

ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE GARRAFAS PARA ENVASE DE ÁGUA MINERAL

STUDY OF THE FEASIBILITY OF REPLACING MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF BOTTLES FOR MINERAL WATER PACKAGING

Vitoria Silva Cavalcanti de Siqueira¹
Rogério Fagundes Leite²

RESUMO

O Brasil descarta anualmente milhões de toneladas de plástico nos mares, mantendo-se entre os dez países que mais realizam descarte inadequado desses resíduos. Apesar de existirem políticas que buscam responsabilizar fabricantes e fornecedores, os impactos ambientais e à saúde persistem, afetando seres vivos. Considerando que as embalagens de bebidas representam grande parte do mercado global de embalagens, avaliado em trilhões de reais, torna-se essencial determinar alternativas mais sustentáveis aos plásticos de origem fóssil, especialmente para essa aplicação. Nesse contexto, a substituição do PET por biopolímeros biodegradáveis, como poli(ácido láctico) PLA e poli(etileno 2,5-furandicarboxilato) PEF, apresenta potencial promissor. Contudo, a literatura disponível ainda é limitada quanto à caracterização quantitativa dos custos de produção unitária de garrafas fabricadas com esses biopolímeros. Apesar disso, algumas indústrias já produzem e comercializam garrafas de PLA e PEF, indicando avanço tecnológico e crescente interesse do setor. Para analisar sua competitividade, este estudo baseou-se em uma ampla pesquisa bibliográfica que incluiu não apenas artigos científicos, mas também relatórios setoriais, legislações, diretrizes técnicas e documentos de órgãos públicos. Esses materiais foram fundamentais para desenvolver equações, critérios de viabilidade e análises visuais. Ambos os materiais demonstraram compatibilidade com processos industriais de moldagem por sopro e estiramento, embora apresentem desafios relacionados à permeabilidade, coloração, parâmetros operacionais e necessidade de upgrades nas linhas de produção. Além disso, a obtenção de matéria-prima ainda representa um fator crítico para redução dos custos das resinas. Assim, a viabilidade apresentada neste trabalho serve como base para novas pesquisas e para o desenvolvimento de linhas de produção de garrafas produzidas a partir de biopolímeros.

Palavras-chave: viabilidade; substituição; PLA; PEF.

ABSTRACT

Brazil discards millions of tons of plastic into the oceans every year, remaining among the ten countries that most improperly dispose of this waste. Although there are policies aimed at holding manufacturers and suppliers accountable, environmental and health impacts persist, affecting living organisms. Considering that beverage packaging represents a large share of the global packaging market—valued in the trillions of reais—it becomes essential to determine

¹ Bacharelanda em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho. 2025

² Doutor do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho. 2025

more sustainable alternatives to fossil-based plastics. In this context, replacing PET with biodegradable biopolymers such as PLA and PEF presents promising potential. However, the available literature is still limited regarding the quantitative characterization of the unit production costs of bottles manufactured with these biopolymers. Even so, some industries already produce and commercialize PLA and PEF bottles, indicating technological progress and growing sector interest. To analyze their competitiveness, this study was based on extensive bibliographic research that included not only scientific articles but also sector reports, legislation, technical guidelines, and documents from public agencies. These materials were essential for developing equations, feasibility criteria, and visual analyses. Both materials demonstrated compatibility with industrial stretch-blow molding processes, although they present challenges related to permeability, coloration, operational parameters, and the need for upgrades in production lines. Additionally, sourcing raw materials remains a critical factor in reducing resin costs. Thus, the feasibility presented in this work serves as a foundation for further research and for the development of production lines for bottles made from biopolymers. **Keywords:** feasibility; substitution; PLA (polylactic acid); PEF (polyethylene furanoate).

INTRODUÇÃO

O mercado¹ mundial de embalagens de consumo em 2024 foi estimado em US\$ 1,76 trilhões, segmentado entre diferentes materiais. Os plásticos (rígidos e flexíveis) representaram cerca de 43,0% das vendas de embalagens nesse ano, seguidos por papel e papelão (37,5%) e materiais metálicos (9,1%). Os plásticos flexíveis, utilizados pela indústria de alimentos e bebidas carbonatadas, apresentaram uma demanda de 23,7% destinadas apenas a bebidas, frente aos principais setores demandantes de embalagens.

No Brasil, aproximadamente R\$ 55,43 bilhões do Valor Bruto de Produção (VBP), representando cerca de 33,4% do VBP total, foram atribuídos à participação de embalagens plásticas em 2024², sendo o VBP o valor monetário total da produção de embalagens antes de quaisquer deduções, como impostos indiretos, depreciação, etc. Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 12.305 sancionada em 2010, complementada pelo decreto nº 12.688/2025 que regulamenta especificamente a logística reversa de

embalagens plásticas, estabeleça metas obrigatórias de reciclagem e diretrizes a fim de responsabilizar fornecedores, fabricantes e importadores quanto ao descarte inadequado de resíduos sólidos pós consumo³, apenas 23,1% das embalagens plásticas são recicladas⁴. Além disso, a baixa eficiência nos processos de reciclagem mecânica pode acarretar perdas de propriedades nos materiais reaproveitados, além de riscos de contaminação biológica ou química, especialmente quando o destino são embalagens alimentícias reutilizadas.⁵

Como consequência direta dessa lacuna entre a relevância econômica do setor e a limitada eficiência na gestão e destinação correta dos resíduos, observam-se impactos ambientais e à saúde associados ao descarte inadequado de resíduos plásticos como, danos significativos à fauna marinha e a milhões de aves todos os anos, por ingestão de plástico⁶. Além disso ocorrem uma série de doenças renais e respiratórias associadas aos gases tóxicos liberados por incineração desses materiais⁷. Paralelamente, os

³ O acesso ao endereço eletrônico da referência é restrito a assinantes da plataforma, razão pelo qual não foi disponibilizado.

⁴ Durante a elaboração do trabalho o endereço eletrônico originalmente utilizado para acessar o documento estava disponível, no entanto, o mesmo foi descontinuado.

microplásticos começam a integrar parte relevante do cotidiano da humanidade, sendo encontrados na água potável, nos alimentos e até mesmo no ar. Estudos⁷ já sugerem efeitos inflamatórios e intervenções no funcionamento dos hormônios naturais, associados a presença de microplásticos. Como se não bastassem os inúmeros impactos ambientais já enfrentados, a atual crise climática é ainda agravada pela produção e incineração de plásticos, que emitem gases poluentes como Dióxido de Carbono (CO₂), intensificando o efeito estufa e, consequentemente, aquecimento global⁸.

