

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Avaliação do Ciclo de Vida de Garrafas PET: Comparativo  
entre Brasil e Alemanha**

**Flavia Bastos Junqueira**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2022**

# **Avaliação do Ciclo de Vida de Garrafas PET: Comparativo entre Brasil e Alemanha**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francys Kley Vieira  
Moreira

São Carlos-SP  
2022



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Flávia Bastos Junqueira

**RA:** 725690

**TÍTULO:** Avaliação do ciclo de vida de garrafas PET: comparativo entre Brasil e Alemanha

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 20/04/2022, 17h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira	10,0	10,0
Prof. Dr. Juliano Marini	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira e Prof. Dr. Juliano Marini e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

Dedico este trabalho em memória ao meu pai, que foi meu exemplo por muito tempo.  
Com muito amor e saudade.

## AGRADECIMENTO

Agradeço às Universidades Federal de Santa Catarina e de São Carlos e à Universidade Técnica de Clausthal, pela contribuição em minha paixão pela Engenharia de Materiais e por comporem a minha formação técnica, profissional e pessoal.

Agradeço aos amigos que eu fiz em São Carlos, que foram companhias especiais e que me deram forças quando precisei. Sou grata especialmente aos meus colegas de curso, Lucas Parreira, Pedro Henrique Gomes e Laura Ferreira, que tornaram as aulas e momentos de estudo mais divertidos.

Um obrigado ao professor Francys, por ter me acompanhado durante toda a minha graduação e ter sido um mentor presente durante toda a elaboração deste trabalho.

Agradeço também a professora Ana Cândida e ao professor Joachim Deubener, que permitiram a realização de um sonho antigo de morar e estudar na Alemanha, o que me direcionou ao tema deste trabalho. E à minha principal companheira nessa empreitada, Mayara Cerruti.

Muito obrigada ao meu namorado, que acompanhou de perto os momentos bons e ruins na escrita deste trabalho e que nunca deixou de me apoiar.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família. Principalmente minha mãe, que por toda minha vida me incentivou em sempre buscar conhecimento, que me apoiou em minhas escolhas e sempre me encorajou a batalhar por meus sonhos. E minha irmã, que é um exemplo de dedicação e empenho, e que abriu muitas portas para mim. Minhas duas mulheres guerreiras, que são meu exemplo de força e me apoiaram por toda a dura caminhada da graduação.

## RESUMO

Diante da tendência mundial de crescimento do consumo de embalagens plásticas, torna-se relevante a preocupação com os efeitos dos resíduos plásticos no meio ambiente. Uma das ferramentas utilizadas para análise de tais efeitos é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que analisa os impactos e benefícios do ciclo de vida de um material no meio-ambiente. Diante dos contextos divergentes de coleta e destinação no Brasil e na Alemanha, o trabalho em questão visa avaliar as vantagens e desvantagens em diferentes categorias de impacto ambiental do ciclo da garrafa PET nos dois países. Foram estabelecidos quatro diferentes cenários de destinação do PET pós consumo – reciclagem, aterro sanitário, lixão e incineração – sendo lixão unicamente para o Brasil e incineração para a Alemanha – e as quantidades de resíduos PET destinadas para cada foram definidas a partir do índice de reciclagem de ambos os países. A ACV foi realizada com o auxílio do software OpenLCA em conjunto com o método de avaliação ReCiPe Midpoint (H), sendo considerada como unidade funcional a produção de 1 tonelada de garrafas PET. Foram escolhidos três indicadores do método ReCiPe para fins de estudo – mudanças climáticas, consumo de água e toxicidade humana. Foi realizada uma comparação isolada dos diferentes descartes para cada país, onde no Brasil os cenários de aterro e lixão se mostram muito semelhantes e os mais prejudiciais em mudanças climáticas e consumo de água, enquanto a reciclagem se apresenta a pior alternativa para toxicidade humana. Na Alemanha, os impactos do aterro sanitário e incineração são bem mais acentuados para aqueles da reciclagem, em todos os três indicadores. Para a comparação entre países, foi definido um cenário de parte descartada em aterro e o restante destinado para reciclagem, onde as quantidades foram definidas pelo índice de 91% de reciclagem na Alemanha e 55% no Brasil. Apesar de maior índice de reciclagem, a Alemanha apresenta impactos mais significativos, que podem ser justificados pela matriz energética do país ser baseada em fontes fósseis. Além disso, para ambos os contextos, a produção da resina polimérica e da garrafa se mostram as mais prejudiciais para os indicadores. Assim, a ACV deste trabalho permite concluir que para minimizar os impactos do ciclo de vida de PET, deve-se combinar um elevado índice de reciclagem com fontes renováveis de energia.

**Palavras-chave:** Garrafas-PET, ACV, Reciclagem, Descarte

## ABSTRACT

In view of the growing consumption of plastic packaging worldwide, the concerns regarding the environmental impacts of plastic wastes have become more and more relevant. One of the tools used for analyzing such impacts is the Life Cycle Assessment (LCA), which assesses the impacts and benefits of a material's life cycle on the environment. In view of the divergent contexts of gathering and destination of plastic wastes in Brazil and Germany, the present work evaluated the advantages and disadvantages in different eco-impact categories of the PET bottle life cycle in both countries. Four different post-consumer PET disposal scenarios were established – recycling, sanitary landfill, dump, and incineration – of which dump is relevant for Brazil, while incineration is typically carried out in Germany – and the amounts of postconsumer PET sent for each end-of-life treatment were defined based on the recycling index of the countries. The LCA was performed using the OpenLCA software and the ReCiPe Midpoint (H) assessment method, considering the production of 1 ton of PET bottles as a functional unit. Three impact categories were evaluated – global warming, water consumption and human toxicity. A comparison between the end-of-life treatments for each country was carried out, where in Brazil the sanitary landfill and open dump scenarios are very similar and the most harmful in terms of global warming and water consumption, while recycling is the worst alternative for human toxicity. For Germany, the impacts related to sanitary landfill and incineration were more pronounced than those related to mechanical recycling. For the comparison between countries, a scenario was created where part of the PET bottle waste was sent to sanitary landfill and part for recycling, being the quantities defined by the recycling indexes of 91% and 55% for Germany and Brazil, respectively. Despite the higher recycling rate, the treatment of PET bottle wastes in Germany has the most significant impacts, which can be justified by its fossil-based energy matrix. Overall, the PET resin and bottle productions contributed at the largest extents for the environmental impacts in all evaluated categories. Thus, the LCA of this work allowed concluding that to minimize the impacts of the PET bottle life cycle, a high recycling rate must be combined with renewable energy sources.

**Keyword:** PET bottle, LCA, Recycling, Disposal

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Esquema de Classificação segundo nível das embalagens. (“Flaticon,”[s.d.].....	3
Figura 2 - Estrutura molecular do poli(tereftalato de etileno) (PET) .....	4
Figura 3 - Reações de a) transesterificação e b) esterificação. (NISTICÒ, 2020).....	5
Figura 4 – Reação de policondensação do PET. (NISTICÒ, 2020) .....	5
Figura 5 - Pré-forma de PET (“Conheça nossas pré-formas PET,” [s.d.] .....	7
Figura 6 - Esquematização de uma Injetora.....	8
Figura 7 - Esquematização da Injeção-Sopro adaptado de (RILEY, 2012) .....	9
Figura 8 - Molde industrial de pré-formas para injeção (“Shutterstock,” [s.d.] .....	9
Figura 9 - Processo industrial de sopro de pré-formas (“Shutterstock,” [s.d.] .....	10
Figura 10 - Estrutura do ACV modificada da norma ISO 14040.....	14
Figura 11 - Etapas de funcionamento da logística reversa conforme o Acordo Setorial, adaptado de (MAIA PIANOWSKI, 2017).....	16
Figura 12- Fluxograma da Reciclagem do PET no Brasil (ABIPET, 2019; MAIA PIANOWSKI, 2017; “Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019).....	17
Figura 13 - Fluxograma da Reciclagem do PET na Alemanha. (“Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019; “PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020).....	22
Figura 14 - Fluxos de entrada e saída na cadeia de Produção do Refrigerante (FARIA, 2017).....	27
Figura 15 - Diagrama representativo do contexto alemão .....	31
Figura 16 - Diagrama representativo do contexto brasileiro .....	31

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Produção Global de Plásticos de 1950 até 2015 medida em toneladas (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; “Our World in Data,” [s.d.] ) .....	11
Gráfico 2 - Fontes de PET pós-consumo para a reciclagem, adaptado de (ABIPET, 2019) .....	17
Gráfico 3 - Destinação do PET reciclado no Brasil – Produzido com os dados obtidos de (ABIPET, 2019) .....	18
Gráfico 4 - Reciclagem do PET no Brasil - Produzido com os dados obtidos de (ABIPET, 2016, 2019) .....	19
Gráfico 5- Destinação do PET reciclado na Alemanha – adaptado pela própria autora de (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020) .....	23
Gráfico 6 - Reciclagem do PET na Alemanha - Produzido com os dados obtidos de (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020) .....	23
Gráfico 7 - Resultados relativos por tonelada de PET descartado dos Indicadores de Mudanças Climáticas, Consumo de água e toxicidade humana para três diferentes destinações no Brasil .....	38
Gráfico 8 - Resultados relativos por tonelada de PET descartado dos Indicadores de Mudanças Climáticas, Consumo de água e toxicidade humana para três diferentes destinações no Brasil. ....	39
Gráfico 9 - Valores normalizados do indicador mudanças climáticas para a Alemanha e para o Brasil, separados pela contribuição de cada processo. ....	40
Gráfico 10 - Valores do indicador de mudanças climáticas do descarte do PET pós-consumo para a Alemanha e para o Brasil. ....	41
Gráfico 11 - Valores normalizados do indicador de consumo de água para a Alemanha e para o Brasil, separados pela contribuição de cada processo. ....	42
Gráfico 12 - Valores do indicador de consumo de água do descarte do PET pós-consumo para a Alemanha e para o Brasil. ....	42
Gráfico 13 - Valores normalizados do indicador de toxicidade humana para a Alemanha e para o Brasil, separados pela contribuição de cada processo. ....	43
Gráfico 14 - Valores do indicador de toxicidade humana do descarte do PET pós-consumo para a Alemanha e para o Brasil. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das embalagens segundo a estrutura (JORGE, 2013) .....	4
Tabela 2 - Produtos de PET e seus usos. (AWAJA; PAVEL, 2005; “Conceitos Básicos sobre Materiais Plásticos,” [s.d.]; JORGE, 2013; LI-NA, 2013; PIRES; LUIZA; CARVALHO, 2013).....	6
Tabela 3 - Composição da unidade funcional dos diferentes sistemas de produto...29	
Tabela 4 - Inventário do Ciclo de Vida para o contexto alemão.....	32
Tabela 5 - Inventário do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro.....	34
Tabela 6 - Indicadores de impacto ambiental dos diferentes destinos de PET pós-consumo nos contextos Brasil e Alemanha .....	35
Tabela 7 - Indicadores de impacto ambiental normalizados para os diferentes destinos do PET pós-consumo nos contextos Brasil e Alemanha.....	36
Tabela 8 - Indicadores de impacto ambiental de cada etapa do processo normalizados para o cenário de comparação no Brasil.....	36
Tabela 9 - Indicadores de impacto ambiental de cada etapa do processo normalizados para o cenário de comparação na Alemanha.....	37

## LISTA DE SIGLAS

ABIPET – *Associação Brasileira da Indústria do PET*  
ABIPLAST – *Associação Brasileira da Indústria do Plástico*  
ACV – *Avaliação do Ciclo de Vida*  
ANVISA – *Associação Nacional de Vigilância Sanitária*  
B2B – *Bottle-to-bottle*  
B2F – *Bottle-to-fiber*  
BHET - *Tereftalato de bis(2-hidroxietileno)*  
BVE – *Associação Federal da Indústria Alimentícia Alemã*  
DMT – *Éster tereftalato de dimetileno*  
EG – *Etilenoglicol*  
GVM – *Empresa de Pesquisa do Mercado de Embalagens Alemã*  
HDE – *Associação Alemã de Varejo*  
ICV – *Inventário do Ciclo de Vida*  
ISO – *International Organization for Standardization*  
PE – *Polietileno*  
PET - *Poli(tereftalato de etileno)*  
PETr - *Poli(tereftalato de etileno) Reciclado*  
PNRS – *Política Nacional dos Resíduos Sólidos*  
PP – *Polipropileno*  
PS – *Poliestireno*  
PVC – *Poli(cloreto de vinila)*  
SSP – *Policondensação no estado sólido*  
TPA – *Ácido tereftálico*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1.	EMBALAGENS PARA ALIMENTOS.....	2
2.2.	POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET) .....	4
2.3.	PROCESSOS DE CONVERSÃO DO PET .....	7
2.4.	RECICLAGEM DO PET .....	10
2.5.	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PET.....	13
3.	REVISÃO DA LITERATURA .....	15
3.1.	PANORAMA DE RECICLAGEM DE PET NO BRASIL .....	15
3.2.	PANORAMA DE RECICLAGEM DE PET NA ALEMANHA .....	19
3.3.	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EMBALAGEM DO PET .....	24
4.	OBJETIVOS.....	28
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	35
6.1.	COMPARAÇÃO ENTRE DESTINAÇÕES – BRASIL .....	37
6.2.	COMPARAÇÃO ENTRE DESTINAÇÕES – ALEMANHA .....	38
6.3.	COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE RECICLAGEM.....	40
6.3.1.	IMPACTO NA QUALIDADE DO ECOSISTEMA.....	40
6.3.2.	IMPACTO NO ESGOTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS .....	41
6.3.3.	IMPACTOS NA SAÚDE HUMANA.....	43
7.	CONCLUSÕES.....	45

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de plástico é atualmente uma grande preocupação ambiental, uma vez que se torna preocupante a destinação correta de enormes volumes de resíduos plásticos. No Brasil, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Plástico (ABIPLAST) apenas 26% do total das embalagens plásticas produzidas é reciclado. Em contrapartida, segundo a Empresa de Pesquisa do Mercado de Embalagens Alemã (GVM) em torno de 55% das embalagens plásticas produzidas na Alemanha são recicladas. (ABIPET, 2019; “PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020)

Dentre os plásticos utilizados como embalagem, um dos mais difundidos mundialmente é o poli(tereftalato de etileno) (PET), especialmente pela sua utilização na produção de garrafas para bebidas. No caso destas, o índice de reciclagem na Alemanha é em torno de 91%, enquanto no Brasil está próximo de 55%. (ABIPET, 2019; “PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020)

Em frente a estas informações, surge o questionamento de quais são as políticas e regulamentações relacionadas a reciclagem de garrafas PET tanto no Brasil quanto na Alemanha para alcançar tais índices. Além disso, para ambos os países existem diferentes destinações para o PET não reciclado, no caso brasileiro para aterro sanitário e lixão e no caso alemão, para incineração e aterro sanitário.

Isto posto, o intuito deste trabalho é o estudo das regulamentações governamentais para a reciclagem de garrafas PET nos dois países e as ações existentes em prol da reciclagem. Além disso, foi realizada a avaliação do ciclo de vida (ACV) de garrafas PET com o objetivo de comparar os diferentes impactos, nos contextos da qualidade dos ecossistemas, saúde humana e esgotamento de recursos naturais, resultante do tratamento do PET pós-consumo, assumindo os diferentes índices de reciclagem de cada país e para as diferentes destinações do PET pós-consumo em cada país.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Embalagens Para Alimentos**

Embalagens são, de acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), um "invólucro, recipiente ou qualquer forma de acondicionamento removível, ou não, destinado a cobrir, empacotar, envasar, proteger ou manter, especificamente ou não, alimentos, medicamentos e insumos farmacêuticos ativos" ("Resolução RDC," 2019). Estas que têm enorme importância na indústria de alimentos, desempenhando papéis essenciais e indispensáveis para a comercialização dos mais diferentes produtos.

A função mais básica de uma embalagem é a contenção dos alimentos, permitindo a distribuição dos mesmos e protegendo-os dos ambientes aos quais serão expostos diariamente. Além disso, as embalagens atuam na proteção dos alimentos, de forma a manter as suas propriedades organolépticas intactas - sendo assim, é necessário que a embalagem atue como uma barreira contra gases, umidade, microrganismos, luz UV, odores, entre outros. A proteção fornecida pela embalagem também deve abranger o âmbito físico, protegendo o produto de choques mecânicos, vibrações, compressões etc. (JORGE, 2013; ROBERTSON, 2009)

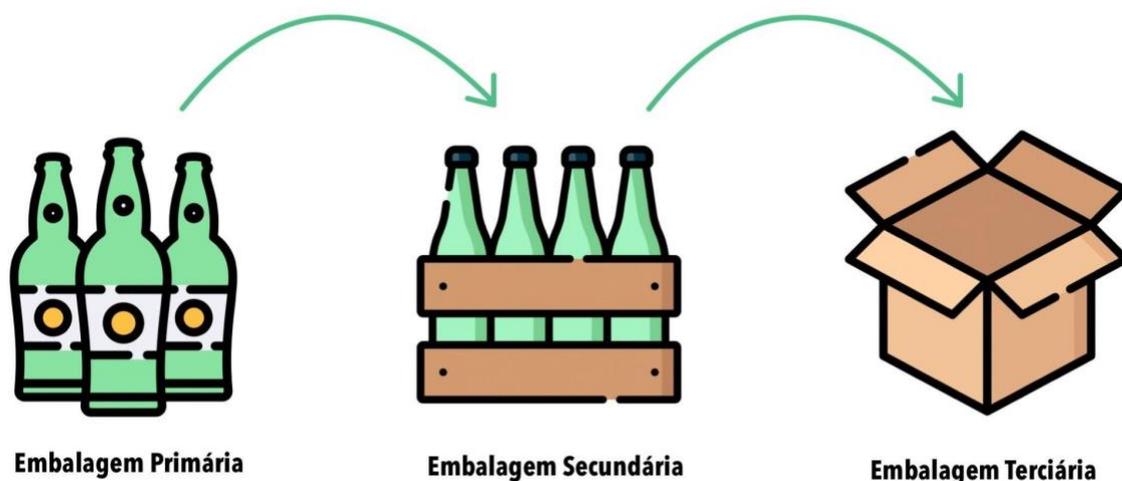
Com o constante crescimento e desenvolvimento tecnológico da população há necessidade de adequação do setor de embalagens às novas tecnologias, trazendo mais conveniência para sociedade moderna - trazendo, por exemplo, embalagens que podem ser facilmente abertas sem geração de sujeira, que podem ser utilizadas no cozimento de alimento, entre outras. (ROBERTSON, 2009)

Do ponto de vista comercial, as embalagens também podem ser utilizadas como meio de comunicação com o consumidor, trazendo informações sobre o conteúdo, sua marca, informações nutricionais assim como um código de barras que permite a leitura do mesmo. Seguindo este raciocínio, a embalagem também pode ser utilizada como um meio de marketing do produto - assim, a embalagem também possui a função de persuadir o consumidor. (JORGE, 2013; ROBERTSON, 2009)

Por fim, deve-se considerar alguns atributos necessários na perspectiva de eficiência, comercial e ambiental. Primeiro, a embalagem deve apresentar um bom desempenho no seu preenchimento, fechamento, manuseio, transporte e armazenamento, evitando quaisquer problemas no seu ciclo de vida. Além disso,

deve-se considerar o impacto ambiental da embalagem, desde a extração do material utilizado, seguindo pela produção da mesma e destino. E por fim, deve-se atentar ao fato de que a embalagem utilizada deve ser feita de materiais que não reajam e migrem para o produto, com o intuito de minimizar as contaminações do alimento. (JORGE, 2013; ROBERTSON, 2009)

As embalagens podem ser classificadas de acordo com a sua função ou nível, podendo ser divididas em embalagens primárias, secundárias e terciárias, essa segmentação pode ser visualizada na Figura 1. As embalagens primárias são aquelas que estão diretamente em contato com o alimento, tendo como principais funções a contenção do alimento e a proteção, ao evitar a infiltração de gases, microrganismos, umidade e luz ultravioleta que podem alterar as propriedades organolépticas do produto. Embalagens secundárias agrupam as primárias e apresentam o papel de proteção físico-mecânica na distribuição e manuseio e comumente são utilizadas como meio de comunicação com o consumidor. Por fim, as embalagens terciárias agrupam diversas embalagens primárias e secundárias e geralmente agem como proteção do conjunto durante transporte e armazenamento. (JORGE, 2013; ROBERTSON, 2009; ZANON BARÃO, 2011)



*Figura 1- Esquema de Classificação segundo nível das embalagens.*  
(“Flaticon,”[s.d.]

