

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS PRODUTO-SERVIÇO PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTO DE IMPRESSÃO 3D USANDO PET RECICLADO¹

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF PRODUCT-SERVICE SYSTEMS FOR 3D PRINTING FILAMENT PRODUCTION USING RECYCLED PET

Thamyres Crystine da Costa Abreu*  E-mail: thamyresabreu@pep.ufrj.br
Igor dos Santos Gomes*  E-mail: igorsant.gomes@gmail.com
Tássia de Azevedo Diniz*  E-mail: tassiadinizufrj@gmail.com
Gustavo Ferreira Soares*  E-mail: gustavo.sofer@gmail.com
Tharcisio Cotta Fontainha*  E-mail: fontainha@pep.ufrj.br
Amanda Fernandes Xavier*  E-mail: amandaxavier@pep.ufrj.br
Rafaela Lima da Fonseca**  E-mail: rafaelafonseca@ufpr.br
Marianna Tamyé Fujiwara Sousa Caetano**  E-mail: mariannatamyé@ufpr.br
Luiz Miguel Oliveira Roder**  E-mail: luiz.miguel@ufpr.br
Marya Gabryela Pereira**  E-mail: maryapereira@ufpr.br
Giancarlo Alfonso Lovón-Canchumani**  E-mail: giancarlo.lovon@ufpr.br

*Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

**Universidade Federal do Paraná (UFPR), Paraná, PR, Brasil.

Resumo: A crescente geração de resíduos sólidos urbanos, especialmente de plásticos como o Polietileno Tereftalato (PET), evidencia a necessidade de soluções que integrem sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e caráter educativo. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um Sistema Produto-Serviço (PSS) para a produção de filamento para impressoras 3D a partir da reciclagem de plástico. Para isso, adota-se o método de Design Science Research e ferramentas como cartões de insight. São desenvolvidos dois protótipos: PSS-A, composto por uma filetadora e uma extrusora de baixo custo para contextos de recursos limitados; PSS-B, com equipamentos mais robustos e maior capacidade produtiva. Os resultados indicam que ambos PSS são tecnicamente viáveis, porém adequados a contextos distintos. O PSS-A se destaca pela simplicidade, baixo custo de implementação e maior aderência a ambientes educacionais, enquanto o PSS-B apresenta maior controle do processo e produtividade, demandando investimentos mais elevados. A análise de ambos reforça o PSS como estratégia para reciclar o PET de forma integrada com manufatura aditiva. Pesquisas futuras devem incluir atualizações na parte elétrica da extrusora do PSS-A, testes de novas blendas para o PSS-B, e análises da qualidade do filamento produzido e os impactos da reciclagem de PET associada à manufatura aditiva.

Palavras-chave: Produto tecnológico. Reciclagem de PET. Impressora 3D. Fabricação digital. Sustentabilidade.

¹ Trabalho aprovado no 45º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), que ocorreu de 14 a 17 de outubro de 2025 em Natal, RN.

Abstract: The growing generation of municipal solid waste, especially plastics such as Polyethylene Terephthalate (PET), highlights the need for solutions that integrate environmental sustainability, economic viability, and educational value. In this context, this study aims to develop a Product–Service System (PSS) for producing 3D-printing filament from recycled plastic. To achieve this, the Design Science Research method is adopted, along with tools such as insight cards. Two prototypes are developed: PSS-A, composed of a low-cost filament cutter and extruder designed for resource-constrained contexts; and PSS-B, which robust equipment and greater production capacity. The results indicate that both PSS are technically feasible but suitable for different contexts. PSS-A stands out for its simplicity, low implementation cost, and alignment with educational environments, while PSS-B offers greater process control and productivity, though it requires higher investment. The analysis of both prototypes reinforces the potential of PSS as a strategy for recycling PET in an integrated manner with additive manufacturing. Future research should include upgrades to the electrical system of the PSS-A extruder, testing of new material blends for PSS-B, and assessments of filament quality and the impacts of PET recycling when associated with additive manufacturing.

Keywords: Technological product. PET recycling. 3D printer. Digital fabrication. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está fortemente associada ao crescimento populacional, aos hábitos de consumo e ao avanço tecnológico. Azevedo *et al.* (2024) aponta que a média mundial de geração de RSU é de aproximadamente 0,74 kg por pessoa ao dia. Enquanto isso, de acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2024), estima-se que em 2023 houve a produção de 81 milhões de toneladas de RSU no Brasil, correspondendo a aproximadamente 1,09 kg por pessoa ao dia. De acordo com o mesmo documento, apesar de certos avanços, 6,6% dos RSU não são coletados e mais de 41% ainda recebem destinação ambientalmente inadequada, como lixões ou queima, gerando riscos ao meio ambiente e à saúde pública.

Materiais plásticos se destacam dentre os principais RSU, especialmente o Polietileno Tereftalato (PET), em função de sua ampla aplicabilidade e versatilidade no uso de embalagens e outros produtos industriais, o que têm impulsionado significativamente o aumento de sua produção (De Assis *et al.*, 2020; Freitas *et al.*, 2023; Melo e Watanabe, 2022). Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, UNEP (2018a), mais de 1 milhão de garrafas plásticas são compradas por minuto no mundo, e menos de 50% é coletado para reciclagem. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico, Abiplast (2022), o PET é o 6º plástico mais consumido no Brasil conforme dados de 2019, o que correspondendo a 8,5% da produção nacional. Quando não é reciclado, e é enviado a aterros sanitários, esse

plástico pode levar até mil anos para se decompor e liberar substâncias potencialmente tóxicas no solo e na água (UNEP, 2018b). Diante desse quadro, De Souza *et al.* (2021) destacam a reciclagem como estratégia central para mitigar os impactos ambientais causados por esse tipo de resíduo.

Neste contexto, surgem no Brasil iniciativas como o projeto Rocinha + Sustentável, que promove o empreendedorismo entre moradores da comunidade por meio da reciclagem de resíduos plásticos, convertidos em produtos como chaveiros, skates e armações de óculos (NEAM PUC-Rio, 2022). Outra iniciativa relevante é o projeto de Façanha (2025), que transforma tampas plásticas em peças de joalheria contemporânea, por meio de processos simples, agregando valor aos resíduos e contribuindo para a educação ambiental, a economia criativa e a sustentabilidade. Pesquisas científicas também abordam a temática da reciclagem do PET em novos produtos, tais como no projeto de Mancini, Bezerra e Zanin (2007), que utiliza garrafas PET moídas para criar copos através da injeção em moldes. Já Ferreira (2016) propõe a reciclagem de garrafas PET para a fabricação de fibras têxteis, utilizando processos industriais como trituração, extrusão e fiação para obter tecidos e produtos de vestuário sustentáveis.

Iniciativas de reciclagem do PET ganham relevância prática também no ambiente educacional em função do avanço da cultura *maker* em escolas, ampliando a demanda por materiais recicláveis e sustentáveis, como os filamentos utilizados nas impressoras 3D (Duque *et al.*, 2023). Por exemplo, no estado do Rio de Janeiro, em 2022, inicia-se a implementação do projeto Salas Maker, desenvolvido pela Secretaria de Estado de Educação (SEEDUC-RJ) como um esforço concreto na adoção de novas abordagens pedagógicas com o uso de tecnologias digitais e de fabricação digital por meio de impressoras 3D (ADERJ, 2021). No entanto, a iniciativa carece de um planejamento a longo prazo para os insumos, especialmente os filamentos necessários à produção dos projetos. Em âmbito federal, a ação é complementada pelo programa Rede Maker, promovido pelo Ministério da Educação, que visa fomentar a aprendizagem baseada na experimentação e no fazer (BRASIL, 2025).