Essencialmente, no que se refere aos materiais plásticos empregados pelas indústrias de embalagens para bebidas, destaca-se o uso massivo de recipientes descartáveis, como as garrafas de água mineral de PET (Politereftalato de Etileno), que são consumidos e descartados diariamente em grande escala. Embora o PET seja amplamente utilizado por suas propriedades físico-químicas e mecânicas⁹, como resistência, leveza e estabilidade térmica, sua degradação em ambientes naturais pode levar séculos, agravando seu impacto ambiental¹⁰. Além disso, apesar de ser tecnicamente reciclável, seu reaproveitamento ainda enfrenta barreiras econômicas, perda de desempenho em reciclagens sucessivas¹¹ e limitações em aplicações de contato direto com alimentos, dependendo da origem e pureza do material reciclado.¹²

O Brasil anualmente é responsável por 1,3 milhões de toneladas de plásticos descartados nos mares, ocupando a oitava posição dos maiores poluidores do mundo¹³. Com o intuito de incentivar a produção sustentável, de acordo com dados¹ da Abiplast em 2024 o Governo aumentou a alíquota de importação de resinas plásticas para 20%, impondo ao Brasil custos muito mais elevados de produção em comparação a alíquota média de importação de 6,5% nos demais países. Essa elevação do custo

também pressiona a busca por alternativas de menor impacto ambiental e maior viabilidade econômica.

Diante das problemáticas e do expressivo volume de produção e consumo de embalagens plásticas, que representam uma parcela significativa do mercado global e nacional, torna-se imperativo buscar alternativas sustentáveis. Dessa forma, materiais poliméricos à base de lignina, como a poli(ácido láctico) (PLA) e de origem biológica como o aromático poli(etileno 2,5-furandicarboxilato) (PEF), surgem como possíveis substitutos adequados para o envase de água mineral, uma vez que se enquadram dentro dos critérios estabelecidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) na Resolução N° 105, de Maio de 1999 sobre as embalagens¹⁴ para comercialização e distribuição de água mineral. Além de atenderem aos critérios estabelecidos pela ANVISA, esses materiais vêm sendo estudados por sua biodegradabilidade, menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida e propriedades semelhantes ao PET.¹⁵

Os desafios dos materiais substitutos do PET não se limitam apenas aos critérios da ANVISA, o PET apresenta um conjunto de propriedades e características que o destacam na lista positiva de materiais poliméricos aptos para o envase e distribuição de água mineral. As características detalhadas a seguir foram baseadas em testes realizados com o PET Ramapet N180 fornecido pela empresa Indorama, conforme estudo citado¹⁶.

(I) Estabilidade Térmica¹⁶: obtida pela elevada temperatura de transição vítrea (T_g) de aproximadamente 76 °C e uma temperatura de fusão (T_m) 245°C. Garantindo a integridade da embalagem e do conteúdo a temperaturas elevadas, além de facilitar a confecção de garrafas com paredes finas e resistentes.

(II) Permeabilidade relativamente baixa a gases e umidade¹⁶: devida a sua estrutura química rígida repleta de anéis aromáticos, alto grau de cristalinidade e interações intermoleculares fortes (dipolo-dipolo) especialmente entre os grupos estér. Garrafas de PET, apresentam uma barreira que impede e reduz a permeação de gases e vapor d'água. O PET Ramapet N180 apresentou uma baixa taxa de transmissão de vapor d'água (WVTR) de 6,9 g/m²·dia (a 23 °C e 85% de umidade relativa), além de uma taxa de transmissão de oxigênio (OTR) de aproximadamente 30 ml O₂/m²·dia·atm (a 23 °C e 85% de umidade relativa).

(III) Resistência Química Elevada¹⁶: igualmente relacionada a estrutura química que inclui anéis aromáticos e grupos estér, que, embora sensíveis a condições extremas, permanecem inertes em situações normais.

IV) Baixa Densidade e boa resistência mecânica¹⁶: estrutura química composta por cadeias de carbono, oxigênio e hidrogênio, elementos considerados leve, apesar da presença de anéis aromáticos, a combinação com o etilenoglicol mantém a densidade do PET relativamente baixa, e com boa resistência mecânica (resistência a tração de 59,4 MPa e módulo de elasticidade de aproximadamente 2273 MPa).

Outras vantagens como, transparência, boa processabilidade e baixo custo ainda favorece a logística de transporte por ser leve, resistente e de fácil manuseio. Entretanto, conforme citado anteriormente, o PET apresenta uma série de desvantagens e enfrenta obstáculos econômicos e ambientais que buscam desacelerar sua produção.

Nesse sentido o PEF e o PLA apresentam propriedades que os classifica como possíveis substitutos. Sendo assim, esse trabalho propõe-se a analisar comparativamente o PET e os biopolímeros PLA e PEF, considerando suas propriedades

físico-químicas, viabilidade econômica e mercadológica, custos de produção por unidade, aplicações no setor de bebidas, capacidade de reciclagem, tempo de degradação e riscos associados à reutilização. Avaliando em que medida esses materiais podem representar uma transição viável rumo a embalagens mais sustentáveis para o mercado brasileiro de água mineral.

METODOLOGIA

Esse trabalho foi realizado a partir de uma revisão bibliográfica. A revisão bibliográfica, compreende várias fontes já publicadas, que sirvam como ponte entre o pesquisador e tudo que já foi registrado sobre determinado tema de pesquisa, servindo como base para análises e discussões.¹⁷

Pesquisa Bibliográfica

Durante a elaboração desse trabalho, foram utilizados artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais revisados por pares, relatórios e estudos técnicos institucionais elaborados por organizações como a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), e a Associação Brasileira de Embalagem (ABRE), Center for International Environmental Law (CIEL) e Oceana, além de documentos oficiais como legislações federais e resoluções da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Também foram utilizadas fichas informativas de conferência internacional, publicações online de entidades setoriais, como o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), e literatura acadêmica, representada por um livro eletrônico de metodologia científica.