As embalagens também podem ser classificadas de acordo com a estrutura dos materiais, sendo divididas entre embalagens rígidas, semirrígidas e flexíveis, conforme Tabela 1.

Embalagens	Metálica	Plástica	Vidro	Papel
Rígidas	Latas em folha de flandres e alumínio	Bandejas, garrafas, potes, grades e caixas	Garrafas e frascos	Caixas de papelão
Semirrígidas	Bandejas de alumínio	Bandejas em poliestireno expandido. Frascos, copos e potes termo formados	-	Caixas e cartuchos em cartolina. Bandejas e alvéolos em polpa moldada.
Flexíveis	Folha de alumínio. Estruturas laminadas	Filmes Estruturas laminadas	-	Folha de papel Estruturas laminadas

Tabela 1- Classificação das embalagens segundo a estrutura (JORGE, 2013)

Há uma elevada gama de materiais que podem ser utilizados na produção de embalagens alimentícias, sendo os principais os vidros, aço e alumínio, plásticos e papéis.

A utilização de embalagens poliméricas na indústria alimentícia tem aumentado constantemente ao longo das décadas. Entre suas qualidades para tal aplicação estão sua ampla faixa de propriedades mecânicas, óticas, baixa densidade e a versatilidade de serem combinadas com outros materiais. Além disso, as embalagens possuem resistência térmica moderada em conjunto com uma relativa inércia química. Apesar de serem, no geral, não reutilizáveis, os polímeros são recicláveis e podem ser de fontes renováveis e/ou biodegradáveis.

Os principais polímeros utilizados para a produção de embalagens na indústria alimentícia são os polímeros termoplásticos, entre eles o polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(cloreto de vinila) (PVC), poliestireno (PS) e o poli(etileno tereftalato) (PET).

## 2.2. Poli(tereftalato de etileno) (PET)

O PET (Figura 2) é um polímero termoplástico sintético, geralmente de fonte fóssil, que é produzido a partir da reação do etilenoglicol (EG) com o ácido tereftálico (TPA) ou com o éster tereftalato de dimetileno (DMT).

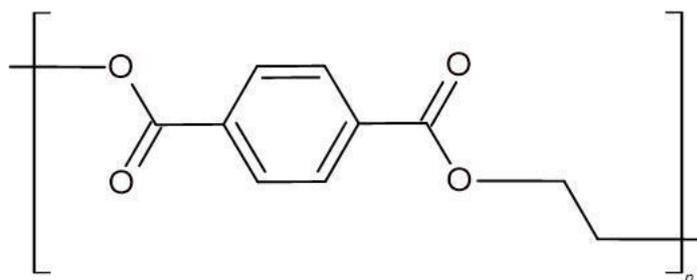
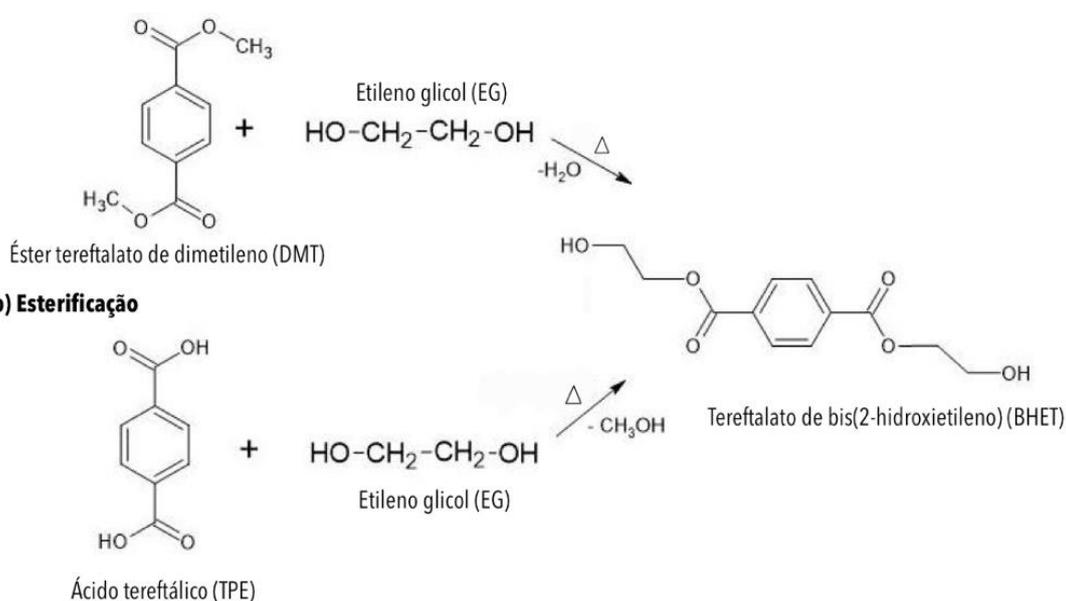


Figura 2 - Estrutura molecular do poli(tereftalato de etileno) (PET)

No geral, a polimerização do PET consiste em duas ou três etapas, sendo elas a pré-polimerização, a policondensação e a polimerização no estado sólido. Na pré-polimerização, o EG reage com um dos monômeros acima mencionado, com o intuito de produzir o oligômero tereftalato de bis(2-hidroxi-etileno) (BHET). A reação do EG com o TPA envolve uma esterificação direta, esta que dispensa a utilização de catalisadores por ser auto catalítica. Já no caso da pré-polimerização do EG com o DMT, há uma reação de transesterificação. (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009)

**a) Transesterificação**



**b) Esterificação**

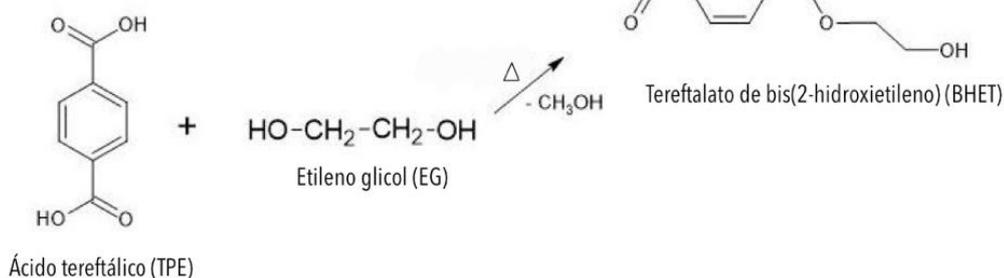


Figura 3 - Reações de a) transesterificação e b) esterificação. (NISTICÒ, 2020)

Após a produção do BHET, é realizada a etapa de policondensação, onde o BHET será aquecido de forma a elevar o grau de polimerização, iniciando a produção do PET. Esta é a etapa final para produtos que são atendidos por propriedades reológicas intermediárias e não requerem elevadas propriedades mecânicas, como é o caso das fibras têxteis. (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009)

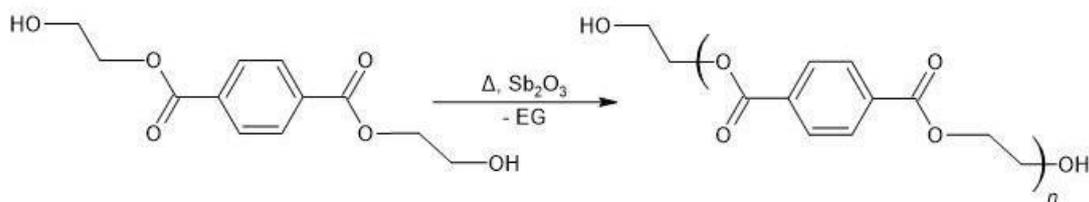


Figura 4 – Reação de policondensação do PET. (NISTICÒ, 2020)

No caso da produção do PET grau garrafa, são necessárias massas molares mais elevadas, as quais são atingidas em uma terceira etapa denominada policondensação no estado sólido (SSP), que tem o intuito de obter PET com elevadas massas molares, sendo necessária para resinas que serão processados por injeção-sopro. (ROMÃO; SPINACÉ; DE PAOLI, 2009)

A ampla utilização do PET em diversos produtos se deve à versatilidade das suas propriedades físicas, incluindo elevada resistência à ruptura, rasgo, impacto e perfuração – ao ser comparado com materiais semelhantes. Ele também possui uma resistência química considerável ao ser comparado com outros termoplásticos, especialmente contra cetonas, ésteres, solventes hidrocarbonados, clorados e ácidos diluídos. Além disso, traz uma versatilidade por poder ser utilizado em blendas, ser copolimerizado e ser produzido em diferentes formas, como pode ser visualizado na Tabela 2. (AWAJA; PAVEL, 2005; JORGE, 2013; NISTICÒ, 2020)

<b>Produto</b>	<b>Utilizações</b>
<b>Filmes PET</b>	Folhas de Raio-X, filmes fotográficos, embalagens, fitas magnéticas, isolamento eletrônicos, laminados para impressão
<b>Fibras PET</b>	Roupas, enchimento de almofadas, cortinas, roupas de cama.
<b>Frascos e Garrafas PET</b>	Bebidas, bebidas carbonatadas, frascos para alimentos, cosméticos, produtos de limpeza, tubos e seringas
<b>Plástico de Engenharia</b>	Componentes elétricos automotivos, limpadores de para-brisas, soquetes, revestimento de eletrodomésticos.

*Tabela 2 - Produtos de PET e seus usos. (AWAJA; PAVEL, 2005; “Conceitos Básicos sobre Materiais Plásticos,” [s.d.]; JORGE, 2013; LI-NA, 2013; PIRES; LUIZA; CARVALHO, 2013)*

O PET tem um importante papel na indústria alimentícia na produção de embalagens, uma vez que este apresenta uma ampla temperatura de trabalho, podendo ser utilizado em processos importantes nesta indústria, como a pasteurização e esterilização. Além disso, quando produzido na forma amorfa, apresenta elevada transparência luminosa, permitindo a visualização do produto pelo

consumidor. Para a conservação de alimentos, é muito importante que o material utilizado apresente uma elevada barreira à gases, umidade, odores, gordura e microrganismos, características que também estão presente no PET. No caso de bebidas carbonatadas, o PET é muito utilizado por manter o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) contido. Por fim, deve-se mencionar que o PET é um material reciclável e a resina reciclada pode ser reinserida na cadeia de valor deste termoplástico – seguindo algumas regulamentações para o caso de embalagens alimentícias. (AWAJA; PAVEL, 2005; JORGE, 2013; NISTICÒ, 2020)

### 2.3. Processos de Conversão do PET

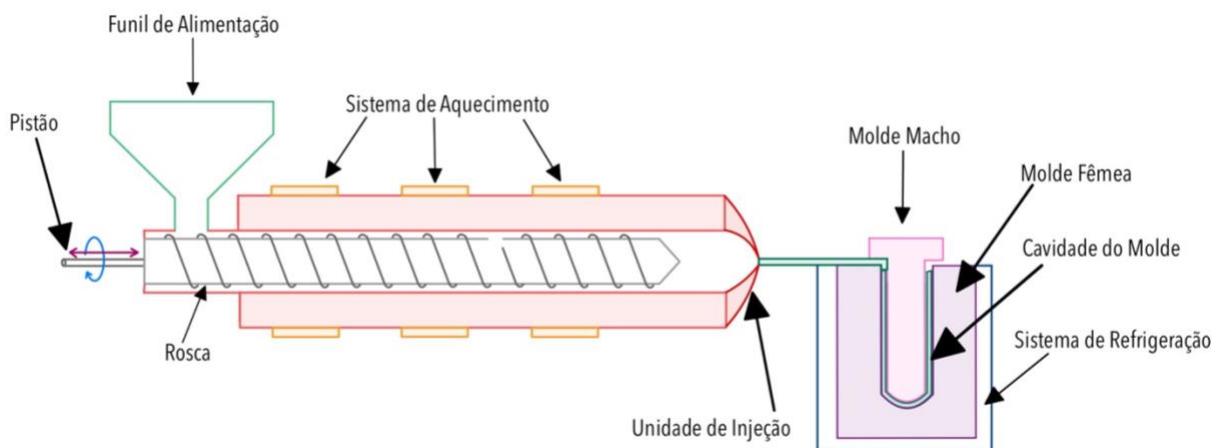
Ao discorrer sobre a utilização do PET na indústria alimentícia para a produção de garrafas, torna-se relevante abordar o processo de conversão, ou seja, o processo necessário para transformar a resina de PET em embalagem. A produção das garrafas PET é feita pelo processo de injeção-sopro, no qual existem duas etapas, sendo elas a moldagem por injeção e a moldagem por sopro. Na primeira, haverá a produção de pré-forma (figura 5) que será soprada na moldagem por sopro, atingindo a forma final de garrafa. (NISTICÒ, 2020)



*Figura 5 - Pré-forma de PET ("Conheça nossas pré-formas PET," [s.d.]*

A moldagem por injeção é comumente utilizada para a fabricação de produtos de geometrias específicas e complexas, que são possibilitadas pela utilização de um molde, para a produção de garrafa PET, ela é utilizada na produção da pré-forma de

PET. Neste processo utiliza-se uma injetora – Figura 6 – que é equipada com um funil de alimentação, um barril dentro do qual há uma rosca, um sistema de aquecimento, um pistão e um molde com o formato da pré-forma e um sistema de resfriamento. O processo de injeção envolve a alimentação do polímero no barril, onde ele será fundido devido à geração de calor do movimento da rosca e do polímero. O polímero fundido é transportado ao longo do barril, onde no fim será bombeado pelo pistão para um molde com a geometria exata do produto. Este molde é resfriado pelo um sistema de refrigeração, que irá resfriar o polímero fundido ao entrar em contato com as paredes do molde, adquirindo as dimensões do molde. Quando o polímero está totalmente resfriado, o molde é aberto e a peça moldada é ejetada. (DE ALMEIDA LUCAS, 2020)



*Figura 6 - Esquematização de uma Injetora*

Após ser produzida no processo de injeção, a pré-forma será acoplada a um bastão de soprimento, e será colocada no interior do molde com a geometria da garrafa. Neste, a pré-forma será soprada de forma a alcançar as suas paredes e tomar a forma de garrafas (JORGE, 2013). Neste processo de sopro, o PET é estirado de forma a reorganizar suas cadeias poliméricas, o que dá ao material uma maior resistência mecânica, propriedade importante para a eficiência das garrafas.

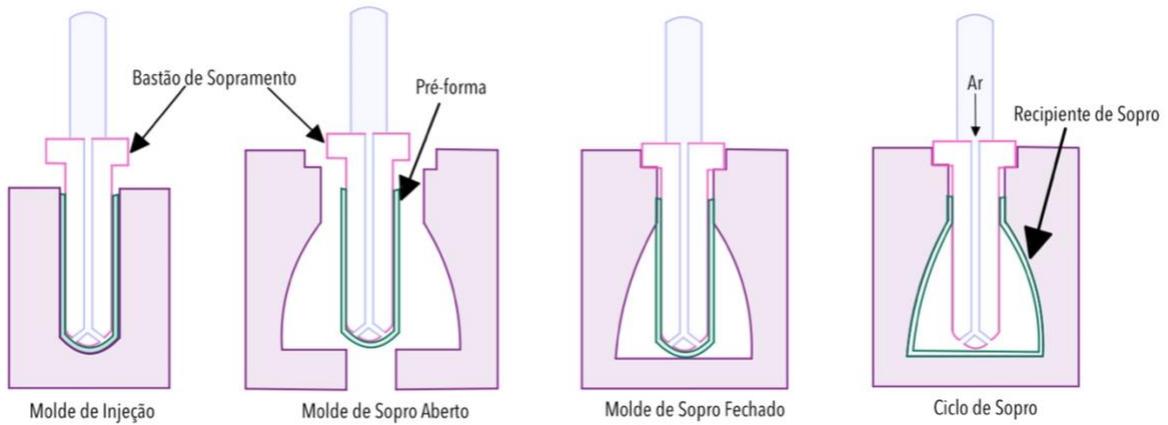


Figura 7 - Esquemática da Injeção-Sopro adaptado de (RILEY, 2012)

Os esquemas apresentados nas figuras 6 e 7 são feitos de forma simplificada, mas na prática as garrafas PET são produzidas em processos industriais, ou seja, a produção é realizada em grande escala. A injeção é feita em peças com diversas cavidades de moldes de pré-formas – Figura 8 – e o sopro é realizado de forma mecanizada, onde as pré-formas presas em garras são inseridas no molde, sopradas e logo retiradas, como ilustrado na Figura 9.