Tais iniciativas de reciclagem do PET envolvem ações integradas envolvendo uma parte com foco no produto e outra com foco no serviço, o que se alinha com o conceito de Sistema Produto-Serviço (PSS). Conforme destacado por Reim *et al.*

(2015), o PSS é caracterizado por um conjunto integrado de produtos e serviços que atendem conjuntamente às necessidades dos usuários de forma eficiente sendo assim podendo otimizar o uso de recursos e promovendo benefícios econômicos, sociais e ambientais. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um PSS para a produção de filamento para impressoras 3D a partir da reciclagem de plástico. O método de Design Science Research (DSR) é adotado por ser considerado adequado para pesquisas aplicadas em engenharia e *design*, combinando rigor científico e relevância prática, permitindo o desenvolvimento de soluções que respondam a problemas reais (Bagni *et al.*, 2025; Gauss *et al.*, 2025). Os resultados dessa pesquisa devem contribuir para o avanço de soluções sustentáveis no uso da manufatura aditiva, com viabilidade técnica, econômica e educacional de diferentes tipos de PSS aplicados à reciclagem de PET.

O artigo está organizado em cinco seções. A primeira apresenta a contextualização e o objetivo da pesquisa. A segunda seção reúne o referencial teórico e técnico sobre reciclagem de PET e impressão 3D. A terceira seção descreve os procedimentos metodológicos. A quarta seção expõe os resultados obtidos em cada etapa, desde a coleta de dados até o desenvolvimento e os testes dos protótipos, incluindo a análise de custos. Por fim, a quinta seção apresenta as conclusões e as sugestões de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E TÉCNICO SOBRE RECICLAGEM DE PET PARA PRODUÇÃO DE FILAMENTO DE IMPRESSORA 3D

Al-Sabagh *et al.* (2016) indicam que a reciclagem de PET envolve processos sobre rotas mecânicas e químicas, sendo a primeira a mais amplamente aplicada em escala industrial. Os autores argumentam que na reciclagem mecânica, as embalagens pós-consumo passam por etapas de triagem, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento por fusão e extrusão, possibilitando a reutilização do material, embora com possível degradação de suas propriedades após sucessivos ciclos. Ainda segundo tais autores, já a reciclagem química baseia-se na despolimerização do PET por métodos como hidrólise, glicólise e metanólise, permitindo a recuperação de monômeros ou intermediários químicos com maior valor

agregado, apesar da maior complexidade operacional. Dessa forma, a adoção dessas rotas contribui para a redução de resíduos plásticos e para o aproveitamento do PET como matéria-prima reciclada (Al-Sabagh *et al.*, 2016).

Nesse contexto de valorização do PET reciclado, um estudo recente aponta que a transformação desse material em filamentos para impressão 3D constitui uma aplicação tecnicamente viável e potencialmente econômica, ao reduzir, ao longo do tempo, os custos associados à aquisição de insumos, ainda que demande investimento inicial em equipamentos como extrusoras e trituradores (Do Nascimento *et al.*, 2025). Contudo, esse mesmo estudo destaca que a extrusão em pequena escala de PET pós-consumo apresenta limitações relacionadas ao controle de temperatura e à estabilidade térmica, fatores que afetam a homogeneidade da fusão e a qualidade do filamento produzido. Ainda assim, os resultados obtidos indicam caminhos para o aprimoramento de parâmetros operacionais e soluções construtivas voltadas à reciclagem descentralizada do material.

Além das limitações térmicas, a complexidade do reprocessamento do PET é ampliada por outros fatores. Bustos Seibert *et al.* (2022) destacam a umidade como um elemento crítico, pois a presença de água durante a extrusão favorece a degradação hidrolítica e térmica, reduzindo a viscosidade e a resistência mecânica do material, o que torna a secagem prévia do PET essencial. Mesmo com o controle desses parâmetros, Nikam *et al.* (2024) apontam desafios adicionais, como a contaminação por rótulos e adesivos e a dificuldade em manter o diâmetro constante do filamento durante a extrusão e a bobinagem, limitando sua padronização.

Apesar desses desafios, o potencial do PET reciclado é amplamente reconhecido. Exconde *et al.* (2019), por meio do método ELECTRE, identificaram o PET reciclado como um dos materiais mais adequados para filamentos de impressão 3D em termos de resistência à tração e custo. De forma convergente, Bustos Seibert *et al.* (2022) observaram que, embora mais suscetível à degradação, o PET reciclado pode apresentar resistência à tração superior à de filamentos comerciais de PETG, desde que parâmetros críticos, como secagem e controle dimensional, sejam rigorosamente monitorados.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota o método de *Design Science Research* (DSR) a partir das perspectivas de Peffers *et al.* (2007), sintetizado em seis passos: (i) identificação do problema, (ii) definição de objetivos, (iii) desenvolvimento do artefato, (iv) demonstração e testes, (v) avaliação, (vi) comunicação dos resultados.

O passo de identificação do problema é executado no período de março de 2023 a março de 2024 a partir de entrevistas com dois professores e trinta alunos que usam a sala *maker* do Colégio Estadual Professor Mendes de Moraes, localizado no Rio de Janeiro e que compartilharam suas percepções sobre os desafios enfrentados nos espaços *maker*. Tais percepções são complementadas por esforços de contextualização científica e prática sobre o assunto, o que é apresentado nas seções anteriores desse artigo.

O passo de definição de objetivos é alcançado com a organização e sintetização de tais dados no formato de cartões de insight – seguindo o formato de Vianna *et al.* (2008). Tais cartões de insight ajudam a destacar os elementos mais relevantes e definir de maneira clara os princípios de *design* a serem considerados nos próximos passos. Esses princípios de *design* são obtidos a partir da organização dos cartões de *insight* no formato de um diagrama de afinidades, o que consiste no agrupamento dos cartões de insight de forma temática - seguindo recomendações definidas também por Vianna *et al.* (2008).

O passo de desenvolvimento do artefato parte de reflexões e pensamentos sobre propostas concebidas por uma equipe interdisciplinar que decide seguir com o desenvolvimento de dois artefatos, denominadas Protótipo PSS-A e Protótipo PSS-B. O PSS-A é então desenvolvido por uma equipe com quatro graduandos de Engenharia de Produção (EP), Design e áreas afins e uma mestranda em EP, todos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), membros do laboratório Centro Avançado em Sustentabilidade, Ecossistemas Locais e Governança (Casulo) e integrantes de projeto de extensão nos temas de desenvolvimento de produtos de baixo custo, fabricação digital (FD) e reciclagem de plásticos. O Protótipo PSS-B é desenvolvido por uma equipe com quatro estudantes de graduação em EP da Universidade Federal do Paraná (UFPR), vinculados a um projeto de extensão e um

projeto de iniciação científica do Laboratório de Gestão de Resíduos e Tecnologias Sustentáveis (LabGERTS-UFPR). Ambas as equipes se apoiam em técnicas de brainstorming e elaboração de esboços para explorar alternativas e gerar modelos iniciais das soluções propostas.

O passo de demonstração e testes do Protótipo PSS-A é realizado em janeiro de 2024 a partir de ensaios em laboratório com alunos de graduação para avaliar os protótipos e coletar feedback iniciais sobre pontos fortes e possibilidades de aprimoramento. Os testes são ampliados em março de 2024, sendo realizados juntos a uma professora do ensino básico e trinta alunos do primeiro ano do ensino médio da escola parceira. O Protótipo PSS-B é testado ainda em 2023 pela própria equipe de desenvolvimento, inicialmente em ensaios no laboratório no LabGERTS-UFPR, a fim de verificar o funcionamento dos equipamentos, identificar limitações operacionais e registrar ajustes no processo de extrusão. Em 2024 e 2025, os testes foram ampliados para incluir as etapas de trituração, mistura e extrusão do material, permitindo a avaliação integrada do sistema e analisar a regularidade do filamento produzido.

