
Manufatura Aditiva: O Upcycling de Garrafas PET

ANDRADE, Wellington José de¹
NUNES, Sergio Eduardo²

Universidade Paulista, Limeira – SP, Brasil

Resumo

Este trabalho tem como finalidade desenvolver uma máquina recicladora de materiais produzidos de plástico PET (Polietileno tereftalato), visando realizar o Upcycling desses itens, para sua utilização na manufatura aditiva, utilizando Arduino, uma tecnologia Open Source (Filosofia de desenvolvimento de Hardware e Software de acesso livre aos projetos de determinada tecnologia) para o controle de temperatura do bico extrusor e do motor que irá enrolar o filamento automaticamente, visando transformá-los em filamento plástico como matéria para impressões 3D, ou seja, reutilizar plásticos comuns do dia-a-dia que seriam descartados em novos itens, sejam protótipos mecânicos, itens de decoração e até mesmo brinquedos.

Palavras chave: PET, Arduino, Open Source, manufatura aditiva, Upcycling.

1 Introdução

1.1 Contextualização

Um dos maiores problemas da sociedade atual é a questão do descarte de resíduos plásticos, o qual vem sendo cada vez mais comum e presente no cotidiano da maioria das pessoas, mas que tem um peso socioambiental irreversível caso seu descarte seja feito de forma irregular, afetando a fauna e flora global.

Em paralelo, a tecnologia de manufatura aditiva (conhecida como impressão 3D que é o processo de construir itens tridimensionais por camadas) tem avançado diariamente, tanto no âmbito industrial quanto para hobbystas e já contam com algumas soluções na questão de reciclagem e utilização inteligente de materiais plásticos e até orgânicos no caso do PLA (Ácido Polilático), que é produzido a partir da fermentação dos açúcares e logo após a polimerização de produtos vegetais como por exemplo, mandioca, milho e beterraba. Já o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) é fabricado a partir de um termoplástico chamado de *Polietileno tereftalato* com a adição de um modificador de cadeia no caso o Glicol para melhorar sua resistência e durabilidade. Sendo assim o PET fabricado a partir das garrafas apenas não irá ter o aditivo do Glicol o que faz com que o material perca parte de sua durabilidade mas ainda sim sendo um meio viável de material a ser utilizado.

Dado o contexto acima, esse trabalho busca evidenciar as possibilidades de realizar o Upcycling (termo utilizado para se referir a ressignificação de materiais que seriam descartados e foram utilizados na criação de novos produtos de maior valor, qualidade e

¹ UNIP|Limeira. Wellington José de Andrade, wellington.j.andrade01@gmail.com

² UNIP|Limeira. Me. Sergio Eduardo Nunes, serginhonunes2013@gmail.com

função) de garrafas PET como insumo base para criação de filamento para impressoras 3D, um ato promissor em questão de sustentabilidade e acessibilidade econômica.

1.2 Tema de Pesquisa

Esse trabalho visa consciencializar sobre o descarte indevido e a ressignificação de materiais plásticos, em especial o PET que compõe grande parte dos recipientes de produtos e alimentos presentes nas casas da maioria das pessoas. Sendo assim a principal proposta é unir a impressão 3D que utiliza o método FDM (Modelagem de Deposição Fundida) a partir de materiais plásticos para a criação de peça com a reutilização de garrafas PET para serem utilizadas como matéria prima, possibilitando sua reutilização transformando-as em novos produtos feitos com impressão 3D. Visando também a criação de uma máquina simples de montar e operar por pessoas que não são tão ligadas ao meio do hobby de impressão 3D.

Portanto, os pontos a serem esclarecidos por esse trabalho são: “O quão viável em comparação a um filamento de mercado seria o PET reciclado, em questão financeira? Quantas garrafas são necessárias para gerar 1 kg de filamento? Qual o custo de produção e facilidade da montagem e operação da máquina?”.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver uma máquina capaz de transformar o PET em matéria-prima para impressoras 3D e analisar seu funcionamento com tal material. Visando também compreender sua viabilidade de montagem e utilização, buscando trazer para a realidade de quem irá criar sua própria recicladora, para que seja possível ser manuseada de maneira simples e eficaz.

Em complemento, busca-se evidenciar a importância da ressignificação de materiais plásticos e sua importância no cotidiano, contribuindo com a disseminação de uma consciência voltada para a ecologia e sustentabilidade nas estruturas da sociedade.

1.3.2 Objetivos Específicos

Logo, os objetivos específicos serão:

- Desenvolver um Hardware capaz de derreter tiras de PET e moldar em um formato específico compatível com as impressoras 3D.
- Desenvolver o código principal do microcontrolador para realizar o controle e acompanhamento do processo.
- Imprimir peças que complementam o projeto inicial.
- Montar um sistema mecânico compatível com o Hardware para facilitar a automatização do processo que irá derreter e enrolar as tiras moldadas em um rolo de maneira automática.
- Mensurar os impactos e a viabilidade do processo.

1.4 Justificativas

A escolha desse tema se justifica devido a constante e crescente necessidade da criação de soluções sustentáveis e democráticas para o reaproveitamento de materiais plásticos, em específico o PET devido ao seu grande impacto ambiental em caso de seu descarte indevido. Segundo dados da ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET), o índice de reciclagem do Brasil atingiu a marca de 56,4% das embalagens descartadas pela população em 2021, tendo um desempenho superior a potências mundiais como Estados Unidos e países da Europa e Ásia.

Sendo assim, o intuito é auxiliar e incentivar para o aumento desse índice de maneira que pessoas interessadas possam dar uma nova vida de uma maneira mais intuitiva e que faça mais sentido individualmente.

A ONU (Organização das Nações Unidas) criou em 2015, um projeto denominado Agenda 2030 cujo o objetivo é unir os países que fazem parte para o combate a pobreza, proteção do meio ambiente e clima, garantir que as pessoas de todos os lugares possam desfrutar da paz e prosperidade. Essa Agenda reúne 17 tópicos denominados de ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), este trabalho se relaciona diretamente com 3 desses tópicos, são eles: ODS 12 Consumo e Produção Responsáveis, que foca em garantir que os padrões de produção e consumo sejam mais sustentáveis, ou seja, promover a eficiência no uso dos recursos e a redução de resíduos. Ao transformar garrafas PET em Filamento, a economia circular (Sistema econômico que busca diminuir o desperdício e a dependência de recursos virgens) é viabilizada, pois reduzimos a geração de novos resíduos que seriam descartáveis e a reciclagem é incentivada, que abrangem as metas centrais do ODS 12, metas 12.2 e 12.5.

