

**Etec Presidente Vargas**  
**Habilitação Técnico em Automação Industrial Integrado ao Ensino Médio**

## **Sistema de Produção de Filamentos Sustentáveis**

Uma cadeia de reciclagem cíclica

**GABRIEL BARBOSA DE CARVALHO**  
**GABRIEL NASCIMENTO MOURA**  
**GUSTAVO RAFAEL GOMES DE MORAIS**  
**JOÃO PEDRO DE MORAIS NASCIMENTO**  
**JOÃO VINÍCIUS DOS SANTOS LIMA**

### **RESUMO**

Com a popularização das impressoras 3D, identificamos a necessidade de filamentos acessíveis e sustentáveis. Por meio do método de engenharia e com base em consultas bibliográficas, desenvolvemos um protótipo para a fabricação de filamentos a partir de garrafas PET. Utilizamos um Arduino Mega para controlar a temperatura do extrusor com base em um sensor de temperatura, usando um MOSFET. Automatizamos o processo implementando um motor de passo para realizar a coleta do filamento. Comprovamos a redução de custos na produção de filamentos e validamos o uso de materiais recicláveis na manufatura aditiva, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria de impressão 3D, alinhando-se com as necessidades de uma economia circular.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva. Filamento. Sustentabilidade.

**Etec Presidente Vargas**  
**Habilitação Técnico em Automação Industrial Integrado ao Ensino Médio**

## **Sistema de Produção de Filamentos Sustentáveis**

Uma cadeia de reciclagem cíclica

**GABRIEL BARBOSA DE CARVALHO**  
**GABRIEL NASCIMENTO MOURA**  
**GUSTAVO RAFAEL GOMES DE MORAIS**  
**JOÃO PEDRO DE MORAIS NASCIMENTO**  
**JOÃO VINÍCIUS DOS SANTOS LIMA**

### **ABSTRACT**

With the increasing popularity of 3D printers, we identified a need for affordable and sustainable filaments. Through engineering methods and based on literature reviews, we developed a prototype for manufacturing filaments from PET bottles. We used an Arduino Mega to control the extruder temperature based on a temperature sensor, utilizing a MOSFET. The process was automated by implementing a stepper motor to collect the filament. We demonstrated a reduction in filament production costs and validated the use of recyclable materials in additive manufacturing, promoting more sustainable practices in the 3D printing industry, aligning with the needs of a circular economy.

**Palavras-chave:** Additive Manufacturing. Filament. Sustainability.

## AGRADECIMENTOS

“Quando estava sob pressão e ansioso, meu pai e minha mãe estavam lá para, gentilmente, me acolher em seus braços. Quando pensei em desistir, minha equipe estava ao meu lado. Quando desisti, Deus me deu força e paciência para recomeçar. Por isso, agradeço de coração a todos vocês!” – Gabriel Nascimento.

“Agradeço a Deus por esta jornada e pelo apoio incondicional dos meus pais. Agradeço também aos meus colegas de equipe e, em especial, ao nosso líder, Gabriel Nascimento Moura, por sua compaixão e dedicação em cada desafio.” – Gustavo Rafael.

“Um grande agradecimento à nossa equipe, que trabalhou incansavelmente no projeto, superando obstáculos com esforço e alcançando vitórias.” – João Pedro.

“Quero agradecer a Deus, pois sem Ele não estaríamos onde estamos hoje, e ao Gabriel Nascimento por ser um líder exemplar, que aprimorou minhas habilidades em lógica de programação.” – João Vinícius.

Agradecemos profundamente à nossa auxiliar técnica, Juliana Pereira, que esteve ao nosso lado em todas as dificuldades e conquistas. Não temos palavras suficientes para expressar nossa gratidão, mas oferecemos este presente, construído ao longo de 8 meses, para moldar o mundo e dar vida às suas ideias, sempre inspirando e ajudando os novos aventureiros a concluírem seus TCCs.

Agradecemos também ao nosso paraninfo e professor, Walter Müller, que deu vida a esta ideia em meio a tantos desafios. Ele nos instruiu com paciência e sabedoria e temos orgulho em associar o nome da nossa equipe ao seu. Lembre-se, amigo, nós estamos e, sempre estaremos, aqui.

Por fim, um agradecimento especial ao nosso coordenador, Daniel Freitas, que, ao longo de 3 anos, foi nossa base e auxílio técnico. Com novas habilidades aprendidas e suas incansáveis atividades, ele nos instigou a sermos a melhor versão de nós mesmos. Aproveite a leitura, professor, mas não abuse. Fique com Deus, cuide de você e dos seus! – Noggers Studios.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o surgimento da impressora 3D, novas oportunidades foram abertas na indústria, como a capacidade de criar peças totalmente personalizadas de maneira rápida e eficiente. Essa tecnologia tem atraído não apenas grandes empresas, mas também o público comum, em especial "hobbystas" e "makers". Uma pesquisa da Juniper Research (2014) previa que, até 2018, as vendas de impressoras 3D para uso pessoal ultrapassariam 1 milhão de unidades. Contudo, esses usuários costumam ser empíricos e têm menor poder de compra em comparação à indústria, o que limita o acesso a filamentos de alta qualidade.

Sob tal ótica, valendo-se de fontes acadêmicas e por meio de experimentos, desenvolveremos um Sistema de Produção de Garrafas PET, a fim de proporcionar aos usuários de impressoras 3D filamentos sustentáveis e acessíveis. Assim, organizamos o artigo da seguinte forma: em Revisão da Literatura, encontrar-se-á uma pesquisa para entender os termos e os componentes que serão utilizados no decorrer do projeto; na Metodologia, discutir-se-á como o projeto foi montado; nos Resultados, analisar-se-á os dados obtidos e, por fim, na Conclusão, far-se-á uma síntese do trabalho.

### 1.1. Problema da Pesquisa

Como desenvolver um filamento sustentável e acessível a partir de garrafas PET para o uso em impressoras 3D, visando reduzir os custos e o impacto ambiental?

### 1.2. Hipóteses de Solução

1. Desenvolver um sistema automático de filetagem e utilizar um bloco extrusor para moldar o filete no formato cilíndrico.
2. Polimerizar a garrafa PET e utilizar uma extrusora profissional, com o fito de transformar os polímeros em filamento.
3. Buscar meios de reduzir os custos com os filamentos PETG comercializados no mercado brasileiro.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Geral

Desenvolver um Sistema de Produção de Filamentos de Garrafa PET que forneça aos usuários de impressora 3D um material acessível e sustentável.

#### 1.3.2. Específico

1. Realizar a análise das propriedades do PET.
2. Construir e testar protótipos do sistema de produção de filamentos.
3. Avaliar a qualidade dos filamentos produzidos por meio de testes de impressão 3D.
4. Realizar um estudo de viabilidade econômica comparando os custos de produção dos filamentos de PET reciclado com os filamentos convencionais.
5. Avaliar o impacto ambiental do sistema de produção de filamentos.

### 1.4. Justificativa

Conforme previsto no Objetivo 11 de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015, p. 30), que visa tornar as cidades e comunidades mais sustentáveis, há uma crescente demanda por um filamento acessível e ambientalmente responsável para a impressão 3D. Nesse contexto, dados da Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2022, p.1) indicam que, em 2021, cerca de 56,4% das garrafas PET descartadas pela população foram recicladas, um aumento significativo de 15,4% em comparação ao censo anterior de 2019. Assim, produzir filamentos sustentáveis a partir de garrafas PET recicladas, não apenas reforça esse crescimento nos índices de reciclagem, mas também incentivará práticas mais sustentáveis, alinhadas aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

No contexto do mercado brasileiro, os filamentos para impressão 3D, além de caros, muitas vezes têm impacto ambiental negativo. O ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno), por exemplo, é amplamente utilizado por ser acessível, mas é derivado do petróleo e libera fumaças tóxicas durante o processo de aquecimento (Besko, Bilyk e Sieben, 2017, p. 12). Já o PLA (Ácido Polilático), apesar de ser biodegradável e atóxico, tem um custo elevado em comparação com o ABS e outros filamentos (Besko, Bilyk e Sieben, 2017, p. 11).

Para enfrentar esse desafio, propomos desenvolver um Sistema de Produção de Filamentos a partir de garrafas PET. As garrafas PET (Polietileno Tereftalato) são amplamente disponíveis e podem ser obtidas gratuitamente, sendo um material com grande potencial devido à sua resistência mecânica e atoxicidade (Besko, Bilyk e Sieben, 2017, p. 12). Contudo, o uso de PET na impressão 3D ainda é limitado, o que exige investigações para comprovar sua adequação como filamento. Ao explorar essa alternativa, contribuiremos para a sustentabilidade, diminuindo os impactos negativos da má destinação de resíduos de PET no meio ambiente brasileiro.