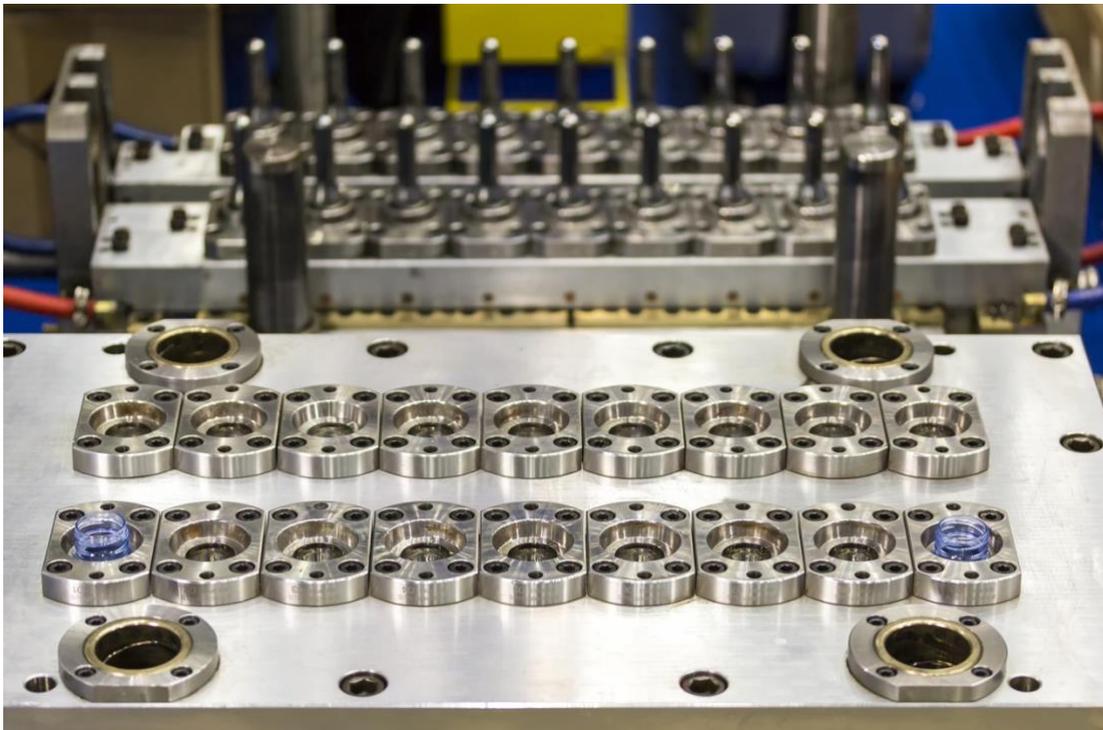
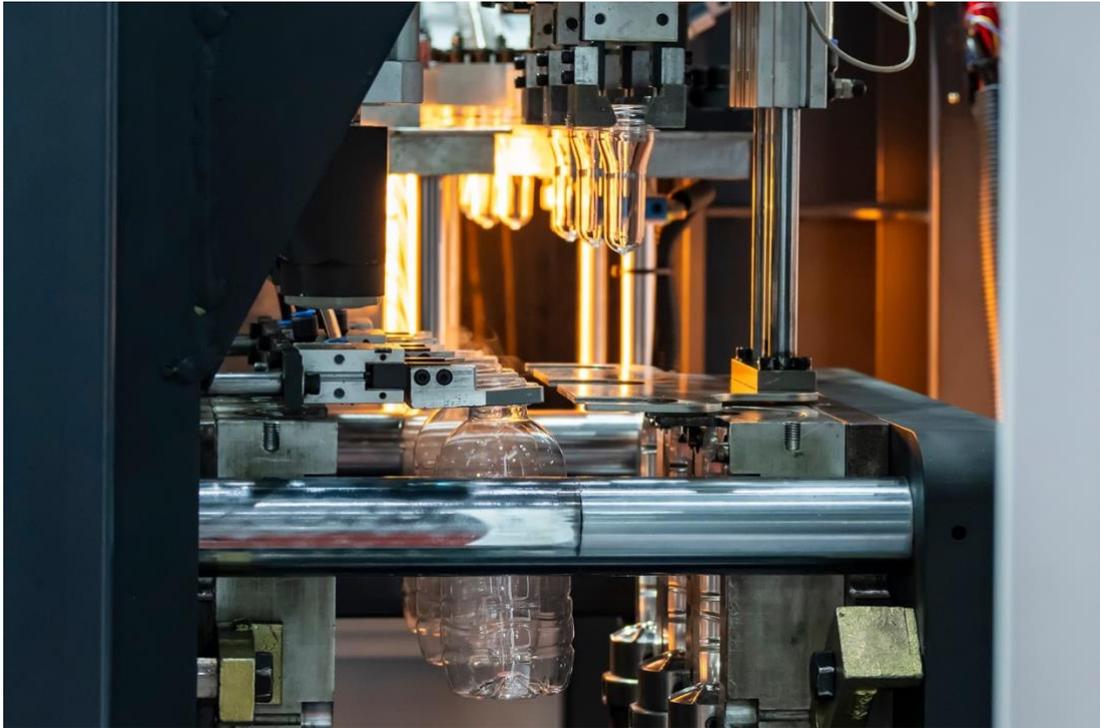


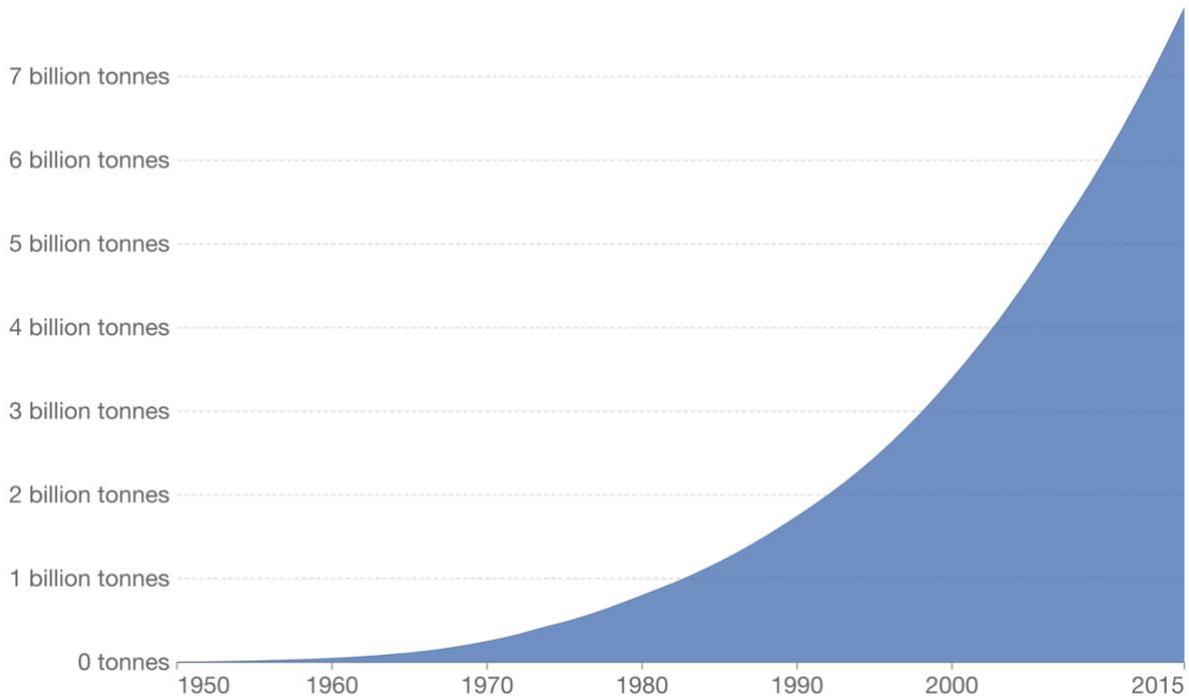
Figura 8 - Molde industrial de pré-formas para injeção ("Shutterstock," [s.d.])



*Figura 9 - Processo industrial de sopro de pré-formas (“Shutterstock,” [s.d.]*

#### **2.4. Reciclagem do PET**

A reciclagem é definida pela Política nacional dos Resíduos Sólidos *como “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos”* (“Política Nacional dos Resíduos Sólidos,” 2010). Com o contínuo crescimento da produção e consumo de plásticos no mundo – como pode ser visto no Gráfico 1 - a reciclagem se torna pertinente, uma vez que dá uma destinação adequada e ambientalmente correta aos mais diferentes tipos de resíduos plásticos.



*Gráfico 1- Produção Global de Plásticos de 1950 até 2015 medida em toneladas (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; “Our World in Data,” [s.d.]*

Do ponto de vista ambiental, o PET apresenta um grande papel, dado que é o polímero mais reciclado do mundo (ABIPET, [s.d.]). Esta reciclagem pode ser feita de três diferentes formas, reciclagem primária, secundária e terciária. O início dos três tipos de reciclagem é dado pela coleta do PET, onde é necessário que haja consciência por parte do consumidor para a destinação correta do material.

No caso da reciclagem primária, também conhecida como reciclagem mecânica, após a coleta os plásticos serão separados em cor e tipo de material e serão moídos em pequenos flocos que serão higienizados e secos. Após as etapas iniciais, o PET moído, limpo e seco, será submetido a um processamento que envolve extrusão para a produção de grânulos que serão utilizados como matéria-prima para a produção de novos produtos (AWAJA; PAVEL, 2005; “Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019). Este é um processo simples, barato e ambientalmente favorável. Porém, não é um processo adequado para resíduos complexos e muito contaminados. Além disso, é um processo que submete o polímero a uma série de reações indesejadas de degradação que diminuem a sua massa molar, diminui sua viscosidade e conseqüentemente altera suas propriedades mecânicas e reológicas. (AWAJA; PAVEL, 2005; ELAMRI et al., 2017; NISTICÒ, 2020)

A reciclagem secundária, também conhecida como reciclagem química consiste na despolimerização total ou parcial do PET, onde este retornará aos seus monômeros ou oligômeros. Essa reação pode ocorrer por meio de hidrólise, metanólise ou glicólise e independente do caminho escolhido, esta despolimerização consiste na abertura das ligações ésteres presentes nas cadeias poliméricas. As moléculas menores – monômeros e oligômeros - produzidas a partir da quebra dessas ligações são posteriormente purificadas e reutilizadas como matéria-prima para outros produtos. (ELAMRI et al., 2017; NISTICÒ, 2020)

A reciclagem química do PET leva à produção do monômero do qual o mesmo é produzido. Este é um processo importante uma vez que permite uma eliminação eficiente de contaminantes pós consumo e não há uma alteração nas propriedades mecânicas como no caso da reciclagem mecânica, porém é um processo de elevado custo. (AWAJA; PAVEL, 2005; NISTICÒ, 2020)

Por fim tem-se a reciclagem terciária, processo também conhecido como reciclagem energética. Este processo é aplicado para casos nos quais o material a ser reciclado é perigoso para ser manuseado ou tem contaminantes tóxicos, ou também em situações nas quais a coleta, classificação e separação é dificultada ou não é economicamente vantajosa. Essa reciclagem consiste na recuperação energética do material, onde energia armazenada no material será recuperada pela sua queima e transformada em energia térmica que será utilizada na produção de eletricidade (ELAMRI et al., 2017). Esta última forma de reciclagem é muito difundida em regiões densamente povoadas, onde torna-se necessário a otimização de espaço. Porém, é um processo que necessita apoio governamental por não ser economicamente viável e quando não realizado de forma correta – ou seja, com a utilização de catalisadores - ser prejudicial ao meio-ambiente uma vez que pode liberar gases tóxicos e nocivos à saúde. (ELAMRI et al., 2017; “Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019)

No caso das embalagens utilizadas na indústria alimentícia, o PET reciclado por via química é o mais adequado para a utilização como embalagem primária – aquelas que estão diretamente em contato com o produto. Isso se dá, pois, a via de reciclagem química permite uma elevada purificação da resina plástica – que pode ser feita por destilação, cristalização, por meio de tratamentos superficiais ou a vácuo – de forma que há uma limpeza mais eficiente do material reciclado (NISTICÒ, 2020)

Já o PET reciclado pela via mecânica só pode ser utilizado como embalagem primária se cumprir requisitos definidos por lei. No Brasil isto segue a regulamentação de embalagens do Mercosul, que define que os mesmos devem passar por um teste de pureza, não podem transferir impurezas para o alimento e devem ser compatíveis com o alimento para o qual serão utilizados. (“Resolução RDC ,” 2008)

Apesar de uma limpeza mais eficiente do material reciclado, demandando uma triagem menos exigente, a reciclagem química ainda é pouco utilizada devido ao seu custo (“Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019). Em contrapartida, a reciclagem mecânica é um processo mais simples, mais econômico e devido as etapas de coleta e separação, no contexto brasileiro, gera uma grande quantidade de empregos. (MONTEIRO AVELINO, 2020)

## **2.5. Avaliação do Ciclo de Vida do PET**

Tendo em vista o contexto atual onde soluções ambientais e produtos ecologicamente corretos são sempre bem-vistos com o intuito de atingir um desenvolvimento sustentável, torna-se importante avaliar mais atentamente o impacto que essas alternativas podem ter a longo prazo e sob uma perspectiva mais holística.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é mais comumente utilizada em produtos, mas pode também ser utilizada em empresas, cidades, infraestrutura, gestão de sistemas - resíduos, energia, transporte etc. O seu principal intuito é olhar para o objeto de estudo com uma perspectiva de ciclo de vida, aferindo as variáveis envolvidas em todos os processos diretos e indiretos relacionados para a sua utilização. Nesta é possível identificar e prevenir as consequências ambientais da implementação do objeto de estudo, se haverá algum efeito colateral decorrente dessa mudança. Entre os problemas avaliados, os principais são o consumo de água, mudanças climáticas, ocupação e transformação de terra, impactos na saúde humana, excesso de nutrientes na água, efeitos tóxicos decorrentes de metais e produtos sintéticos e esgotamento de recursos naturais. (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017)

De acordo com a norma ISO 14040, a ACV é realizada em quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretações (Figura 9). De início, deve-se definir o objetivo da ACV, a motivação da sua realização e quais são os questionamentos que se pretende responder ao fim

do estudo. Em conjunto com a definição do objetivo, é essencial definir o escopo, ou seja, quais atividades e processos estão envolvidos com o sistema do objeto de estudo. Nesta etapa também deve-se definir os parâmetros a serem avaliados pelo estudo e uma unidade funcional, que será utilizada como parâmetro quantitativo. Além disso, deve-se decidir se é um estudo comparativo, ou seja, se avalia o impacto da utilização do produto como alternativa ou se tem como principal objetivo a avaliação apenas do produto por si só. (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017)

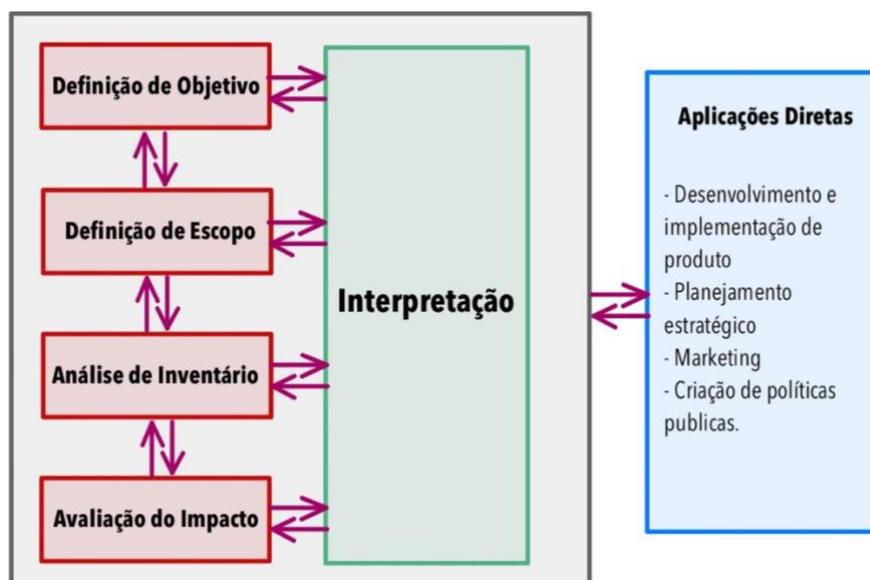


Figura 10 - Estrutura do ACV modificada da norma ISO 14040

Após essa primeira etapa, deve-se realizar a análise de inventário, essa que afere todos os processos definidos no escopo. Nessa fase é avaliado o fluxo do sistema estudado, considerando as entradas que são recursos, materiais, produtos e subprodutos utilizados ao longo do ciclo de vida do sistema e as saídas decorrentes dele, ou seja, emissões, resíduo e outros produtos relevantes para o sistema. Com essa análise de inventário, obtém-se uma lista com todos os fluxos contidos no processo definidos em formas quantitativas, esta lista é denominada de inventário do ciclo de vida (ICV). (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017)

Na terceira etapa realiza-se a análise de impactos ambientais, esta que é separada em seleção, classificação, caracterização, normalização e agrupamento ou ponderação. Primeiro são selecionados grupos de impacto definidos de acordo com o que foi estabelecido pelo escopo. Para cada um desses grupos, um indicador é escolhido e um modelo ambiental, a fim de obter parâmetros quantitativos. Após essa

seleção, os fluxos definidos na análise de inventário serão categorizados em cada grupo de impacto de acordo com a sua influência nos indicadores definidos. Na etapa de caracterização, se obtém resultados com a utilização do modelo ambiental que quantifica os impactos de cada fluxo. Posteriormente, estes impactos são normalizados, a fim de obter pontuações que poderão ser comparadas entre si para cada grupo de impacto. Por fim, realiza-se uma ponderação ou agrupamento, onde pode-se avaliar e classificar cada grupo avaliado de acordo com a severidade do seu impacto. (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017)

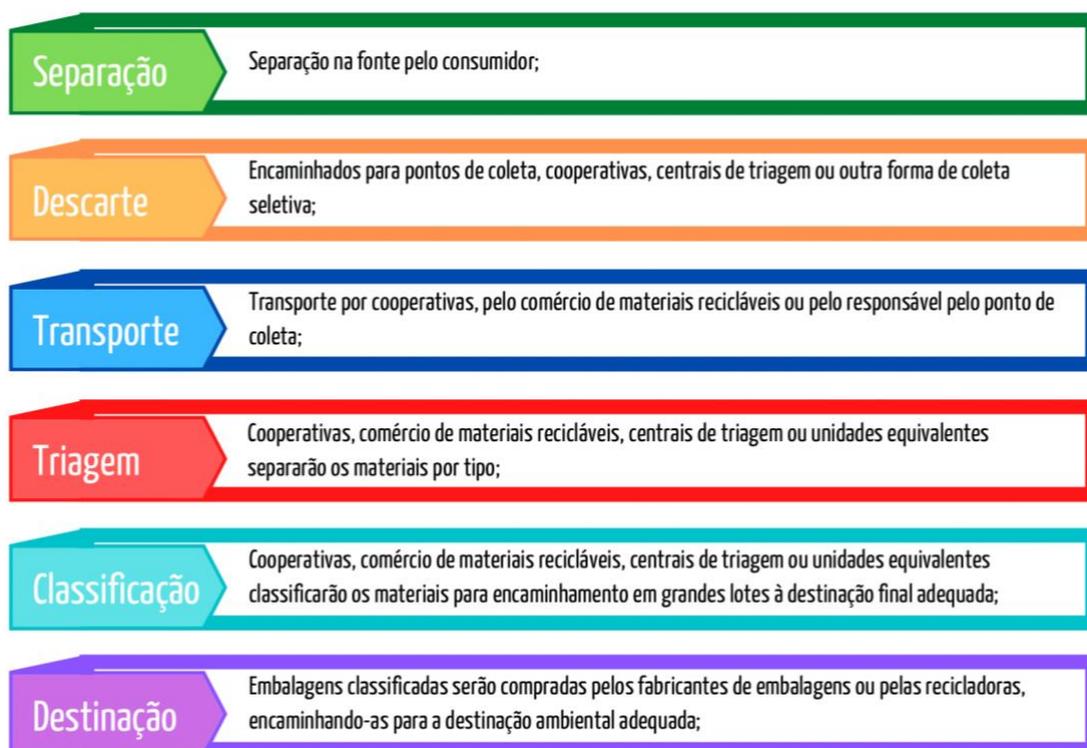
Na interpretação considera-se os resultados obtidos na análise de inventário, na análise de impacto, na normalização e ponderação. Estes resultados serão interpretados e utilizados para responder as perguntas definidas no início, em conjunto com a definição do escopo e do objetivo. (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017)

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1. Panorama de Reciclagem de PET no Brasil**

Em vista do aumento populacional e conseqüentemente do consumo de produtos atrelado a este crescimento, em 2010 foi implementada no Brasil a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Entre seus objetivos há o incentivo à indústria de reciclagem, com o intuito de aumentar o uso de matérias primas derivadas de materiais recicláveis. No âmbito de embalagens, em 2015, foi definido um acordo setorial onde foi estabelecida a responsabilidade compartilhada pelo seu ciclo de vida, pela destinação correta ou retorno dos resíduos ao ciclo produtivo. (MAIA PIANOWSKI, 2017)

Neste contexto, foi implementado um sistema de logística reversa com a cooperação de empresas e associações relacionadas à indústria de embalagem com cooperativas e catadores de resíduos sólidos. Este sistema consiste em seis etapas, que estão resumidas no fluxograma a seguir. (MAIA PIANOWSKI, 2017)



*Figura 11 - Etapas de funcionamento da logística reversa conforme o Acordo Setorial, adaptado de (MAIA PIANOWSKI, 2017)*

No caso das embalagens de PET, segundo a ABIPET, os principais transportadores dos produtos pós-consumo, são os comerciantes de reciclagem, as cooperativas de coleta de material sólido, a coleta seletiva realizada pela prefeitura e os catadores de lixo. Sendo a participação destes no fornecimento de matéria-prima para a reciclagem mostrada no Gráfico 2. (ABIPET, 2019)

Após a coleta do PET pós-consumo, ele será encaminhado para as empresas recicladoras de PET. Segundo a ABIPET existem 160 empresas recicladoras de PET, sendo elas divididas em três diferentes grupos; as que fazem a reciclagem, que representam 22% desse total, as aplicadoras, que adquirem e utilizam o PET reciclado, que equivalem a 70% e os outros 8% são compostos pelos integrados, que além de reciclar o material também o utilizam para a fabricação de produtos. (ABIPET, 2019) Dentro desse número, existem um total de 20 plantas de reciclagem de PET em todo o país. (“Plastic Recycling Plants in Brazil,” [s.d.]