As referências utilizadas foram obtidas através de ferramentas como, Google Acadêmico, ScienceDirect e o portal do Periódicos da CAPES, além dos sites das entidades setoriais e plataformas online. A seleção do material bibliográfico priorizou

materiais publicados entre 2017 e 2025, optando por fontes de acesso público ou institucional, publicados por órgãos governamentais, agências reguladoras, organizações científicas e institutos de análises setoriais consolidadas no mercado.

Levantamento econômico-financeiro

A coleta de informações econômicas, como precificações, dados macroeconômicos, remunerações (hora/operador), ticket, volume de produção, capacidade produtiva, entre outros. Foi baseada em artigos científicos, informações públicas divulgadas pelo Conselho Monetário Nacional (CMN), vagas publicadas, informações de fabricantes de máquinas e equipamentos, além de literaturas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As embalagens de envase e distribuição de água mineral deverão seguir os seguintes critérios estabelecidos pela ANVISA:

1. Não deverão ocasionar modificações organolépticas na composição ou características dos alimentos;
2. Não deverão ceder substâncias não voláteis ao líquido, em quantidades superiores a 10 mg/dm² de área da superfície da embalagem, ou ainda, não pode exceder 50 mg de substâncias não voláteis para cada kg de simulante;
3. Deverão ser estáveis a temperatura ambiente;
4. Deverão apresentar baixa interação com agentes externos como, luz, contaminantes físicos e microbiológicos
5. Permeabilidade a gases e umidade relativamente baixa.

Dessa forma, o PET apresenta um conjunto de propriedades e características que o destacam na lista positiva de monômeros (instrumento regulatório, adotado por

órgãos como a ANVISA, que define explicitamente quais monômeros podem ser utilizados na fabricação de materiais poliméricos destinados ao contato com alimentos e bebidas.) aptos para o envase e distribuição de água mineral. Ademais, os desafios dos materiais que possivelmente poderão substituir o PET não se limitam apenas aos critérios da ANVISA. Além de outras vantagens como, transparência, boa processabilidade e baixo custo, o PET ainda favorece a logística de transporte por ser leve, resistente e de fácil manuseio. Entretanto, conforme citado anteriormente, apresenta uma série de desvantagens e enfrenta obstáculos econômicos e ambientais que buscam desacelerar sua produção.

Propriedades físico-químicas dos materiais

Com base na proposta desse estudo, devemos avaliar o PLA e o PEF, como materiais alternativos do PET, sob o ponto de vista de propriedades físico-químicas, a Tabela 1, apresenta características comparativas entre os materiais. Vale salientar que, as características detalhadas a seguir foram baseadas em testes realizados com o PET Ramapet N180 fornecido pela empresa Indorama, e com o PLA Luminy® LX175 fornecido pela empresa Total Corbion conforme estudo citado¹⁶. Para o PEF, os valores foram obtidos do estudo de Souza *et al.*¹⁵

Comparativamente, em termos de propriedades, o PEF se destaca por sua baixa permeabilidade ao oxigênio (OTR) e ao vapor d'água (WVTR), o que dispensa a necessidade de camadas adicionais de barreira, já que, por si só, preserva a qualidade da água (Tabela 1). O PLA, por outro lado, apresenta propriedades de barreira inferiores às do PET e do PEF.

Tabela 1 – Propriedades comparativas

Propriedades	PET	PLA	PEF
T _g (°C)	↑ 80	↓ 65	↑ 87
T _m (°C)	↑ 245	↓ 180	→ 215
E (MPa)	↓ 1700	↑ 4000	→ 2450
σ _y (MPa)	↓ 55	→ 70	↑ 98,2
ε _r (%)	↑ 200	↓ 11	↓ 4,0
OTR *	↓ 30	↑ 155	↓ 2,7
WVTR**	↓ 6,9	↑ 35,5	↓ 2,5

Fonte: elaborada pela própria autora.

Nota: *OTR: *Oxygen Transmission Rate* (Taxa de Transmissão de Oxigênio), expressa em ml O₂/m²·dia·atm, medida a 23 °C e 85% de umidade relativa (U.R.).

**WVTR: *Water Vapor Transmission Rate* (Taxa de Transmissão de Vapor de Água), expressa em g/m²·dia, nas mesmas condições de 23 °C e 85% de U.R.

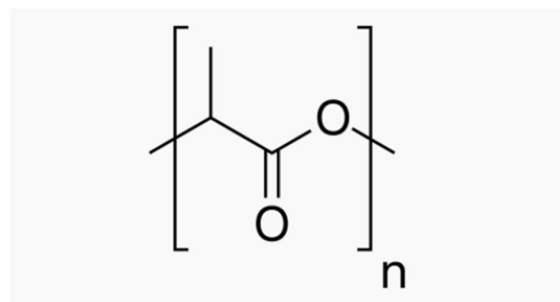
Quanto às propriedades mecânicas (Módulo de Young (*E*) e tensão de escoamento(σ_y)), o PEF supera ligeiramente o PET. Embora o PEF apresente temperatura de transição vítrea (T_g) mais elevada e boa estabilidade térmica, sua estrutura química, caracterizada pela presença do anel furânico, reduz a mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em uma cristalização mais lenta. O PEF semicristalino pode ser tão frágil que chega a apresentar um alongamento na ruptura (ε_r) de apenas 4%, tornando necessário o estiramento induzido por tensão para alcançar valores de ε_r de até 120%.

Conforme exibido na Tabela 1, o PLA, apesar de ser um poliéster de origem renovável e biodegradável, possui baixa temperatura de transição vítrea o pode levar à deformação das garrafas quando expostas a temperaturas elevadas. Além disso, seu reduzido alongamento na ruptura indica comportamento mais frágil sob solicitação mecânica.

Estrutura Química

O PEF, poliéster derivado do ácido furano dicarboxílico, apresenta em sua estrutura o anel furano rígido, que reduz a mobilidade da cadeia e resulta em maior temperatura de transição vítrea (~87 °C) em comparação ao PET. Apesar de sua temperatura de fusão mais baixa (210–215 °C), o que favorece a economia de energia no processamento, o PEF possui estabilidade térmica até 350 °C. A cristalização quiescente do PEF é mais lenta do que a do PET, tanto a partir do estado vítreo quanto da fusão, característica que pode ser vantajosa durante o processamento, ao permitir maior controle no sopro e estiramento de pré-formas amorfas. No entanto, para a obtenção de propriedades mecânicas e de barreira adequadas em garrafas, a cristalização induzida por estiramento torna-se essencial, exigindo controle rigoroso nos processos industriais, como moldagem por sopro e estiramento para filmes e garrafas. A lentidão na cristalização pode ser solucionada por meio da adição de agentes nucleantes, como o cálcio, associado ao estiramento uniaxial ou biaxial, promovendo estruturas mais cristalinas e robustas, adequadas para aplicações em embalagens e fibras.