O passo de avaliação é então realizado a partir das análises de custos do filamento produzido e dos parâmetros técnicos de produção e impressão dos Protótipos PSS-A e PSS-B utilizando a fórmula a seguir.

$$C_{kg} \left(\frac{C_m}{V_u \times P} \right) + \left(\frac{C_e}{P} \right) + C_{mp}$$

- C_{kg} : Custo total por quilograma de filamento produzido;
- C_m : Custo total da máquina;
- V_u : Vida útil da máquina em horas;
- P : Produção de filamento por hora (em kg/h);
- C_e : Custo de energia por hora de operação;
- C_{mp} : Custo da matéria-prima por quilograma.

O passo final, de comunicação dos resultados, se dá pela apresentação dos resultados nesse artigo e no registro da propriedade intelectual no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). A Figura 1 apresenta toda a estrutura metodológica de passos adotados nessa pesquisa.

Figura 1 – Estruturação dos procedimentos metodológicos da presente pesquisa



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

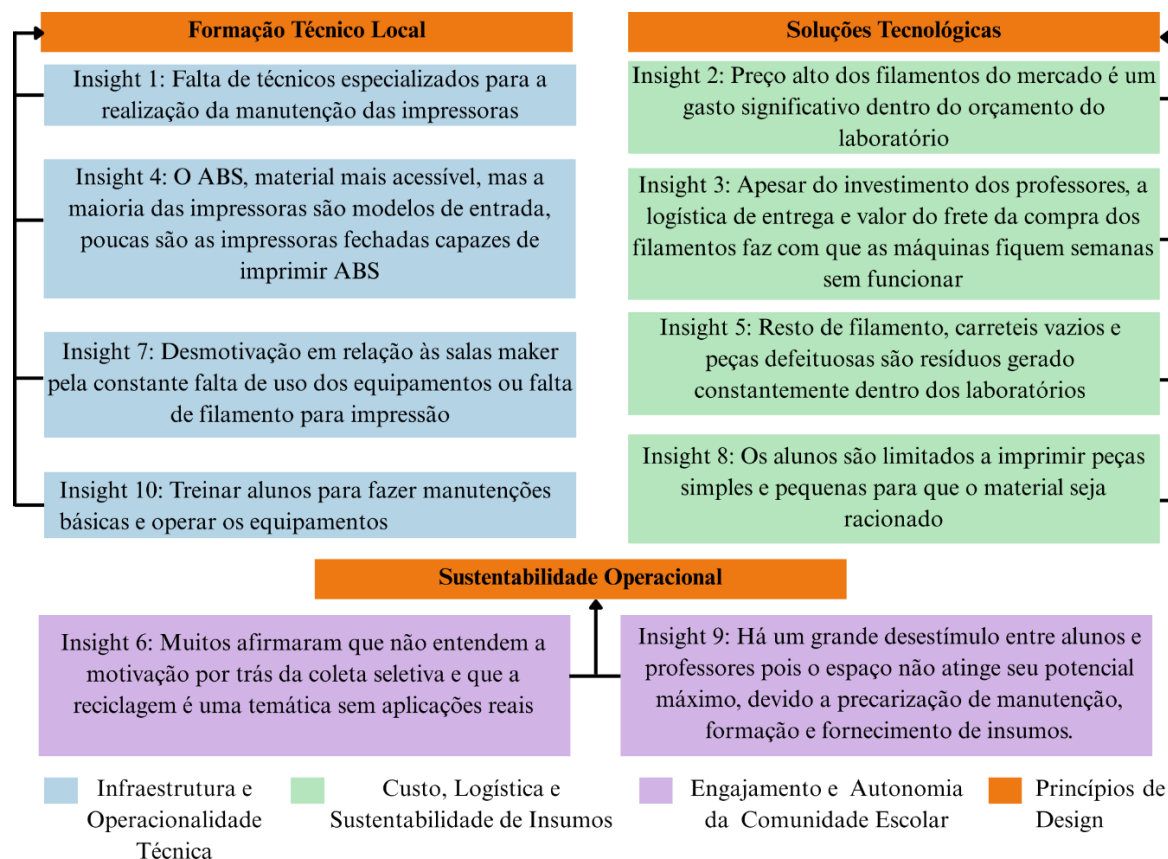
4. RESULTADOS

4.1. Identificação do Problema e Definição de Objetivos

O resultado dos passos de identificação do problema e definição de objetivos é materializado na definição de dez cartões de *insight*, construídos a partir de entrevistas com professores e estudantes e dos referenciais técnicos e científicos sobre o tema – apresentados nas duas primeiras seções do presente artigo. Esses cartões sintetizam as principais dificuldades relacionadas à manutenção, operação e sustentabilidade do uso de impressoras 3D no ambiente educacional. A Figura 2 apresenta os cartões organizados em um diagrama de afinidades, agrupados em três princípios de design: Formação Técnica Local, Soluções Tecnológicas e

Sustentabilidade Operacional. Tais princípios orientam o desenvolvimento de soluções capazes de assegurar o funcionamento contínuo, economicamente viável e pedagogicamente relevante das *salas maker* das escolas de ensino básico e de laboratórios universitários.

Figura 2 – Diagrama de afinidade



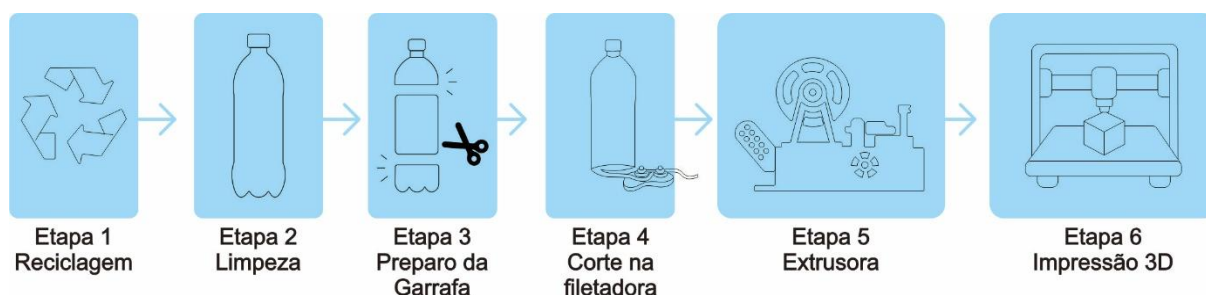
Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

4.2. Protótipo PSS-A

Considerando as diferentes formas de reciclagem de plástico e produção de filamento indicadas na Seção 2 do presente artigo, o protótipo de PSS-A é desenvolvido sem a utilização de uma trituradora de plástico em função de seu elevado custo de aquisição e manutenção, o que é inadequado para o contexto de salas *maker* em escolas do ensino básico. Com foco em uma solução acessível a contextos com recursos limitados, é definido um fluxo simplificado que considera

etapas de reciclagem de garrafas PET, limpeza e preparo das garrafas (i.e., retiradas das partes de fundo das garrafas PET), seguida pelo seu corte em tiras com auxílio de uma filetadora, processamento dessas tiras em filamento, e sua utilização em impressoras 3D. A Figura 3 apresenta esse fluxo do PSS-A, considerando que as três primeiras etapas possuem baixa complexidade e podem ser realizadas pelas escolas sem custos adicionais, e com as próximas subseções detalhando o desenvolvimento de um filetador para a etapa 4 e de uma extrusora para a etapa 5, e que as escolas já possuem as impressoras 3D em suas salas *maker*.