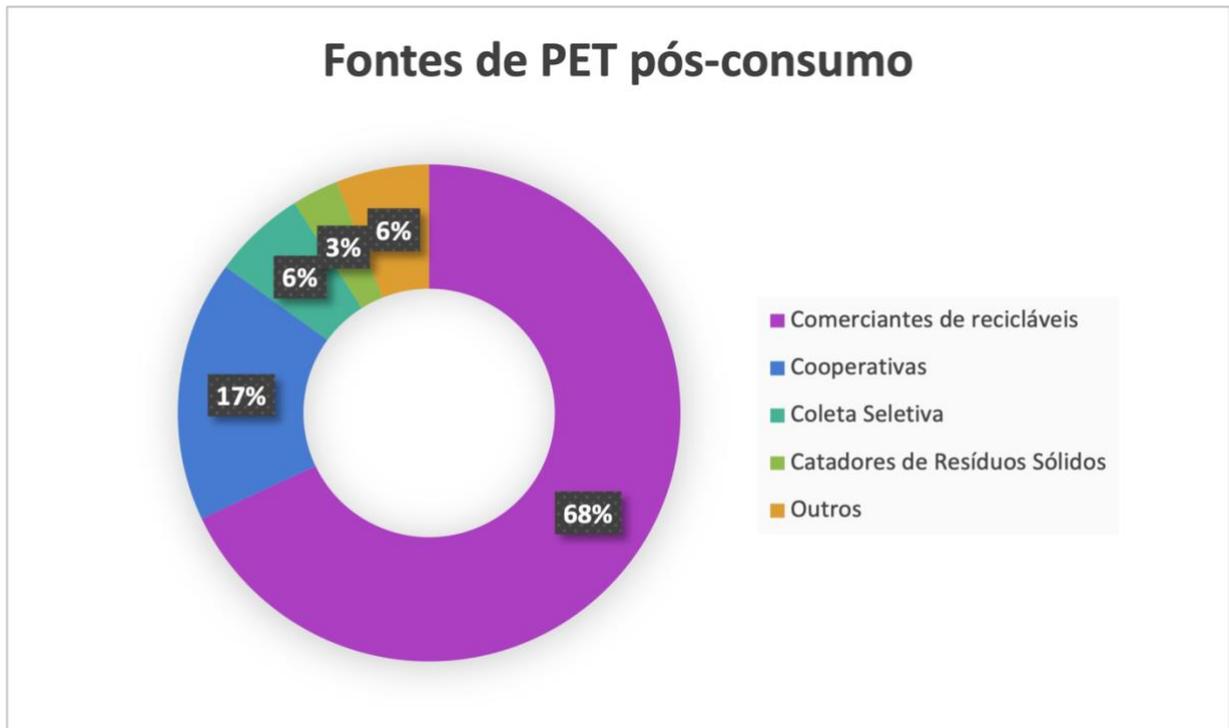


Gráfico 2 - Fontes de PET pós-consumo para a reciclagem, adaptado de (ABIPET, 2019)

O principal processo de reciclagem do PET realizado no Brasil é a reciclagem mecânica, esta que consiste primeiro na separação dos materiais que podem ser reciclados através desse processo daqueles que não podem, além disso, os que serão reciclados são separados por tipo de material e cor. Após essa etapa, o material será condensado a partir de um processo de empacotamento ou moagem. Para a retirada de contaminantes, o material será lavado com água e secado através de circulação de ar quente. Por fim, esse material será colocado em uma extrusora, que irá fundi-lo e transformá-lo em grânulos, que serão comercializados como matéria-prima reciclada (MONTEIRO AVELINO, 2020). O processo está esquematizado no fluxograma a seguir.

Pensando no panorama de reciclagem do PET, é importante ressaltar os mercados supridos pela resina reciclada produzida. A partir de 2008, o PET reciclado (PETr) produzido de acordo com as regulações dispostas pela resolução da ANVISA RDC nº 20 de março de 2008 passou a ser utilizado para o tipo de reciclagem *bottle-to-bottle* (B2B), que significa que o pet garrafa pós consumo é reciclado e sua resina é adicionada à resina virgem para a produção de novas garrafas. As principais aplicações da resina reciclada de PET estão representadas no Gráfico 3.

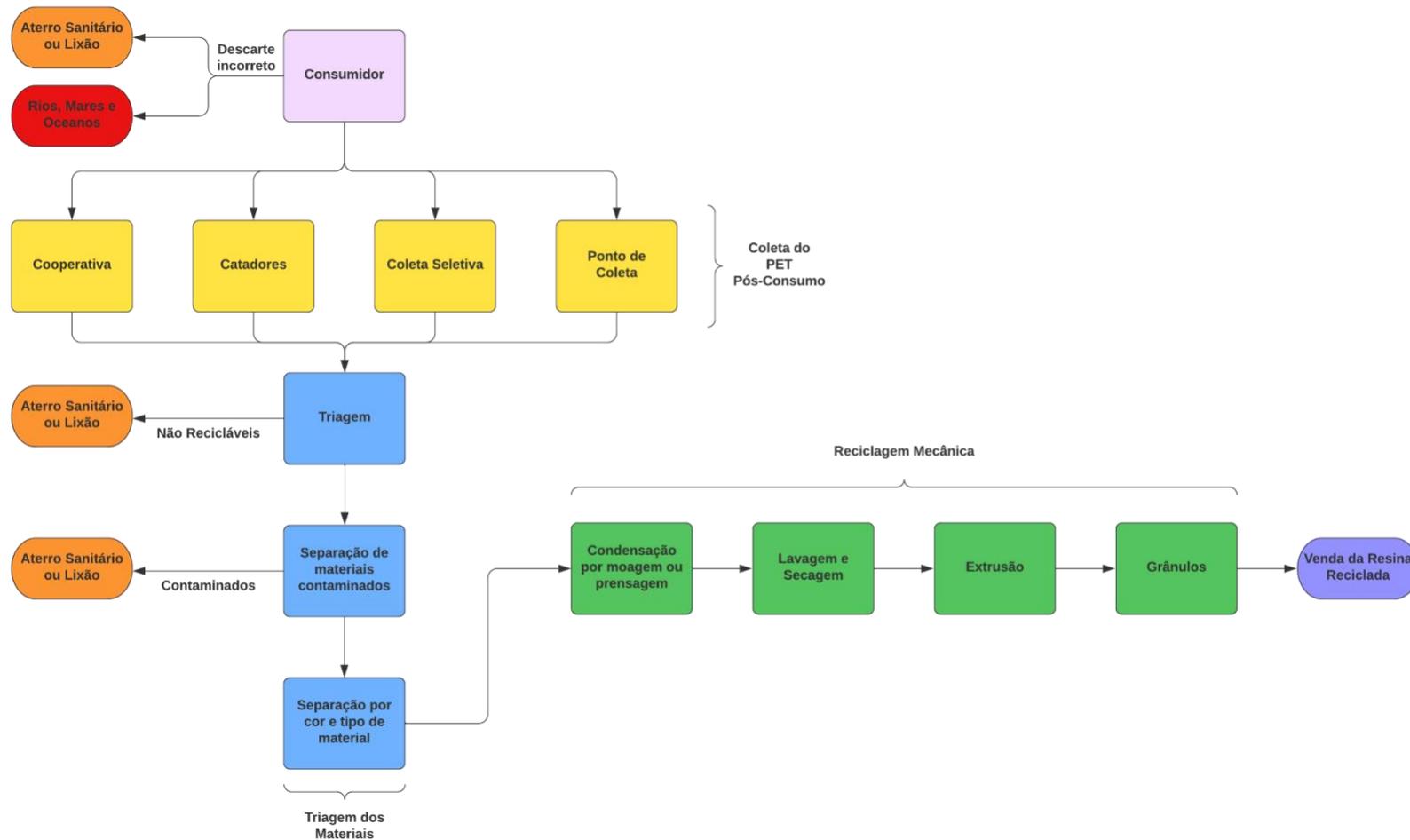


Figura 12- Fluxograma da Reciclagem do PET no Brasil (ABIPET, 2019; MAIA PIANOWSKI, 2017; “Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019)

A indústria de garrafas PET responde pela maior parte do consumo do PETr, utilizando-o para pré-formas e garrafas, sendo seguida a indústria têxtil, que o utiliza na produção de fios de poliéster, tecidos, carpetes. Além disso, o PETr também é utilizado para termoformagem e laminados, no setor químico e para a produção de fitas de arquear, entre outras aplicações. (ABIPET, 2019; “Resolução RDC ,” 2008)

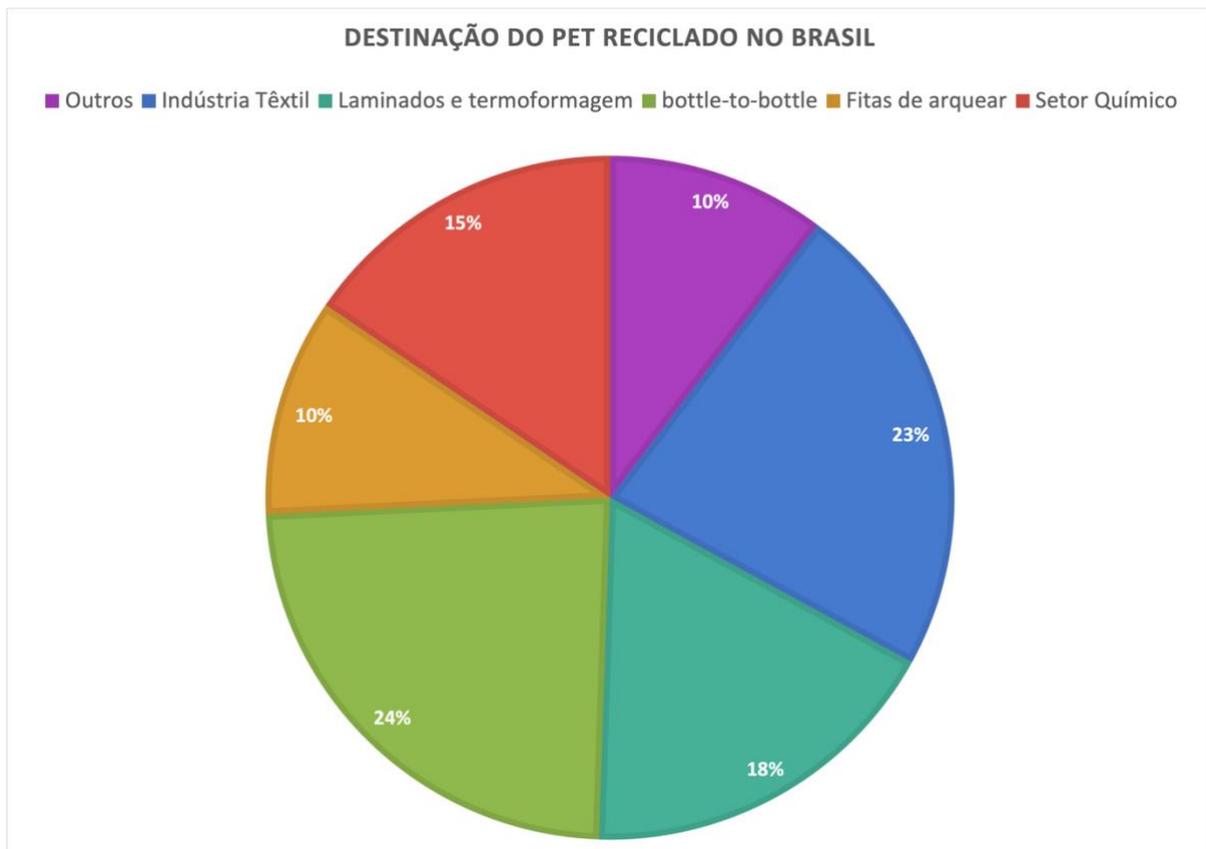


Gráfico 3 - Destinação do PET reciclado no Brasil – Produzido com os dados obtidos de (ABIPET, 2019)

Apesar da criação da PNRS e da realização do acordo setorial, o Brasil ainda enfrenta alguns problemas no crescimento da taxa de reciclagem do PET. Quando se observa os dados obtidos a partir dos censos realizados pela ABIPET, ainda encontra-se uma certa instabilidade no índice de reciclagem, onde o mesmo não apresenta um crescimento contínuo. Além disso, há uma certa dificuldade para encontrar os dados de reciclagem do PET, sendo que apenas a quantidade reciclada foi disponibilizada e não o percentual em relação a quantidade total de PET produzida no ano de referência. Os dados encontrados sobre a reciclagem do PET no Brasil encontram-se no gráfico abaixo. (ABIPET, 2016, 2019)

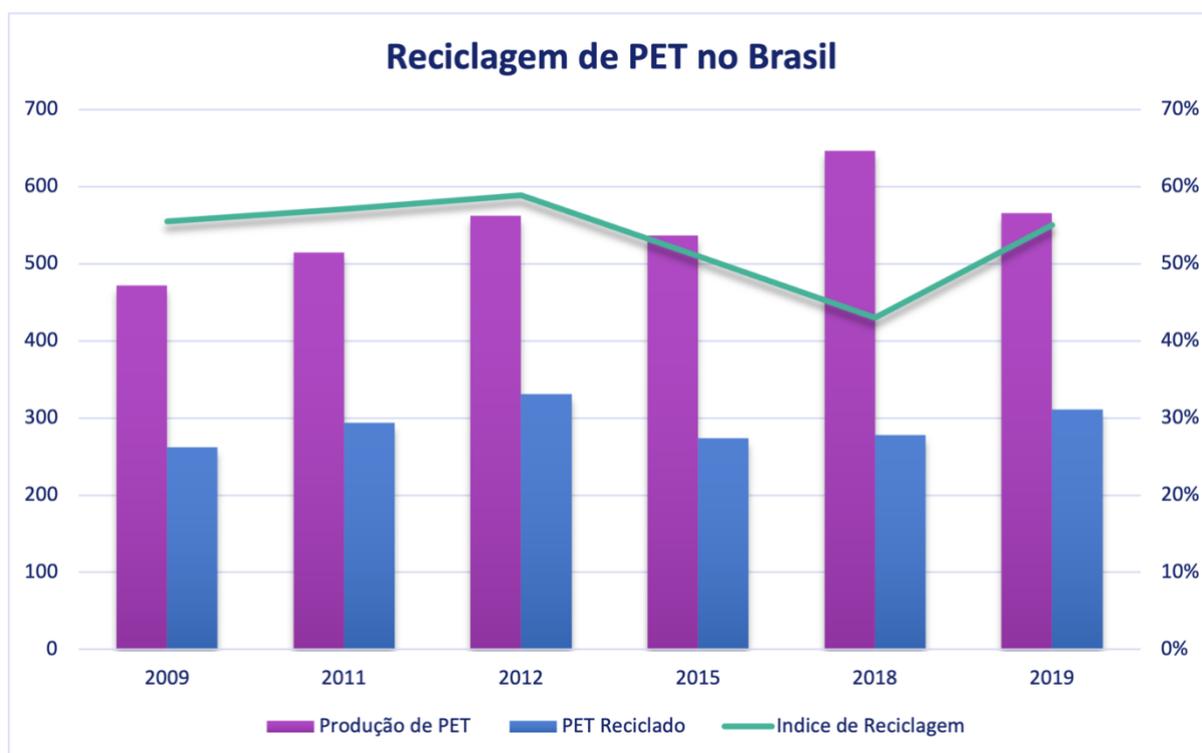


Gráfico 4 - Reciclagem do PET no Brasil - Produzido com os dados obtidos de (ABIPET, 2016, 2019)

### 3.2. Panorama de Reciclagem de PET na Alemanha

A Alemanha é atualmente uma referência em reciclagem de embalagens e o principal motivo foi o fato de o governo alemão ser pioneiro na criação e implementação de uma lei que incentivasse a reciclagem. Em 1986 se inicia a criação de Lei de Lixo Alemão, dentro da qual, em 1991 foi criada a Portaria de Embalagem alemã (Packaging Ordinance). Nesta, foi atribuída uma responsabilidade compartilhada entre fabricantes de embalagens, seus envasadores, distribuidores e importadores pelo ciclo de vida da embalagem, onde eles devem coletar um certo percentual das embalagens pós-consumo e reciclá-las. Ao longo dos anos a Portaria de Embalagem alemã foi modificada, sendo denominada de Lei de Embalagem Alemã e mais recentemente esta estabeleceu que todos os comerciantes e distribuidores finais são obrigados a recolher embalagens de bebidas feitas de materiais que eles próprios vendem e que deve ser cobrado um caução das garrafas de bebidas de uso único. (NAKAJIMA; VANDERBURG, 2006)

Por conta dessa regulamentação, em 2005, a Associação Alemã de Varejo (HDE) e a Associação Federal da Indústria Alimentícia Alemã (BVE) fundaram o Deutsche Pfandsystem, sistema que consiste na existência de pontos de coleta em

todos os estabelecimentos comerciais que vendem garrafas PET. Com a devolução da embalagem pós consumo, o consumidor recebe um ticket – referente ao caução, que é recebida de volta - que é utilizado como um voucher em novas compras no estabelecimento. (“Der DPG-Einwegpfand-prozess,” [s.d.] )

Paralelamente ao sistema acima mencionado, existe também o denominado sistema duplo, que após as regulamentações aplicadas pela Lei da Embalagem Alemã foi criado pelas indústrias de embalagem e é utilizado para embalagens que não podem ser coletadas no Pfand. Esse sistema duplo consiste em uma terceirização da coleta do material pós consumo, onde as produtoras de embalagens pagam uma taxa de licença para uma outra empresa, que fica responsável pela coleta e destinação correta desse material. As embalagens das participantes desse sistema contêm um símbolo característico, denominado ponto verde, que as diferem por destinação correta das suas embalagens. (BIRKENSTOCK, 2013)

Em 2019 foram coletadas um total de 458 mil toneladas de embalagens de PET na Alemanha, sendo o sistema de Pfand responsável por 85% desse valor e o sistema duplo por 11%. Devido a existência de embalagens retornáveis e de algumas perdas no processamento, nem todo o material coletado é reciclado, porém o elevado índice de coleta é um forte contribuinte para elevados níveis de reciclagem. (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020)

Após a coleta desse PET pós consumo, ele será direcionado para a reciclagem. Como a principal embalagem produzida a partir do PET são as garrafas, será abordado o seu ciclo de reciclagem. Após as garrafas serem colocadas na máquina de coleta, os seus códigos serão lidos e então elas serão separadas de acordo com a sua destinação. Atrás dessa máquina há um compactador, que irá amassar as garrafas e prensá-las em um bloco que será armazenado até sua coleta. (“Der DPG-Einwegpfand-prozess,” [s.d.] )

As garrafas serão coletadas e direcionadas para uma planta de reciclagem, onde são colocadas em uma esteira automatizada, onde inicialmente se retira o rótulo das garrafas e as separam de suas tampas – que são feitas de material diferente. Depois há uma triagem, onde as garrafas são separadas por cores. Após essa primeira triagem, as garrafas serão picotadas em flakes, que são lavados por lixiviação. Estes flakes serão colocados em grandes extrusoras, que irão processar o material em forma de grânulos, que serão comercializados como matéria-prima para novos produtos. (“Einweg-PET-Flasche mit Pfand,” [s.d.] )

Importante ressaltar, que no processo de reciclagem alemão, todas as perdas na triagem— ou seja, materiais contaminados – e perdas de processamento, serão encaminhadas para a incineração, onde haverá a sua reciclagem energética. Em 2019, de 448,6 mil toneladas de garrafas PET coletadas, 8,7 mil toneladas foram destinadas para a reciclagem energética (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020). Todo o processo de reciclagem de PET está esquematizado na figura 12.