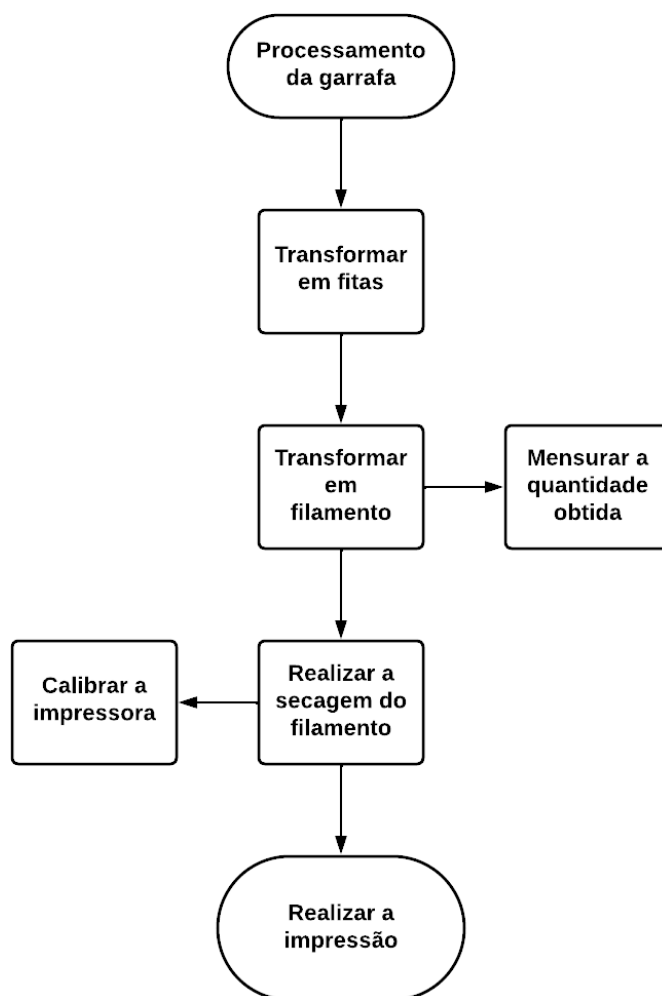
ODS 9 Indústria, Inovação e Infraestrutura, essa ODS busca criar infraestruturas mais resilientes e promover a industrialização sustentável, este trabalho se enquadra pois está sendo desenvolvida uma máquina de um projeto open-source, podendo sofrer quaisquer alterações necessárias estimulando a inovação e uma alternativa sustentável para pessoas que utilizam impressoras 3D criarem filamentos.

ODS 11 Cidades e Comunidades Sustentáveis, essa ODS busca transformar cidades e assentamentos humanos em ambientes inclusivos, seguros e sustentáveis, gerir os resíduos sólidos, no caso as garrafas PET, auxilia na redução de volume de materiais plásticos que poderia ir para aterros sanitários ou poluir os ambientes urbanos, sendo assim, impactando diretamente em cidades mais limpas e sustentáveis, meta 11.6.

1.5 Metodologia

A primeira etapa desse trabalho se dará a partir do pré-processamento das garrafas que serão utilizadas para resultar na matéria-prima final, em seguida serão filetadas com um dispositivo para deixar as garrafas no formato correto para serem derretidas e tomarem a forma de filamento, para que então sejam enroladas em um carretel e estejam prontas para passar pelo processo de secagem visando a remoção de umidade do material para enfim serem impressas utilizando nosso novo material. As etapas do desenvolvimento estão representadas na Figura 01.

Figura 01 - Fluxograma das etapas de Desenvolvimento



Fonte: Autor (2025).

Em seguida, será mensurado a quantidade de garrafas recicladas para gerar 1kg de material, o preço de produção e a qualidade final das peças impressas com o PET reciclado.

1.5.1 Materiais e Equipamentos

O Quadro 1 especifica quais materiais serão utilizados para comparação das peças finais.

Quadro 1 - Insumos comparativos

Quantidade	Material	Especificação / Modelo
5	Garrafas PET	Pré-processadas, diversas cores e marcas
1	Filamento PETG	Voolt3D, Branco, 1,75mm
1	Filamento PLA	Voolt3D, Branco, 1,75mm

Fonte: Autor, 2025.

O filamento feito a partir das garrafas PET, será comparado no quesito de qualidade final da impressão e facilidade de configuração aos demais filamentos.

No Quadro 2 estão presentes os materiais necessários para o desenvolvimento da máquina que irá ser responsável pelo filetagem das garrafas, extrusão pelo bloco aquecedor e bobinamento automático do filamento.

Quadro 2 - Componentes eletrônicos e mecânicos

Quantidade	Componente	Especificação / Modelo
1	Microcontrolador	Arduino Uno R3
1	Bloco Aquecedor	Hotend Elegoo Neptune 4 Pro
1	Transistor	MOSFET IRLZ44N
1	Resistor	120 Ohm, 1/4W
1	Motor	Motor DC 24V
1	Estrutura Filetador	Peças impressas em 3D PLA
1	Lâmina de Estilete	Lamina de Estilete
1	Estrutura Bobinador	Peças impressas em 3D PLA
1	Barra Roscada	Barra roscada M8x40cm
2	Parafusos	Parafusos M8x40
5	Porcas	Porcas M8
1	Eletrônica Auxiliar	Protoboard e jumpers
1	Fonte de Alimentação	24V 10A
1	Display	Modulo Display 16x2

Fonte: Autor, 2025.

Os componentes principais a serem mencionados no primeiro quadro são principalmente o Microcontrolador, que irá gerir todo o funcionamento do projeto no quesito eletrônico, realizando o controle de temperatura no bico extrusor e a velocidade de rotação do motor para garantir a qualidade final do filamento produzido. O bloco aquecedor será responsável por derreter o PET e dar o formato necessário para a etapa de impressão. As estruturas impressas em 3D irão dar o apoio mecânico para que o projeto funcione, auxiliando em filetar as garrafas e bobinar automaticamente o filamento.

O quadro três informa os itens que serão utilizados para realizar as comparações entre os filamentos.

Quadro 3 - Equipamentos de Teste e Medição

Quantidade	Equipamento	Especificação / Modelo
1	Impressora 3D	Elegoo Neptune 3 Pro
1	Paquímetro Digital	Resolução 0.01 mm
1	Balança de Precisão	

Fonte: Autor, 2025.

Quanto aos itens do terceiro quadro, a impressora 3D tem papel imprescindível, ela será responsável por transformar o filamento em uma peça funcional. O paquímetro será utilizado para conferir a medida de diâmetro do filamento obtido, sempre pensando no

diâmetro dos filamentos de mercado que é de 1,75mm. A balança digital será utilizada para pesar o filamento obtido e mensurar a quantidade por garrafa processada.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentação Teórica e Técnica

Embora nosso país seja um dos principais recicladores de PET do planeta, ainda há muito desperdício principalmente no âmbito residencial, e visando que a impressão 3D possa passar a ser cada vez mais comum no cotidiano dos cidadãos comuns e não apenas de hobbystas, por que não unir o útil ao agradável e reciclar enquanto cria material para sustentar o uso da impressora de maneira que também auxilie o planeta?

