

Rodrigo Rossi Longo

**Estudo de modelos de introdução de plástico PET na cadeia de valor
no Brasil**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do diploma
de Engenheiro de Produção.

**São Paulo
2023**

RODRIGO ROSSI LONGO

**ESTUDO DE MODELOS DE INTRODUÇÃO DE PLÁSTICO PET
NA CADEIA DE VALOR NO BRASIL**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do diploma
de Engenheiro de Produção.

Orientadora: Prof.^a Roberta de Castro
Souza Piao

**São Paulo
2023**

Longo, Rodrigo

**Estudo de Modelos de Introdução de Plástico PET na Cadeia
de Valor no Brasil / R.R. Longo -- São Paulo, 2023
111 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.**

**1. Economia Circular 2. Reciclagem
3. PET 4. Polímeros 5. ACV I. Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II. t.**

Dedico este trabalho a meus amigos e família.

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que proporcionou diversas experiências, ensinamentos e aprendizados que me formaram como indivíduo e que levarei para o resto da minha vida. Sou muito grato pelo privilégio de estudar em uma instituição como a USP.

À minha orientadora, Profa. Roberta Piao, pelo auxílio na realização deste trabalho, pela paciência e dedicação.

À Lina Pimentel e ao professor Luiz Alexandre Kulay, muito obrigado por compartilharem o conhecimento de vocês, foi imprescindível para a construção deste artigo e para o entendimento de perspectivas futuras, tanto do assunto, quanto para minha carreira.

Aos meus pais e amigos por sempre estarem presentes e pelo contínuo apoio.

RESUMO

O tema de Economia Circular está em crescente discussão nas últimas décadas, devido à insustentabilidade da economia linear baseada em *‘take-make-dispose’*.

A circularidade promove alternativas sustentáveis para solucionar os problemas do modelo econômico vigente, como a extração exacerbada de matérias-primas finitas, a grande geração de resíduos e sua disposição inadequada, além dos impactos ambientais causados por estas práticas.

A indústria e o mercado de polímeros estão entre as atividades que geram maior impacto ambiental, com mais de 2,4 milhões de toneladas de plástico sendo descartadas por ano no Brasil, de maneira irregular em lixões a céu aberto. Somado a má gestão dos resíduos plásticos, fazem com que aproximadamente 75% de todo o plástico já produzido seja lixo.

Este trabalho visa analisar a possibilidade de comparação de diferentes métodos de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia de valor, sob a visão da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), através de uma revisão bibliográfica e entrevistas com especialistas.

Os resultados obtidos indicam que não há estudos suficientes de ACV de plástico PET no Brasil, e os estudos disponíveis mundialmente não possuem padrões de unidade funcional, escopo sistêmico, ou categorias de impacto, tornando-os pouco comparáveis entre si.

Dessa maneira, a aplicação de leis de obrigação de reciclagem no país torna-se irresponsável do ponto de vista ambiental, uma vez que há pouco conhecimento sobre os reais impactos das diferentes técnicas de gerenciamento de resíduos plásticos disponíveis.

Palavras-chave: Economia Circular, Reciclagem, PET, Polímeros, ACV

ABSTRACT

The topic of Circular Economy has been under increasing discussion in recent decades due to the unsustainability of the linear economy based on the ‘take-make-dispose’ logic. Circularity promotes sustainable alternatives to solve the problems of the current economic model, such as the excessive extraction of finite raw materials, the large generation of waste and its inadequate disposal, and the environmental impacts caused by these practices. The polymer industry and market are among the activities that generate the greatest environmental impact, with more than 2.4 million tons of plastic being discarded irregularly in open dumps in Brazil per year, which, combined with poor waste management, makes approximately 75% of all plastic ever produced to be currently considered waste. This work aims to analyze the possibility of comparing different methods of introducing and reintroducing PET plastic into the value chain, from the perspective of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, through a literature review and interviews with experts. The results indicate that there are not enough studies on LCA of PET plastic in Brazil, and the studies available worldwide do not have a standard functional unit, systemic scope, or impact categories, making them incomparable. In this way, the application of mandatory recycling laws in the country becomes irresponsible from an environmental point of view, since there is little knowledge about the real environmental impacts of different plastic waste management techniques available.