Esse sistema beneficiará tanto o público em geral quanto escolas, que usam impressoras 3D em contextos educativos, ao oferecer um filamento mais acessível e sustentável. Além disso, a iniciativa será um exemplo prático de como a Indústria 4.0 pode automatizar e aprimorar processos, tornando-os mais seguros e eficientes. O projeto também abre espaço para futuras pesquisas sobre filamentos disponíveis no mercado e suas propriedades, com o objetivo de desenvolver materiais mais eficientes e sustentáveis para a impressão 3D.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. A Sustentabilidade

Figura 1 – Símbolo de reciclagem do PET



Fonte: Freepik

A sustentabilidade é um desafio constante na indústria moderna, especialmente diante da crescente preocupação com a degradação ambiental e o esgotamento dos recursos naturais. O livro "Cradle to Cradle", propõe um modelo de produção circular, em que os resíduos são transformados em nutrientes que alimentam novos ciclos produtivos. Esse conceito é diretamente aplicável à produção de filamentos sustentáveis a partir de garrafas PET, o que proporciona uma solução para o problema dos resíduos plásticos, à medida que reintroduz esses materiais no ciclo industrial. Consoante aos autores, "a natureza opera de acordo com um sistema de nutrientes e de metabolismos em que o desperdício não existe" (McDonough; Braungart, 2002, p. 84).

No contexto da reciclagem de PET, esse material pode ser transformado em filamentos para impressoras 3D, o que promove a reutilização de um resíduo amplamente disponível e de longa degradação no meio ambiente. Esse processo de reaproveitamento evita que o PET seja descartado em aterros ou incinerado, os quais geram impactos ambientais negativos. Em vez disso, o material é revalorizado, tornando-se um produto útil e eficiente no processo de manufatura aditiva, alinhando-se ao conceito de "Triple Top Line", o qual integra economia, ecologia e equidade. Nesse sentido, os autores comentam que, "se as empresas não utilizam a análise do tripé da sustentabilidade como uma ferramenta estratégica de projeto, perdem uma excelente oportunidade" (McDonough; Braungart, 2002, p. 135).

No eixo econômico, o reaproveitamento do PET como matéria-prima limita a necessidade de novos recursos e gera uma fonte de receita com custos relativamente baixos — o uso de PET reciclado em vez de plástico virgem diminui a emissão de gases de efeito estufa associados à produção de novos plásticos, que dependem da extração e processamento de petróleo. No eixo ecológico, há uma significativa redução no impacto ambiental, uma vez que se evita a extração de novos materiais e se restringe a quantidade de resíduos plásticos no ambiente. Já no eixo social, o processo fornece benefícios ao envolver comunidades na coleta e reciclagem de garrafas PET, as quais contribuem para a conscientização ambiental e a criação de empregos em uma economia mais sustentável.

A implementação do conceito de ciclo fechado de materiais no processo de produção de filamentos a partir de garrafas PET demonstra como a abordagem proposta em “Cradle to Cradle” pode ser aplicada de maneira prática e eficaz. Como observado no livro, “a verdadeira mágica acontece quando a indústria começa com todas essas perguntas abordando-as desde o princípio como perguntas de ‘triple top line’” (McDonough; Braungart, 2002, p. 135). Dessa forma, a produção de filamentos reciclados a partir de garrafas PET exemplifica a transição para uma economia circular, em que o resíduo é visto como um recurso valioso, o qual colabora para a preservação ambiental e a eficiência econômica.

A reciclagem cíclica, portanto, visa reaproveitar resíduos, a fim de promover um sistema produtivo mais responsável e alinhado com os princípios da sustentabilidade, o que transforma os resíduos em uma matéria-prima valiosa e fomenta um ciclo industrial regenerativo.



## 2.2. O PET

As empresas beneficiam-se ao optar por esse material, uma vez que há redução nos custos tanto de transporte, haja vista que as garrafas PET representam apenas cerca de 2% do peso total da carga transportada, o que contribui para um menor consumo de combustível e, conseqüentemente, para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Do ponto de vista ambiental, o impacto das garrafas PET é notável, já que elas não geram chorume em lixões e aterros, o que preserva a qualidade da água subterrânea e dos rios (ABIPET, [s.d]).

Sob essa perspectiva, as características químicas e mecânicas do PET tornam esse material único. O PET, ou poli(tereftalato de etileno), é um termoplástico que pode ser aquecido e moldado repetidamente sem perder suas propriedades. Além disso, destaca-se pela alta estabilidade hidrolítica (resistência à decomposição), devido aos anéis aromáticos dispostos em sua cadeia molecular. Seu ponto de fusão elevado, entre 265 °C e 275 °C, reforça sua resistência mecânica (Romão; Spinacé; De Paoli, 2009, p. 121). Uma variante do PET, amplamente utilizada na impressão 3D, é o PETG. Essa versão, modificada com glicol, oferece maior resistência mecânica e um ponto de fusão ainda mais elevado, o que amplia sua aplicabilidade em projetos que exigem durabilidade e resistência térmica<sup>1</sup>.

Entretanto, após completar três ciclos de reutilização, o PET torna-se duro e quebradiço. A redução da viscosidade intrínseca em 23% afeta diretamente sua reutilização em aplicações que exigem a mesma resistência dos polímeros virgens, como na fabricação de peças de alta precisão e durabilidade. Ademais, a degradação termo-oxidativa é outro desafio no reprocessamento do PET, já que o material, ao ser exposto a calor e oxigênio, sofre variações de cor. Além disso, por ser resistente à decomposição, o descarte incorreto do PET no meio ambiente impacta negativamente a fauna e flora locais (Romão; Spinacé; De Paoli, 2009, p. 127).

A reciclagem do PET, portanto, surge como uma alternativa viável para aplicações inovadoras, como a impressão 3D, mas é essencial garantir que a qualidade do filamento não seja comprometida pelos processos de degradação.

---

<sup>1</sup> Informações obtidas por meio de uma aula ministrada por Calixto Fernandes Filho, na ETEC Presidente Vargas, no dia 01 de julho de 2024.

### 2.3. Automação Industrial e Instrumentação

Nesta última década, a automação industrial é a área com maior crescimento e investimento na indústria. Segundo a Pesquisa Industrial de Inovação Tecnológica (2023, p.14), realizada no ano de 2022, cerca de 84,9% das médias e grandes empresas entrevistadas, utilizavam tecnologias digitais avançadas, tais quais Big Data, computação em nuvem, inteligência artificial, internet das coisas, manufatura aditiva e robótica.

O termo “automação industrial”, difundiu-se mundialmente em 2011, na maior feira de tecnologia da Europa: a CeBIT, sediada em Hannover, na Alemanha. Nesse sentido, a automação tem o objetivo de integrar tecnologias avançadas à cadeia produtiva, visando otimizar os processos e reduzir a mão de obra humana, o que resulta na diminuição de erros e acidentes, bem como no aumento da produtividade, ao passo que se cria uma demanda por profissionais de Tecnologia da Informação (TI), o que exige a especialização do mercado de trabalho. O setor administrativo, por sua vez, beneficia-se do acesso a dados em tempo real, a fim de tomar decisões rápidas e eficazes, como o controle de estoque e a análise de lucros.

No entanto, nada disso seria possível sem a instrumentação, definida por Moreira ([s.d.]a, p. 3) como a "ciência que aplica e desenvolve técnicas de medição, indicação, registro e controle de processos de fabricação, visando a otimização da eficiência". Consoante ao autor, sensores captam informações (variáveis) que servem como parâmetros para a execução de comandos programados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), os quais enviam sinais para os atuadores, que realizam as ações necessárias. Ademais, com o uso de tecnologias como o Edge Computing, esses dados podem ser transferidos à nuvem, o que possibilita a criação de sistemas supervisórios SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e dashboards. Essas ferramentas auxiliam na supervisão e controle da planta, bem como na solução de problemas e na definição de estratégias para a empresa.

Portanto, a automação e a instrumentação, implementadas exponencialmente na última década, contribuem para a eficiência e a flexibilidade dos processos industriais, além de facilitar a traçar objetivos.

## 2.4. A Manufatura Aditiva

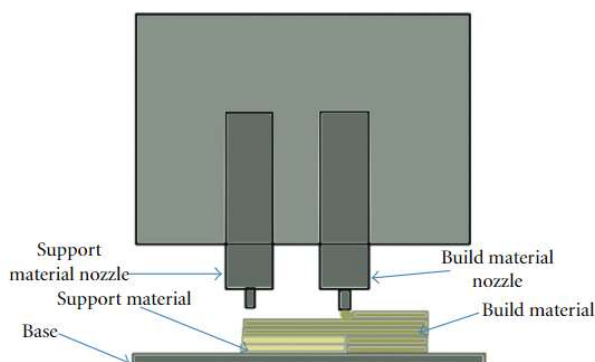
Conforme a Pesquisa Industrial de Inovação Tecnológica (2023, p.13), em 2022, cerca de 19,2% das 9.586 empresas entrevistadas, utilizavam a manufatura aditiva na produção de suas mercadorias. Sem dúvida, é uma importante tecnologia habilitadora da Quarta Revolução Industrial e assume papel vital em nosso projeto.

Ao escrever sobre essa inovação apresentadas pela Indústria 4.0, em seu livro “A Quarta Revolução Industrial”, Schwab (2016, p.27) explica que

“Também chamada de fabricação aditiva, a impressão em 3D consiste na criação de um objeto físico por impressão, camada sobre camada, de um modelo ou desenho digital em 3D. O processo é o oposto da fabricação subtrativa, isto é, a forma como os objetos foram construídos até agora: as camadas são removidas de um bloco de material até que a forma desejada seja obtida.”