Na Alemanha, a divisão dos mercados que são atendidos pelo PET reciclado é um pouco mais simplificada, sendo ele utilizado em sua maioria para a produção *bottle-to-bottle*, Em seguida, temos uma grande participação dos filmes laminados, que é uma indústria cuja utilização desse PET reciclado tem aumentado. Depois, tem-se as fibras, e o restante é classificado como outros, que abrange as fitas de plástico, aplicações em moldagem por injeção e garrafas para fins não alimentícios. No gráfico 5 é possível visualizar essa divisão de forma mais clara. (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020) Essa regulamentação e as soluções aplicadas mostraram grandes resultados nos níveis de reciclagem do PET no país, que vem crescendo ao longo dos anos. Em 2013, o nível de reciclagem era de aproximadamente 75%, em 2019 esse número foi em torno de 91% de reciclagem, mais detalhes podem ser visualizados no gráfico 6. Esse elevado índice de reciclagem também tem a contribuição das 35 plantas de reciclagem de PET espalhadas por toda a Alemanha. (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020; “Plastic Recycling Plants In Germany,” [s.d.]

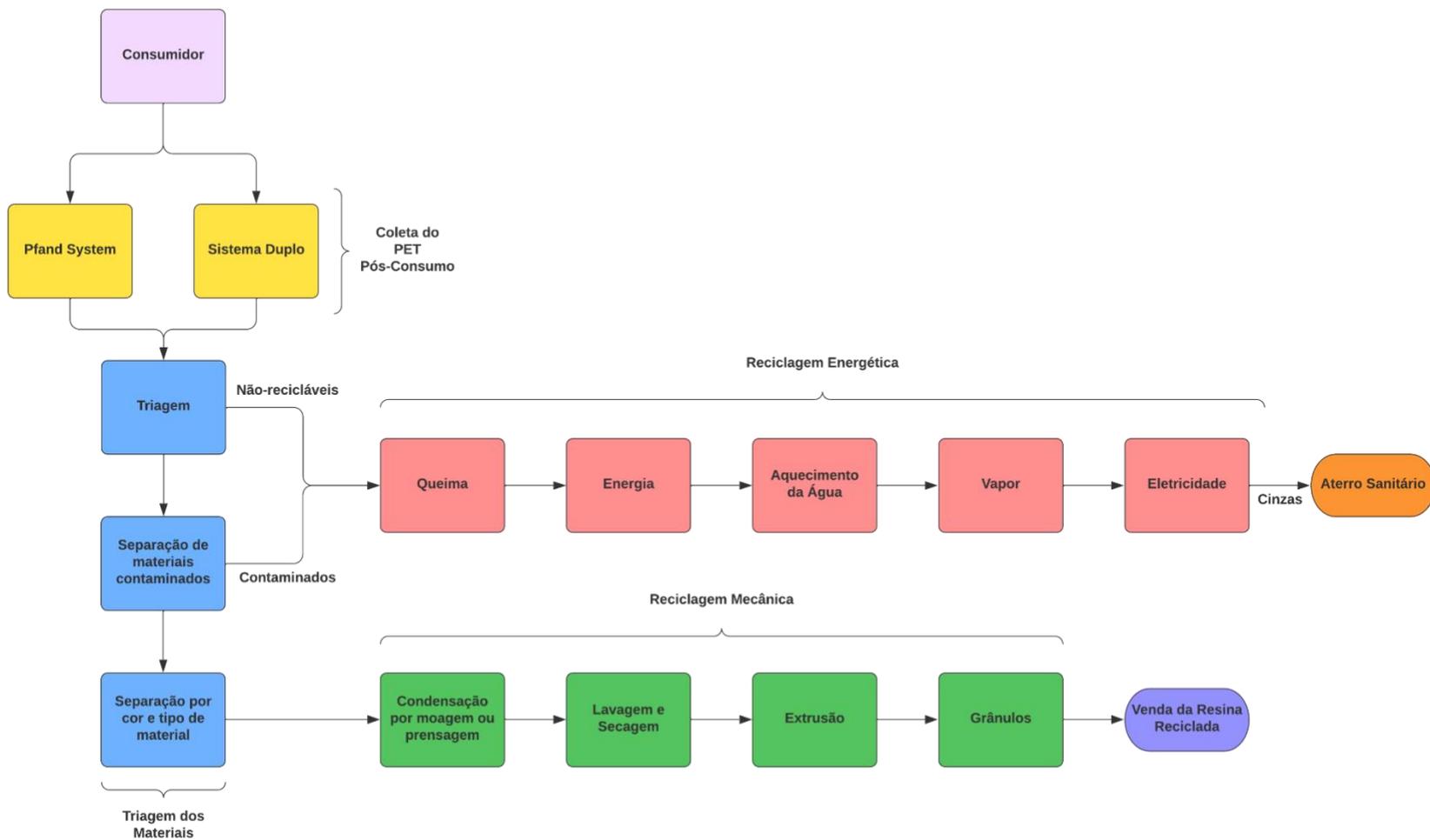


Figura 13 - Fluxograma da Reciclagem do PET na Alemanha. (“Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.,” 2019; “PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020)

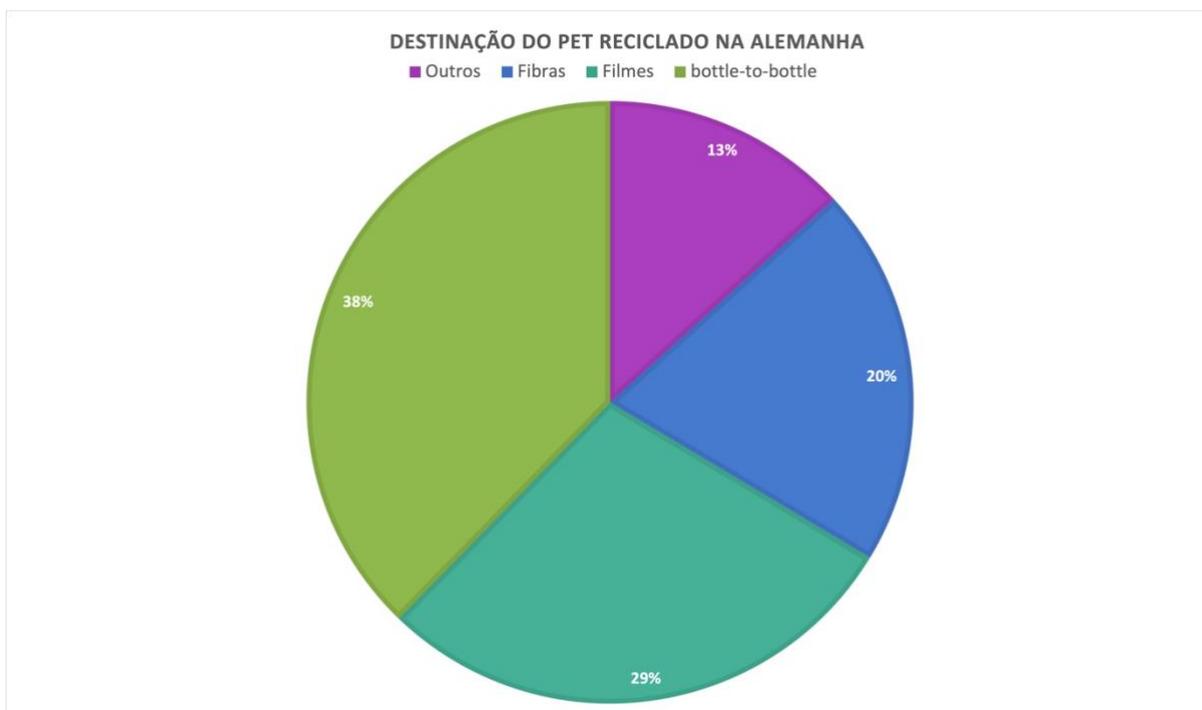


Gráfico 5- Destinação do PET reciclado na Alemanha – adaptado pela própria autora de (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020)

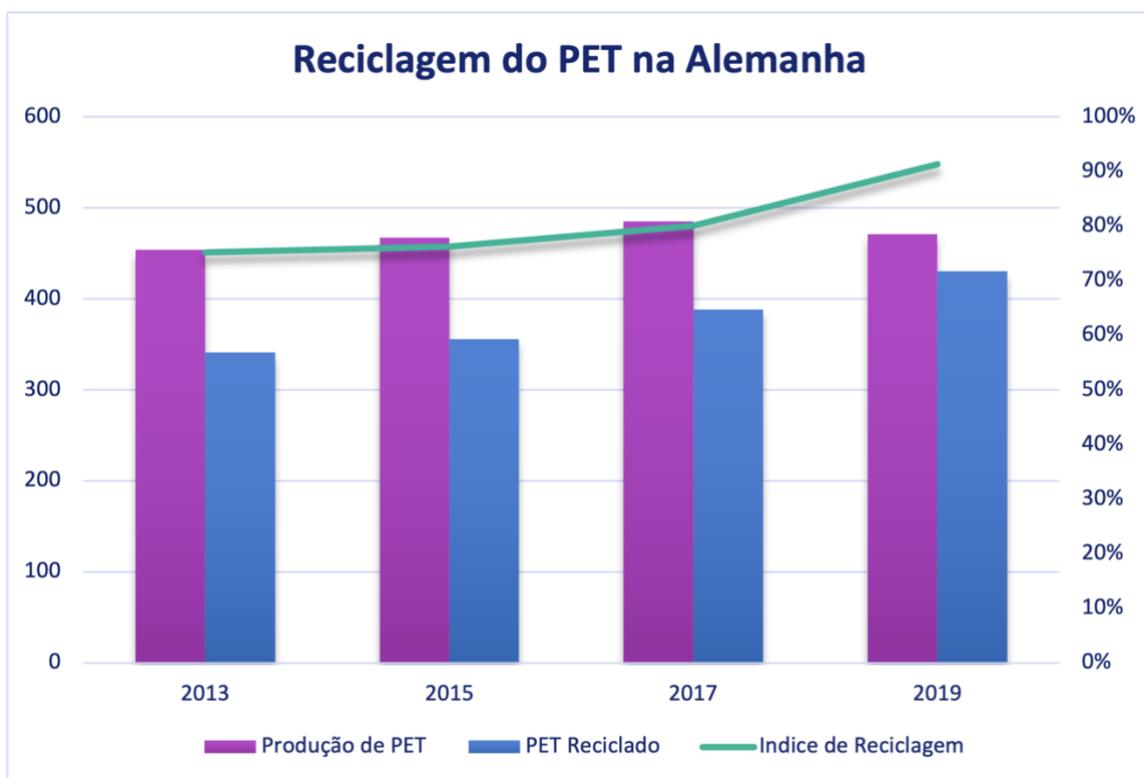


Gráfico 6 - Reciclagem do PET na Alemanha - Produzido com os dados obtidos de (“PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020)

A partir do panorama realizado para ambos os países, é possível observar uma grande diferença nos índices de reciclagem do PET, sendo em torno de 90% para a Alemanha, enquanto o Brasil se mantém em torno de 50%. Como já mencionado, o Brasil tem partes das suas plantas de reciclagem de PET ociosas, concluindo-se uma carência no sistema coleta do PET pós consumo. Isso pode ser justificado por legislação mais recente e pela dependência de cooperativas e catadores de resíduos sólidos em algumas regiões, visto que a coleta seletiva é realizada em apenas 1269 dos 5570 municípios no Brasil (“Resumo Executivo - Compromisso Empresarial para Reciclagem,” 2020). Outro fator a ser considerado é a consciência ambiental dos consumidores, considerando que em 2019 no Brasil houve em torno de 15,5 kg/per capita de plástico destinado incorretamente em comparação aos 0,40kg/per capita na Alemanha. Assim, é possível assumir uma menor preocupação dos brasileiros com a reciclagem de embalagens plásticas (MEIJER et al., 2021).

### **3.3. Avaliação do Ciclo de Vida de Embalagem do PET**

Dada a grande importância do PET e seu grande papel como material para a fabricação de embalagens, torna-se essencial uma abordagem do ponto de vista de seu impacto ambiental. Existem diversos estudos com diferentes perspectivas sobre o ciclo de vida desse material polimérico quando utilizado em embalagens e alguns serão apresentados como base de revisão para o presente trabalho.

De forma mais geral, Santos (2011) realiza uma ACV de garrafas PET no Brasil, sendo uma fonte de informações para outras análises. É um trabalho abrangente, onde é feita uma avaliação, desde a fabricação da resina e das pré-formas, passando pelo sopro e envase das garrafas, até seu descarte e reciclagem. Essa análise resultou que a produção de uma unidade de garrafa PET consome 2,9 watts-h de energia e que nesta há emissão de 91,45 gramas de resíduos – sendo eles emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos - o transporte da matéria-prima ser inteiramente rodoviário é uma grande contribuição nesse valor. Além disso, foi verificado que a reciclagem de garrafas PET é benéfica, dado que a reciclagem compensa toda a energia utilizada na produção da resina virgem.

Ainda dentro do contexto brasileiro, Gileno & Turci, (2021) realizaram um estudo do ciclo de vida comparando os impactos ambientais da utilização do PET reciclado em produção de novas garrafas - *bottle-to-bottle* (B2B) – e quando ele é utilizado para

a produção de fibras – *bottle-to-fiber* (B2F). Foram avaliados os indicadores de potencial de aquecimento global, de destruição de camada de ozônio, o esgotamento de recursos abióticos, a acidificação de terras, escassez de água e toxicidade de água doce. Neste foram considerados como entradas combustíveis utilizados na logística e processamento, eletricidade e água. Como saídas, foram considerados emissões para o solo, água e ar e resíduos sólidos. A partir da análise realizada, foi concluído que ambos têm um menor impacto ambiental do que a utilização do PET virgem, porém, o caminho B2F tem um maior impacto do que o B2B.

Martin et al., (2021) realizaram a ACV para diferentes cenários de descarte do PET pós consumo em uma cidade paulista. O contexto real, onde mais de 95% do PET vai para aterros sanitários e o restante é destinado para cooperativas de triagem para reciclagem de triagem, foi comparado com diferentes conjunturas que abordaram percentuais diversificados de destinação para aterros, cooperativas e incineração. Nas categorias de impacto ambiental analisadas, a reciclagem se apresentou como melhor opção em relação a incineração. Comparando incineração com aterros, foi visto que com a exceção de eutrofização da água e destruição da camada de ozônio – que tiveram uma pequena diferença, a destinação para aterros sanitários se apresenta com menores impactos ambientais. Importante ressaltar que no trabalho em questão foi ignorada dados relacionados à coletas de lixo informais, dado a dificuldade de obtenção de dados.

A reciclagem do PET pode ser feita de forma a reintroduzir o material no ciclo produtivo ou pela reciclagem energética, Chilton, Burnley & Nesaratnam (2010) realizaram o ACV de ambos os caminhos. Foram avaliados os impactos ambientais da incineração do PET – apenas com energia e com energia e calor – e os impactos da reciclagem. Por fim, conclui-se que a reciclagem apresenta uma redução líquida na emissão de gases ácidos e poluentes, assim como matéria particulada e metais pesados. A incineração é uma fonte de metais pesados, matéria particulada e ácido clorídrico, porém apresenta uma diminuição na emissão de gás carbônico e gases ácidos, sendo os benefícios mais significativos quando se utiliza a combinação de calor e energia. De forma comparativa, a reciclagem por circuito fechado possui menos impactos ambientais, mas foi desconsiderado o custo de coleta e processamento.

Na esfera da reciclagem de embalagens alimentícias, Toniolo et al., (2013) abordaram a ACV de forma a avaliar os benefícios ambientais da utilização de uma

embalagem monocamada reciclável em comparação à uma embalagem multicamadas não reciclável, sendo ambas produzidas a partir do PET reciclado pós consumo. Enquanto a primeira possuía como destinação a reciclagem, aterros sanitários ou incineração, a segunda só apresentava os dois últimos. Os pesquisadores utilizaram quatro diferentes abordagens de forma a influenciar as análises, o cenário de fim de vida, a composição dos aditivos utilizados, a utilização de um diferente método de análise e o processo de reciclagem e em todos a embalagem multicamadas apresentou um maior impacto no meio ambiente em comparação com a monocamada.

Outra abordagem para o ACV foi a origem dos insumos para a produção do PET, estes podendo ser renováveis ou não, foi com esse contexto que Chen, Pelton & Smith (2016) avaliaram o caminho a partir da produção do PET até a indústria, para doze diferentes rotas de produção. O resultado foi que as garrafas de fonte renovável impactam mais negativamente nos indicadores de destruição da camada de ozônio e da toxicidade ecologia, em contrapartida, todos os outros indicadores delas se sobressaem como melhor opção quando comparadas às garrafas de fonte fóssil. Além disso, foram comparadas fontes renováveis a base de madeira e de palha de milho, sendo que a primeira apresentou um menor impacto ambiental que a segunda.

No contexto europeu, Kägi & Frey (2018) realizaram a ACV de garrafas PET na Suíça com para diferentes percentuais de adição do PET reciclado. Neste foram avaliados diferentes cenários para produção de novas garrafas, sendo eles utilizando 100% de PET virgem, 100% de PET reciclado, 35% de PET reciclado e 65% virgem e 50% de cada. Foi usada a base de dados Ecoinvent, onde foram utilizados dois métodos de avaliação de impacto ambiental – a pegada de carbono e a pegada ambiental pelo método da escassez ecológica. Em ambos os métodos, foi obtido um melhor resultado quanto maior o percentual de PET reciclado na produção de garrafas, sendo que a maior contribuição para a pegada de carbono e a pegada ambiental foi decorrente da produção dos granulados.