A partir dessa ideia, diversos alunos principalmente de cursos de engenharia fora do país iniciaram essas pesquisas e atingiram resultados satisfatórios. A produção de 1kg de filamento a base de garrafas PET tem um preço de produção final de aproximadamente US\$7,44 enquanto a mesma quantidade de filamento PETG comercializado tem um custo de venda de aproximadamente US\$20,00 e o PLA tem seu preço na base dos US\$36,00, uma redução considerável de preço considerando o impacto ambiental que pode gerar (VALENZUELA et al., 2024).

Unido aos benefícios gerados pelo processo de reciclagem, é necessário também ter um controle de qualidade dessa produção e padronizar uma forma de montar a máquina responsável pelo processamento do material, utilizar uma abordagem diferente no pré-processamento da matéria-prima gera resultados extremamente satisfatórios, criar um “granulado” do material a ser reciclado, a abordagem desse método se destina mais a uma produção industrial, visando a agilidade e qualidade mais controlada do material adquirido (SHETTY et al., 2024).

Sendo assim, este trabalho se sustenta em duas bases:

- Quantidade de material reciclado em comparação aos comprados comumente no mercado, buscando extrair o máximo de material possível da matéria prima utilizada, no caso garrafas PET.
- Viabilidade de criação caseira da máquina, onde a qualidade do material conta e a facilidade de montagem e operabilidade da máquina por usuários caseiros.

2.2 Trabalhos Relacionados

O Upcycling de materiais plásticos é um tema recorrente nos dias atuais, o artigo de Valenzuela et al. (2024) “Feasibility Study for the Manufacturing of 3D Printing Filaments from Recycled PET: A Design of Experiments Approach” destaca a direta economia da utilização dos materiais reciclados comparados aos filamentos vendidos pela indústria. Segundo os autores o kg do PLA é vendido por aproximadamente US\$36,00/kg, enquanto o filamento produzido a partir do PET tem seu custo em torno dos US\$7,44/kg, gerando uma economia final de US\$28,56 em comparação ao PLA. Os dados apresentados pelos autores destacam a importância e proposta do presente trabalho, demonstrando o baixo custo da reciclagem do material PET para obter insumos de impressão 3D.

O trabalho de Pires (2022) “Avaliação Técnica da Produção de Filamentos Plásticos para Impressão 3D: Comparação de Plásticos Virgens e Reciclados”, evidencia um método de processamento do material das garrafas PET, realizando a trituração e o transformando em

um granulado de PET. Esse processo se equipara a processos industriais, o que pode reduzir o tempo de processamento e o desperdício de materiais, já que as garrafas podem ser trituradas por completo, sem necessidade de separar fundo e gargalo, o que não ocorre no processo de filetagem. Porém, embora a trituração do material seja eficiente e cause menos desperdício, o processo exige um maquinário complexo para a trituração, o presente trabalho faz a utilização de um método mais simples mecanicamente, viável economicamente e com uma complexidade menor de montagem, democratizando o acesso a essa tecnologia possibilitando que mais pessoas realizem a construção do equipamento. O material PET não é o único que pode fazer parte do ciclo de Upcycling, no artigo de Pramanik et al. (2024) "Potential of recycled PLA in 3D printing: A review", é abordada a reciclagem do PLA, resíduos de produção de materiais comerciais próprios para impressão 3D, isso demonstra o potencial da manufatura aditiva de reduzir o próprio impacto ambiental que pode ser causado por ela.

Apesar dos trabalhos citados apresentarem abordagens diferentes, todos acabam tendo a mesma proposta, que é, produção de matéria prima de maneira acessível e sustentável. A proposta que meu trabalho apresenta é a integração de ferramentas open source como o Arduino e bibliotecas disponibilizadas pela comunidade para um controle preciso da temperatura, utilizando peças de impressoras 3D que poderiam vir a ser descartadas, como o cartucho de aquecimento, termistor, bloco de alumínio e bico, visando unir qualidade no processamento do material e deixando mais acessível para quem queira replicar os resultados de maneira simples, eficaz e economicamente viável.

3 OPEN SOURCE

3.1 Arduino

De acordo com a documentação oficial da plataforma (Arduino, 2025), o Arduino é definido como uma plataforma de desenvolvimento e prototipagem de hardware open source, pensada para ser simples e amigável a quem estivesse iniciando na eletrônica e desenvolvimento de hardware e firmware, com um preço baixo para que seja de fácil acesso monetário para estudantes e entusiastas da área. Por ser open source, o Arduino pode ser replicado por milhares de fabricantes ao redor do planeta, fazendo com que sua popularidade aumentasse cada vez mais ao mesmo tempo em que seu preço diminuía devido a quantidade de clones disponíveis no mercado. O projeto teve sua origem na Itália, em 2005, quando o grupo de pesquisadores do Interaction Institute Ivrea (IDII), tiveram a ideia da criação dessa plataforma, são eles, Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis. A escolha desse microcontrolador para o meu trabalho se deve justamente aos fatores acima, custo e facilidade de adaptação ao desenvolvimento com a plataforma.

3.2 Bibliotecas Utilizadas

3.2.1 LiquidCrystal_I2C

Foi escolhida a biblioteca LiquidCrystal_I2C.h do desenvolvedor johnrickman que cuida de gerenciar a conexão e exibição dos dados no Display, devido a sua integração com um módulo de comunicação I2C diminuindo a quantidade de fios necessários para conexão com o microcontrolador deixando o projeto visualmente mais limpo e simples. As funções disponíveis na biblioteca são fáceis de se utilizar, a partir delas exibimos no Display um feedback da temperatura alvo e a temperatura atual medida pelo termistor.

3.2.2 SmoothThermistor

Biblioteca utilizada para a leitura dos valores do Termistor. O que a biblioteca faz é aplicar a equação de Steinhart-Hart, que faz a relação entre a resistência e a temperatura medida por um Termistor, com o resultado de cada amostra é realizada uma média das amostras e retornado um valor em graus Celsius.

3.2.3 PID_v1_bc

A biblioteca de controle PID do criador David Forrest, realiza todo o cálculo necessário para poder estabilizar a temperatura da forma mais precisa o possível, graças a essa biblioteca fica simples realizar o controle, apenas chamando 3 funções e passando as variáveis necessárias para os cálculos.