Figura 3 – Estrutura de etapas do PSS-A



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

4.2.1. Filetador

Durante o processo de desenvolvimento do PSS-A são concebidos diferentes modelos de filetadora, que são ajustados e refinados a fim de garantir bons resultados de desempenho, ergonomia e durabilidade da ferramenta. A Figura 4 apresenta a ilustração dos modelos 01, 02 e 03. Com base no modelo 01, são desenvolvidas duas novas versões para aprimorar a eficiência de corte das garrafas PET e a durabilidade do equipamento. No modelo 02, os pinos são substituídos por parafusos M8, aumentando a robustez estrutural. No modelo 03 são efetuados aprimoramentos ergonômicos, com melhor pega, funcionalidade e menor atrito durante a filetagem.

Figura 4 – Respectivamente os modelos 01, 02 e 03



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

Após as etapas de reciclagem das garrafas PET, sua limpeza e retirada do rótulo, seguida pelo corte da extremidade inferior, é então iniciada a etapa 4 apresentada na Figura 4. A Figura 5 ilustra essa etapa, que se inicia com uma borda da garrafa PET sendo inserida na filetadora, entre os discos de corte. Em seguida, a garrafa é girada manualmente, utilizando o corpo como apoio, até a formação de uma tira contínua. O filete obtido é enrolado em um carretel para armazenamento, enquanto os resíduos restantes podem ser descartados ou reaproveitados.

Figura 5 – Etapa 4, corte com a filetadora no PSS-A



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025)

4.2.2. Extrusora

O desenvolvimento da extrusora se inicia com a análise de equipamentos similares disponíveis no mercado, etapa voltada a identificar referências de menor custo. Esse levantamento evidencia que as extrusoras comerciais apresentam valores elevados, reforçando a necessidade de alternativas acessíveis baseadas em fabricação em impressora 3D do tipo *Deposition Modeling Prototype* (FDM). Um exemplo é proposto Tylman Design (2022), em projeto ilustrado na Figura 6 e que possui construção simplificada, baixo custo de produção e uso de componentes de

fácil obtenção, características alinhadas às metas de viabilidade técnica e econômica deste trabalho.

Figura 6 – Modelo da extrusora desenvolvido por Tylman Design



Fonte: Tylman Design (2022).

Tomando esse modelo como base, a equipe decide por algumas adaptações em certos componentes que não se mostram adequados à presente proposta do PSS-A. Por exemplo, testes iniciais evidenciaram a necessidade de remover a filetadora acoplada. Quando fixada diretamente à estrutura da extrusora, o conjunto de filetadora e extrusora apresenta certas dificuldades em realizar as duas operações de forma contínua e eficiente. Mesmo com essa limitação, o sistema se mostra funcional para o objetivo central de extrudar tiras de PET e produzir o filamento, o que direciona a separação das duas operações com a filetação realizada com a filetadora desenvolvida e apresentada na subseção anterior e a extrusão com o restante da estrutura do modelo de referência de extrusora de Tylman *Design* (2022).

Com a realização de novos ensaios apenas da parte de extrusora, a equipe observa que o contato direto entre o bloco metálico de aquecimento e o suporte impresso em Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) causa deformações na base da extrusora devido às altas temperaturas exigidas para processar o PET, aproximadamente 240°C. Para solucionar esse problema, a equipe decide por inserir uma placa de madeira entre o suporte em L e a base da extrusora. Essa modificação se mostra eficaz, já que a madeira possui baixa condutividade térmica e atua como isolante, protegendo o conjunto contra danos por calor excessivo. Além disso, a

equipe decide por ajustar o ângulo de extrusão. No modelo original, o filamento passa por uma guia, mas a presente proposta considera o direcionamento do filamento diretamente para o carretel, também contribui para redução da deformação na estrutura de suporte, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Alterações na guia da extrusora desenvolvida no PSS-A



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025)

Com o resultado de desenvolvimento da extrusora, a etapa 5 do PSS-A pode ser realizada com a produção do filamento a partir das tiras de garrafa PET obtidas com a filetação na etapa 4, enrolando manualmente o filamento em um carretel vazio. Por fim, conforme a estrutura de etapas do PSS-A na Figura 3, a etapa 6 pode ser realizada com o uso do filamento em impressora 3D das salas *maker* das escolas de ensino básico.

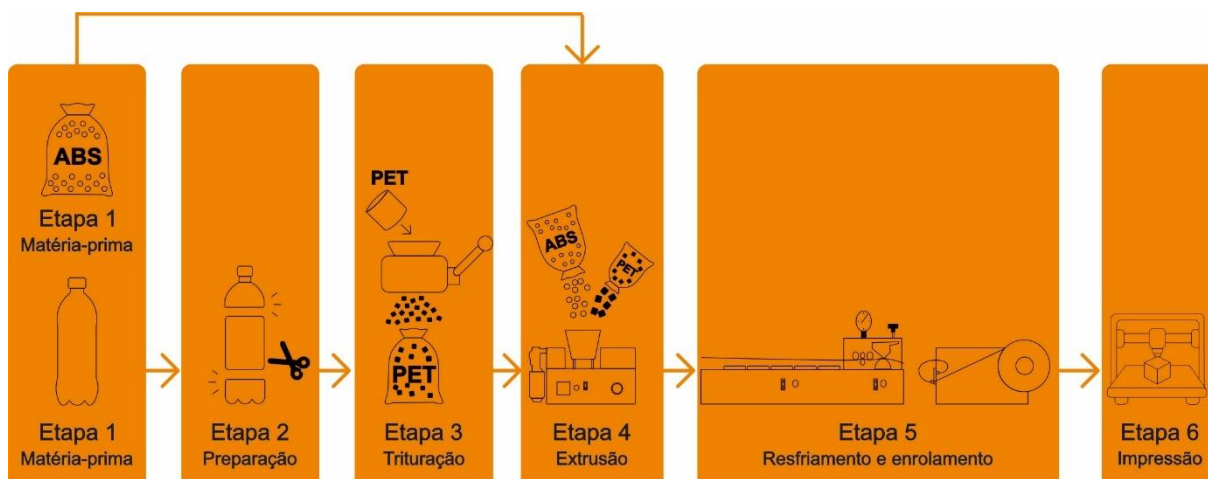
4.3. Protótipo do PSS-B

Considerando as diferentes formas de reciclagem de plástico e produção de filamento indicadas na Seção 2 do presente artigo, o protótipo de PSS-B considera a possibilidade de uso de uma trituradora, considerando cenários de processamento de PET em ambientes com maior disponibilidade de recursos. Essa versão avança em direção a um sistema mais robusto, permitindo maior produtividade. O PSS-B considera uma sequência de etapas ilustrada na Figura 8 e consiste em um fluxo integrado de coleta e compra de material, preparo, trituração, mistura, extrusão do PET pós-consumo e impressão, apoiado por um conjunto ampliado de equipamentos

industriais, como trituradora, extrusora comercial, sistemas de resfriamento, tração e bobinagem, visando maior controle do processo produtivo e aumento da capacidade de produção de filamento para impressão 3D.