A impressão Fused Deposition Modelling (FDM) consiste no depósito tridimensional e controlado de um material sobre uma mesa de impressão. Ao passo que o filamento é extrusado — processo em que o material é aquecido e empurrado por um orifício —, a mesa de impressão vai abaixando para permitir a formação de novas camadas sobre as já endurecidas. Embora seja o método de impressão mais comum e acessível entre o público em geral, a impressão FDM exige acabamento adicional para obter superfícies lisas e a impressão de peças grandes ou complexas é lenta (Wong, 2012, p. 4).

Figura 2 – No processo de FDM o material é depositado em camadas



Fonte: Wong

Além disso, fatores como as características mecânicas do filamento e o posicionamento da peça na mesa de impressão devem ser cuidadosamente analisados, uma vez que diferentes filamentos têm propriedades como temperatura de amolecimento e resistência à umidade distintas. O mau posicionamento da peça pode exigir muitos suportes ou causar falhas no processo, como o desmoronamento do material (Unkovskiy *et al.*, 2018, p. 324-333).

Entender o funcionamento da impressão 3D FDM auxiliará o usuário no desenvolvimento de seus projetos. Consoante ao fato, primeiro é necessário fabricar a peça em um software de Computer Aided Design (CAD) (Wong; Hernandez, 2012, p.1). Em seguida, exportar o arquivo no formato STL (Standard Tessellation Language), que utiliza um algoritmo de triangulação de superfície nó a nó, o qual cobre a peça com um número finito de triângulos. Esse processo permite a impressão, desde que certas condições técnicas sejam atendidas (Herman, 1993, p.199). Por fim, o usuário deve fatiar o modelo em camadas horizontais em um software, o qual irá gerar um arquivo G-code contendo as instruções de impressão para a impressora 3D (Hu, 2001, p.886).

A tecnologia FDM, portanto, é a mais utilizada pelo público comum. O custo-benefício é o que mais agrada esses usuários, já que sua impressão é fácil de ser realizada e garante um acabamento satisfatório em pequenos projetos. No entanto, falhas de impressão são comuns devido à posição da peça, ao material e ao volume.

#### 2.4.1. Benefícios

A manufatura aditiva oferece importantes benefícios, como a capacidade de produzir estruturas leves e otimizadas, especialmente para os setores automotivo e aeroespacial. Nesse sentido, a impressão 3D, por exemplo, permite a criação de peças com geometrias complexas, como estruturas em favo de mel, as quais reduzem o peso sem comprometer a integridade estrutural. Além das aplicações industriais, a manufatura aditiva tem grande relevância na medicina, pois possibilita a fabricação de próteses e implantes personalizados, adaptados à anatomia individual dos pacientes, o que melhora tanto os resultados funcionais quanto estéticos, à medida que reduz os custos operacionais (Wong; Hernandez, 2012, p. 5-7).

Sob essa visão, o estudo de Moreira e Faria (2019) destaca que materiais reciclados, como PET e PLA, podem ser transformados em filamentos de alta qualidade, os quais oferecem desempenho semelhante aos materiais virgens. Segundo os autores, a reciclagem de plásticos melhora a qualidade do produto e se alinha ao conceito de economia circular, bem como consome menos energia do que a produção de novos plásticos, o que torna o processo mais sustentável por reduzir a pegada de carbono. Ademais, a economia que vem com o uso de filamentos reciclados é significativa. Nesse contexto, com a redução de custos em matérias-primas e menor consumo de energia, os filamentos sustentáveis tornam-se uma opção competitiva no mercado, uma vez que essa abordagem não só ajuda a reduzir o impacto ambiental, mas também permite a produção de peças com menos desperdício (Moreira; Faria, 2019, p.87).

O estudo de Moreira e Faria (2019), portanto, demonstra que a reciclagem de plásticos, como o PET, para a fabricação de filamentos é uma estratégia promissora. Essa prática atende à demanda por soluções mais sustentáveis e mostra como a inovação pode se aliar à responsabilidade ambiental, a fim de criar um futuro mais verde para a indústria da impressão 3D.

## 2.5. O Hardware

O Hardware compreende todo o meio físico utilizado para executar as instruções desenvolvidas pelo fabricante. Com isso em mente, o grupo irá utilizar um Arduino Mega 2560 para controlar todo o sistema, por meio dos seguintes atuadores: motor de passo NEMA17, módulo A4988, módulo MOSFET. Ademais, um sensor de temperatura (Módulo MAX6675) será responsável pela captação de dados, os quais servirão de parâmetro para a execução das instruções programadas no Arduino.

- **Arduino 2560 (a):** McRoberts (2011, p.22) define o Arduino como:

“[...] um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software.”

Consoante ao autor, o Arduino é um microcontrolador voltado para aplicações simples. Entretanto, possui uma rápida capacidade de processamento, o que permite executar tarefas com esmero.

- **Módulo MAX6675 (b):** contém um sensor de temperatura do tipo K que funciona por meio do efeito termoelétrico, ou seja, ao aquecer um material de carga positiva, seus elétrons tendem a migrar para o outro material de carga negativa, assim é gerado um movimento ordenado de elétrons, em que se forma uma corrente elétrica, na qual é convertida em temperatura (Adresi; Pakhirehzan, 2023; Maxim Integrated, 2002).

- **Motor de passo NEMA17 (c):** o motor de passo converte energia elétrica em mecânica através do eletromagnetismo, já que ao enviar um sinal de tensão variável às bobinas do Nema17, ocorre a formação de um campo eletromagnético que atrairá o rotor e os dentes magnéticos do motor, o que provoca seu movimento angular (Júnior, 2024; Santos, 2021, p. 2).

- **Módulo A4988 (d):** é um driver responsável pela comunicação entre o Arduino e o motor de passo, capaz de controlar a direção do passo e a quantidade de passos, por meio de um sinal variável (0-5V), isolando a tensão de operação do motor de passo (0-12V) do circuito (Allegro Microsystems, 2010).

- **Módulo MOSFET (e):** o transistor MOSFET irá regular a tensão de saída do sistema, a fim de controlar a temperatura do extrusor, visto que quanto maior a tensão de entrada, maior a tensão de saída e vice-versa. Além disso, ele isolará a tensão de acionamento (0-5V) da tensão de operação (0-12V), o que denota a sua capacidade de amplificação de sinal, bem como a aplicação semelhante a um relé (CD-Team, 2017).

O hardware, portanto, será o meio pelo qual as instruções serão executadas. Esses dispositivos de campo captarão dados, como o sensor de temperatura, e controlarão de maneira automática o sistema.

Figura 3 – Componentes utilizados no projeto



Fonte: Smartcomp

## 2.6. O Software

O software consiste nas instruções programadas pelo fabricante. No caso do Arduino, utiliza-se a Integrated Development Environment (IDE) para programar — em linguagem C++ — e gravar essas instruções, o que permite a comunicação entre o computador e o Arduino. Dessa forma, o usuário tem à disposição uma ferramenta poderosa para automatizar seus projetos (McRoberts, 2011, p. 22-24).

Essa linguagem de programação é uma excelente escolha devido ao seu reconhecimento internacional, o que garante confiabilidade. Além disso, ela oferece uma ampla variedade de bibliotecas, bem como uma vasta comunidade, a qual auxilia na solução de problemas. Outrossim, a linguagem C++ é ensinada no curso de Automação Industrial, especificamente para aplicações com microcontroladores, o que nos familiariza com sua sintaxe e com o desenvolvimento de programas. Embora seja uma linguagem robusta, concluímos que C++ atende perfeitamente às necessidades do nosso projeto (Stroustrup, 1999, p. 2-4 e 21).

Ademais, as bibliotecas são essenciais para garantir o funcionamento eficiente dos componentes do sistema. No C++, elas consistem em conjuntos de instruções organizadas em funções ("voids"), o que facilita a execução rápida do código. Ao chamar uma função, todas as instruções nela contidas são executadas automaticamente, otimizando o desempenho. No nosso projeto, utilizaremos as seguintes bibliotecas:

- **LiquidCrystal\_I2C.h e Wire.h:** fornecerá comandos para a programação do LCD, que exibirá informações pertinentes.
- **MAX6675.h:** auxiliará na configuração do módulo de temperatura MAX6675.
- **Stepper.h:** implementará as instruções necessárias para ajustar a velocidade e o torque do motor de passo que irá girar o carretel.
- **PID\_v01.h:** realizará a parametrização do controle PID para regular a temperatura do extrusor.

O software, portanto, será o elemento central do projeto, viabilizando o controle preciso da temperatura do extrusor e do movimento do motor de passo, o que permitirá a automação eficiente do processo de fabricação de filamentos.



## 2.7. O Supervisório

Para garantir a segurança do projeto, será implementado um sistema supervisório composto por: um display LCD para monitoramento, LEDs indicativos, módulos Push-Button para acionamento, um módulo Buzzer Passivo para alertas sonoros e um interruptor de segurança.

- **LCD (a):** é uma tecnologia amplamente utilizada para exibir informações em tempo real. O seu funcionamento se baseia em cristais líquidos que, ao serem polarizados, controlam a passagem da luz e formam imagens ou caracteres. Será crucial para fornecer “feedbacks” visuais aos usuários de nosso sistema, como a temperatura do extrusor (Robocore, 2020).