4 PRÉ-PROCESSAMENTO DO MATERIAL

4.1 Matéria-Prima e Insumos Comparativos

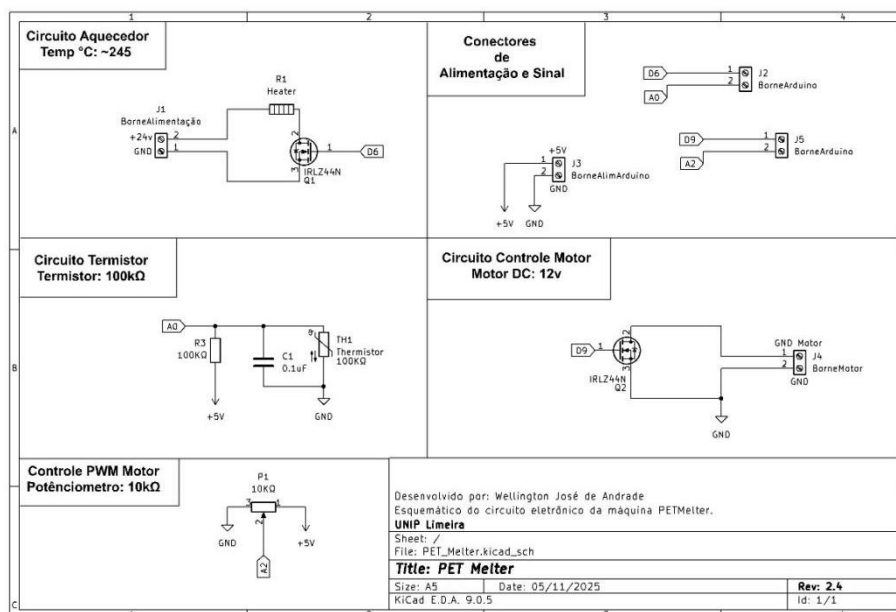
As garrafas utilizadas para a produção passarão por um processo de preparação, as mesmas serão lavadas com água e detergente tanto internamente quanto por fora, após isso terão o rótulo removido junto da cola fazendo a utilização de um solvente. Após a limpeza a garrafa será aquecida com uma estação de retrabalho para que possa ter sua superfície o mais reta e sem deformidades possível. Em seguida será feito um pequeno corte para que seja possível filetar as garrafas. O filete e os filamentos serão submetidos a uma etapa de secagem para a remoção da umidade dos mesmos.

5 MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS

5.1 Protótipo Eletrônico

A máquina se baseia em diversas partes para seu funcionamento, porém antes de qualquer montagem mecânica, a eletrônica deve estar pronta para funcionamento, os principais componentes serão o Arduino Uno, o cérebro do projeto que fará o controle da temperatura do bico de extrusão e da rotação do motor 12v, o bico e o motor serão controlados por dois MOSFETs IRLZ44N um para controlar a temperatura do bico e o outro a rotação do motor, para balancear os dois e extrair o filamento mais linear e com qualidade possível.

Figura 02 - Esquema Eletrônico PCB



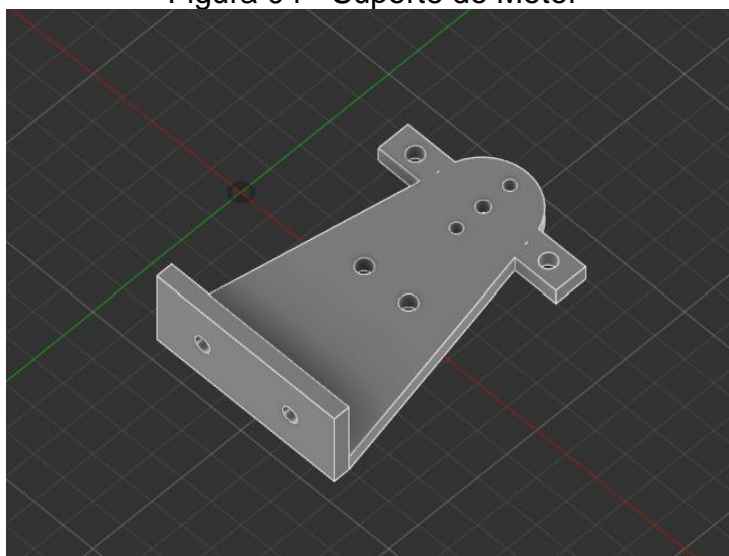
Fonte: Autor (2025).

5.2 Protótipo Mecânico

A máquina será montada sob uma base de madeira para que as partes mecânicas e eletrônicas possam ser fixados.

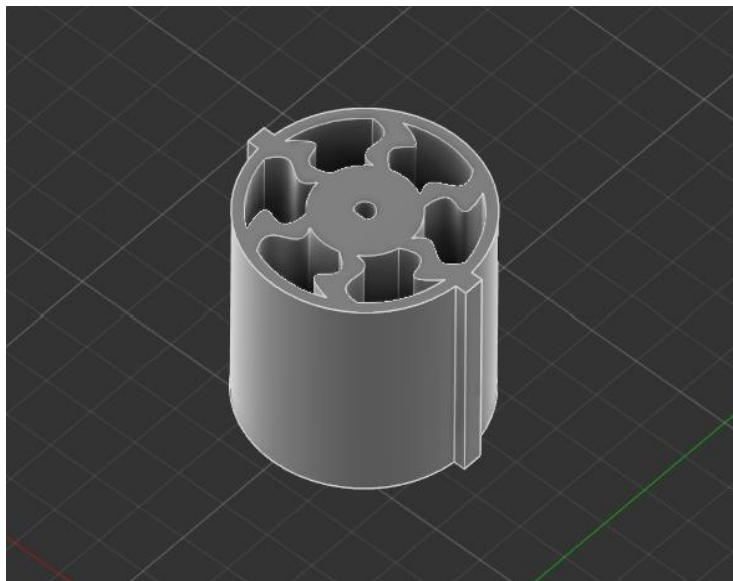
Algumas peças mecânicas impressas como o filetador e o carretel foram reaproveitadas de projetos open-source disponíveis em sites que compartilham STL gratuitamente, o suporte do motor e o acoplamento do eixo do motor para o carretel foram modelados por mim utilizando o software Fusion360. O carretel foi reutilizado do projeto PETAmentor2.

Figura 04 - Suporte do Motor



Fonte: Autor (2025).

Figura 05 - Adaptador do Eixo do Motor



Fonte: Autor (2025).

6 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

6.1 Firmware de Controle de Temperatura e Rotação

O firmware do microcontrolador será desenvolvido baseado em três partes principais, o controle de temperatura que utilizará uma biblioteca de controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo), que se baseia em uma equação composta pelas três operações que dão o nome da técnica, ela funciona utilizando 3 variáveis para a função, K_p que representa a Proporcional que calcula a diferença da temperatura atual medida pelo termistor e a temperatura que deseja atingir, K_i que representa a Integral que corrige os erros de aproximação do K_p e K_d que representa a Derivada que serve para evitar que a temperatura aumente de maneira abrupta ultrapassando a temperatura alvo, as 3 se complementam na função para um controle preciso da temperatura, que no caso desse projeto deve ser de 260° que seria o ponto onde o PET se torna maleável suficiente para ser moldado em um novo formato e tracionado sem se romper.

Em seguida será feito o controle do motor tracionador, que será controlado por uma porta PWM do Arduino e um Potenciômetro de 10KOhm para aumentar e diminuir sua velocidade manualmente sem que perca sua potência e tenha força para enrolar o filamento mesmo em velocidades mais baixas.