A partir dessa configuração de processo foram planejados e realizados os ensaios de extrusão, iniciados com a utilização de PET pós-consumo puro. No entanto, essa primeira tentativa foi interrompida devido ao travamento da rosca. Diante dessa limitação, incorporou-se polímero virgem de ABS aos testes, inicialmente com 20% de PET reciclado e 80% de pellets de ABS, proporção que apresentou bom escoamento e eliminou os entupimentos. Com base nesse resultado, optou-se por avaliar uma composição intermediária, com maior participação de PET pós-uso, buscando um equilíbrio entre desempenho do processo e aumento do aproveitamento de material reciclado.

Figura 8 – Etapas PSS-B



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

4.4 Avaliação e Comunicação

4.4.1 Análise técnica do protótipo PSS-A

As impressões com o filamento reciclado foram realizadas em uma impressora Creality Ender 3 V3 SE, utilizando *nozzle* de 0,4 mm e fatiamento no *software* OrcaSlicer (v. 2.3.0), a partir do perfil base *Generic* PETG, ajustado manualmente.

Adotou-se altura de camada de 0,2 mm e fluxo de extrusão de 135%, compensando a estrutura oca do filamento. A temperatura do bico foi fixada em 255 °C, com mesa aquecida a 80 °C na primeira camada e 75 °C nas subsequentes. O resfriamento variou entre 20% e 40%, conforme o tempo de camada. A retração foi configurada em 1,8 mm a 50 mm/s, com *Z-hop* de 0,5 mm, visando minimizar *stringing*. As velocidades de impressão variaram entre 20 mm/s na primeira camada e até 70 mm/s no preenchimento, com acelerações reduzidas para paredes externas, garantindo melhor qualidade dimensional e adesão entre camadas.

O material apresentou excelente aderência à superfície PEI, dispensando brim ou adesivos. A temperatura de trabalho foi definida a partir de um teste incremental de fusão, no qual a fluidez adequada foi observada a 255 °C, valor adotado nos ensaios.

4.4.2. Análise do custo de desenvolvimento da filetadora e da extrusora do Protótipo PSS-A

Os custos de desenvolvimento do PSS-A são apresentados na Tabela 1. optou-se pelo uso de filamento ABS, custando 69,00 reais, com um custo de energia de 0,842 kWh (quilowatt-hora) para a impressão das peças dos modelos, devido à sua boa resistência mecânica e à estabilidade térmica, características adequadas para a produção de componentes estruturais.

Tabela 1- Custo de impressão das peças

Item	Quant. de peças	Quant. de material em g.	Custo filamento	Tempo de impressão	Custo de energia	Custo Total
Suporte lateral e base	3	23	R\$ 1,58	1h 21min	R\$ 0,09	R\$ 1,67
Base inferior esquerda	1	98	R\$ 6,75	6h 50 min	R\$ 0,56	R\$ 7,31
Base inferior direita	1	152	R\$ 10,47	9h 8 min	R\$ 0,86	R\$ 11,33
Porca martelo T	30	39	R\$ 2,69	2h 42min	R\$ 0,19	R\$ 2,88
Alça da base + Enrolador	2	47	R\$ 3,24	2h 47 min	R\$ 0,19	R\$ 3,43
Placa do motor + Placa de rolamento	2	58	R\$ 4,00	3h 19min	R\$ 0,28	R\$ 4,28

Anel espaçador 1 + anel espaçador 2 + 2x arruelas + parte traseira do motor + trava do motor 1 + trava do motor 2 + bloco de aquecimento	9	20	R\$ 1,38	1h 21 min	R\$ 0,09	R\$ 1,47
Tampa 1 + tampa 2	2	46	R\$ 3,17	2h 54 min	R\$ 0,19	R\$ 3,36
Cooler + tampa do motor + parte traseira do motor	3	60	R\$ 4,13	3h 57 min	R\$ 0,09	R\$ 4,22
Conector de energia + tampa do terminal + suporte do terminal	3	16	R\$ 1,10	1h 3min	R\$ 0,09	R\$ 1,19
engrenagem 17 + engrenagem 55 + lateral do carretel	3	66	R\$ 4,55	3h 55min	R\$ 0,19	R\$ 4,74
Suporte esquerdo (arruela 1 + arruela 2 + porca)	4	125	R\$ 8,61	7h 32 min	R\$ 0,65	R\$ 9,26
Suporte direito	1	25	R\$ 1,72	1h 19min	R\$ 0,09	R\$ 1,81
Filetadora	1	170	R\$ 11,73	5h	R\$0.63	
					Total	R\$ 68,69

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

Já a Tabela 2 apresenta os custos dos componentes eletrônicos e mecânicos necessários para o funcionamento da extrusora e da filetadora.

Tabela 2 - Orçamento parte eletrônica e mecânica

Componente	Qtd.	Preço unitário	Total
Rolamento 6810 zz	2	R\$ 66,42	R\$ 104,41
Controlador de temperatura	1	R\$ 59,29	R\$ 59,29
Motor de engrenagem dc 12v 30rpm	1	R\$ 103,79	R\$ 101,42
Bloco aquecedor vulcano	2	R\$ 9,90	R\$ 19,80
Capa de silicone para isolamento bloco aquecedor vulcano	2	R\$ 19,85	R\$ 39,70
Bico para vulcano 1.0 mm	4	R\$ 7,85	R\$ 31,40
Cartucho aquecedor de alta potência - 12v	3	R\$ 10,90	R\$ 32,70
Cooler silencioso 12v	1	R\$ 16,45	R\$ 16,45
Mini controlador de velocidade PN35	1	R\$ 14,16	R\$ 14,16
Wal TP-01A sonda sensor de temperatura de fio tipo K termopar	2	R\$ 12,27	R\$ 24,54
Tomada Ac	1	R\$ 26,10	R\$ 26,10
Rolamento 608 ZZ	4	R\$ 1,80	R\$ 7,20
Fonte chaveada driver mean well Lrs-75-12	1	R\$ 184,98	R\$ 184,98

Parafusos M 5x 10	33	R\$ 0,31	R\$ 10,23
Parafusos M 8x 40	3	R\$ 0,52	R\$ 1,56
Suporte em L	1	R\$ 18,49	R\$ 18,49
Arruela M5	4	R\$ 0,39	R\$ 1,56
Arruela M8	2	R\$ 0,40	R\$ 0,80
Porca M8	2	R\$ 0,50	R\$ 1,00
Total			R\$ 695,79

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

Com base nos valores apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2, verifica-se que o custo total para a construção da extrusora e da filetadora foi de R\$ 764,48, resultado da soma de R\$ 68,69 referentes à impressão das peças (Tabela 1) e R\$ 695,79 correspondentes aos componentes eletrônicos (Tabela 2). Esse investimento é muito inferior ao preço de extrusoras industriais disponíveis comercialmente, que costuma ficar em torno de R\$ 6.000,00. Esse contraste reforça a viabilidade do PSS-A como uma solução funcional e economicamente acessível para a produção de filamento reciclado, sobretudo em contextos educacionais e em laboratórios de FD com orçamento reduzido. Com esse valor, foi possível obter um equipamento capaz de cortar garrafas PET e gerar filamento compatível com sistemas FDM.

4.4.3. Análise do custo do filamento produzido Protótipo PSS-A

A seguir, apresenta-se a estimativa de custos referente à produção do filamento reciclado obtido pela extrusora PSS-A. Para o cálculo, foram considerados o valor necessário para a construção do equipamento, o consumo de energia durante a extrusão e o uso de PET reciclado como insumo. Essa análise permite determinar o custo aproximado por quilograma de filamento produzido.