Figura 2 – Estrutura química do PLA

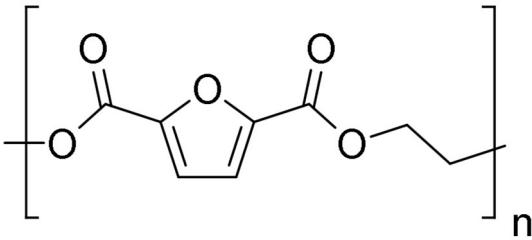


Fonte: Wikipédia, 2025.

O PLA, poliéster alifático derivado do ácido láctico, cuja estrutura contém grupos éster e um carbono quiral com um grupo metil (–CH₃) como substituinte, pode existir como isômeros D ou L, em que o isômero L ocorre naturalmente. O grau de pureza óptica (quantidade de L vs. D) influencia diretamente a cristalinidade e as

propriedades térmicas e mecânicas do PLA, dependendo da presença de D-isômeros. Esses isômeros surgem quando o PLA é sintetizado a partir de misturas racêmicas do ácido lático, resultando na incorporação dessas unidades na cadeia polimérica. A presença dos D-isômeros quebra a regularidade da cadeia, reduz a cristalinidade e compromete a estabilidade térmica e mecânica do material. Por isso, tornam-se necessárias estratégias para melhorar seu desempenho, como a modificação dos grupos terminais da cadeia e a formação de estereocomplexos entre cadeias L e D, que elevam a resistência térmica do PLA.

Figura 1 – Estrutura química do PEF



Fonte: Wikipedia 2025.

Viabilidade econômica e mercadológica

O PEF é produzido a partir da desidratação de açúcares vegetais renováveis, encontrados na palha de milho ou bagaço, trigo ou madeira. Processados até obtenção do ácido 2,5 furanodicarboxílico (FDCA) e enfim, policondensado por etilenoglicol. O PEF já é utilizado e comercializado como embalagens de água mineral pela Avantium. De forma análoga, o poli(ácido lático) (PLA) é obtido a partir de fontes naturais ricas em amido e açúcares fermentáveis, como milho, beterraba e mandioca. Sua síntese envolve a fermentação de açúcares em ácido lático, posteriormente convertido em lactídeo e polimerizado por abertura de anel para formar o polímero final. Assim, tanto o PLA quanto o PEF exemplificam o avanço dos biopolímeros termoplásticos como alternativas frente aos polímeros

derivados do petróleo, especialmente no setor de embalagens.

Custos de Produção e Análise Comparativa

A avaliação da viabilidade econômica dos polímeros analisados — PET fóssil, PLA e PEF — permite compreender as limitações tecnológicas e o potencial de substituição do PET por alternativas sustentáveis de base biológica. O polímero utilizado, matéria prima de geração dos polímeros, os custos de cada matéria prima, e as técnicas de produção foram reunidos na Quadro 1, com base em estudos recentes e dados industriais.

Quadro 1 – Matérias primas, custos e técnicas de obtenção comparativas

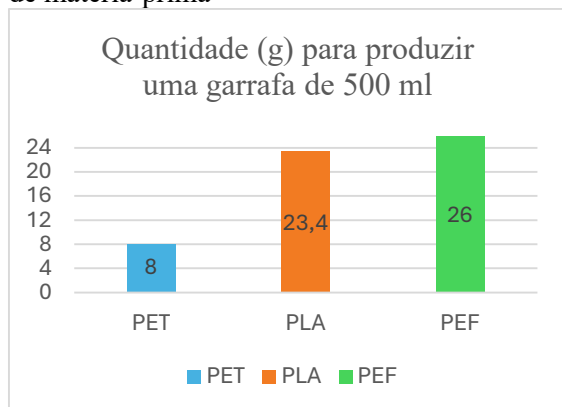
Polímero	Matéria Prima	Técnica de Produção	Custo (USD/kg)
PET (fóssil)			1.03
PLA	Grãos de milho	Biorrefinaria	0.84
	Cereais (Triticale)	Tecnologia Baseline	1.20
	Amido de Milho	Fermentação de levedura	2.12
PEF (1G)	A-melaço (1ª Geração)	Fermentação e Oxidação	1.07
PEF (2G)	Bagaço e Resíduos (2ª Geração)	Pré-tratamento e Hidrólise Enzimática	1.57
PEF (1G2G)	A-melaço + Bagaço	Co-processamento Integração da Biomassa	1.10

Fonte: elaborada pela própria autora.

Segundo boletim¹⁸ de inovação e sustentabilidade da PUC em 2018, os últimos avanços tecnológicos já permitem por exemplo garrafas de água mineral de 500 ml com somente 8 gramas. Na GS-Company¹⁹ são necessários 23,4 gramas de PLA para produzir uma garrafa de 500 ml de água. Enquanto, a Avantium²⁰ afirma que para uma garrafa de 250 mL de única camada de PEF a massa estimada era ≈ 13

g. Assumindo que para 500 ml a quantidade necessária de PEF seria aproximadamente o dobro, 26g, ou seja, 2,6 gramas a mais que o necessário para produção de uma garrafa de PLA.

Gráfico 1 – Peso da garrafa de 500 mL por tipo de matéria-prima



Fonte: elaborada pela própria autora.