- **LEDs (b):** são dispositivos eletrônicos que emitem luz quando uma corrente elétrica passa por eles. No nosso projeto, os LEDs serão utilizados para indicar o status de componentes importantes, como o motor de passo e o bloco extrusor. Assim, o operador saberá instantaneamente o estado de cada parte do sistema, sem precisar acessar informações mais complexas no display.

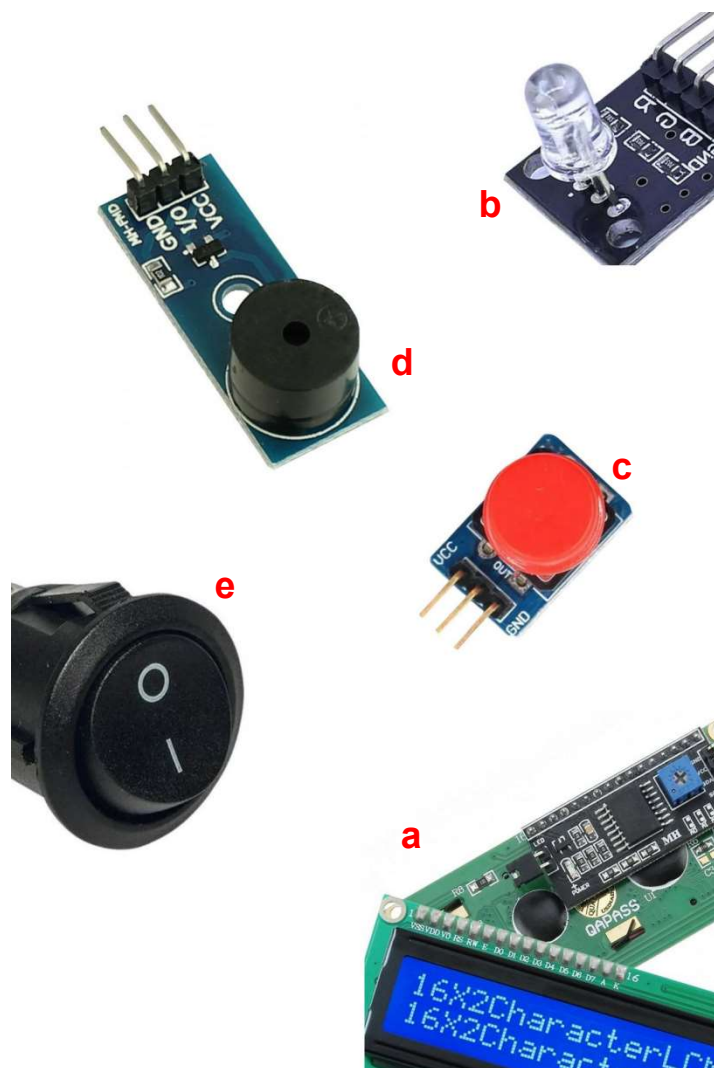
- **Módulos Push-Button (c):** são interruptores projetados para abrir ou fechar circuitos, os quais desempenham um papel vital em diversos processos automatizados. Serão aplicados para navegar pelas telas do LCD, alterar a temperatura do bloco extrusor e acionar o motor de passo. Esses interruptores oferecem um controle manual e prático sobre processos críticos, melhorando a eficiência do sistema (Ferreira, 2018).

- **Módulo Buzzer Passivo (d):** é um dispositivo sonoro utilizado em sistemas eletrônicos para emitir alertas audíveis através da tensão elétrica. Em nosso projeto, atuará como um sistema de emergência ao emitir um alarme sonoro quando a temperatura do extrusor ultrapassar o limite de segurança, o qual alertará o operador sobre um possível risco de superaquecimento. Esse alarme imediato é crucial para garantir a segurança do sistema e evitar danos aos componentes (Guse, 2024.).

- **Interruptor (e):** é um tipo de interruptor que permite o controle do fornecimento de energia. Ele é frequentemente utilizado em circuitos onde é necessário um controle simples para ligar ou desligar dispositivos eletrônicos. Em nosso projeto, esse botão garantirá uma maneira prática de acionar ou interromper o funcionamento do sistema quando necessário, especialmente durante manutenções ou ajustes (Autocore Robótica, 2024).

O sistema supervisorio, portanto, proporcionará segurança e praticidade ao projeto, ao fornecer informações visuais sobre o processo e permitir um controle eficaz.

Figura 4 – Componentes que integraram o sistema supervisorio



Fonte: Smartcomp

## 2.8. Método de Controle PID e Sintonia Ziegler-Nichols

O controle PID, por meio de três parâmetros, oferece uma variação contínua da saída dentro de um sistema de realimentação, o qual aumenta a eficiência do processo por ajustá-lo com precisão e reduzir o impacto das oscilações. Desse modo, ao aplicar esse conceito para controlar a temperatura do extrusor, podemos manter o sistema na faixa ideal, o que permitirá a produção de filamentos de alta qualidade.

- **Proporcional (P)**

A ação Proporcional (P) irá fornecer uma resposta mais rápida para o sistema, com a variação no sinal de entrada. Porém, é um parâmetro agressivo, ou seja, caso seja atribuído um fator P muito alto, o sistema sofrerá com o “overshooting” (Moreira, [s.d.]b, p.107).

- **Integral (I)**

A ação Integral (I) visa eliminar o erro de estado estacionário, ou seja, o erro permanente que ocorre quando o sistema atinge um valor fixo. No entanto, um valor elevado para o fator I pode gerar oscilações no sistema, semelhantes a um sinal senoidal. Assim, a ação integral proporciona um ajuste fino, útil para reduzir pequenos erros provocados por vibrações e outros distúrbios na planta (Moreira, [s.d.]b, p.107).

- **Derivativo (D)**

A ação Derivativa (D) exerce um efeito de antecipação na correção do valor de saída do sistema, o qual permite uma resposta mais rápida e diminui o “overshooting”. Porém, um fator D elevado pode causar o efeito de “downshooting”. Por isso, é importante ter cautela ao ajustar essa ação para evitar impactos negativos no desempenho do sistema (Moreira, [s.d.]b, p.108).

Nesse sentido, “Ziegler e Nichols propuseram regras para a determinação de valores do ganho proporcional  $K_p$ , do tempo integral  $T_i$  e do tempo derivativo  $T_d$ ” (Ogata, 2010, p. 522-523). Dessa maneira, esse método busca estabelecer valores iniciais que serão ajustados depois empiricamente.

Para realizar o controle automático da temperatura, portanto, optamos pelo PID, já que este possibilita um ajuste de alto desempenho e, assim, possamos alcançar uma curva de resposta rápida e eficiente, com o auxílio do método de sintonia proposto por Ziegler e Nichols.

## 2.9. Trabalhos relacionados

### 2.9.1. O Robô Cigano

Essa foi a primeira ideia analisada pelo grupo. Para desenvolver esse protótipo, Ramires utilizou a placa-mãe, o LCD e o hotend de uma impressora 3D. Trata-se de um projeto simples e caseiro, mas muito inteligente, considerando a ideia de utilizar peças comuns e acessíveis para usuários de impressoras 3D. No entanto, não podemos aproveitar essas peças em nosso projeto, pois não temos conhecimento suficiente para desmontar uma impressora 3D sem danificá-la. Assim, esse projeto servirá como base para o desenvolvimento do nosso protótipo (O Robô Cigano, 2022).

### 2.9.2. Isabella H. Lopez e John S. M. Villamil

O sistema desenvolvido apresenta uma base de MDF projetada para reduzir vibrações, um carretel para o enrolamento do filamento pronto, um unificador de filamentos, um suporte para o extrusor e uma base de filetagem para a garrafa PET. Além disso, foi implementado o controle de temperatura do cartucho aquecedor utilizando um REX C100 e o controle da velocidade do motor DC com um controlador PWM digital, ambos alimentados por uma fonte de 12V e 6A. No entanto, como recomendações de melhorias feitas pelos próprios autores, é necessário desenvolver um controle PID mais eficiente, bem como implementar materiais com maior durabilidade e aumentar a segurança geral do sistema (Lopez; Villamil, 2024, p. 76-77).

### 2.9.3. Electronoobs

O protótipo caseiro desenvolvido pelo site Electronoobs utiliza um Arduino Nano para controlar o sistema. Um MOSFET foi empregado para o controle de temperatura, e um driver A4988 foi utilizado para o motor de passo. A aplicação do MOSFET representa uma abordagem eficaz para implementar a técnica PID de maneira simples e acessível. Portanto, vamos incorporar essa ideia em nosso projeto, juntamente com o driver A4988. Além disso, o design do carretel de armazenamento do filamento foi muito bem elaborado, o que nos motivou a integrá-lo ao nosso sistema. Entretanto, embora o site Electronoobs tenha criado um protótipo de qualidade, é fundamental aprimorá-lo para alcançar um projeto mais profissional. (Electronoobs, 2022).