Sendo o custo de energia, $C_e = 0,15 \times 0,842 = R\$ 0,1263/h$ e custo de energia por kg de filamento, $\frac{0,1263}{0,0324} \approx R\$3,90$, sendo o total de filamento produzido na vida útil, $5000 \times 0,0324 = 162$ kg, com um custo de máquina por kg $\frac{764,48}{162} \approx R\$4,72$, sendo assim o custo total por kg é $C_{kg} = 4,72 + 3,90 + 0 = R\$8,62$.

Com uma taxa de produção de 20 gramas a cada 37 minutos, a extrusora apresenta capacidade aproximada de 0,0324 kg/h. De acordo com CapXon (2024),

capacitores eletrolíticos apresentam vida útil nominal de 5000 horas, e, como esses componentes constituem a parte central da fonte de alimentação, essa estimativa foi adotada como base para o cálculo da vida útil do equipamento. Dessa forma, considerando a vida útil da fonte de energia de 5000 horas, estima-se a produção de 162 kg de filamento reciclado. Diante de um custo total de construção de R\$ 764,48, o custo de amortização resulta em R\$ 4,72 por quilograma.

O consumo elétrico do equipamento é de 150 W, gerando um custo de R\$ 0,1263 por hora, com tarifa de R\$ 0,842/kWh. Assim, o custo de energia por quilograma produzido é de R\$ 3,90. Como o PET utilizado é proveniente de resíduos descartados, sem custo de aquisição, o custo total estimado para a produção de 1 kg de filamento reciclado é de R\$ 8,62, valor significativamente inferior ao preço médio de mercado, estimado em R\$ 96,51 por quilograma.

4.4.4. Avaliação técnica do Protótipo PSS-B

Os testes iniciais apresentaram desempenho adequado; contudo, a falta de uniformidade no diâmetro do filamento impediu a finalização da impressão, já que em determinado momento ele se tornou grosso demais ao ponto de travar na extrusora da impressora. A qualidade do material impresso foi analisada e apesar de levemente quebradiço, foi satisfatório.

Com base nesses primeiros testes, as impressões com o filamento do PSS-B foram realizadas em uma impressora Creality Ender-3 S1 Pro, com *nozzle* de 0,4 mm, utilizando o *software* Ultimaker Cura para o fatiamento. O perfil base adotado foi o *Generic* PET, com ajustes manuais para adequar os parâmetros às características do filamento produzido a partir de PET reciclado e pellets ABS. Definiu-se altura de camada de 0,2 mm e fluxo de extrusão de 95%.

Em sequência, foi desenvolvido um novo lote com 40% de PET reciclado e 60% de plástico ABS virgem. Sendo assim a temperatura do bico foi estabelecida em 245 °C, enquanto a mesa aquecida operou a 110. As velocidades de impressão variaram de 20 mm/s na primeira camada até 50 mm/s nas regiões de preenchimento, com acelerações reduzidas nas paredes externas para garantir melhor acabamento superficial e estabilidade dimensional.

4.4.5. Análise do custo do filamento produzido Protótipo PSS-B

A contabilidade dos custos foi dividida em duas categorias: materiais e maquinários. Os valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de custos

Tipo	Item	Valor	
Insumo	Pellets de ABS	R\$	41,13
	Garrafas PET	R\$	-
	Máquina trituradora	R\$	3.000,00
Maquinários	Triturador FTR1:	R\$	4.545,30
	Extrusora Filmaq3D CV	R\$	6.008,00
	Resfriadora e tracionadora	R\$	4.340,00
	Enroladora de filamentos FE1	R\$	2.986,60
Total		R\$	20.921,03

Fonte: Desenvolvido pelos autores (2025).

Dessa forma, apresenta-se a estimativa de custos referente à produção do filamento reciclado obtido pela sistema PSS-B. No cálculo foram considerados os valores necessário para a construção do sistema de extrusão, o consumo de energia durante o processo e a mistura do PET reciclado e ABS como insumo. Essa análise permite determinar o custo aproximado por quilograma de filamento produzido.

Sendo a taxa de produção de 350 gramas a cada 60 minutos, a capacidade da extrusora é de 0,35 kg/h. Considerando uma vida útil estimada de 5.000 horas, o total de filamento produzido ao longo de sua vida útil é igual a $5.000 \times 0,35 = 1.750$ kg.

Diante de um custo total de R\$ 17.879,90 para a aquisição dos equipamentos do sistema de reciclagem, o custo de máquina por quilograma de filamento é obtido pela razão entre o investimento total e a quantidade total produzida ao longo da vida útil, resultando em $\frac{17.879,90}{1.750} \approx R\$ 10,22 /Kg$

O consumo elétrico do equipamento é de 2.590 W (2,59 kW) e, considerando uma tarifa de R\$ 0,842/kWh, o custo de energia elétrica por hora de operação é calculado como $2,59 \times 0,842 = R\$ 2,18/h$. Assim, o custo de energia por quilograma de filamento produzido é de $\frac{2,18}{0,35} \approx R\$ 6,23 /Kg$.

Como o material utilizado consiste em uma mistura de 60% de ABS e 40% de PET reciclado, proveniente de resíduos descartados, o custo de aquisição refere-se apenas à fração de ABS. Considerando o custo de R\$ 41,13/kg do ABS, obtém-se um custo de matéria-prima de $0,6 \times 41,13 = \text{R\$ } 24,68/\text{kg}$.

Dessa forma, o custo total estimado para a produção de 1 kg de filamento reciclado é dado pela soma do custo de amortização da máquina, do custo de energia e do custo de matéria-prima, resultando em $C_{\text{kg}} = 10,22 + 6,23 + 24,68 = \text{R\$ } 41,13/\text{kg}$.

Quando comparado ao valor do quilograma do PETg adquirido no varejo comercial, custando R\$ 96,51, obtém-se uma diferença de R\$ 55,38 entre as duas opções. Essa diferença evidencia que a produção própria do filamento é mais econômica e que, ao longo do tempo, a economia gerada é capaz de compensar o investimento feito no maquinário.

4.4.6 Discussão das diferenças entre Protótipo PSS-A e Protótipo PSS-B

O Quadro 1 sintetiza a comparação entre os protótipos PSS-A e PSS-B, considerando aspectos técnicos, operacionais e econômicos observados na avaliação, o que permite identificar diferenças relevantes entre os sistemas e sua adequação a distintos contextos de uso.

A análise mostra que o PSS-A é uma solução de menor complexidade, formada apenas pela filetadora e pela extrusora desenvolvidas para o projeto, exigindo infraestrutura reduzida, menor investimento e operando com tiras de PET obtidas diretamente das garrafas, sem trituração intermediária. De acordo com Tylman e Dzierżek (2020), esse arranjo é compatível com sistemas simplificados para produção de filamentos a partir de PET reciclado. Já o PSS-B reúne trituradora, extrusora comercial, resfriadora/tracionadora e enroladora de filamentos, permitindo etapas adicionais de preparo do material, porém com maior demanda de capacidade instalada e custos de implementação mais elevados.

Quadro 1 - Comparação entre os Protótipos PSS-A e PSS-B

Categoria	Protótipo PSS-A	Protótipo PSS-B
Composição do sistema	Filetadora e extrusora desenvolvidas no projeto.	Trituradora, triturador manual FTR1, extrusora comercial, resfriadora/tracionadora e enroladora.
Processamento do material	Utiliza tiras de PET obtidas diretamente das garrafas.	Exige PET triturado e, em alguns casos, mistura com ABS.
Infraestrutura necessária	Baixa demanda de espaço e energia.	Maior demanda de espaço, energia e organização do fluxo de trabalho.
Regularidade do filamento	Dependente de um melhor pré-processamento das garrafas e maior prática de uso da filetadora para regularidade do filamento.	Maior regularidade ao utilizar mistura PET/ABS; limitações com PET puro.
Capacidade de processamento	Taxa de produção reduzida.	Taxa de produção superior, condicionada ao uso de blendas.
Aplicabilidade educacional	Adequado para atividades formativas e prototipagem básica.	Adequado para ambientes com maior exigência de produtividade.
Custo de implementação	Aproximadamente R\$ 750,00.	Aproximadamente R\$ 20.921,03.
Aderência ao conceito de PSS	Integra produção, uso e capacitação.	Predominância da dimensão produtiva sobre a de serviços.