Por fim, foi utilizado um Display LCD 16x2 para monitorar a temperatura no bico aquecedor, dando um feedback visual do que está acontecendo com o circuito de aquecimento do projeto.

7 PRODUÇÃO DO FILAMENTO

7.1 Extrusão do Filamento

A etapa de extrusão se dá por carregar a máquina com a garrafa já filetada e seca, onde o mesmo passará pelo bico aquecedor e em sequência tracionado pelo motor e bobinado já no formato adequado e propício para carregar uma impressora 3D.

7.2 Análise de Qualidade

Após a extrusão o material será analisado para garantir que atingiu a qualidade mínima para seu uso, onde será observado se se formou um filamento maciço sem espaços internos ou bolhas de ar e se a maioria do filamento está na medida comercial de 1,75mm. O material também será pesado em uma balança digital de precisão para que seu peso possa ser registrado para então ter uma média de quantas garrafas seriam necessárias para se obter 1Kg de material.

7.3 Secagem do Filamento

Caso o filamento passe da análise qualitativa o mesmo será submetido a mais um processo de secagem, para garantir que não haja problemas de impressão devido a umidade presente no material. Evitando assim que as camadas não tenham um acabamento ideal devido a formação de bolhas de água que podem estourar e causar falhas no momento da impressão ou que o bico possa entupir possivelmente danificando a Hot End(Cabeça de impressão que derrete o material e guia pelo bico extrusor) da impressora 3D.

8 IMPRESSÃO DOS MATERIAIS

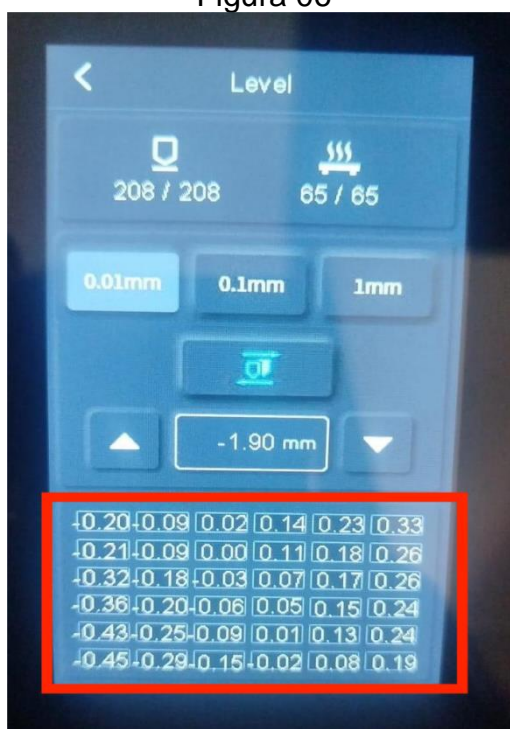
8.1 Calibração da Impressora 3D

Os 3 filamentos serão submetidos a testes de calibração presentes no fatiador (Software utilizado para transformar arquivos STL que é o formato lido pelo software para objetos 3D em um arquivo GCODE que a impressora interpreta e comanda os motores para a impressão da peça). Serão executadas 3 calibrações básicas, torre de temperatura para encontrar a melhor temperatura do bico para a impressão do material, teste de fluxo para identificar qual o melhor valor de fluxo para que as camadas sejam sempre preenchidas da melhor forma evitando falhas na impressão e fluxo volumétrico que indica a velocidade em que o filamento deve ser “empurrado” pelo bico de impressão.

8.2 Calibração da Mesa

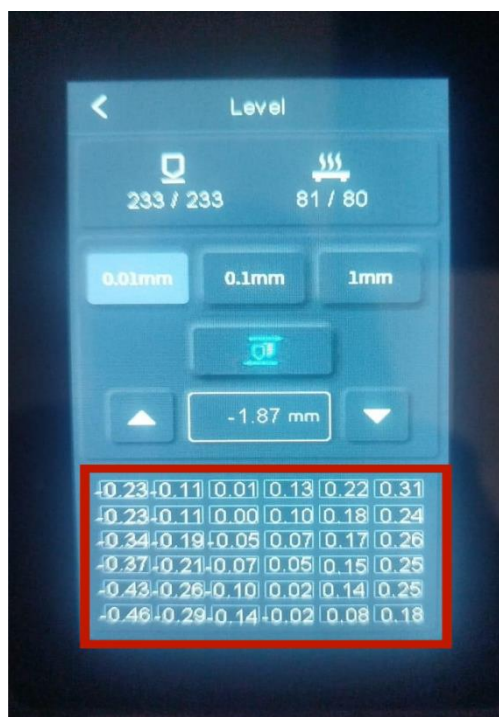
A impressora 3D utilizada nesse projeto (Elegoo Neptune 3 Pro), realiza a calibração automática da mesa, porém é necessário realizar a calibração sempre que for trocar de material, devido a dilatação térmica, enquanto o PLA trabalha com uma temperatura de mesa em torno dos 65° o PET e o PETG utilizam em torno de 80°, essa diferença de temperatura pode ser suficiente para causar uma disparidade no nivelamento da mesa devido a dilatação do metal que a PEI (É o revestimento feito de um termoplástico o Polietereimida, que é aplicado sobre a base magnética, melhorando a adesão e a melhor liberação do material impresso sobre ela) é construída. Nas Figuras 06 e 07 é possível observar as diferenças na calibração da mesa para ambos os materiais. O retângulo vermelho nas imagens indicam os resultados da calibração da mesa.

Figura 06



Fonte: Autor (2025).

Figura 07

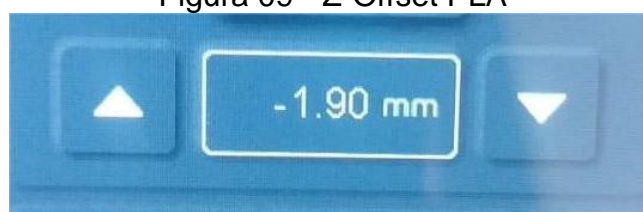


Fonte: Autor (2025).

8.3 Calibração do Z-Offset

O Z-Offset é a distância entre o bico e a PEI, o PLA exige uma distância menor em referência a PEI, por ser menos viscoso e fluir com mais facilidade, já o PET e o PETG por terem uma viscosidade maior necessitam de uma distância maior da PEI em relação o bico de impressão, essa distancia serve para melhorar a aderência entre as camadas e caso esteja descalibrada pode gerar diversos problemas, entre eles a falta de adesão das camadas e o pior que é o acúmulo do material no bico causando entupimento da extrusora podendo levar a sua quebra em casos mais extremos. A Figuras subsequentes 09 e 10 mostram a diferença na altura do bico em relação a mesa para os diferentes materiais.

Figura 09 - Z-Offset PLA



Fonte: Autor (2025).

Figura 10 - Z-Offset PETG



Fonte: Autor (2025).