Faria (2017) abordou a produção das garrafas, a captação de água para o processo, o envase e empacotamento e realizou a ACV desse processo dentro do contexto de uma empresa portuguesa. No estudo, foi desconsiderada a produção da resina do PET, mas foi realizada uma esquematização de toda cadeia produtiva com suas entradas e saídas – Figura 13. Por fim, os indicadores foram divididos entre categorias de dano, sendo elas Ecossistema, Recursos Naturais e Saúde Humana,

onde a produção da garrafa, empacotamento e preparação do refrigerante se apresentaram como maiores contribuidores de impacto.

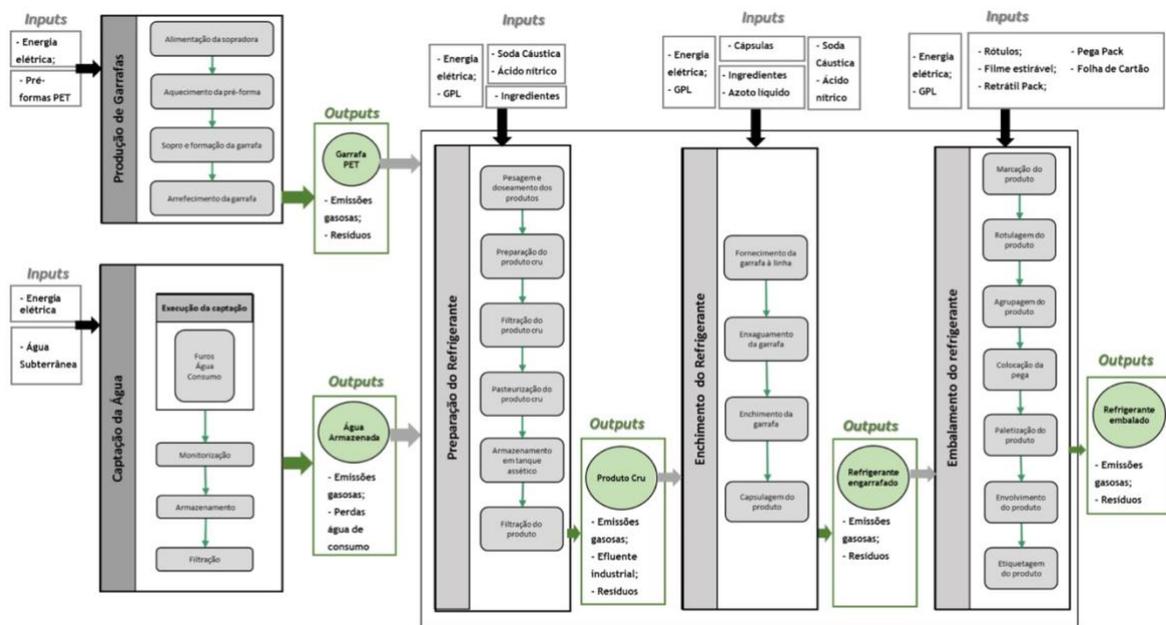


Figura 14 - Fluxos de entrada e saída na cadeia de Produção do Refrigerante (FARIA, 2017)

#### **4. OBJETIVOS**

O objetivo do presente trabalho foi avaliar comparativamente os potenciais impactos ambientais das garrafas PET produzidas e recicladas no Brasil e na Alemanha. De forma mais específica:

- Avaliar separadamente os impactos ambientais e benefícios de diferentes destinos de garrafas PET pós-consumo em cada um dos países.
- Avaliar para um contexto semelhante, o efeito do índice de reciclagem nos impactos ambientais decorrentes da quantidade de garrafas PET que é destinada para aterro sanitário.

Os dados obtidos foram transformados em indicadores ambientais, a fim de avaliar os impactos dos diferentes cenários no meio-ambiente, na escassez de recursos naturais e na saúde humana.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir das diretrizes definidas pela norma ISO 14040 para a utilização de uma ACV, o presente trabalho apresenta a definição de objetivo e escopo, a análise de inventário do ciclo de vida, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. Para a realização das ACV, foi utilizado o software OpenLCA, versão 1.11 (GreenDelta, Alemanha).

### 5.1. Definição do objetivo e escopo

O objetivo desse trabalho foi avaliar comparativamente a ACV de quatro destinações distintas para garrafas PET pós consumo, no contexto brasileiro e alemão, definindo impactos e benefícios de cada uma. Além disso, foi avaliada a influência do percentual de reciclagem dos dois países, considerando que o material não reciclado foi destinado para aterro sanitário, obtendo assim os efeitos ambientais consequentes de baixos índices de reciclagem.

<b>País</b>	<b>Índice de Reciclagem (%)</b>	<b>Sistemas de Produto</b>	<b>Quantidade Destinada (%)</b>
<b>Brasil</b>	55%	Aterro Sanitário ou Lixão	45
		Reciclagem Mecânica	45
		Reciclagem Mecânica	55
<b>Alemanha</b>	91%	Aterro Sanitário ou Incineração	9
		Aterro Sanitário ou Incineração	9
		Reciclagem Mecânica	91

*Tabela 3 - Composição da unidade funcional dos diferentes sistemas de produto*

O escopo dessa ACV engloba o ciclo de vida da produção e destinação de uma garrafa PET – sendo desconsideradas as etapas de envase e transporte, com o intuito de simplificar os estudos. Foi utilizado como unidade de referência uma garrafa de PET de 2L, que possui 47 g e uma produção de 1 milhão de garrafas. Além disso,

o índice de reciclagem considerado foi o obtido em 2019 para ambos os países, informação coletada de (ABIPET, 2019; “PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung,” 2020).

Baseado no índice de reciclagem de garrafas PET de ambos os países, foram simulados cenários nos quais a destinação para a reciclagem foi estipulada baseada nesse índice, e o restante foi para destinações alternativas comumente utilizadas em ambos os países.

## 5.2. Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Os inventários foram construídos considerando uma garrafa PET de 2 litros com 47g, com uma produção de 1 milhão de unidades de garrafas, ou seja, 47 toneladas de produto. Estas que foram destinadas para reciclagem e disposições alternativas, considerando 55% de reciclagem para o Brasil e 91% de reciclagem para Alemanha.

Seguindo a ISO 14040 é necessário estabelecer as fronteiras da análise de inventário, as quais foram representadas esquematicamente nos diagramas das figuras 14 e 15. As análises consideraram o processamento da garrafa, incluindo a produção da resina do PET e a conversão desta em garrafas PET pelo processo de injeção-sopro. As etapas de envasamento, transporte até o distribuidor, consumidor ao local de descarte foram desconsideradas. Após o descarte desta garrafa PET pós-consumo, foram analisados os destinos de aterro sanitário e reciclagem mecânica - para o contexto brasileiro – e de incineração e reciclagem mecânica – para o contexto alemão.

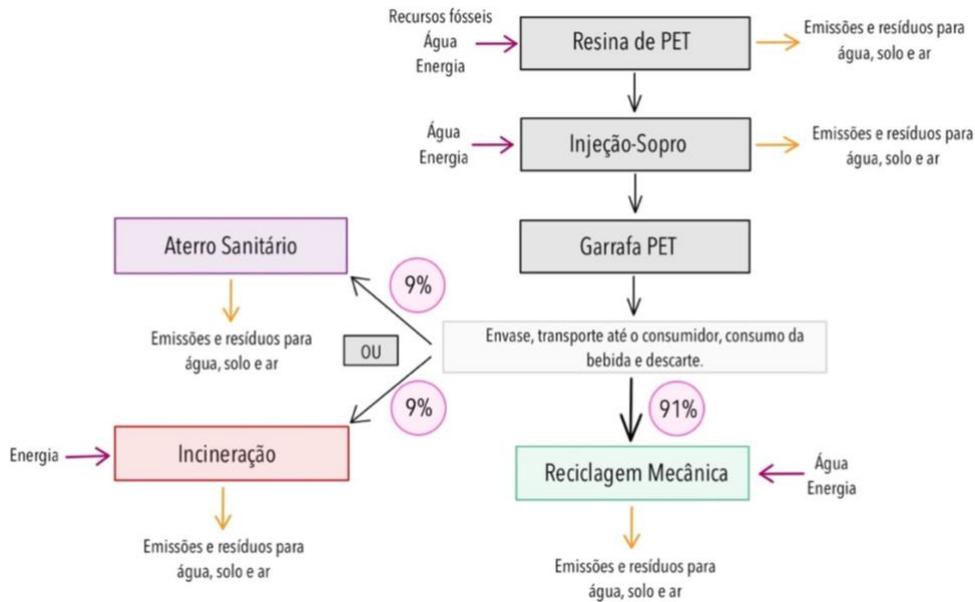


Figura 15 - Diagrama representativo do contexto alemão

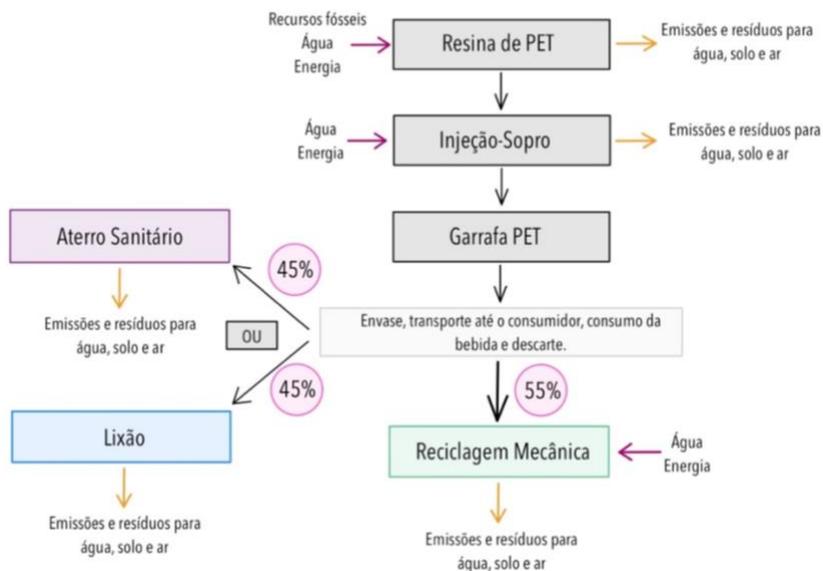


Figura 16 - Diagrama representativo do contexto brasileiro

### 5.2.1. Sistemas de Produto no Contexto Alemão

Para o contexto alemão, a partir da produção de 1 milhão de unidades de garrafas PET, tem-se 47 toneladas de produto. Foi considerado que 91% deste montante foi destinado para a reciclagem mecânica, totalizando 42,77 toneladas – e

9% deste produto foi destinado para aterro sanitário ou para a incineração – totalizando 4,23 toneladas.

Alemanha					
Processo	Tipo	Material	Quantidade	Unidade	Provider
Garrafa PET	Entrada	Resina PET	47	g	polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade   polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade   Cutoff, S - RER
			47	g	blow moulding   blow moulding   Cutoff, S - RER
	Saída	Garrafa PET	47	g	
Aterro Sanitário	Entrada	Garrafa PET Resíduo	4,23	g	
			4,23	g	
	Saída	Garrafa PET Aterro	4,23	g	treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill   waste polyethylene terephthalate   Cutoff, S - RoW
Incineração	Entrada	Garrafa PET Resíduo	4,23	g	
			4,23	g	
	Saída	Garrafa PET Lixão	4,23	g	treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration   waste polyethylene terephthalate   Cutoff, S - RoW
Reciclagem Mecânica	Entrada	Reciclagem PET	42,77	g	
			42,77	g	polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade, recycled   polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade, recycled   Cutoff, S - RoW
	Saída	PET Reciclado	42,77	g	

Tabela 4 - Inventário do Ciclo de Vida para o contexto alemão

### 5.2.2. Sistemas de Produto no Contexto Brasileiro

Para o contexto brasileiro, a partir da produção de 1 milhão de unidades de garrafas PET, tem-se 47 toneladas de produto. Foi considerado que 55% deste montante foi destinado para a reciclagem mecânica, totalizando 25,85 toneladas – e 45% deste produto foi destinado para aterro sanitário ou para o lixão – totalizando 21,15 toneladas – como pode ser visualizado na figura 15.

Brasil					
Processo	Tipo	Material	Quantidade	Unidade	Provider
Garrafa PET	Entrada	Resina PET	47	g	polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade   polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade   Cutoff, S - RoW
		Injeção-Sopro	47	g	blow moulding   blow moulding   Cutoff, S - RoW
	Saída	Garrafa PET	47	g	
Aterro Sanitário	Entrada	Garrafa PET	21,15	g	
		Resíduo	21,15	g	
	Saída	Garrafa PET Aterro	21,15	g	treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill   waste polyethylene terephthalate   Cutoff, S - RoW
Lixão	Entrada	Garrafa PET	21,15	g	
		Resíduo	21,15	g	
	Saída	Garrafa PET Lixão	21,15	g	treatment of waste polyethylene terephthalate, open dump, wet infiltration class (500mm)   waste polyethylene terephthalate   Cutoff, S - GLO
Reciclagem Mecânica	Entrada	Garrafa PET	25,85	g	
		Resíduo	25,85	g	
		Reciclagem PET	25,85	g	polyethylene terephthalate production,

				granulate, bottle grade, recycled   polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade, recycled   Cutoff, S - RoW
	Saída	PET Reciclado	25,85	g

Tabela 5 - Inventário do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro

### 5.3. Avaliação dos Impactos Ambientais

Para a realização da avaliação dos impactos ambientais foi utilizada a metodologia ReCiPe Midpoint (H). Essa metodologia foi criada em nome do Ministério Holandês de Infraestrutura e Meio Ambiental em 2008, a partir de uma cooperação entre o Instituto Nacional de Saúde e Meio Ambiente dos Países-Baixos, a empresa de consultoria PRé, o Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden e a Universidade Radboud Nijmegen.

O ReCiPe apresenta 18 categorias de indicadores de impacto *midpoint*, estas que são vias de danos em três diferentes categorias *endpoint*, que são definidas como danos à saúde humana, danos aos ecossistemas e danos à escassez de recursos naturais (HUIJBREGTS et al., 2017). No presente trabalho, será avaliado três indicadores: mudanças climáticas (GWP), consumo de água e toxicidade humana.

Mudanças climáticas é o principal indicador utilizado para a medição de aquecimento global, sendo que esta é medida baseada no aumento da quantidade de radiação infravermelha decorrente de um gás estufa (GHG), tendo nesse caso como medida o quilograma equivalente de CO<sub>2</sub>. Já o consumo de água é medido em metros cúbicos e indica a quantidade de água consumida daquela que foi extraída pelo ciclo de vida. Por fim, a toxicidade humana é dividida em efeitos toxicológicos carcinogênicos e não-carcinogênicos, indicadores que foram unificados no presente trabalho para melhor visualização e discussão dos resultados e é dada por quilograma equivalente de 1,4-diclorobenzeno. (HUIJBREGTS et al., 2017)

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da definição dos processos e montagem dos sistemas de produtos, foram obtidos os indicadores para mudanças climáticas, consumo de água e toxicidade humana para cada uma das destinações. Considerando o contexto brasileiro com 55% de índice de reciclagem, foi considerado nos sistemas de produto de aterro sanitário e lixão a quantidade alvo de 21,15 toneladas de pet pós-consumo e 25,85 toneladas para a reciclagem mecânica. No contexto alemão, com 91% de reciclagem, foi considerada para o aterro sanitário e a incineração uma quantidade de 4,23 toneladas de pet pós-consumo e 42,77 toneladas para a reciclagem.

Brasil		Alemanha		Unidade
<b>Mudanças Climáticas</b>		<b>Mudanças Climáticas</b>		kg de CO <sub>2</sub> -Eq
Aterro Sanitário	2,12E+05	Aterro Sanitário	1,95E+05	
Lixão	2,12E+05	Incineração	2,03E+05	
Reciclagem	2,37E+05	Reciclagem	2,17E+05	
<b>Consumo de Água</b>		<b>Consumo de Água</b>		m <sup>3</sup>
Aterro Sanitário	2,17E+03	Aterro Sanitário	2,73E+03	
Lixão	2,17E+03	Incineração	2,73E+03	
Reciclagem	2,34E+03	Reciclagem	2,71E+03	
<b>Toxicidade Humana</b>		<b>Toxicidade Humana</b>		kg 1,4-DCB-Eq
Aterro Sanitário	1,42E+05	Aterro Sanitário	1,45E+05	
Lixão	1,42E+05	Incineração	1,45E+05	
Reciclagem	1,90E+05	Reciclagem	2,31E+05	

*Tabela 6 - Indicadores de impacto ambiental dos diferentes destinos de PET pós-consumo nos contextos Brasil e Alemanha*

Para um melhor comparativo entre as diferentes destinações em cada país, os valores obtidos foram divididos pela quantidade de PET específica de cada destinação, a fim de obter um resultado normalizado de cada impacto por tonelada de PET descartada.

Com o intuito de melhorar a comparação entre os países e os índices de reciclagem, foram considerados para o Brasil e a Alemanha um cenário de descarte em aterro sanitário além da reciclagem. Os valores totais dos indicadores de impacto por tonelada de PET descartado em cada país foram definidos pela somatória do impacto ambiental da reciclagem e do aterro, baseado na quantidade destinada para

cada. Além disso, foram verificadas as contribuições de cada processo do ciclo da garrafa, abrangendo a produção da resina polimérica, a produção da garrafa e o descarte.

Brasil		Alemanha		Unidade
<b>Mudanças Climáticas</b>		<b>Mudanças Climáticas</b>		kg de CO <sub>2</sub> -eq/ton PET
Aterro Sanitário	1,00E+04	Aterro Sanitário	4,60E+04	
Lixão	1,00E+04	Incineração	4,80E+04	
Reciclagem	9,17E+03	Reciclagem	5,08E+04	
<b>Consumo de Água</b>		<b>Consumo de Água</b>		m <sup>3</sup> / ton PET
Aterro Sanitário	1,03E+02	Aterro Sanitário	6,45E+02	
Lixão	1,02E+02	Incineração	6,45E+02	
Reciclagem	9,06E+01	Reciclagem	6,35E+01	
<b>Toxicidade Humana</b>		<b>Toxicidade Humana</b>		kg 1,4-DCB-eq/ton PET
Aterro Sanitário	6,73E+03	Aterro Sanitário	3,43E+04	
Lixão	6,70E+03	Incineração	3,42E+04	
Reciclagem	7,35E+03	Reciclagem	5,39E+03	

Tabela 7 - Indicadores de impacto ambiental normalizados para os diferentes destinos do PET pós-consumo nos contextos Brasil e Alemanha.