Atualmente, as garrafas de 500 ml de água são produzidas a partir da moldagem por sopro e estiramento, cujo o controle da temperatura, é um dos principais parâmetros para obtenção de garrafas PET de qualidade²¹. No caso da produção, de garrafas de 500 ml de PLA e de PEF, o PLA pode ser produzido pelo estiramento biaxial controlado, exigindo controle térmico preciso entre 80–95 °C, com temperatura ótima de 82 °C, além de tempo de aquecimento e taxas de deformação bem definidos. Isso torna seu processamento mais sensível a variações operacionais quando comparado ao PET. Os equipamentos de produção de garrafas PET possuem todos os sistemas básicos necessários (forno, estiramento, secagem, refrigeração), entretanto a sensibilidade térmica e mecânica do PLA exige uma janela de processamento muito mais estreita. Por isso, os mesmos módulos que funcionam para PET precisam de ajustes ou upgrades para operar com PLA como, controladores de temperatura por zona (PID) e substituições de sistema pneumáticos grosseiros por servo-elétricos ou atualização de servos existentes para

controlar a velocidade, aceleração e força do stretch rod com repetibilidade alta. O PEF embora possa ser processado no mesmo equipamento utilizado para PET, exige maiores razões de estiramento devido à sua menor densidade de emaranhamento^{22,23}, sendo necessário recalibrar a sequência e a razão de estiramento. Em termos de controle, o PEF demanda ajustes no perfil térmico (forno, moldes e injeção) sendo necessário também o controle de sopro (pressão e temporização) para acomodar a maior viscosidade do PEF. Sendo assim, em termos de tecnologia e processos, ambos os biopolímeros podem reaproveitar os equipamentos de modelagem por sopro e estiramento, incluindo vários componentes como, sistema de alimentação de pré-formas, sistema de transferência, sistema de aquecimento, sistema de moldagem, sistema de descarga de garrafas, etc. Divergindo apenas nos parâmetros de controle e janela de processamento, que serão diferentes, a depender de cada material, uma vez que apresentam, propriedades diferentes conforme mencionado nas seções anteriores e na tabela 1.

Para estimar o custo unitário de produção de uma garrafa de 500 mL em PLA, foram consideradas três parcelas principais: (i) matéria-prima, (ii) energia elétrica e (iii) custos operacionais (OPEX), que incluem mão de obra, manutenção, controle de qualidade e amortização de moldes. As equações e justificativas adotadas são apresentadas a seguir:

1. Custo da matéria-prima

O custo da resina PLA/PEF por garrafa (C_{MP}) foi calculado considerando o preço da resina em reais (P_{PLA} ou P_{PEF}), a massa da embalagem (m) e o rendimento do processo (Y), que incorpora perdas produtivas típicas de linhas PET adaptadas para PLA e PEF (aprox. 5%). Sabendo que,

- $P_{PLA} = 4,57$ reais/kg

- $P_{PEF} = 5,83$ reais/kg
- $m_{PLA} = 23,4$ g = 0,0234 kg
- $m_{PEF} = 26$ g
- $Y = 0,95$

$$C_{MP} = \frac{P_{PLA} \times m}{Y}$$

O cálculo do rendimento (Y) foi baseado em um relatório de análise de KPIs de “plastic bottle manufacturing” afirma que a “taxa de sucata” (scrap rate) típica para garrafas plásticas varia entre 2% e 5%.²⁴

2. Custo de energia elétrica

Até o momento, não há dados industriais publicados sobre o consumo energético específico (kWh por garrafa) no processo ISBM aplicado ao PEF ou ao PLA. Para o PEF, a literatura apenas confirma sua processabilidade em equipamentos semelhantes aos do PET, mas ressalta diferenças térmicas e de cristalização que podem alterar o desempenho energético, ainda não mensurado devido ao estágio piloto do material. No caso do PLA, embora amplamente utilizado em outros processos, sua menor viscosidade e a necessidade de temperaturas mais baixas (80–95 °C) limitam o uso do ISBM, e também não há valores de energia por unidade disponíveis.

Assim, para ambos os polímeros, as estimativas deste trabalho dependem de extrapolações baseadas em dados consolidados do PET e em parâmetros gerais de processamento térmico. O consumo energético por garrafa foi estimado com base no consumo típico de linhas de estiramento e sopro (ISBM) adaptadas ao PLA e PEF. Linhas industriais apresentam consumo médio entre 0,012 e 0,022 kWh por garrafa de 500 mL, considerando aquecimento da pré-forma, compressores e servomotores²⁵. Para este estudo, adotou-se o valor intermediário:

$$E = 0,012 \times 0,702 = 0,0084 \text{ reais}$$

Sendo,

- Consumo médio de energia = 0,012 kWh/garrafa
- Preço médio do kWh no Brasil²⁶ = 0,702 reais

3. Custo operacional (OPEX)

O OPEX incorpora quatro componentes: operação (mão de obra direta e indireta), manutenção da linha, controle de qualidade e amortização de moldes/equipamentos. Em plantas com alta produtividade, essas parcelas apresentam baixo valor unitário, pois são distribuídas por um grande número de garrafas produzidas.

3.1 Custo com mão de obra

O custo de mão de obra operacional (C_{MO}) por garrafa foi obtido dividindo-se o custo total de operadores por turno pelo número de garrafas produzidas por hora. Linhas modernas de sopro PET operam com 2–4 operadores para 8.000–24.000 garrafas/h²⁷. Assumindo: 3 operadores, salário total (incluindo encargos) $\approx$ R\$ 9,68/h²⁸ por operador (faixa típica global de plantas automatizadas). Considerando a produção de 18 mil garrafas, chegamos em C_{MP} de:

$$C_{MP} = \frac{3 \times 9,68}{18.000} = 0,0016 \text{ R\$/garrafa}$$

3.2 Custo com manutenção

O custo com manutenção é estimado como 2%-4% do CAPEX inicial.²⁹ E consideram a manutenção dos equipamentos e maquinários da linha de produção das garrafas. Mantendo a qualidade e capacidade produtiva da operação.

3.3 Custo com controle de qualidade

Os custos associados ao controle de qualidade³⁰ baseiam-se no custo típico de inspeção automatizada e amostragem

manual para food-grade. O que equivale a 0,1-0,3% do custo total por unidade.

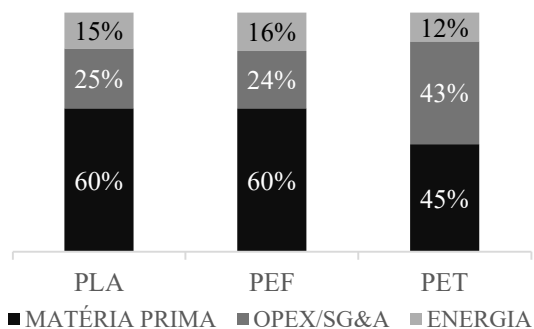
3.4 Custos com amortização e depreciação

Máquinas e equipamentos, tendem a depreciar 10% ao ano para fins fiscais. Correspondendo a uma vida útil de 10 anos.³¹ Ou seja, o valor contábil do equipamento tende a depreciar 10% ao ano. Dessa forma, o custo operacional total foi expresso como:

$$Opex\ Total = C_{MO} + C_{man} + C_q + C_{am}$$

Abaixo, o gráfico comparativo representa em termos percentuais e aproximados a partir dos cálculos estimados nesse trabalho, a representatividade das principais parcelas que compõem os custos estimados para produção de uma garrafa de 5 ml de água.