8.4 Torre de Temperatura

A torre de temperatura é uma calibração fornecida pelo software fatiador que visa determinar a melhor temperatura para a impressão de determinado filamento, quando comprados os filamentos informam na etiqueta o intervalo de temperatura recomendável para a impressão. O do PLA é em torno de 200° a 220° segundo o fabricante e o PETG em torno de 225° a 245°. Essa calibração auxilia na identificação visual da melhor qualidade obtida para os passos de temperatura realizados, onde é possível obter a melhor adesão das camadas, menos fiapos e melhores detalhes.

8.4.1 Torre de Temperatura para PLA

A Figura 9, representa a torre de temperatura impressa em PLA Branco da marca Voolt3D, a torre vai de 215°C a 200°C, como mostra a Figura 11, é possível observar que a melhor qualidade se encontra entre as temperaturas de 210°C e 205°C, portanto foi escolhida a temperatura de 208°C.

Figura 11 - Torre de Temperatura PLA



Fonte: Autor (2025).

8.4.2 Torre de Temperatura para PETG

Como é possível observar na Figura 12, a torre de temperatura vai de 250°C a 230°C, o filamento PETG Branco da marca Voolt3D apresenta uma boa qualidade entre as temperaturas de 235°C e 230°C portanto decidi manter em 233°C, pois apresentou uma boa fluidez de nas camadas e qualidade nos detalhes.

Figura 12 - Torre de Temperatura PETG



Fonte: Autor (2025).

8.4.3 Torre de Temperatura para PET Reciclado

8.6 Impressão dos Materiais

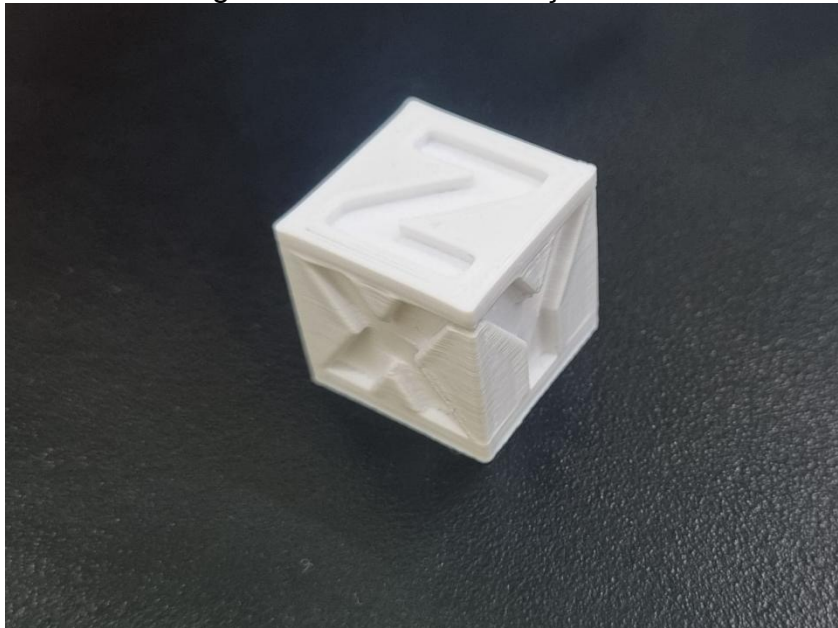
Para validação da qualidade do Filamento produzido a partir de garrafas PET, foram impressas 3 peças básicas que são utilizadas para testes de filamento todos os filamentos mencionados serão submetidos ao mesmo teste, ao fim serão comparadas a qualidade

final da peça, as marcas de impressão, fiapos deixados e possíveis falhas de impressão nos diferentes materiais.

8.6.1 Cubo Impresso em PLA

O Cubo impresso apresenta uma qualidade consistente com os parâmetros configurados, camadas com boa aderência entre as camadas, superfície lisa e uniforme, detalhes das letras com qualidade e resolução ótimas, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Cubo Calibração PLA

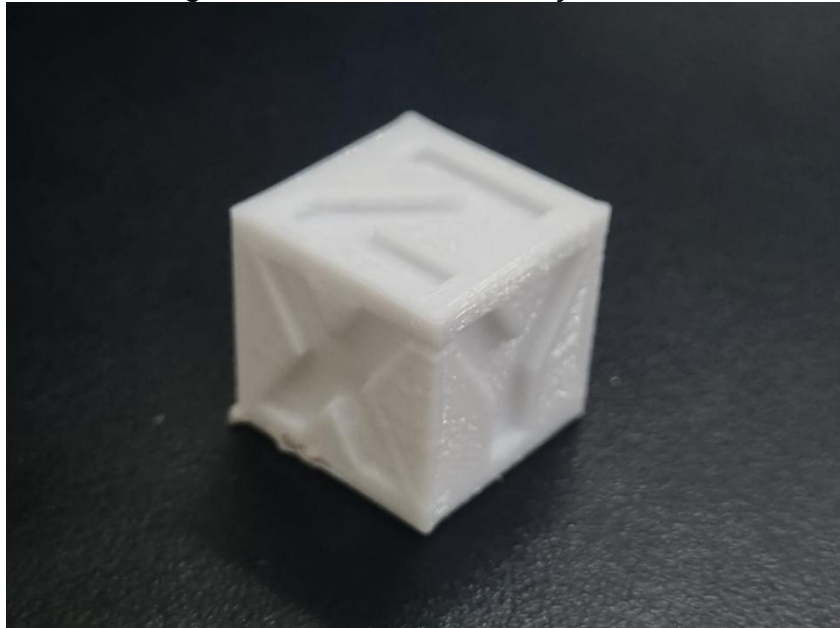


Fonte: Autor (2025)

8.6.2 Cubo Impresso em PETG

Por característica do material, o Cubo de calibração impresso em PETG apresenta uma superfície mais brilhosa, também com uma qualidade de impressão ótima, boa aderência entre as camadas e boa resolução nos detalhes, assim como representa a Figura 14.

Figura 14 - Cubo de Calibração PETG



Fonte: Autor (2025).

8.6.3 Cubo Impresso em PET Reciclado

9 Resultados

Os filamentos de mercado apresentaram resultados concisos em comparação ao filamento impresso com o PET reciclado, foram mais fáceis de calibrar e tiveram qualidade de impressão e velocidade superior, entretanto a proposta do trabalho é criar um material que seja possível de imprimir por uma impressora convencional e uma máquina simples de ser copiada por usuários comuns, sendo assim, os resultados foram satisfatórios e condizentes com o escopo do projeto.

9.1 Pontos Positivos

A eficiência do Controle PID foi um grande acerto do projeto, proporcionando grande flexibilidade de adaptação da temperatura para cada ambiente que a máquina estará inserida, o sistema apresentou grande precisão em altas temperaturas.

O método de filetagem das garrafas PET remove a grande barreira de acesso a esse método de reciclagem visto que sua montagem e utilização são extremamente simples e acessíveis, democratizando a implementação desse modelo de Upcycling.