Brasil	Produção da Garrafa	Produção da Resina Polimérica	Descarte	Total
<b>Mudanças Climáticas (kg de CO<sub>2</sub>-eq por tonelada de PET)</b>				
Aterro Sanitário	3,46E+03	6,48E+03	1,02E+02	1,00E+04
Reciclagem	2,83E+03	5,30E+03	1,05E+03	9,18E+03
<b>Total</b>	6,29E+03	1,18E+04	1,15E+03	1,92E+04
<b>Consumo de Água (m<sup>3</sup> por tonelada de PET)</b>				
Aterro Sanitário	2,34E+01	7,90E+01	2,66E-01	1,03E+02
Reciclagem	1,91E+01	6,46E+01	6,73E+00	9,05E+01
<b>Total</b>	4,26E+01	1,44E+02	7,00E+00	1,93E+02
<b>Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB-eq por tonelada de PET)</b>				
Aterro Sanitário	1,63E+03	4,38E+03	7,23E+02	6,73E+03
Reciclagem	1,33E+03	3,58E+03	2,44E+03	7,35E+03
<b>Total</b>	2,96E+03	7,96E+03	3,16E+03	1,41E+04

Tabela 8 - Indicadores de impacto ambiental de cada etapa do processo normalizados para o cenário de comparação no Brasil

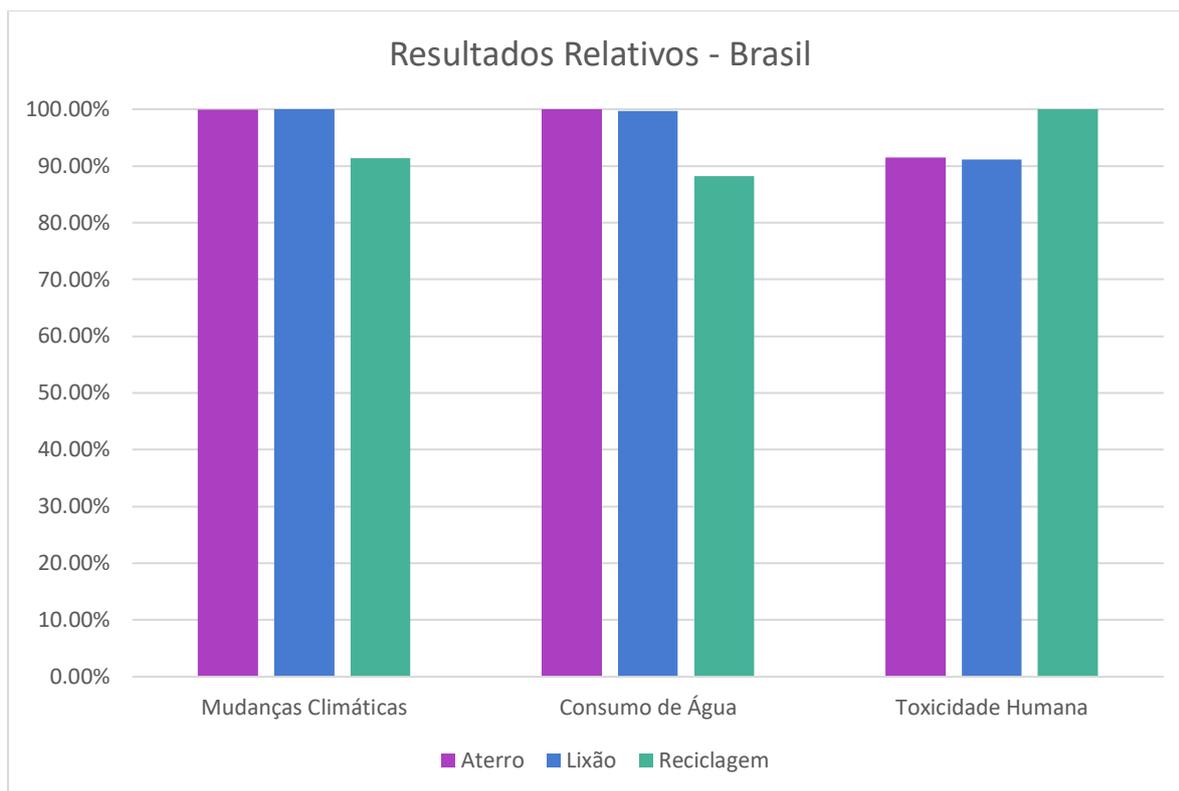
Alemanha	Produção da Garrafa	Produção da Resina Polimérica	Descarte	Total
<b>Mudanças Climáticas (kg de CO<sub>2</sub>-Eq por tonelada de PET)</b>				
Aterro Sanitário	1,07E+04	3,52E+04	1,02E+02	4,61E+04
Reciclagem	9,45E+02	3,09E+03	1,05E+03	5,08E+03
<b>Total</b>	1,17E+04	3,83E+04	1,15E+03	5,11E+04
<b>Consumo de Água (m<sup>3</sup> por tonelada de PET)</b>				
Aterro Sanitário	1,92E+02	4,54E+02	2,65E-01	6,46E+02
Reciclagem	1,69E+01	3,97E+01	6,76E+00	6,34E+01
<b>Total</b>	2,09E+02	4,94E+02	7,02E+00	7,10E+02
<b>Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB-Eq por tonelada de PET)</b>				
Aterro Sanitário	9,03E+03	2,46E+04	7,21E+02	3,43E+04
Reciclagem	7,95E+02	2,16E+03	2,43E+03	5,39E+03
<b>Total</b>	9,83E+03	2,67E+04	3,15E+03	3,97E+04

*Tabela 9 - Indicadores de impacto ambiental de cada etapa do processo normalizados para o cenário de comparação na Alemanha*

Para melhor visualização, os resultados foram divididos na comparação de descarte do PET pós-consumo no Brasil e na Alemanha, e por fim a comparação entre os dois países em um contexto de parte do PET pós-consumo descartado em aterro e parte destinado para a reciclagem. Além disso, para o comparativo entre os países, os indicadores são divididos segundo três categorias de impacto *endpoint*, onde serão avaliados os efeitos dos cenários sobre a Qualidade do Ecossistema, no Esgotamento de Recursos Naturais e na Saúde Humana.

### 6.1. Comparação entre Destinações – Brasil

Para o Brasil tem-se um cenário de destinação de 21,15 toneladas para o aterro e para o lixão, em comparação às 25,85 toneladas destinadas à reciclagem. A partir dos valores de impacto obtidos por tonelada de PET pós-consumo descartado, foi montado o gráfico de resultados relativos abaixo, onde considera-se o maior valor para cada indicador como 100% e os valores para as outras destinações são obtidos a partir deste valor de referência.



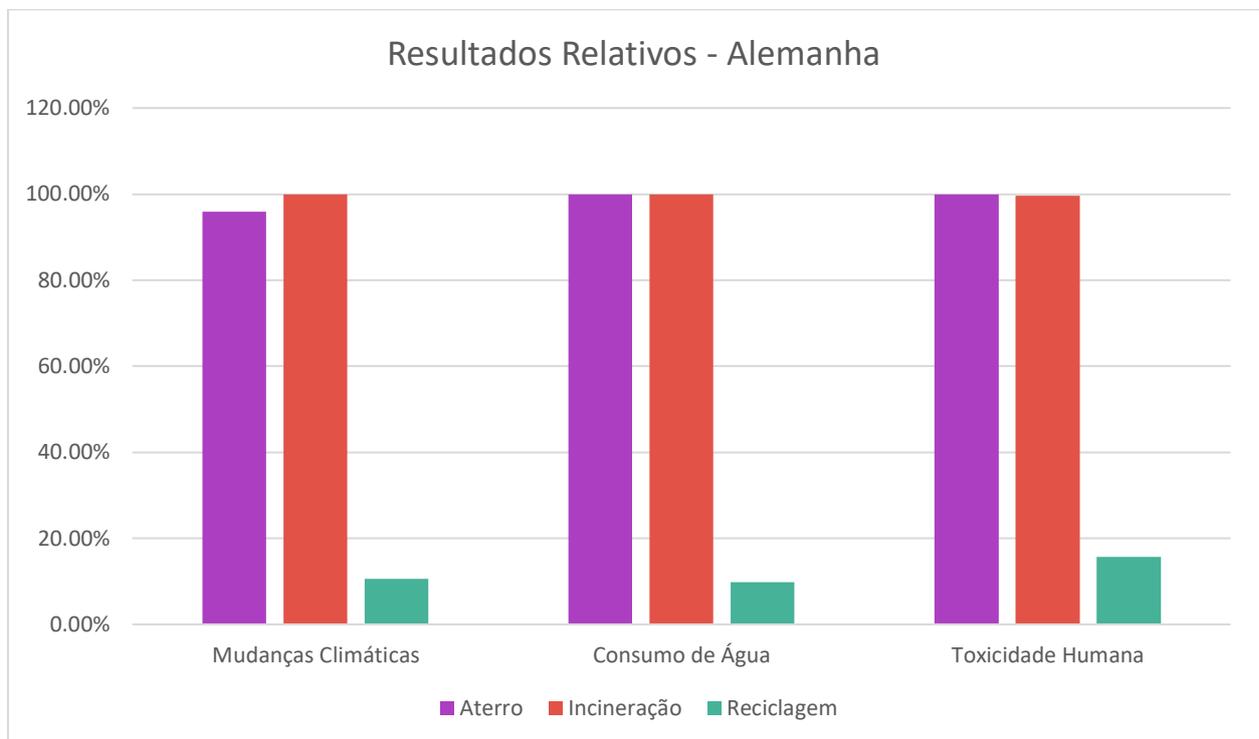
*Gráfico 7 - Resultados relativos por tonelada de PET descartado dos Indicadores de Mudanças Climáticas, Consumo de água e toxicidade humana para três diferentes destinações no Brasil*

Verifica-se os valores dos indicadores observados para o aterro sanitário e para o lixão ainda são muito semelhantes, apresentando uma diferença um pouco maior no quesito de toxicidade humana. Para as mudanças climáticas e consumo de água, a reciclagem se apresenta como a alternativa mais ambientalmente saudável, apresentando valores 10% menor em relação ao valor de referência. Contrariando o esperado, a reciclagem se mostra a pior alternativa na questão de toxicidade humana, o que pode ser justificado pelo fato de ser um processo que emite resíduos que podem ser prejudiciais a saúde humana.

## **6.2. Comparação entre Destinações – Alemanha**

Na Alemanha foi estipulado um cenário de destinação de 4,23 toneladas para o aterro e para a incineração, em comparação às 42,77 toneladas destinadas à reciclagem. O gráfico de resultados relativos abaixo foi plotado considerando o destino com maior valor para o indicador como 100% e os valores dos outros destinos

foram obtidos utilizando-o como referência. Todos os indicadores foram considerados por tonelada de PET pós-consumo descartado.



*Gráfico 8 - Resultados relativos por tonelada de PET descartado dos Indicadores de Mudanças Climáticas, Consumo de água e toxicidade humana para três diferentes destinações no Brasil.*

No contexto alemão, devido ao maior índice de reciclagem, pode-se ver que os valores relativos de indicadores para esta são quase 90% inferiores aos valores para o aterro sanitário e a incineração. No caso das mudanças climáticas, pode-se ver a incineração com maior impacto relativo, sendo seguida pelo aterro sanitário e a reciclagem. Para os indicadores de consumo de água e toxicidade humana, a incineração e o aterro se mostram muito semelhantes.

A incineração é vista por um lado como uma alternativa aos aterros sanitários no contexto europeu, já que tem uma menor ocupação de espaço e produz energia pela queima. Ambos apresentam essa grande participação na toxicidade humana e em mudanças climáticas uma vez que emitem dióxido de carbono e metano, e no caso da incineração algumas outras substâncias nocivas (DESOLE et al., 2022). Na questão de consumo de água, percebe-se que apesar da reciclagem ser um processo que requer consumo de energia e água, ela ainda se mostra bem mais benéfica do que as alternativas de descarte.

## 6.3. Comparação entre Índices de Reciclagem

### 6.3.1. Impacto na Qualidade do Ecossistema

Apesar de ter uma maior quantidade de PET pós consumo direcionada para reciclagem na Alemanha, seu cenário geral é mais prejudicial em termos de mudanças climáticas (Gráfico 9). Enquanto no Brasil emite-se aproximadamente 19 mil kg-eq CO<sub>2</sub> por tonelada de PET descartado, a Alemanha está em torno de 50 mil kg-eq CO<sub>2</sub>. Deste valor, no Brasil 6% é correspondente ao descarte, 33% à produção da garrafa PET e 61% à produção da resina polimérica. No caso da Alemanha, estes valores são de 2%, 23% e 75%, respectivamente.

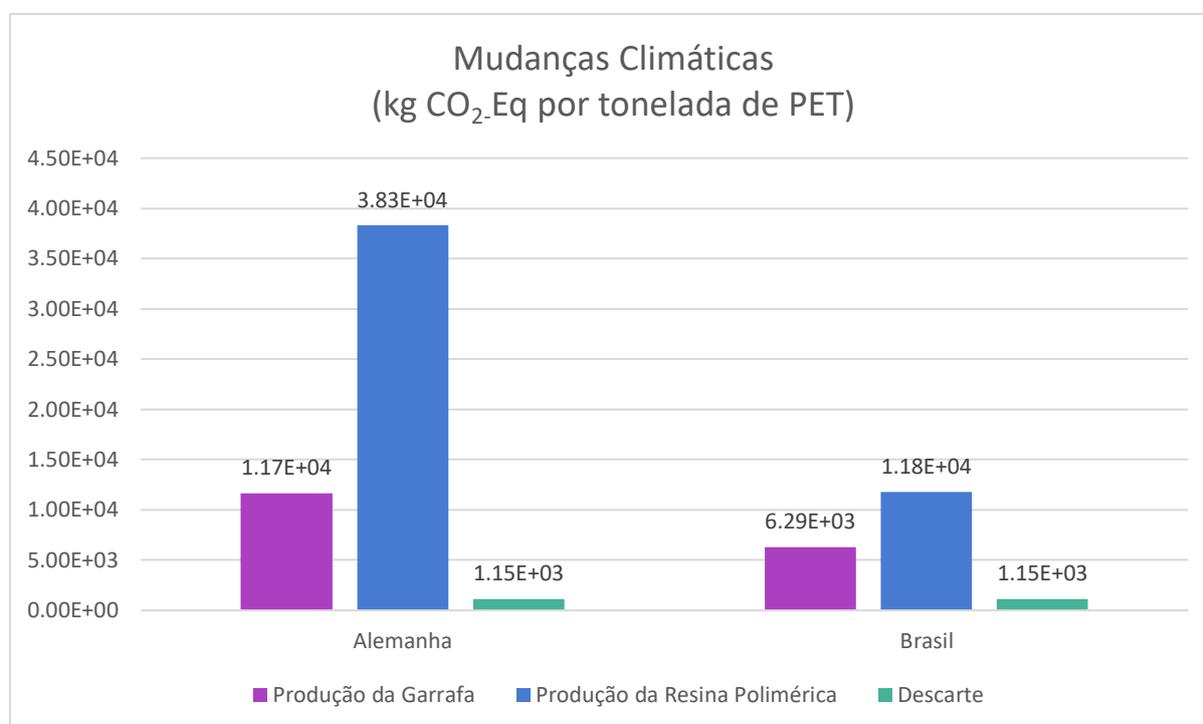
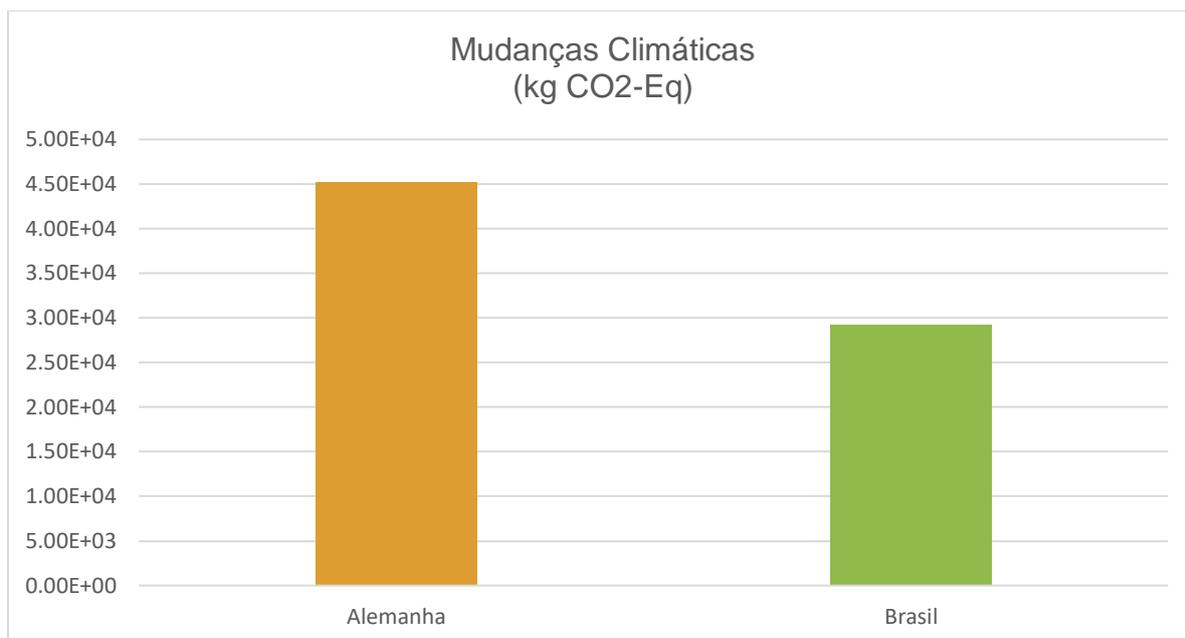


Gráfico 9 - Valores normalizados do indicador mudanças climáticas para a Alemanha e para o Brasil, separados pela contribuição de cada processo.

Dado que o contexto do tópico em questão tem como principal foco a diferença quantitativa de PET pós consumo destinado à reciclagem e ao aterro sanitário, as diferentes contribuições do descarte para Alemanha – 4,23 toneladas para Aterro e 42,77 toneladas para Reciclagem - e o Brasil – 21,15 toneladas para Aterro e 25,85 toneladas para reciclagem - podem ser visualizados no gráfico abaixo.



*Gráfico 10 - Valores do indicador de mudanças climáticas do descarte do PET pós-consumo para a Alemanha e para o Brasil.*

### **6.3.2. Impacto no Esgotamento de Recursos Naturais**

Para o consumo de água de ambos os cenários, pode-se visualizar novamente uma maior contribuição da produção da resina polimérica em ambos os países. Sendo que esta contribui para o consumo de água em 60% na Alemanha e 74% no Brasil. Além disso, novamente é possível visualizar que em questões de valores totais, a Alemanha se apresenta bem a frente no consumo de água, chegando a um total de aproximadamente 700 m<sup>3</sup> de água por tonelada de PET, enquanto no Brasil consome-se um pouco menos de 200 m<sup>3</sup> de água.