Gráfico 2 – Custo de produção



Fonte: elaborada pela própria autora.

Investimento Inicial – CAPEX e Endividamento

O investimento inicial necessário para produção de garrafas de PLA e PEF, seriam relacionados a adaptação da planta industrial já existente do PET, e, portanto, seria um investimento moderado comparado a uma instalação completamente nova. Como uma linha PET

completa custa entre US\$ 700 mil e US\$ 3 milhões.

Não existem dados públicos que registram os investimentos necessários para as adaptações necessárias para obter-se uma planta industrial de PLA e PEF, principalmente que quantifiquem ajustes nos sistemas de aquecimento, secagem, controle térmico e eventuais trocas de moldes. Baseada na ideia de que muitos componentes da planta já existem e só haveria ajustes, consideramos que esses representam tipicamente 5% a 20% de uma linha completa de PET. Resultando em um investimento estimado entre R\$ 190.750 mil e R\$ 327 mil, considerando uma taxa de câmbio de R\$: 5,45.

Para viabilizar o investimento necessário à adaptação da planta de produção de garrafas PET para PLA e PEF, a empresa poderia recorrer ao programa conjunto BNDES + FINEP de Inovação e Sustentabilidade, que é especificamente direcionado a projetos de bioeconomia, biopolímeros e modernização industrial com redução de impacto ambiental. Essa linha é compatível tanto com investimentos menores (como os R\$ 190 mil estimados para ajustes básicos) quanto com projetos de grande porte (até R\$ 327 mil), oferecendo condições mais favoráveis do que o crédito industrial tradicional.

O programa permite financiar equipamentos, engenharia, processos, automação e adaptação da planta, com possibilidade de juros reduzidos, maior participação financiável, carência estendida e prazos longos de amortização características essenciais para reduzir o peso financeiro inicial e aumentar a viabilidade econômica da transição para PLA e PEF. O Quadro³² 2 apresenta, as condições do financiamento do programa do BNDS + FINEP de Inovação e Sustentabilidade, considerando eventuais investimentos em adaptações de plantas

industriais existentes no Brasil para fabricação de garrafas de PLA e PEF.

Quadro 2 – Condições de endividamento

Parâmetros	Condição
Partic. Financiável	60-80% do valor do projeto
Taxas de juros	TLP + 2-6%
Carências	1-3 anos
Amortização	5-12 anos
Itens financiáveis	Máquinas, adaptação da planta; engenharia; automação
Modalidade	Apoio a inovação
Adequação ao projeto	Alta – Inovação sustentável

Fonte: elaborada pela própria autora.

Devida à baixa escala de produção atual, a falta de informações econômicas e financeiras, e a produção ainda piloto das garrafas de biopolímeros, não é possível quantificar à risca os custos associados a produção unitária de uma garrafa de PLA e de PEF, e comparar a uma garrafa de 500 ml de PET. No entanto, Um relatório³³ de 2024 de um fabricante/fornecedor de biogarrafa de PLA indica que o preço de venda por unidade, para garrafas de diferentes volumes, varia hoje entre US\$ 0,18 e US\$ 0,42 por unidade (dependendo volume, espessura da parede, tipo de fechamento, decoração, moldagem etc.). Para o PEF e qualquer outro biopolímero, a literatura estima que os custos de produção sejam entre 50 e 100% comparados aos plásticos convencionais.

Aplicações, Desafios e Biodegradabilidade

O PLA e o PEF apresentam aplicações consolidadas e crescentes no setor de embalagens e têxteis, embora cada um enfrente limitações técnicas que influenciam sua adoção em larga escala. O PLA, comercializado principalmente pela NatureWorks sob o nome Ingeo™, já é

amplamente utilizado em talheres compostáveis, sacolas, filmes agrícolas, fibras têxteis descartáveis e tecidos domésticos, beneficiado por sua rigidez, boa resistência mecânica e processabilidade em equipamentos convencionais; contudo, sua baixa taxa de alongamento na ruptura, elevada permeabilidade ao vapor d'água e propriedades de barreira inferiores às do PET ainda restringem sua substituição plena em embalagens de alimentos. Estudos¹⁶ buscam contornar essas limitações por meio de copolimerização com PEF ou incorporação de lignina, embora tais estratégias introduzam novos desafios de reciclagem.

O PEF, desenvolvido industrialmente pela Avantium dentro do projeto PEFerence, é aplicado em garrafas, filmes e recipientes termoformados graças à sua excelente barreira a gases e potencial para reduzir camadas adicionais de barreira presentes no PET; porém, seu estado semicristalino apresenta alta fragilidade, exigindo maiores taxas de estiramento e ajustes de processamento, além de enfrentar um problema prático crítico: a descoloração, decorrente de impurezas no Ácido 2,5-furanodicarboxílico (FDCA), estabilidade térmica limitada e efeitos do catalisador. Adicionalmente, sua menor T_m e maior T_g demandam temperaturas e condições diferenciadas de processamento, implicando retrabalho industrial para moldagem por sopro e estiramento. Apesar dessas barreiras técnicas, ambos os polímeros avançam comercialmente como alternativas de menor impacto ambiental.

Quanto às opções de fim de vida útil¹⁶, o PEF pode ser reciclado mecanicamente nas mesmas condições do PET e incorporado ao seu fluxo em proporções aprovadas, além de apresentar maior compatibilidade com esse polímero do que barreiras tradicionais, como poliamidas ou EVOH. O material também pode ser separado do PET por seu perfil característico de absorção no infravermelho, viabilizando uma

reciclagem independente no futuro. Além da reciclagem mecânica, o PEF pode ser depolimerizado por metanólise, glicólise ou processos enzimáticos, recuperando monômeros com alta eficiência, e apresenta biodegradação significativa em condições de compostagem industrial. Já o PLA¹⁶, por ser um polímero biodegradável, constitui uma alternativa ambientalmente favorável, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ e atuando como sumidouro de gases de efeito estufa. Sua capacidade de biodegradar sob condições controladas e de ser incorporado em ciclos produtivos mais sustentáveis reforça seu papel como material estratégico na busca por soluções de menor impacto ambiental.