Fonte: Os autores (2025).

Do ponto de vista técnico, os resultados mostram que o PSS-A gera filamentos com maior variabilidade dimensional, sobretudo devido ao pré-processamento manual das garrafas e ao grau experiência do usuário na filetagem. Ainda assim, o material pode ser utilizado em impressoras FDM, desde que sejam feitos ajustes no fatiamento. No PSS-B, houve maior regularidade quando o PET foi combinado com ABS, enquanto o uso de PET puro revelou limitações. Dessa forma, o PSS-A é mais adequado a contextos que privilegiam acessibilidade e aprendizagem técnica, ao passo que o PSS-B atende melhor a situações que exigem maior controle de processo e contam com estrutura mais robusta.

Há também diferenças marcantes de custo entre os sistemas. O PSS-A exige investimento inicial reduzido e apresenta custo de produção compatível com ambientes educacionais e laboratórios com orçamento limitado. Já o PSS-B, embora ofereça maior capacidade produtiva anual, demanda valores mais altos de aquisição e manutenção, alongando o tempo de retorno financeiro. Assim, a escolha entre os

dois arranjos depende diretamente das condições de infraestrutura, dos objetivos de uso e da disponibilidade de recursos humanos e financeiros de cada instituição.

Concluindo, a comparação mostra que os dois protótipos atendem as demandas distintas dentro do conceito de PSS. O PSS-A é mais alinhado à formação técnica e à experimentação em ambientes educacionais, facilitando a inserção de práticas de reciclagem e de manufatura aditiva no cotidiano de ensino. Já o PSS-B se configura como um sistema orientado à produção em maior escala, mas dependente de equipamentos industriais e de operação mais complexa. Assim, a análise conjunta dos modelos ajuda a orientar decisões sobre adoção e aperfeiçoamento de sistemas de reciclagem de PET em diferentes contextos institucionais.

4.4.8. Disseminação dos resultados

A etapa final trata da comunicação dos resultados, que ocorre tanto por meio deste artigo quanto pelo encaminhamento do registro de propriedade intelectual do produto desenvolvido ao INPI, garantindo sua devida proteção legal. Assim seguindo, atualmente, apenas a filetadora está em processo de depósito, como modelo de utilidade, na fase da adequação do texto para o processo de depósito. Além disso, no âmbito do laboratório Casulo da UFRJ e do projeto de extensão sobre o tema, estão sendo realizados contatos com escolas públicas do Rio de Janeiro para apoiar a futura adoção do PSS-A proposto nesta pesquisa; e no âmbito do laboratório LabGERTS-UFPR, a equipe deve continuar desenvolvendo atividades de aprimoramento do PSS-B dentro do projeto de extensão em andamento.

5 CONCLUSÃO

A elevada produção global de plásticos, especialmente do PET, constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, dada a grande quantidade de garrafas descartadas e as ainda limitadas taxas de reciclagem. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um PSS para a produção de filamento para impressoras 3D a partir da reciclagem de plástico.

A partir da aplicação da metodologia de DSR, são concebidos e analisados dois protótipos distintos: o PSS-A e o PSS-B. Os resultados demonstram que ambos são

tecnicamente viáveis, porém atendem a demandas e contextos distintos. O PSS-A destaca-se por sua simplicidade, baixo custo de implementação (aproximadamente R\$ 750,00) e forte aderência a contextos educacionais, favorecendo a experimentação, a formação técnica e a autonomia de salas *maker* e laboratórios de FD com recursos limitados. Já o PSS-B apresenta maior capacidade produtiva e melhor controle do processo quando operando com blendas poliméricas, embora exija investimentos significativamente mais elevados e infraestrutura mais robusta, o que amplia o tempo de retorno financeiro.

A comparação entre os dois modelos evidencia que a escolha do sistema mais adequado depende diretamente dos objetivos institucionais, da escala de produção desejada e da disponibilidade de recursos técnicos e financeiros. Enquanto o PSS-A se alinha a propostas pedagógicas e de democratização do acesso à manufatura aditiva, o PSS-B mostra-se mais apropriado para contextos que demandam maior produtividade e controle de processo.

Como contribuições, o estudo apresenta soluções acessíveis para reciclagem de PET aliadas à manufatura aditiva, reforçando o potencial de desenvolvimento de um PSS (qualquer uma das duas opções, PSS-A ou PSS-B) como estratégia para integrar sustentabilidade, educação e tecnologia. Entre as limitações identificadas no PSS-A está a dificuldade de adaptação do processo para produção em grande escala, e, as restrições operacionais do PSS-B com PET puro. Como perspectiva de aprimoramento do PSS-A, destaca-se a possibilidade de substituir a fonte de alimentação de 36V por um modelo de 12V, mais acessível economicamente (custo médio de R\$ 50,00 frente a R\$ 184,90), contribuindo para a redução do custo total do sistema. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem o controle térmico, o isolamento estrutural e a avaliação de novas configurações de materiais, ampliando a robustez e a aplicabilidade dos sistemas desenvolvidos. Para o PSS-B, uma das possibilidades é a seleção de outros materiais para a blenda e investigar diferentes proporções de mistura entre os polímeros empregados. A utilização de materiais mais similares química e estruturalmente, pode favorecer a produção de um insumo mais estável e padronizado, possibilitando testes com maior concentração de PET reciclado no composto, favorecendo a produção de um material mais sustentável. Pesquisas futuras também devem aprofundar análises mais detalhadas sobre o controle do

processo e sobre a qualidade do filamento produzido. Também se planeja investigar de forma sistemática os impactos educacionais, ambientais e econômicos da reciclagem de PET associada à manufatura aditiva, com a disponibilização do PSS-A para professores de escolas públicas através do site do CASULO.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Perfil 2021: As indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. **Abiplast**, 2022.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <https://abrema.org.br/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

ADERJ. **Sala Maker**. ADERJ – Associação dos Diretores de Escolas Públicas do Estado do Rio de Janeiro, 6 jun. 2021. Disponível em: <https://www.aderj.org.br/post/sala-maker>. Acesso em: 17 de abr. de 2025.

AL-SABAGH, A. M.; YEHA, F. Z.; ESHAQ, G.; RABIE, A. M.; ELMETWALLY, A. E. Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 1, p. 53–64, 2016.

BAGNI, G.; GODINHO FILHO, M.; FINNE, M.; THÜRER, M. Design science research in operations management: is there a single type?. **Production Planning & Control**, v. 36, n. 6, p. 789–807, 2025.

BRASIL. Ministério da Educação. “**Rede Maker: o ‘aprender fazendo’ da Rede Federal**”. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mec/pt-br/assuntos/ept/rede-maker-o-2018aprender-fazendo2019-da-rede-federal>. Acesso em: 18 abr. 2025.

BUSTOS SEIBERT, M.; MAZZEI CAPOTE, G. A.; GRUBER, M.; VOLK, Wolfram; OSSWALD, T. A. Manufacturing of a PET Filament from Recycled Material for Material Extrusion (MEX). **Recycling**, v. 7, n. 5, p. 69, set. 2022.