## 2.10. Lacunas e contribuições

Ao analisar os trabalhos relacionados e as fontes bibliográficas, o grupo identificou diversas abordagens para desenvolver esse tipo de sistema, por exemplo, muitos projetos utilizam sistemas de controle tanto em placas desenvolvidas sob medida, quanto com módulos prontos. Além disso, vários sistemas são caseiros, o que demonstra a criatividade dos fabricantes na escolha e na disposição das peças. Com isso em mente, o objetivo do nosso projeto não é apenas produzir filamentos sustentáveis, mas também desenvolver um sistema com padrão profissional, por implementar práticas industriais que aumentem a segurança e a eficiência, como um sistema de supervisão de temperatura e um controle PID eficiente.

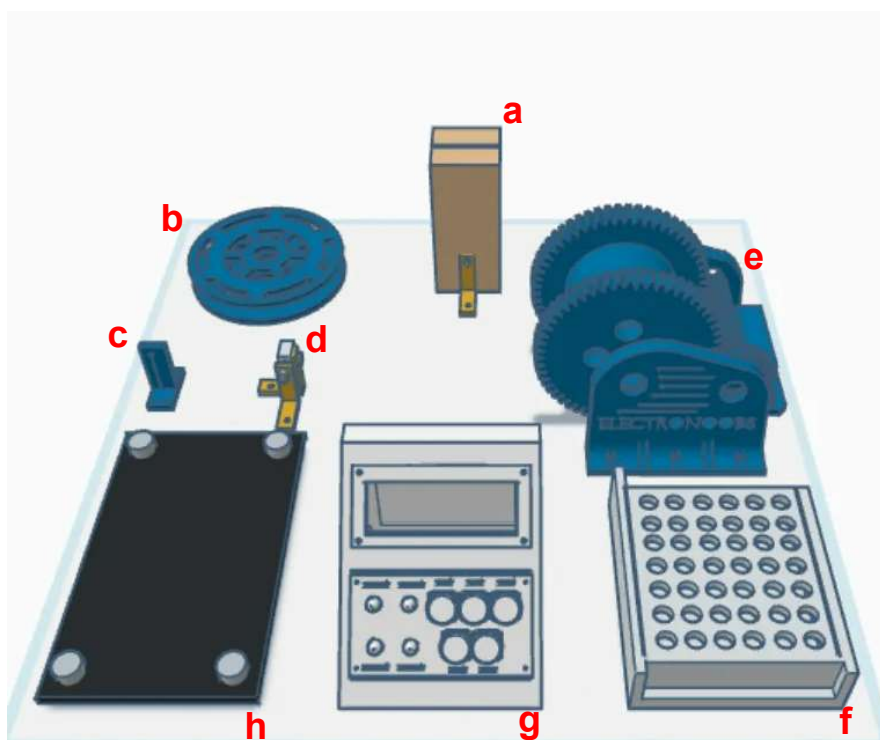
Outra observação relevante é que sistemas com circuitos projetados especificamente em placas tendem a ter maior risco de falhas em componentes, o que compromete o funcionamento geral do processo. Assim, optar por módulos prontos, além de serem acessíveis e fáceis de usar para quem tem pouca experiência em eletrônica e elétrica, facilita a identificação e substituição de peças em caso de problemas.

Outro aspecto a ser aprimorado é o corte manual do fundo das garrafas, que muitas vezes resulta em cortes irregulares, o que afeta a uniformidade do filamento. Dessa maneira, estamos desenvolvendo um sistema de corte automático do fundo da garrafa, o qual utiliza um motor DC acoplado a uma lâmina em um suporte fixo. Assim, conseguiremos obter um corte preciso e consistente, ao melhorar a qualidade do filamento produzido.

### 3. METODOLOGIA

O método de pesquisa adotado pela equipe é o de engenharia, uma vez que buscamos maneiras de produzir um filamento sustentável e acessível a partir de garrafas PET para o uso em impressoras 3D, visando reduzir os custos e o impacto ambiental. Além disso, será feito um estudo dos resultados obtidos, com o fito de avaliar a quantidade dos filamentos produzidos em função do tempo, bem como a qualidade destes filamentos. Dessa forma, recorreremos ao procedimento bibliográfico para embasar nossa tese. Assim, para solucionar a problemática em evidência, será apresentado um Sistema de Produção de Filamentos de Garrafa PET que irá transformar estas em filetes, os quais serão extrusados, o que resultará em um filamento acessível, sustentável e de qualidade.

Figura 5 – Ilustração 3D do Sistema de Produção de Filamentos Sustentáveis



Fonte: Os autores

A primeira etapa é a filetagem (a), em que uma garrafa sem fundo é posicionada sobre uma base de madeira com uma lâmina de estilete fixada a 8 mm do final de uma fenda. Ao puxar a garrafa, ela é cortada em um filete uniforme que segue para a segunda etapa do processo. Nessa fase, o filete passa pelo carretel de alinhamento (b) e pelo posicionador (c), os quais geram a tensão necessária para mantê-lo esticado, o que evita dobras ou enrolamentos que poderiam causar irregularidades ou obstrução durante a extrusão. Na terceira etapa (d), o filete é moldado em formato cilíndrico no bloco extrusor. Um sensor monitora a temperatura do extrusor, a fim de garantir que o material derreta de forma controlada e consistente. Finalmente, o filamento é enrolado em um carretel (e), que, com a ajuda de um motor de passo, recolhe o filamento de forma controlada e contínua, o que torna o processo automático.

Ademais, uma fonte de 12V (f) alimenta o processo, que é controlado pelo Arduino e atuadores fixados na placa (h). Nesse contexto, o Arduino realiza o controle PID ao corrigir o erro medido pelo sensor de temperatura MAX6675 (variável de processo, PV) em relação ao valor desejado (Set-Point, SP). Então, o Arduino gera um sinal PWM tratado pelas condicionais PID (variável manipulada, MV), que é enviado a um módulo MOSFET, o qual amplifica ou atenua a tensão de saída (de 0 a 12V), o que resulta no controle da temperatura do extrusor de forma precisa. Além disso, o microcontrolador torna o projeto automático por parametrizar o motor de passo, por meio do Driver A4988, uma vez que o Arduino define a quantidade de passos – contínua em nosso projeto – e a direção deste – no caso, anti-horário.

O grupo desenvolveu um painel de supervisão em modelo 3D utilizando o software online Tinkercad. Após a modelagem, geramos o arquivo G-code e realizamos a impressão em uma impressora 3D. No painel, fixamos os botões, LEDs e o LCD. Nesse contexto, os botões permitem a navegação pelas telas do LCD, o ajuste do Set-Point da temperatura (aumentar ou diminuir) e o controle do motor de passo e do motor responsável pelo corte do fundo da garrafa (ligar/desligar). O LCD fornece informações importantes ao usuário, como a temperatura do extrusor, o SP e o status de funcionamento dos motores. Os LEDs indicam se o sistema e os motores estão ativados ou desativados. Um LED especial, dedicado ao extrusor, mudará de cor conforme a temperatura: azul quando estiver frio, verde na faixa de uso ideal, e vermelho caso a temperatura ultrapasse o Set-Point. Nesse caso, um buzzer emitirá um sinal sonoro para alertar o usuário sobre o problema.



## 3.1. Cronograma

## SISTEMA DE PRODUÇÃO DE FILAMENTOS SUSTENTÁVEIS

ETEC Presidente Vargas  
Gabriel Moura

Início do projeto:

qua, 15/05/2024

Semana de exibição:

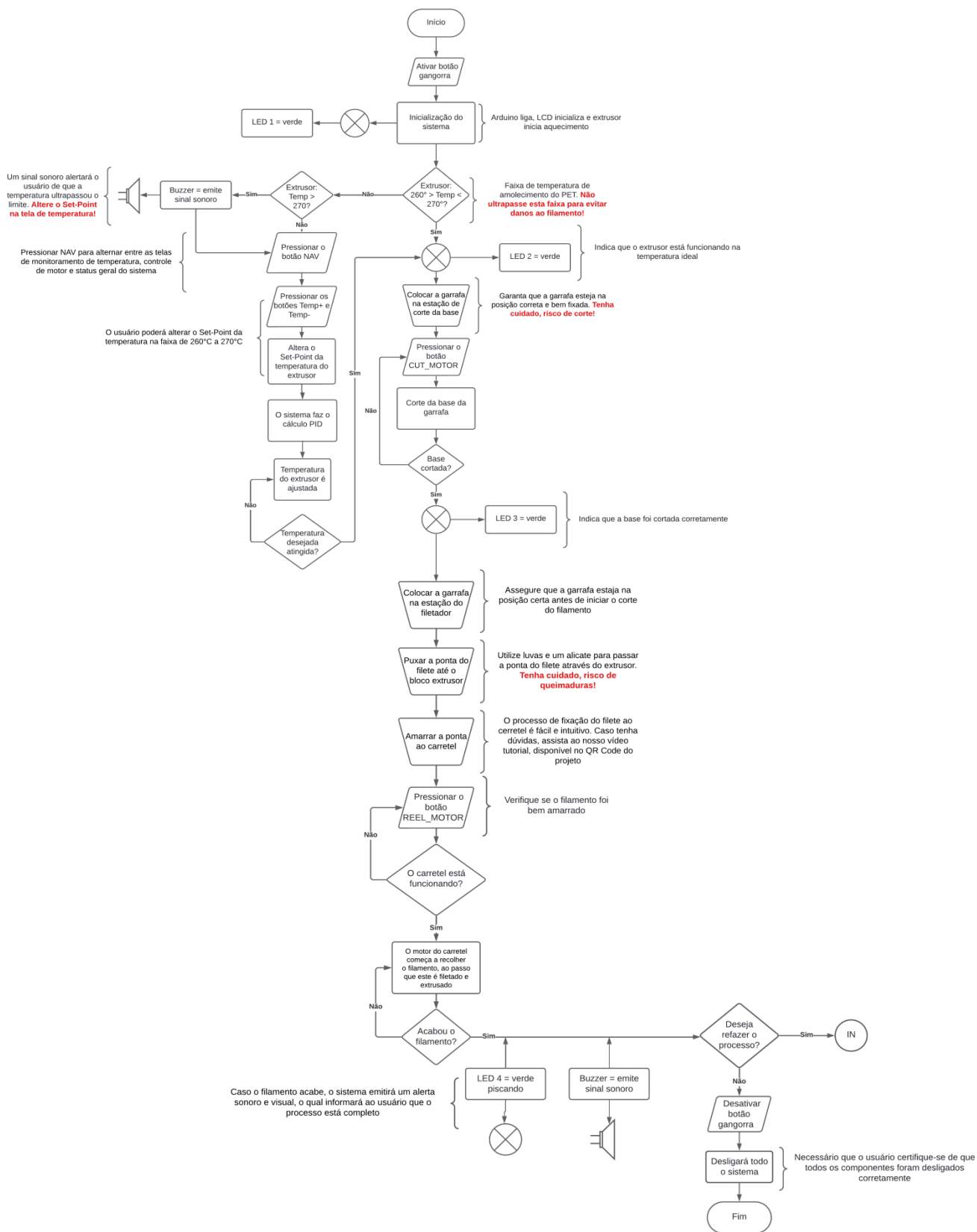
1

| TAREFA  | ATRIBUÍDO PARA                 | PROGRESSO | INÍCIO   | TÉRMINO  |
|---|--------------------------------|-----------|----------|----------|
| <b>Estudo</b>                                       |                                |           |          |          |
| Realização de pesquisas sobre o projeto             | Gabriel Barbosa                | 0%        | 15/5/24  | 22/5/24  |
| Definição do projeto                                | Gabriel Moura                  | 0%        | 22/5/24  | 29/5/24  |
| Elaboração da Lista de Materiais                    | Gabriel Moura                  | 0%        | 29/5/24  | 5/5/24   |
| Impressão das peças 3D                              | Gustavo Rafael                 | 0%        | 5/5/24   | 18/9/24  |
| Compra dos materiais                                | João Pedro                     | 0%        | 5/5/24   | 18/9/24  |
| <b>Delimitação</b>                                  |                                |           |          |          |
| Revisão da literatura                               | Gabriel Barbosa                | 0%        | 17/7/24  | 4/9/24   |
| Elaboração da revisão da literatura                 | Gabriel Moura                  | 0%        | 17/7/24  | 18/9/24  |
| Elaboração da contextualização                      | Gabriel Moura                  | 0%        | 18/9/24  | 25/9/24  |
| Elaboração da metodologia                           | Gustavo Rafael                 | 0%        | 18/9/24  | 25/9/24  |
| Determinar os benefícios do PET                     | João Pedro                     | 0%        | 3/7/24   | 10/7/24  |
| Lista de I/Os                                       | João Pedro                     | 0%        | 3/7/24   | 17/7/24  |
| Programação: LCD                                    | João Vinicius                  | 0%        | 3/7/24   | 18/9/24  |
| Programação: Motor de Passo                         | João Vinicius                  | 0%        | 3/7/24   | 18/9/24  |
| Programação: Controle de Temperatura                | João Vinicius                  | 0%        | 3/7/24   | 18/9/24  |
| Programação: Supervisório                           | João Vinicius                  | 0%        | 3/7/24   | 18/9/24  |
| <b>Execução</b>                                     |                                |           |          |          |
| Construção: filetador                               | Gustavo Rafael                 | 0%        | 7/8/24   | 18/9/24  |
| Construção: extrusor                                | João Vinicius                  | 0%        | 7/8/24   | 18/9/24  |
| Construção: carretel                                | João Pedro                     | 0%        | 7/8/24   | 18/9/24  |
| Construção: placa de expansão VDD/GND               | João Pedro                     | 0%        | 7/8/24   | 18/9/24  |
| Construção: placa de expansão 12V                   | João Vinicius                  | 0%        | 7/8/24   | 18/9/24  |
| Elaboração do painel de comando                     | Gabriel Moura                  | 0%        | 7/8/24   | 28/8/24  |
| Fixação do painel de comando                        | Gabriel Moura                  | 0%        | 28/8/24  | 18/9/24  |
| Fixação dos componentes eletrônicos                 | Gabriel Barbosa                | 0%        | 28/8/24  | 18/9/24  |
| Realizar as ligações elétricas                      | João Vinicius                  | 0%        | 28/8/24  | 18/9/24  |
| <b>Aperfeiçoamento</b>                              |                                |           |          |          |
| Elaboração da pesquisa de campo                     | Gustavo Rafael                 | 0%        | 4/9/24   | 9/10/24  |
| Realização de testes                                | João Vinicius                  | 0%        | 18/9/24  | 9/10/24  |
| Realização de ajustes                               | João Vinicius                  | 0%        | 18/9/24  | 9/10/24  |
| Elaboração dos capítulos do artigo                  | Gabriel Moura e Gustavo Rafael | 0%        | 4/9/24   | 15/10/24 |
| Análise dos resultados                              | Gabriel Barbosa                | 0%        | 18/9/24  | 9/10/24  |
| Elaboração dos resultados                           | Gabriel Barbosa                | 0%        | 25/9/24  | 9/10/24  |
| Elaboração da apresentação final (Banner)           | Gustavo Rafael                 | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Organização da apresentação final                   | Gabriel Moura                  | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Revisão e discussão dos resultados com o orientador | Gabriel Moura                  | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Elaboração da conclusão                             | Gabriel Moura                  | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Elaboração do resumo                                | Gustavo Rafael                 | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Elaboração do abstract                              | Gabriel Barbosa                | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Revisão do artigo com orientador                    | Gabriel Moura                  | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Ajustes no artigo                                   | Gabriel Moura                  | 0%        | 2/10/24  | 16/10/24 |
| Apresentação final e entrega do projeto             | Gabriel Moura                  | 0%        | 17/10/24 | 18/10/24 |
| Realização de ajustes no projeto e no artigo        | Gabriel Moura                  | 0%        | 23/10/24 | 27/11/24 |

## 3.2. Orçamento

| ORÇAMENTO - PROJETO TCC - Sistema de Produção de Filamentos Sustentáveis |  |            |         |           |                   |
|--|--|------------|---------|-----------|-------------------|
| ITEM   | DESCRIÇÃO  | QUANTIDADE | UNIDADE | PREÇO     | TOTAL             |
| 1  | Borne KRE 2 vias                                     | 7          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 2  | Barra 20 Pinos Fêmea                                 | 2          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 3  | Variados Parafusos, Arroelas e Porcas para Fixação   | Indeter.   | Peça    | Doação    | Doação            |
| 4  | Botão Gangorra Redonda                               | 1          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 5  | Placa de Fenolite 5 cm x 4,5 cm                      | 1          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 6  | Placa de Fenolite 6,5 cm x 2,5 cm                    | 1          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 7  | Lâmina de Estilete                                   | 1          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 8  | Motor DC 12V   | 1          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 9  | Percloroeto de Ferro                                 | 100        | Gramas  | Doação    | Doação            |
| 10   | Folha de Papel Fotográfico                           | 1          | Peça    | Doação    | Doação            |
| 11   | Arduino Mega 2560 R3 Compatível + Cabo USB 2.0       | 1          | Peça    | R\$ 89,90 | R\$ 89,90         |
| 12   | Módulo Sensor de Temperatura Max 6675                | 2          | Peça    | R\$ 34,90 | R\$ 69,80         |
| 13   | Motor de Passo NEMA17 4,2kgf 17HS4401                | 1          | Peça    | R\$ 55,60 | R\$ 55,60         |
| 14   | Kit Bloco Aquecedor + Termistor + Cartucho Aquecedor | 1          | Peça    | R\$ 55,00 | R\$ 55,00         |
| 15   | Módulo Push-Button                                   | 5          | Peça    | R\$ 9,09  | R\$ 45,45         |
| 16   | Rolamentos 608zz                                     | 6          | Peça    | R\$ 7,00  | R\$ 42,00         |
| 17   | Módulo LED RGB                                       | 4          | Peça    | R\$ 8,79  | R\$ 35,16         |
| 18   | Protoboard 400 Pontos + 65 Jumpers                   | 1          | Peça    | R\$ 31,65 | R\$ 31,65         |
| 19   | Fonte Chaveada Coméia 12V 120W 10A                   | 1          | Peça    | R\$ 27,99 | R\$ 27,99         |
| 20   | Display LCD I2C 16X2 - BackLight Azul                | 1          | Peça    | R\$ 22,00 | R\$ 22,00         |
| 21   | Módulo MOSFET IRF520                                 | 2          | Peça    | R\$ 10,69 | R\$ 21,38         |
| 22   | Kit 10 Espaçador de Nylon M3 Completo                | 2          | Peça    | R\$ 10,00 | R\$ 20,00         |
| 23   | Módulo Motor de Passo A4988                          | 1          | Peça    | R\$ 19,53 | R\$ 19,53         |
| 24   | Módulo Buzzer Passivo                                | 1          | Peça    | R\$ 8,47  | R\$ 8,47          |
| 25   | Barra Roscada  | 1          | Metro   | R\$ 8,00  | R\$ 8,00          |
| 26   | Kit 40 Jumpers Fêmea                                 | 1          | Peça    | R\$ 7,50  | R\$ 7,50          |
| 27   | Plug Tomada 10A                                      | 1          | Peça    | R\$ 5,00  | R\$ 5,00          |
| 28   | Suporte em L (Cantoneira) - Grande                   | 1          | Peça    | R\$ 4,00  | R\$ 4,00          |
| 29   | Rolamentos 608zz                                     | 2          | Peça    | R\$ 2,00  | R\$ 4,00          |
| 30   | Suporte em L (Cantoneira) - Médio                    | 2          | Peça    | R\$ 1,50  | R\$ 3,00          |
| 31   | Conector P4 Macho com Borne                          | 1          | Peça    | R\$ 2,50  | R\$ 2,50          |
| 32   | Suporte em L (Cantoneira) - Pequeno                  | 1          | Peça    | R\$ 1,00  | R\$ 1,00          |
| Soma dos Fretes  |  |            |         |           | R\$ 48,22         |
| <b>SubTotal - Material</b>   |  |            |         |           | <b>R\$ 641,51</b> |
| Mão de obra  |  | 40         | Horas   | R\$ 1,00  | R\$ 40,00         |
| <b>Total geral</b>   |  |            |         |           | <b>R\$ 681,51</b> |