CONCLUSÃO

Esse trabalho buscou determinar, como objetivo principal, a viabilidade da substituição do PET pelos biopolímeros PLA e PEF. Durante o processo, foi possível perceber as diferenças estruturais que impactam diretamente as propriedades de permeabilidade e mecânicas desses materiais. Consequentemente, evidenciaram-se as dificuldades em produzir garrafas de 500 ml a partir das mesmas técnicas de produção adotadas pela indústria de garrafas PET, uma vez que PLA e PEF exigem parâmetros de processabilidade distintos e demandam ajustes ou upgrades nas linhas de produção.

A literatura ainda é escassa no que diz respeito aos dados quantitativos e qualitativos econômicos necessários para embasar a substituição do PET por componentes mais sustentáveis. Há, portanto, um amplo espaço para crescimento, desenvolvimento tecnológico, investimentos e novas iniciativas no setor de biopolímeros. No caso do PLA, a baixa taxa de alongamento na ruptura implica em adaptações significativas nos equipamentos de sopro e estiramento; além disso, sua elevada permeabilidade ao vapor d'água e propriedades de barreira inferiores às do

PET restringem sua utilização plena em embalagens de alimentos, elevando os custos, uma vez que, há necessidade de multicamadas ou copolimerização para atender aos critérios da ANVISA. De forma semelhante, o estado semicristalino do PEF torna o material intrinsecamente frágil, exigindo maiores taxas de estiramento e ajustes no processamento. Soma-se a isso o problema da descoloração, decorrente de impurezas no FDCA, que dificulta sua elegibilidade como substituto direto do PET.

Apesar desses avanços, o preço da matéria-prima ainda representa a principal barreira à adoção ampla desses biopolímeros. A obtenção das resinas PLA e PEF requer processos industriais complexos e ainda pouco difundidos, resultando em custos elevados que dificultam sua competitividade frente ao PET convencional. Novas pesquisas são necessárias para otimizar rotas de síntese, reduzir custos de produção, aprimorar propriedades mecânicas e de barreira, e estabelecer protocolos industriais mais eficientes. Espera-se que, com o avanço tecnológico, expansão da escala produtiva e incentivos voltados à economia circular, PLA e PEF possam se tornar alternativas mais viáveis e sustentáveis para o futuro das embalagens.

Dessa forma, conclui-se que é viável substituir o PET por PLA e PEF, especialmente considerando seu potencial ambiental superior e as melhorias crescentes em desempenho. Contudo, para que essa substituição se torne realmente competitiva em escala industrial, é fundamental avançar em métodos de obtenção de matéria-prima mais barata, uma vez que essa etapa representa a maior parcela dos custos atuais (Gráfico 2). Isso inclui o desenvolvimento de fontes agrícolas com maior rendimento por quilograma, como bagaço, milho e outros insumos capazes de fornecer ácido láctico e FDCA de forma mais eficiente.

Aprimorando os métodos de obtenção das resinas de PLA e PEF, será possível reduzir significativamente os custos de produção das garrafas e consequentemente, tornar esses biopolímeros competitivos no mercado de embalagens.

REFERÊNCIAS

1 LAFIS. **Relatório setorial: embalagens**. São Paulo: LAFIS, 2025. p. 38. Disponível em: <https://www.lafis.com.br>. Acesso em: 20 jul. 2025.

2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. **Estudo ABRE macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo**: apresentação março de 2025: fechamento dos dados de 2024. São Paulo: ABRE, 2025. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2024-2/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

3 BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 148, p. 3, 3 ago. 2010.

4 COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Taxas de reciclagem**. São Paulo: CEMPRE, [S.d.]. Disponível em: <https://cempre.org.br/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

5 UNITED NATIONS. **Factsheet: Marine pollution**. [S.l.], 2017. Documento em PDF.

6 KÜHN, S.; VAN FRANEKER, J. A. Quantitative overview of marine debris ingested by marine megafauna. **Marine Pollution Bulletin**, Amsterdam, v. 151, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110858>. Disponível em: [Quantitative](#)

[overview of marine debris ingested by marine megafauna - ScienceDirect](#). Acesso em: 21 jul. 2025.

7 KONTRICK, A. V. Microplastics and human health: our great future to think about now. **Journal of Medical Toxicology**, New York, v. 14, p. 117–119, 23 abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13181-018-0661-9>. Disponível em: [Microplastics and Human Health: Our Great Future to Think About Now | Journal of Medical Toxicology | Springer Nature Link](#). Acesso em: 24 jun. 2025.

8 CENTER FOR INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL LAW. **Plastic & climate**: the hidden costs of a plastic planet. [S.l.]: CIEL, 2019. Disponível em: <https://www.ciel.org/plasticandclimate/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

9 BENYATHIAR, P. *et al.* Polyethylene terephthalate bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: a review. **Polymers**, Switzerland, v. 14, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14122366>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9231234/>. Acesso em: 04 jul. 2025.

10 CHAMAS, A. *et al.* Degradation rates of plastics in the environment. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, Cincinnati, OH, v. 8, p. 3494–3511, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>. Disponível em: [Degradation Rates of Plastics in the Environment | ACS Sustainable Chemistry & Engineering](#). Acesso em: 06 jul. 2025.

11 MARCELINO, CS; GOMES, VEdS; MARANGONI JÚNIOR, L. Post-Consumer Recycled PET: A Comprehensive Review of Food and

Beverage Packaging Safety in Brazil. **Polymers**, v. 17, n. 5, 594, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17050594>.

Disponível em:
<https://www.mdpi.com/2073-4360/17/5/594#metrics>. Acesso em: 15 jul. 2025

12 MAGNO, Iran (org.). et al. Fragmentos da destruição: impactos do plástico na biodiversidade marinha brasileira. Brasília: Oceana Brasil, 2024. E-book. DOI: 10.5281/zenodo.13931989. Disponível em: https://brasil.oceana.org/wp-content/uploads/sites/23/2024/10/Fragmentos-da-Destruicao_FINAL-FINAL-FINAL_compressed.pdf. Acesso em 15 jul. 2025.