A tecnologia open-source com a utilização do Arduino e peças impressas de outros criadores facilita a replicação do projeto por usuários comuns e com menos acesso a recursos econômicos, aumentando o alcance e permitindo que os processos de reciclagem atinga mais classes sociais e comunidades ao redor do mundo.

9.2 Pontos de Atenção

Durante o desenvolvimento da máquina foi possível notar que a maior dificuldade é dimensionar um motor que atenda o requisito do projeto, no caso é preciso um motor que tenha uma rotação menor com um torque maior. O motor que utilizei no projeto não atende esses requisitos, porém foi desenvolvido um sistema de redutor, o que auxiliou o motor a chegar nas especificações necessárias. Esse sistema deve ser adaptado ao motor que a pessoa que irá replicar tem disponível.

10 Considerações Finais

Para próximas versões seria interessante utilizar um sistema de motor e redutor com motores NEMA 17, os motores padrão de impressoras 3D, eles possuem muito mais torque que motores comuns, portanto seria mais simples desenvolver um sistema de tração baseado nesses motores.

Quanto a eletrônica, a criação de uma PCB dedicada ao projeto evitaria ruídos elétricos da utilização do PWM, visto que seria possível criar um plano de Terra pela placa toda, filtrando o ruído antes dele chegar ao microcontrolador, trazendo também mais robustez ao projeto.

Referências Bibliográficas

ABIPET-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Você Sabia?** 2025. Disponível em: <<https://abipet.org.br/voce-sabia/>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

ABIPET-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **O PET é o plástico número 1 em reciclagem.** Disponível em: <<https://abipet.org.br/reciclagem/>>. Acesso em : 26 ago. 2025.

ARDUINO. **About Arduino.** Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/about/>>. Acesso em : 30 out. 2025.

GITHUB. **Arduino-PID-Library_V2.** Disponível em: <<https://github.com/imax9000/Arduino-PID-Library?tab=readme-ov-file>>. Acesso em : 13 out. 2025.

GITHUB. **Arduino-PID-Library.** Disponível em: <<https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>>. Acesso em : 13 out. 2025.

GITHUB. **LiquidCrystal_I2C** 2025. Disponível em: <https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C>. Acesso em: 14 out. 2025.

GITHUB. **NexNTC.** Disponível em: <<https://github.com/magnus-cpu/NEXNTC>>. Acesso em : 13 out. 2025.

MAKER WORLD. **Cortador de Garrafa PET Simples.** Disponível em: <<https://makerworld.com/pt/models/98441-simple-pet-bottle-cutter#profileId-111492>>. Acesso em : 24 out. 2025.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em : 06 nov. 2025.

PETAMENTOR. **Official PET filament machine.** Disponível em: <petamentor.com>. Acesso em : 25 out. 2025.

PIRES, L. T. **Avaliação Técnica da Produção de Filamentos Plásticos para Impressão 3D: Comparação de Plásticos Virgens e Reciclados.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Paraná. 2022.

PRAMANIK, A.; DAVIES, I. J.; JHON, M.; HASAN, M. H.; BISWAS, W. K. **Potential of recycled PLA in 3D printing: A review.** Sustainable Manufacturing and Service Economics. V. 3, 100020, mar. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344424000033#refdata001>>. Acesso em: 16 out. 2025.

SHETTY, V. C.; MENDON, V. **Recycling PET Bottles into Usable Filament FDM 3D Printing: A Sustainable Approach.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Srinivas University Institute of Engineering & Technology, Mangalore.2024.

VALENZUELA, G. E. S.; CANTARERO, P. M. P.; **Feasibility Study for the Manufacturing of 3D Printing Filaments from Recycled PET: A Design of Experiments Approach.** Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (JFFHMT). v. 11, n. p. 388-396, nov. 2024. Disponível em: <<https://jffhmt.avestia.com/2024/038.html>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

APÊNDICE A - Análise do Código Fonte e Lógica de Controle

Este apêndice apresenta a análise sobre o algoritmo de processamento principal da biblioteca PID_v1, utilizada no trabalho, para realizar o controle preciso de contínuo de temperatura da extrusora.

A.1 Código Fonte e a Função Compute()

A função Compute() é responsável pela implementação das equações matemáticas do PID para o código. A figura 15 representa o trecho de código extraído do código fonte da biblioteca, no arquivo PID_v1.cpp. As variáveis *myInput e *mySetpoint, são ponteiros para variáveis armazenadas no código de controle desenvolvido neste projeto que trazem a temperatura de entrada e o valor de temperatura a ser atingido, vide a Figura 16.

Figura 15 - Função Compute()

```
58  bool PID::Compute()
59  {
60      if(!inAuto) return false;
61      unsigned long now = millis();
62      unsigned long timeChange = (now - lastTime);
63      if(timeChange >= SampleTime)
64      {
65          /*Compute all the working error variables*/
66          double input = *myInput;
67          double error = *mySetpoint - input;
68          double dInput = (input - lastInput);
69          outputSum += (ki * error);
70
71          /*Add Proportional on Measurement, if P_ON_M is specified*/
72          if(!pOnE) outputSum -= kp * dInput;
73
74          if(outputSum > outMax) outputSum = outMax;
75          else if(outputSum < outMin) outputSum = outMin;
76
77          /*Add Proportional on Error, if P_ON_E is specified*/
78          double output;
79          if(pOnE) output = kp * error;
80          else output = 0;
81
82          /*Compute Rest of PID Output*/
83          output += outputSum - kd * dInput;
84
85          if(output > outMax) output = outMax;
86          else if(output < outMin) output = outMin;
87          *myOutput = output;
88
89          /*Remember some variables for next time*/
90          lastInput = input;
91          lastTime = now;
92          return true;
93      }
94      else return false;
95  }
```

Fonte: GITHUB, (2017).

Figura 16 - Código Principal de Controle

```
PETMelter.ino
1 // Código referente ao TCC Manufatura Aditiva: O Upcycling de Garrafas PET
2 // É responsável por controlar a temperatura do bloco de aquecimento via PID
3 // e um sistema de tração com um motor via PWM e Potenciometro
4 // exibir os dados em um display 16x2 para feedback visual
5 // Autor: Wellington Andrade (2025).
6
7 #include "SmoothThermistor.h"
8 #include "HardwareSerial.h"
9 #include "PID_v1_bc.h"
10 #include "LiquidCrystal_I2C.h"
11
12 #define NTC_PIN A5
13 #define LED_PIN 2
14 #define HOT_CARTIDGE 6
15 #define TEMP_ALVO 240.0
16 #define POT_PIN A2
17 #define MOTOR_PIN 9
18
19 int pot_val = 0;
20 int pwm = 0;
21 float temp_filtrada = 0;
22 double Setpoint, Input, Output;
23 double Kp = 10.0, Ki = 0.05, Kd = 80.0;
24
25 PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
26
27 SmoothThermistor thermistor(NTC_PIN, ADC_SIZE_10_BIT, 100000, 1000, 3950, 25, 10);
28
29 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
30
31 void setup() {
32     Serial.begin(9600);
33
34     pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
35     pinMode(HOT_CARTIDGE, OUTPUT);
36     pinMode(MOTOR_PIN, OUTPUT);
37     pinMode(POT_PIN, INPUT);
38
39     temp_filtrada = thermistor.temperature();
40
41     lcd.init();
42     lcd.backlight();
43     lcd.setCursor(0,0);
44
45     // Configurar PID
46     Setpoint = TEMP_ALVO;
47     myPID.SetSampleTime(300);
```

Fonte: Autor (2025).