### 3.3. Fluxograma



## 4. RESULTADOS

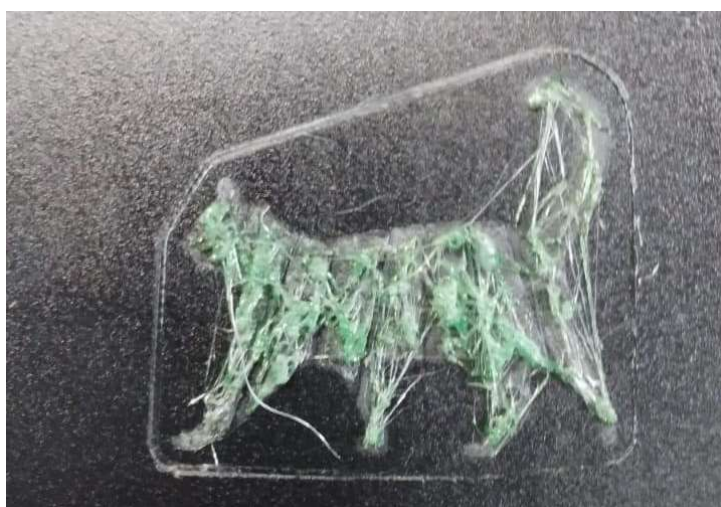
### 4.1. Gerais

Ao realizar a etapa de testes, notamos que a impressão 3D utilizando filamento PET reciclado apresentou como principal obstáculo a variação na espessura do filamento, entre 7mm e 8mm. Essa irregularidade resultou na formação de vincos, os quais comprometeram a qualidade do filamento e da peça final. Para isso, é necessário implementar um sistema de filetamento mais eficiente e regular, o qual corte a garrafa em tiras retas, visto que o modelo utilizado no projeto corta a garrafa em formato circular, o que provoca as irregularidades no filamento.

Além disso, uma opção para mitigar os vincos é aumentar o tamanho das tiras e do funil do bloco extrusor, bem como aumentar a faixa de temperatura de 0 a 150 °C - utilizada nos testes -, para 0 a 250 °C, assim um filete maior pode ser extrusado. O torque e a velocidade do motor também devem ser ajustados, ou seja, aumentar a corrente que o motor recebe para elevar o torque e diminuir a velocidade, a fim de garantir a constância da extrusão e evitar o rompimento do filamento ou a sobrecarga no motor.

Ademais, percebeu-se que a temperatura ideal para realizar a impressão está entre 270°C e 350°C, o que a impressoras 3D utilizada não conseguiu atingir. Desse modo, é necessário requisitar o auxílio de outras pessoas que possuam impressoras 3D mais potentes.

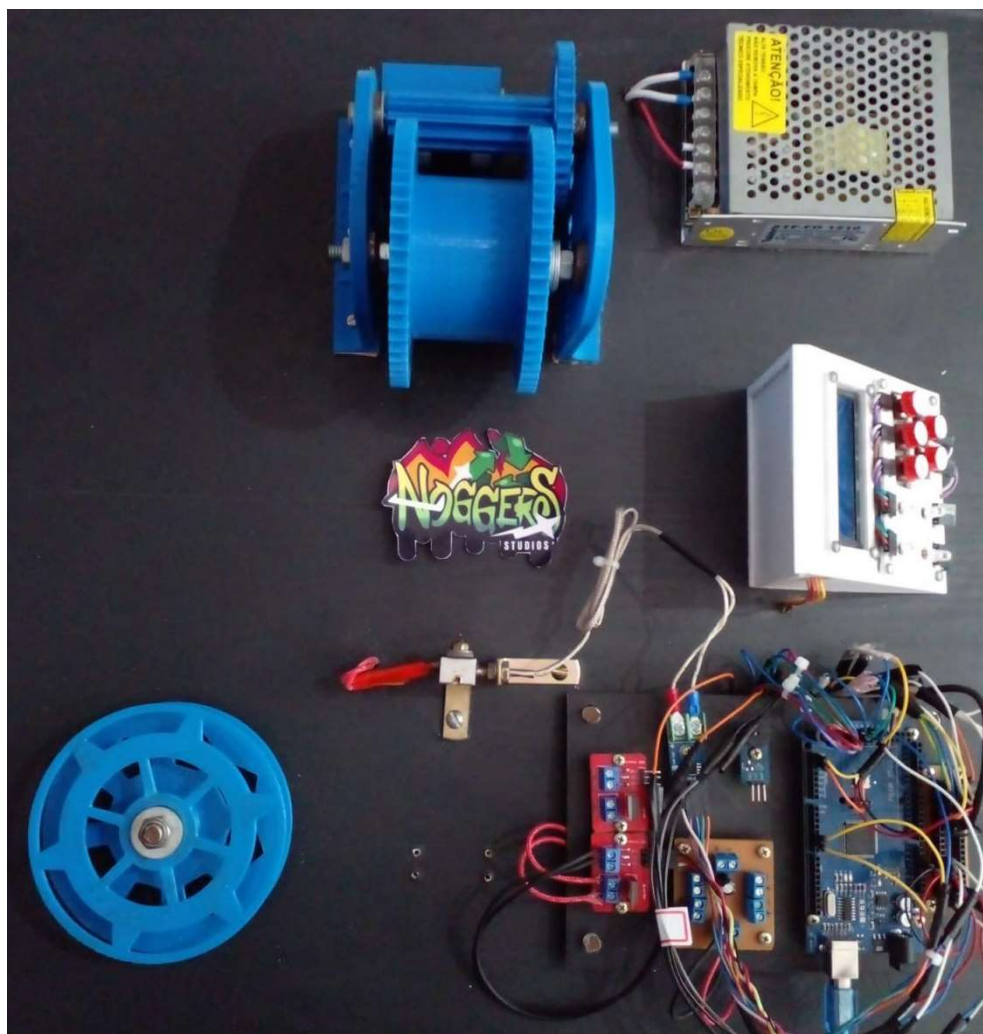
Figura 6 – Teste realizado na impressora 3D, impressão de um gato articulável



Fonte: Os autores

A integração do motor de passo com o sistema PID, crucial para o controle preciso da temperatura e do movimento, demandou a implementação da biblioteca FreeRTOS para coordenar essas funções. Apesar de ter solucionado os conflitos iniciais, a automação completa do sistema de corte da garrafa PET ainda requer ajustes na parametrização do PID e dos sistemas de segurança.

Figura 7 – Projeto finalizado



Fonte: Os autores

#### 4.2. Pesquisa de campo

A pesquisa de campo, realizada com 95 participantes, indicou uma receptividade positiva ao projeto. Quase 80% dos entrevistados expressaram interesse em utilizar uma impressora 3D como hobby, sendo a qualidade da impressão o fator mais importante na escolha de um filamento.

Em relação à sustentabilidade, 67,1% dos participantes demonstraram disposição em investir em filamentos sustentáveis, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental (68,4%). Além disso, 53,9% manifestaram interesse em adquirir nosso projeto, o que indica um potencial mercado consumidor para filamentos reciclados.

Quanto aos canais de venda (físico e digital), os resultados apontam para uma preferência por ambos os formatos: 48,7% dos entrevistados indicaram que comprariam o filamento tanto em lojas físicas quanto em plataformas digitais.