DE ASSIS, M. W. V. DOS SANTOS, T. T. Propriedades químicas, problemas ambientais e reciclagem de plástico: uma revisão de literatura/Chemical properties, environmental problems and plastic recycling: a review. **Jornal Interdisciplinar de Biociências**, v. 5, n. 1, p. 31-37, 2020.

DE SOUZA, M.A.; LIMA, F.d.P.A.; da SILVA, V.Z.; GONÇALVES, J.T. **Lixo zero? Uma pesquisa-ação na co-construção de uma solução territorial para os**

resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado, Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

DO NASCIMENTO, I. T.; DA SILVA, M. E. A.; DOS SANTOS, B. C. FILAMENTO PET RECICLADO PARA IMPRESSÃO 3D: UMA ANÁLISE SUSTENTÁVEL. **South American Development Society Journal**, v. 11, n. 31, p. 196-196, 2025.

DUQUE, R.; FILHO, P.; SOUZA, L.; LIMA, A.; CABRAL, M.; ROZENDO, J.; SILVA, I. A cultura maker: e suas implicações no contexto educacional. 1. ed. Vitória: Editora **Educação Transversal**, 2023.

EXCONDE, M. K. J. E.; CO, Julie A. A.; MANAPAT, J. Z.; MAGDALUYO, E. R., Jr. Materials Selection of 3D Printing Filament and Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in a Redesigned Breadboard. **Procedia CIRP**, v. 84, p. 28-32, 2019.

FAÇANHA, M. T. Infinitude (in)visível: Joias-corpo produzidas com tampas plásticas. 2025. Projeto de Graduação de Design Industrial (Bacharelado em Design Industrial). Escola de Belas Artes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

FREITAS, M. F.; DE MOURA PIRES, M.; BENINCÁ, D. Gestão de resíduos sólidos urbanos: uma revisão sistemática aplicada à realidade brasileira. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 5, p. 2337-2359, 2023.

FERREIRA, R. S. **Reciclagem de garrafas PET na indústria têxtil.** Americana: Faculdade de Tecnologia de Americana – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2016. 41 f. Monografia (Tecnologia em Produção Têxtil).

GAUSS, L.; LACERDA, D. P.; SILUK, J. C.; ROMME, A. G. L. Design science in operations management: a review and synthesis of the literature. **International Journal of Management Reviews**, v. 27, n. 2, p. 221–237, 2025.

MANCINI, S. D.; BEZERRA, Maxwell N.; ZANIN, Maria. Reciclabilidade do PET pós-consumo através de múltiplos ciclos de moldagem por injeção. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 151–155, 2007.

MELO, J.; WATANABE, M. O setor plástico e sustentabilidade: direcionamentos dos artigos científicos na área de Ciências Sociais Aplicadas. RGSN - **Revista Gestão, Sustentabilidade e Negócios**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 151-164, jun. 2022.

NEAM – **Núcleo de Estudos e Ação Mundo da Juventude. Rocinha + Sustentável.** Disponível em: <https://www.neam.puc-rio.br/projetos-e-cursos/rocinha-sustentavel/>. Acesso em: 13 de abr. de 2025.

NIKAM, M.; PAWAR, P.; PATIL, A.; PATIL, A.; MOKAL, K.; JADHAV, S. Sustainable fabrication of 3D printing filament from recycled PET plastic. **Materials Today: Proceedings**, v. 103, p. 115-125, 2024.

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 26, n. 2 (edição especial), e-5758, 2026.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.

REIM, W.; PARIDA, V.; ÖRTQVIST, D. Product–Service Systems (PSS) business models and tactics—a systematic literature review. **Journal of cleaner production**, v. 97, p. 61-75, 2015.

TYLMAN DESIGN. PET-Machine, make Your own 3D printer filament from plastic bottles at home (DIY!). **YouTube**, 09 out. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=WUcZyOWUzcY>. Acesso em: 27 nov. 2025.

TYLMAN, I.; DZIERŻEK, K. Filament for a 3D Printer from Pet Bottles- Simple Machine. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 9, n. 10, p. 1388-1392, out. 2020.

UNEP – **United Nations Environment Programme**. Plastic planet: how tiny plastic particles are polluting our soil. Nairobi: UNEP, 2018b.

UNEP – **United Nations Environment Programme**. Single-use plastics: a roadmap for sustainability. Nairobi: UNEP, 2018a.

Biografia do(s) autor(es)

Thamyres Crystine da Costa Abreu

Formada em Design Industrial pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente é mestranda no Programa de Engenharia de Produção, no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve pesquisas voltadas ao design e à engenharia aplicada à sustentabilidade, com foco em reciclagem de polímeros e uso de fabricação digital em contextos educacionais.

Igor dos Santos Gomes

Formando como técnico em Telecomunicações pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). Graduanda em Design Industrial pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve pesquisas voltadas ao design e à engenharia aplicada à sustentabilidade, com foco em reciclagem de polímeros e uso de fabricação digital em contextos educacionais.

Tássia de Azevedo Diniz

Formada como Técnico em Comunicação Visual Design pelo Senac RJ. Graduanda em Design Industrial pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve pesquisa voltada ao design e à engenharia aplicada à sustentabilidade, com foco em reciclagem de polímeros.

Gustavo Ferreira Soares

Graduando em Engenharia Nuclear pela Universidade Federal do estado Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve pesquisa voltada a engenharia aplicada à sustentabilidade, com foco em reciclagem de polímeros.

Tharcisio Cotta Fontainha

Professor no Programa de Engenharia de Produção, no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve pesquisas na área de gestão, inovação e sustentabilidade, com foco no desenvolvimento de produtos tecnológicos para o contexto de desastres e ajuda humanitária.

Amanda Fernandes Xavier

Professora no Programa de Engenharia de Produção, no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve pesquisas nas áreas de sustentabilidade, governança e inovação, com foco em sistemas de avaliação de eco-inovação, estratégias territoriais e desenvolvimento de cadeias produtivas sustentáveis.

Rafaela Lima da Fonseca

Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Desenvolve atividades nas áreas de manufatura aditiva, reciclagem de materiais poliméricos e sistemas produto-serviço, com foco em processos sustentáveis aplicados à fabricação digital. Participa de projetos de pesquisa e extensão voltados à valorização de resíduos.

Marianna Tamyé Fujiwara Sousa Caetano

Graduanda em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atua em temas relacionados à gestão de resíduos, manufatura aditiva e análise de processos produtivos. Participa de projetos de pesquisa que integram sustentabilidade, desenvolvimento tecnológico e aplicação de metodologias de engenharia voltadas à melhoria de sistemas produtivos.

Luiz Miguel Oliveira Roder

Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Suas áreas de interesse incluem reciclagem de materiais, desenvolvimento de processos para fabricação de filamentos, e avaliação técnica de equipamentos voltados à manufatura aditiva. Participa de projetos de pesquisa e extensão voltados à valorização de resíduos.

Marya Gabryela Pereira

Graduanda em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Desenvolve estudos nas áreas de sustentabilidade, reciclagem de plásticos e desenvolvimento de sistemas para processamento de materiais. Participa de projetos de pesquisa que integram gestão de resíduos e economia circular.

Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani

Doutor em Planejamento Energético e Ambiental pelo Programa de Planejamento Energético (PPE/COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É professor no curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Suas áreas de pesquisa incluem Engenharia da Sustentabilidade, Gestão de Resíduos, Avaliação do Ciclo de Vida e Economia Circular.



Artigo recebido em: 28/11/2025 e aceito para publicação em: 18/04/2025
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v26i2.5758>