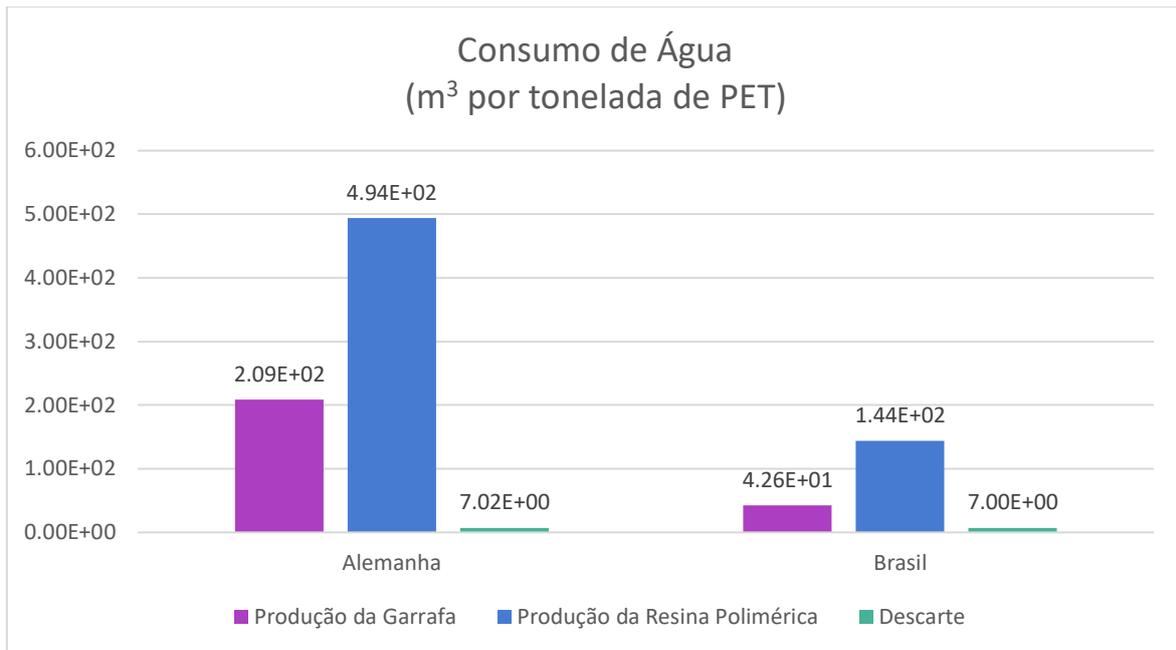


Gráfico 11 - Valores normalizados do indicador de consumo de água para a Alemanha e para o Brasil, separados pela contribuição de cada processo.

No Brasil, o descarte contribui em 4% para o consumo de água enquanto na Alemanha ele contribui em apenas 1%. Pensando nos valores brutos de consumo de água para o descarte de cada um dos países – Gráfico 12 – nota-se que o consumo no Brasil é em torno de 60% do consumo alemão.

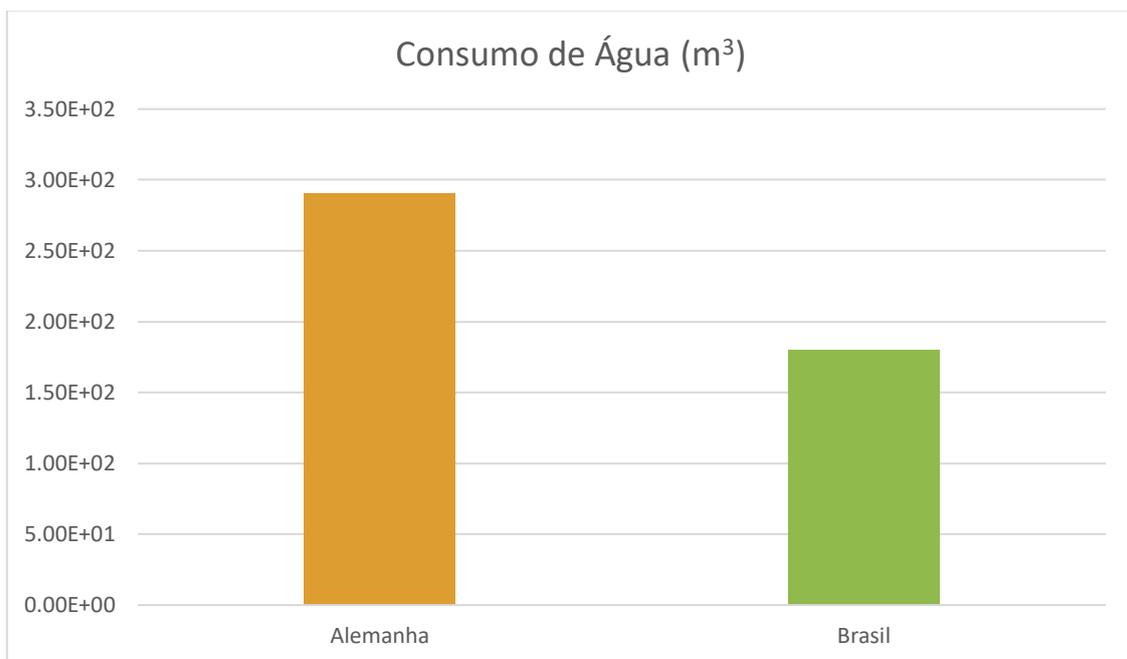


Gráfico 12 - Valores do indicador de consumo de água do descarte do PET pós-consumo para a Alemanha e para o Brasil.

### 6.3.3. Impactos na Saúde Humana

A ACV não é uma ferramenta cujo foco é restrito aos impactos ao meio-ambiente, mas também atenta-se aos impactos que processos possuem na saúde humana. A tendência de uma maior contribuição geral do contexto alemão se mantém, sendo esse responsável por quase 40 mil kg de 1,4-DCB por tonelada de PET, enquanto o Brasil está em torno de 14 mil. Observa-se como uma modificação aqui é a participação de cada etapa em cada um dos países, enquanto na Alemanha o descarte continua com uma menor participação – 8% - e a produção do PET com a maior, com 67% - no Brasil pode-se ver uma contribuição de 22% do descarte enquanto a produção da resina apresenta uma participação de 57%.

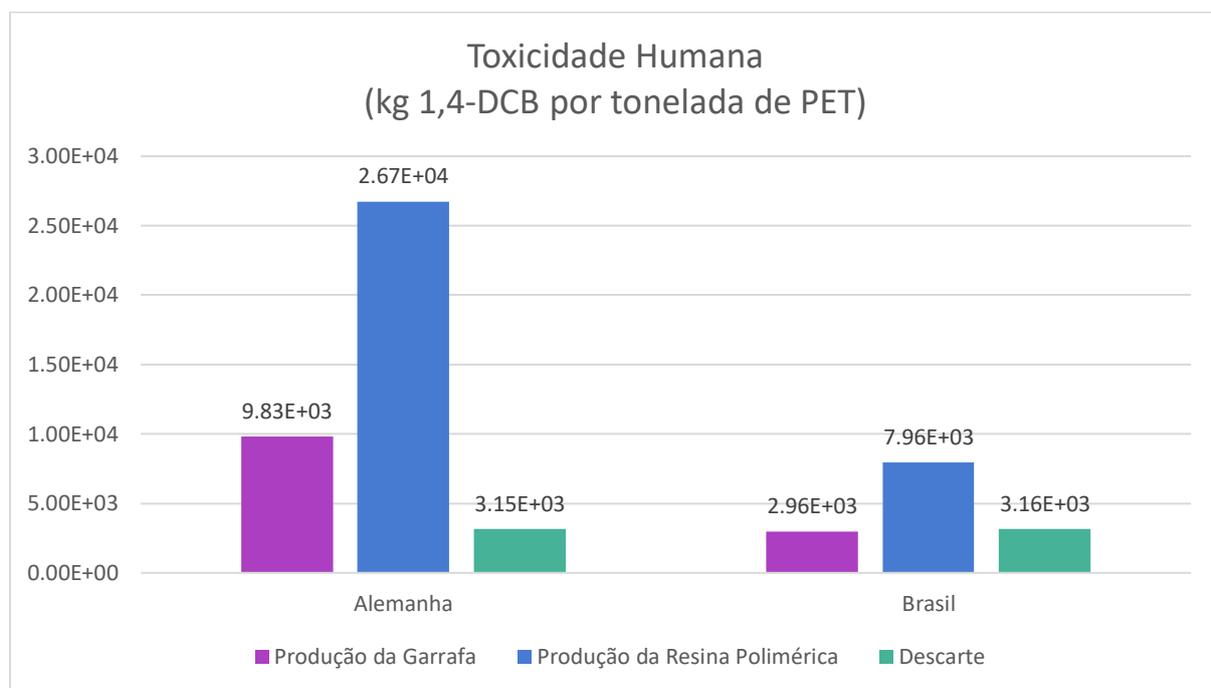
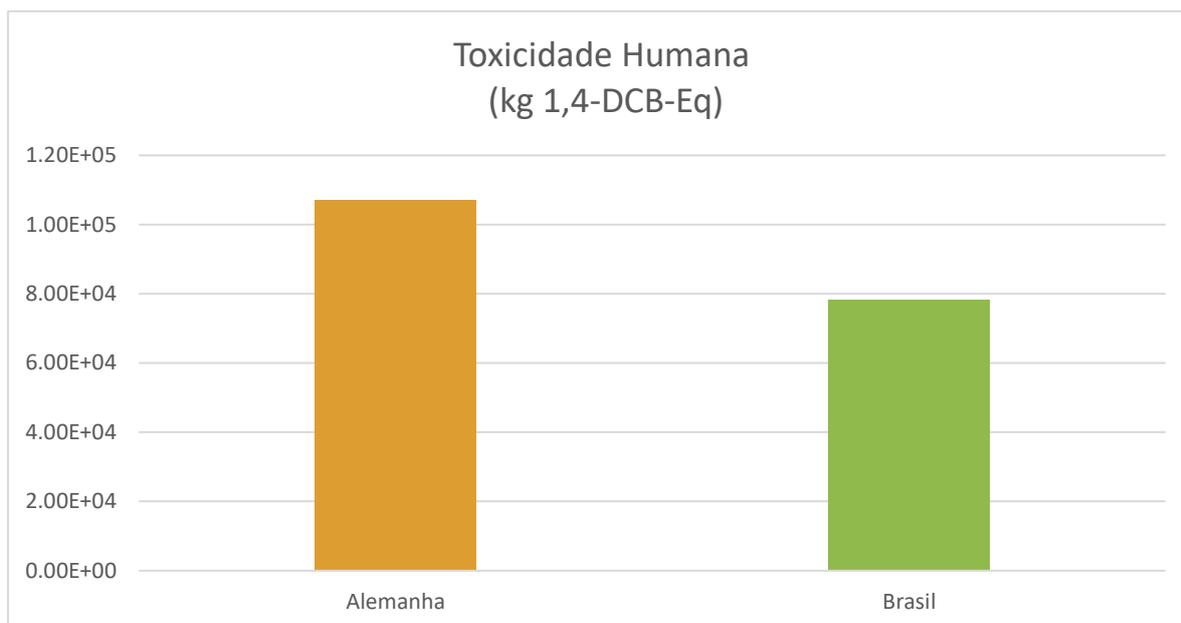


Gráfico 13 - Valores normalizados do indicador de toxicidade humana para a Alemanha e para o Brasil, separados pela contribuição de cada processo.

Pode-se visualizar que a contribuição do descarte do PET pós-consumo no contexto brasileiro possui um número normalizado superior ao alemão. Pensando em valores brutos, a destinação do PET pós-consumo na Alemanha é majoritariamente para reciclagem e no contexto brasileiro é mais equilibrado entre aterro e reciclagem, observa-se que apesar de valores mais próximos entre os países, a Alemanha ainda se mantém com valores superiores.



*Gráfico 14 - Valores do indicador de toxicidade humana do descarte do PET pós-consumo para a Alemanha e para o Brasil.*

Em ambos os países se vê uma maior participação da produção da resina e da garrafa em comparação ao descarte, o que segue a tendência apresentada em (DESOLE et al., 2022). Para ambas, a Alemanha apresenta valores bem superiores decorrente da escolha da provider no software, onde para esta é no contexto europeu e no caso do Brasil, é para o resto do mundo.

É importante ressaltar, que enquanto a reciclagem é um processo industrial – que consome uma quantidade maior de água e energia em relação ao descarte em que tem maior peso em emissões de resíduos. Assim, considerando que na Alemanha há quase o dobro de toneladas destinadas para a reciclagem, ela se mostra com maiores emissões nos três indicadores. Ressalta-se que o processo de reciclagem envolve a limpeza das garrafas, que envolve a utilização de água. Outro fator a ser considerado, é que uma maior participação na reciclagem, requer maior consumo de energia e a Alemanha tem como principais fontes de energia elétrica a queima de lignina (25,6%) e de carvão (18%), que são fontes não-renováveis e poluentes em comparação à energia hidrelétrica, que constitui cerca de 63% da matriz elétrica brasileira (DE MELO; JANNUZZI; BAJAY, 2016).

## 7. CONCLUSÕES

A aplicação de metodologias mais eficientes para a coleta do PET pós-consumo com o intuito de melhorar os índices de reciclagem e evitar a destinação incorreta deste termoplástico se mostra como uma alternativa para a redução de impactos ambientais. Porém, é importante se atentar que a cadeia produtiva do PET envolve outras etapas de produção, que podem ter muito peso nos impactos ambientais.

Entre os indicadores avaliados para o contexto de comparação dos diversos descartes, podemos visualizar que no Brasil, a reciclagem se mostra como a melhor alternativa em relação à aterro sanitário e ao lixão na questão de mudanças climáticas e de consumo de água, sendo a pior alternativa no caso da toxicidade humana.

No contexto alemão, onde mais de 90% do PET é destinado para a reciclagem, vemos que a diferença dos indicadores entre esta, e os destinos de aterro e incineração é acentuada. Isso mostra que para uma mesma quantidade de PET descartado, a reciclagem sempre será benéfica nesse contexto.

No comparativo entre Alemanha e Brasil, visualiza-se que a diferença dos indicadores para o descarte por tonelada de PET é pequena. O que se mostra como maior responsável pelas diferenças é a produção da resina polimérica e da garrafa, que se mostra com muito mais impactos no contexto alemão. O que se apresenta como justificativa para tal é a maior quantidade de PET destinada para a reciclagem, que demanda um maior consumo de água na limpeza das garrafas e o consumo de energia, que tem maior participação de fontes não-renováveis no contexto alemão.

Conclui-se, para ambos os países, que ainda há um longo caminho a percorrer em questões ambientais. Um maior desenvolvimento do sistema de coleta do PET pós-consumo no Brasil, com um maior número de reciclagem de PET em conjunto com a utilização de fontes renováveis de energia, seria muito favorável. No contexto alemão, o uso de energias não-renováveis se mostra muito prejudicial para o meio-ambiente. É importante ressaltar, que nos dois países, existem projetos sendo colocados em prática para os pontos mencionados.

## REFERÊNCIAS

- ABIPET. **10º Censo da Reciclagem do PET**. [s.l: s.n.].
- ABIPET. **11º Censo da Reciclagem do PET**. [s.l: s.n.].
- ABIPET. **Reciclagem do PET**. Disponível em: <<https://abipet.org.br/reciclagem/>>. Acesso em: 31 mar. 2022.
- AWAJA, F.; PAVEL, D. **Recycling of PET** *European Polymer Journal*, jul. 2005.
- BIRKENSTOCK, G. German Green Dot recycling system under threat. **Deutsche Welle**, 15 jul. 2013.
- CHEN, L.; PELTON, R. E. O.; SMITH, T. M. Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 667–676, 20 nov. 2016.
- CHILTON, T.; BURNLEY, S.; NESARATNAM, S. A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1241–1249, 2010.
- Conheça nossas pré-formas PET**. Disponível em: <<http://www.preformapet.com.br/>>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- DE ALMEIDA LUCAS, A. **Moldagem por Injeção de Termoplásticos** São Carlos Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, , 2020.
- DE MELO, C. A.; JANNUZZI, G. D. M.; BAJAY, S. V. **Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 ago. 2016.
- Der DPG-Einwegpfandprozess**. Disponível em: <<https://dpg-pfandsystem.de/index.php/en/the-one-way-deposit-system/the-dpg-deposit-process.html>>. Acesso em: 9 mar. 2022.
- DESOLE, M. P. et al. Life cycle assessment (LCA) of PET and PLA bottles for the packaging of fresh pasteurised milk: The role of the manufacturing process and the disposal scenario. **Packaging Technology and Science**, v. 35, n. 2, p. 135–152, 1 fev. 2022.
- Einweg-PET-Flasche mit Pfand**. Disponível em: <<https://einweg-mit-pfand.de/einweg-pet-flasche.html>>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- ELAMRI, A. et al. Progress in Polyethylene Terephthalate Recycling. In: **Polyethylene terephthalate: Uses, Properties and Degradation**. [s.l.] Nova Science Publishers, 2017. p. 1–22.
- FARIA, A. C. O. P. **Avaliação do Ciclo de Vida na Indústria dos Refrigerantes - O Caso da Etanor/Penha**. Porto: [s.n.].
- Flaticon**.
- GILENO, L. A.; TURCI, L. F. R. Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100057, dez. 2021.
- HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. Life Cycle Assessment: Theory and Practice. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**, p. 1–1216, 1 set. 2017.
- HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 1 fev. 2017.
- JORGE, N. **Embalagens para Alimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2013.
- KÄGI, T.; FREDY, D. **Ökobilanz von PET-Flaschen mit unterschiedlichem Rezyklatanteil**. Basel: [s.n.].
- MAIA PIANOWSKI, S. **Logística Reversa de Embalagens em Atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos: Estudos de caso da Alemanha e do Brasil**. Fortaleza: [s.n.].

**Mecânica, Energética ou Química: Como os tipos de reciclagem funcionam.** Disponível em: <<https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

MEIJER, L. J. J. et al. **More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean***Sci. Adv.* [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.science.org](https://www.science.org/)>.

MONTEIRO AVELINO, G. **A Reciclagem Química como Alternativa ao Tratamento de Resíduos Plásticos no Brasil.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2020.

NAKAJIMA, N.; VANDERBURG, W. H. A Description and Analysis of the German Packaging Take-Back System. **Bulletin of Science, Technology & Society**, v. 26, n. 6, p. 510–517, dez. 2006.

NISTICÒ, R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. **Polymer Testing**, v. 90, 2020.

**PET-Getränkeflaschen in Deutschland-Kurzfassung.** . Mainz: [s.n.].

**Plastic Recycling Plants in Brazil.**

**Plastic Recycling Plants In Germany.**

**Resolução RDC. Estabelece os critérios para a realização de Estudos de Estabilidade de insumos farmacêuticos ativos e medicamentos, exceto biológicos, e dá outras providências.** Brasília DF, Brasil Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Ministério da Saúde, Agência Nacional da Vigilância Sanitária, , 6 nov. 2019.

**Resolução RDC . Dispõe sobre o Regulamento Técnico sobre embalagens de polietilenotereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos.** Brasília DF, 26 mar. 2008.

**Resumo Executivo - Compromisso Empresarial para Reciclagem.** . [s.l.: s.n.].

ROBERTSON, G. L. **Food Packaging and Shelf Life A Practical Guide.** [s.l.] CRC Press, 2009.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M.-A. Poli(Tereftalato de Etileno), PET- Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009.

SANTOS, B. C. M. DOS. **Análise do Ciclo de Vida da Embalagem de Polietileno Tereftalato.** VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. **Anais...**2011.

**Shutterstock.** Disponível em:

<<https://www.shutterstock.com/pt/search/injection+molding+bottle?orderId=CS-0F545-4C6C>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

TONIOLO, S. et al. Comparative LCA to evaluate how much recycling is environmentally favourable for food packaging. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, p. 61–68, 2013.

ZANON BARÃO, M. **Embalagens para produtos alimentícios.** [s.l.] Instituto de Tecnologia do Paraná–TECPAR, 2011.