Figura 17 - Código Principal Continuação

```
48 myPID.SetOutputLimits(0, 255);
49 myPID.SetMode(AUTOMATIC);
50
51 }
52
53 void loop() {
54
55     // Filtro para diminuição de ruídos na leitura da temperatura
56     float alpha = 0.1;
57     temp_filtrada = (alpha * thermistor.temperature()) + ((1.0 - alpha) * temp_filtrada);
58     Input = temp_filtrada; // Input temp filtrada para o PID
59
60     //Input = thermistor.temperature();
61
62     myPID.Compute();
63
64     analogWrite(HOT_CARTIDGE, Output);
65
66     delay(200);
67
68     Serial.println(Input);
69
70     // Exibe dados no Display
71     lcd.print("Temp. Alvo: ");
72     lcd.print(Setpoint);
73     lcd.setCursor(0,1);
74     lcd.print("Temp. Atual: ");
75     lcd.print(Input);
76
77     delay(300);
78 }
```

Fonte: Autor (2025).

As variáveis Setpoint e Input, são declaradas na linha 22 da figura 16. Na linha 25 da figura 16, é instanciado o objeto PID, e seus parâmetros para o método construtor da classe. A partir de sua instância podemos acessar métodos públicos, que a classe PID disponibiliza para realizarmos a configuração do algoritmo.

A.2 - A Lógica da Função

O algoritmo de cálculo do PID opera em tempo discreto, ou seja, ele ocorre em passos ou intervalos distintos, ele se baseia em amostras para realizar a operação seguinte como uma máquina de estados, se em uma amostra a temperatura está acima do SetPoint, no próximo loop o algoritmo realiza o cálculo para reduzir a temperatura diminuindo o valor enviado pelo PWM do Arduino que controla a tensão sobre o MOSFET. A variável que realiza esse controle é a SampleTime e sua lógica é implementada na linha 63 e garante que o cálculo só ocorra em intervalos fixos, isso garante que a Integral e a Derivada funcionem corretamente em tempo discreto de execução.

Na linha 67 presente na figura 15, o código realiza o cálculo de erro atual e a variação na entrada do PID, que serão utilizados na fórmula de cálculo da Integral.

A linha 69 representado na figura 15, realiza a soma do erro atual e o acumulado que seria o cálculo da Integral. Através desse cálculo o algoritmo corrige o erro passado para acertar pequenos desvios constantes, auxiliando em uma linearidade maior no controle de temperatura para o cartucho aquecedor.

O cálculo Proporcional ocorre na linha 79 na figura 15, esse cálculo é flexível, a lógica é a seguinte, se pOnE for verdadeiro, o algoritmo multiplica a diferença de temperatura pela constante de ganho que é armazenada na variável Kp, quanto maior a diferença de

temperatura, maior será o valor inicial da saída, o que força o sistema a reagir de maneira mais rápida,

Já se `pOnE` for falso, a proporcional é calculada na linha 72 encontrado na figura 15, esse cálculo visa suavizar a resposta caso o usuário altere a temperatura bruscamente em tempo de execução do código.

A.3 Cálculo de Saída

O cálculo final é o que é devolvido para realizar o controle da temperatura de forma precisa e com o mínimo de oscilação possível, se encontra na linha 83. Nesse cálculo os resultados da Proporcional, Integral e Derivada são unidos e devolvem um valor que é convertido para a saída PWM do Arduino que realiza o controle da corrente do MOSFET.

A variável `output` armazena o seguinte cálculo, `output += outputSum - kd * dInput`, onde, soma a variável `output` com o resultado da Integral (`outputSum`) e subtrai o resultado da Derivada (`kd * dInput`), que atua como um freio para o sistema, o qual se baseia na velocidade da mudança de temperatura.

A.4 Clamping

As lógicas contidas nas linhas 85 e 86 da figura 15, servem para garantir que o resultado dos cálculos nunca ultrapassem os limites de saída e entrada dos pinos digitais do Arduino que vão de 0 a 255, evitando erros e comportamentos imprevisíveis do PWM.

A.5 - Filtro Digital

Além da lógica padrão e um filtro passa-baixa eletrônico presente no circuito físico do projeto, foi necessário implementar um filtro de Média Móvel Exponencial, conhecido também como filtro EMA, que funciona como um filtro passa-baixa, mas implementado via software, representado nas linhas 56, 57 e 58 na figura 16.

A linha 56 declara a variável `alpha` com valor atribuído de 0.1, em seguida foi declarada a variável `temp_filtrada` na linha 57, ela armazenará o cálculo necessário para o filtro. O cálculo funciona como um cálculo de média ponderada, que para gerar o próximo valor de temperatura lida, atribui 10% de peso a leitura atual e 90% do peso ao histórico de medidas acumulado. Isso cria um filtro e garante que picos de tensão lidos pelo circuito de temperatura que foram gerados pelo motor, não afetem a temperatura interpretada, mascarando o resultado real para o PID.

A.6 - Sintonia dos Parâmetros

Mesmo que a biblioteca forneça toda a lógica necessária para o perfeito funcionamento do PID, os parâmetros devem ser ajustados via código através dos parâmetros passados para as funções.

Essa sintonia paramétrica se deu em 3 variáveis, são elas $K_p = 10.0$, $K_i = 0.05$ e $K_d = 80.0$, também foi alterado o parâmetro de entrada de uma função, que seria `myPID.SetSampleTime()`, o valor utilizado foi 300, que representa a taxa de amostragem em milissegundos, ou seja, o PID computa uma amostragem a cada 300 milissegundos, isso evita perda de amostras devido a resolução dos pinos do Arduino caso a amostra seja computada em menos tempo, ou demora na reação do PID caso o tempo de amostragem esteja muito alto, para a temperatura de 240°, esse tempo funcionou perfeitamente, a partir do momento que o plástico frio entra em contato com o bico e o mesmo perde calor, o

sistema consegue reagir de forma veloz e precisa para manter a linearidade de temperatura.

Os testes para alcançar esses valores foram empíricos, através de tentativa e erro, visto a dificuldade de se estimar valores precisos para sistemas de altas temperaturas devido sua enorme perda de calor para o ambiente.

Todos os códigos e arquivos do projeto estão disponíveis em, <https://github.com/Weritu/PET-Melter>.