13 BRASIL despeja, anualmente, 1,3 milhão de toneladas de plástico no oceano. Brasília: Oceana Brasil. Disponível em: <https://brasil.oceana.org/blog/brasil-despeja-anualmente-13-milhao-de-toneladas-de-plastico-no-oceano/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

14 BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RDC nº 105, de 19 de maio de 1999**. Aprova os regulamentos técnicos: disposições gerais para embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos. Brasília, DF, 19 maio 1999. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/1999/res0105_19_05_1999.html. Acesso: 20 jul. 2025.

15 SOUSA, A. F. *et al.* Recommendations for replacing PET on packaging, fiber, and film materials with biobased counterparts. **Green Chemistry**, [S. l.], v. 23, 8795–8820, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1GC02082J>. Disponível em: [Recommendations for replacing PET on packaging, fiber, and film materials with biobased counterparts -](#)

Green Chemistry (RSC Publishing). Acesso em: 20 jul. 2025.

16 BEUKELAER, H. de; HILHORST, M.; WORKALA, Y. *et al.* Overview of the mechanical, thermal and barrier properties of biobased and/or biodegradable thermoplastic materials. **Polymer Testing**, [S. l.], v. 110, art. 107803, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107803> .Disponível em: [Overview of the mechanical, thermal and barrier properties of biobased and/or biodegradable thermoplastic materials - ScienceDirect](#). Acesso em: 20 jul. 2025.

17 LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021. E-book. p.1. ISBN 9788597026580.

18 MIRANDA, D.; MELLO, M.; ZOGAIB, P. **Plásticos biodegradáveis**. BISUS 2018, v.2. São Paulo: Pontifícia Universidade Católica De São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/bisus2018-vol2-plasticos-biodegradaveis.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025

19 BENEFITS of pla compared to other
packaging. Valkenswaard, The
Netherlands: PLABottles.eu., [S.d.].
Disponível em:
[https://plabottles.eu/benefits-of-pla-
compared-to-other-packaging/](https://plabottles.eu/benefits-of-pla-compared-to-other-packaging/). Acesso em:
1 nov. 2025.

20 AVANTIUM. **PEF bottles – a sustainable packaging material:** ISO certified LCA of avantium's PEF products. Amsterdã, 21 fev. 2022. Arquivo PDF. Disponível em: <https://avantium.com/wp-content/uploads/2022/02/20220221-PEF-bottles-%E2%80%93-a-sustainable-packaging-material-ISO-certified-LCA.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2025.

- 21 HSIEH, Ping-Cheng. Intelligent temperature control of a stretch blow molding machine using deep reinforcement learning. **Processes**, Taiwan v. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11071872>. Disponível em: [Intelligent Temperature Control of a Stretch Blow Molding Machine Using Deep Reinforcement Learning](#). Acesso em: 19 out. 2025.
- 22 DE JONG, E.; VISSER, H. A.; DIAS, A. S.; HARVEY, C.; GRUTER, G.-J. M. The Road to Bring FDCA and PEF to the Market. **Polymers**, v. 14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14050943>. Disponível em: [The Road to Bring FDCA and PEF to the Market](#). Acesso em: 12 out. 2025.
- 23 LIM, L. T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Processing technologies for poly(lactic acid). **Progress in Polymer Science**, v. 33, n. 8, p. 820-852, 2008. DOI: [10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004> . Acesso em: 12 out. 2025.
- 24 WHAT Are the Core 5 KPIs for Plastic Bottle Manufacturing Business? Startup financial projection, 16 out. 2025. Disponível em: <https://startupfinancialprojection.com/blogs/kpis/plastic-bottle-manufacturing?> . Acesso em: 8 dez. 2025.
- 25 WANPLAS. **PET Blow Molding Machine for Beverage and Cosmetic Bottles**. 24 Mar. 2026. Disponível em: <https://www.wanplas.com/industry-blogs/pet-blow-molding-machine-for-beverage-and-cosmetic-bottles/>. Acesso em: 8 dez. 2025.
- 26 CONFIRA o ranking das tarifas de energia mais caras do Brasil em 2024. Disponível em: <https://dippe.com.br/confira-o-ranking-das-tarifas-de-energia-mais-caras-do-brasil-em-2024/> . Acesso em: 8 dez. 2025.
- 27 HOW to choose plastic bottle blow moulding machines without pitfalls?. Disponível em: <https://huilimachinery.com/how-to-choose-plastic-bottle-blow-moulding-machines-without-pitfalls/>. Acesso em: 09 dez. 2025.
- 28 SELECT RH. **Vaga operador de máquina de sopro**: salário R\$ 9,68/h [...]. Facebook: Vagas Select RH. 19 mar. 2024. Disponível em: <https://www.facebook.com/vagasselectrh/posts/vaga-operador-de-m%C3%A1quina-de-sopro-sal%C3%A1rio-r-968-hora-hor%C3%A1rio-1-turno-segunda-%C3%A0-se/856691723136815/>. Acesso em: 9 dez. 2025.
- 29 BRYCE, D. M. **Plastic Injection Molding**: volume IV: manufacturing startup and management. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1999. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/559884235/Bryce-Douglas-M-Plastic-Injection-Molding-Volume-IV-Manufacturing-Startup-and-Management-Society-of-Manufacturing-Engineers-SME-1999?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 9 dez. 2025.
- 30 PAGLIOSA, M. M. ; GRIPA, S.; LOPO, W. N. Quality costs: identification and appraisal in the manufacturing process of an auto parts industry. **Revista Espacios**, v. 38, n. 9, 2017. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Quality-costs%3A-Identification-and-Appraisal-in-the-Pagliosa-Gripa/9d1bd9f60c1fc714d36c5b6fa5206daad3ab8e21> . Acesso em: 9 dez. 2025.

31 ANEXO III da Instrução Normativa RFB nº 1.700 - taxas anuais de depreciação. 2017. Disponível em: <https://www.normaslegais.com.br/legislacao/anexoIII-in-rfb-1700-2017.htm>. Acesso em: 09 dez. 2025.

32 BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. BNDES Finem – Crédito para projetos. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/bndes-finem/> . Acesso em: 10 dez. 2025.

33 BIODEGRADABLE PLA bottles: cost comparison by volume (2024 data). 26 maio 2025. Disponível em: <https://www.paupacking.com/blog/biodegradable-pla-bottles-cost-comparison-by-volume-2024-data> . Acesso em: 9 dez. 2025.