Ao longo deste ano, esforçamo-nos muito para entregar o melhor de nós. Com certeza, ficamos felizes com tudo o que desenvolvemos. Todavia, o tempo foi um grande inimigo, o qual não nos permitiu realizar os ajustes necessários para entregar o projeto da maneira como havíamos planejado. Mesmo assim, foi um grande aprendizado e contribuimos muito para a comunidade com a documentação deste projeto.

## 5. CONCLUSÕES

O protótipo apresentou avanços substanciais, especialmente no controle de temperatura e na produção de filamento, mas ainda requer ajustes no processo de alimentação do filamento e no sistema de corte automatizado. O motor de passo e o sistema PID funcionam de forma estável, mas a alimentação do filamento necessita de uma consistência maior para garantir a qualidade da impressão.

Os resultados da pesquisa de campo indicam uma forte disposição do público para adotar filamentos sustentáveis. A aceitação do protótipo é, portanto, alinhada com as expectativas dos usuários potenciais, e os ajustes em curso têm como objetivo aumentar ainda mais a funcionalidade do sistema, garantindo que ele atenda às necessidades do mercado de maneira eficiente e sustentável.

O protótipo, com os ajustes necessários, tem grande potencial para contribuir com soluções sustentáveis para a impressão 3D, um mercado que, como evidenciado pela pesquisa, está cada vez mais disposto a adotar práticas mais ecológicas.

Portanto, para as próximas pesquisas na área, propomos como sugestões de melhorias em nosso projeto:

1. Desenvolvimento de um filetador que garanta a consistência do filete.
2. Implementação de um cortador automático para realizar o corte do fundo da garrafa.
3. Ajuste preciso do controle PID, adquirindo a curva de resposta do sistema via protocolo Modbus no software Elipse E3, a fim de estabelecer os valores necessários do  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ .
4. Criação de um dashboard interativo no Elipse E3 ou no Node-RED, via protocolo Modbus, com integração de ferramentas de análise em tempo real das variáveis e banco de dados para armazenamento.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1]. ABIPET - Associação Brasileira de da Indústria do PET. **12° Censo da reciclagem do PET no Brasil**. ABIPET, 2022. Disponível em: [https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico\\_12\\_Censo\\_da\\_Reciclagem\\_no\\_Brasil-Novembro\\_2022.pdf](https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil-Novembro_2022.pdf). Último acesso em: 10 out. 2024.
- [2]. ABIPET - Associação Brasileira de da Indústria do PET. **Benefícios da embalagem PET**, [s.d.]. Disponível em: <https://abipet.org.br/beneficios-da-embalagem-pet/>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [3]. ADRESI, M.; PAKHIREHZAN, F. **Evaluating the Performance of Self-Sensing Concrete Sensors under Temperature and Moisture Variations- a Review**. Construction and Building Materials, vol. 404, 1 Nov. 2023, pp. 132923–132923. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823026399>. Último acesso em: 5 ago. de 2024.
- [4]. ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Datasheet A4988**. Alldatasheet, 2010. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/338780/ALLEGRO/A4988.html>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [5]. AUTOCORE ROBÓTICA. **Chave Gangorra Redonda ON/OFF com Fio**. Autocore Robótica, 2024. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/chave-gangorra-redonda-on-off-com-fio>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [6]. BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 3, 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [7]. BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W. **Cradle to Cradle: criar e reciclar ilimitadamente**. São Paulo: Gustavo Gili, 2014.
- [8]. CD-TEAM. **What is a MOSFET? It's Types, Working, Circuit, and Applications**. Electronicsforu, 2017. Disponível em: [www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/mosfet-basics-working-applications](http://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/mosfet-basics-working-applications). Último acesso em: 12 de out. de 2024.



- [9]. ELECTRONO OBS. **Filament from Bottle**. Electronoobs, 2022. Disponível em: [https://electronoobs.com/eng\\_arduino\\_tut174.php](https://electronoobs.com/eng_arduino_tut174.php). Último acesso em: 10 out. 2024.
- [10]. FERREIRA, A. **Como usar push button com Arduino (programação)**. Squids Arduino, 2018. Disponível em: [https://www.squids.com.br/arduino/software/dicas-de-software/168-como-usar-push-button-com-arduino-programacao#google\\_vignette](https://www.squids.com.br/arduino/software/dicas-de-software/168-como-usar-push-button-com-arduino-programacao#google_vignette). Último acesso em: 10 out. 2024.
- [11]. GUSE, R. **O que é buzzer? Tipos, função e aplicações**. MakerHero, 2024. Disponível em: <https://www.makerhero.com/guia/componentes-eletronicos/buzzer>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [12]. HAMANN, B. **A data reduction scheme for triangulated surfaces**. Mississippi State University, 2002. Disponível em: <https://web.cs.ucdavis.edu/~hamann/Hamann1994a.pdf>. Último acesso em: 12 de out. de 2024.
- [13]. HU, J. **Estudo sobre o processo de fatiamento baseado em STL para impressão 3D**. University of Colorado Denver, 2001. Disponível em: <https://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2017/Manuscripts/StudyonSTLBasedSlicingProcessfor3DPrinting.pdf>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [14]. JÚNIOR, J. **Experimento de Oersted**. Mundo Educação, [s.d.]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/experimento-oersted.htm>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [15]. LAURO, A.; FARIA, M. **Estudo para viabilidade técnica de produção de filamento reciclado de PLA e PET para impressão 3D**. Universidade de Brasília, 2020. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24854/1/2019\\_ArthurMoreiraLauro\\_MaxJuniorFaria\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24854/1/2019_ArthurMoreiraLauro_MaxJuniorFaria_tcc.pdf). Último acesso em: 10 out. 2024.
- [16]. LOPEZ, I.; VILLAMIL, J. **PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D A PARTIR DEL RECICLADO DE BOTELLAS PET**. Universidade Autonôma do Ocidente, 2024. Disponível em: <https://red.uao.edu.co/entities/publication/eae38837-0ccf-40fd-b379-dffdb9d46a94>. Último acesso em: 10 out. 2024.

- [17]. MAXIM INTEGRATED. **Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)**. Alldatasheet, 2002. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/73692/MAXIM/MAX6675.html>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [18]. MCROBERTS, M; [tradução Rafael Zanolli]. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec Editora, 2011.
- [19]. MOREIRA, W. **Instrumentação industrial – I**. Escola Técnica Estadual Presidente Vargas. São Paulo, [s.d.]a.
- [20]. MOREIRA, W.; SAITO, L. **Sintonia de Controlador PID utilizando o TDPS Simulador de Processos**. Escola Técnica Estadual Presidente Vargas. São Paulo, [s.d.]b.
- [21]. O ROBÔ CIGANO. **Como fazer FILAMENTO de GARRAFA PET para sua impressora 3D?**. Youtube, 2022. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=P\\_I5AHNhajQ&list=PLqAGJunTg5dBjNXZgEYb\\_PSaBjPwCOKxF](https://www.youtube.com/watch?v=P_I5AHNhajQ&list=PLqAGJunTg5dBjNXZgEYb_PSaBjPwCOKxF). Último acesso em: 12 de out. de 2024.
- [22]. OGATA, K [tradução Heloísa Coimbra de Souza]. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [23]. PINTEC - Pesquisa Industrial de Inovação Tecnológica. **Tecnologias Digitais Avançadas, Teletrabalho e Cibersegurança**. Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/6d5a4d4e68d61dace3aa220ef4712218.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/6d5a4d4e68d61dace3aa220ef4712218.pdf). PINTEC, 2023. Último acesso em: 12 de out. de 2024.
- [24]. ROBOCORE. **Módulo I2C - Primeiros passos**. RoboCore, 2020. Disponível em: <https://www.robocore.net/tutoriais/primeiros-passos-com-modulo-i2c>. Último acesso em: 10 out. 2024.
- [25]. ROMÃO, W.; SPINACÉ, M.; PAOLI, M. **Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/M977rShFktsw4DpHbqk6KYN/?lang=pt&format=pdf>. Último acesso em: 12 de out. de 2024.
- [26]. SANTOS, V. **Motores de Passo**. Escola Técnica Estadual Presidente Vargas. São Paulo, 2021.

- [27]. STROUSTRUP, B. **An overview of the C++ programming language.** Handbook of object technology, p. 72, 1999. Disponível em: <https://courses.cs.umbc.edu/undergraduate/CMSC331/resources/papers/Stroustrup%20-%201999%20-%20An%20Overview%20of%20the%20C%20Programming%20Language-annotated.pdf>. Último acesso em: 12 de out. de 2024.
- [28]. UNKOVSKIY, A., *et al.* **Objects Build Orientation, Positioning, and Curing Influence Dimensional Accuracy and Flexural Properties of Stereolithographically Printed Resin.** Dental Materials, vol. 34, no. 12, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0109564118305943?via%3Dihub>. Último acesso em: 12 de out. de 2024.
- [29]. WONG, V.; HERNANDEZ, A. **A review of additive manufacturing.** International scholarly research notices, v. 2012, n. 1, p. 208760, 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.5402/2012/208760>. Último acesso em: 12 de out. de 2024.