Keywords: Circular Economy, Recycling, PET, Polymers, LCA

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	20
Figura 2: Estrutura do Trabalho Final	22
Figura 3: Diagrama de fluxos de recursos e resíduos.....	25
Figura 4: Diagrama de Borboleta de Economia Circular	28
Figura 5: Diagrama da cadeia de suprimentos avançando e retornando	32
Figura 6: Características dos produtos para possibilitar uma cadeia de suprimentos circular e logística reversa	33
Figura 7: Fluxo de recursos na economia circular.....	34
Figura 8: Diagrama de Benefícios Globais da Economia Circular	35
Figura 9: Cadeia produtiva de plástico no Brasil	38
Figura 10: Setores consumidores e Ciclo de Vida dos plásticos no Brasil	39
Figura 11: Economia Linear x Circular do Plástico	40
Figura 12: Antes e Depois (esperado) da PNRS (2010).....	44
Figura 13: Reação de formação do PET	47
Figura 14: Estrutura do monômero de PET	48
Figura 15: Produção de PET a partir de combustíveis fósseis	49
Figura 16: Produção de PET a partir de biomassa	50
Figura 17: Processos de introdução de plástico PET na cadeia produtiva	52
Figura 18: Possíveis fluxos de degradação do plástico PET	53
Figura 19: Fluxograma das etapas básicas da Reciclagem Mecânica de PET	54
Figura 20: Processos de Reciclagem Química	55
Figura 21: Etapas da Reciclagem Biológica.....	57
Figura 22: Ciclo de Vida de um Produto	58
Figura 23: Etapas da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	59
Figura 24: Fluxograma básico de Inventário de Ciclo de Vida (LCI).....	60
Figura 25: Avaliação de Ciclo de Vida Sustentável (Sustainable Life Cycle Assessment)	69
Figura 26: Primeira etapa de uma ACV	70
Figura 27: Atores da PNRS	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Escopo geográfico dos artigos analisados.....	92
Gráfico 2: Escopo sistêmico dos artigos analisados.....	92
Gráfico 3: Distribuição temporal de publicação dos artigos analisados.....	93
Gráfico 4: Tecnologias de gerenciamento de resíduos PET dos artigos analisados.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas do polietileno tereftalato	47
Tabela 2: Descrição das entrevistas realizadas.....	62
Tabela 3: Categorias de Impacto	64
Tabela 4: Categorias de Impacto da ACV	71
Tabela 5: Artigos utilizados na revisão bibliográfica.....	87
Tabela 6: Siglas das Categorias de Impacto	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria de Plástico
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ADIRPLAST	Associação Brasileira dos Distribuidores de Resinas Plásticas e Afins
AP	Potencial de Acidificação (Aquático, Marinho, Terrestre)
ARD	Depleção de Recursos Abióticos (Abiotic Resource Depletion)
B2B	Bottle-to-Bottle
B2F	Bottle-to-Fiber
DMT	Tereftalato de Dimetila
EC	Consumo Energético (Energetic Consumption)
EG	Etilenoglicol
EP	Potencial de Eutrofização (Eutrophization Potential)
ETP	Potencial de Ecotoxicidade (Ecotoxicity Potential)
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	Global Warming Potential
HT	Toxicidade Humana (Human Toxicity)
IR	Radiação Ionizante (Ionizing Radiation)
KPI	Key Performance Indicator
LU	Uso de Terras (Land Use)
NP	Nutrição (Nutrification Potential)
ODP	Potencial de Depleção de Ozônio (Ozone Depletion Potential)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCR	Post Consumer Recycled
PET	Polietileno Tereftalato
PMFP	Potencial de Formação de Material Particulado (Particulate Matter Formation Potential)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POFP	Formação de Ozônio Fotoquímico (Photochemical Ozone Formation Potential)
rPET	PET Reciclado

SSP	Solid State Polimerization
SW	Geração de Resíduos (Solid Waste Generation)
TPA	Ácido Tereftalato
UF	Unidade Funcional
vPET	PET Virgem
W2E	Waste to Energy
WD	Consumo de Água (Water Depletion)
WF	Pegada Hídrica (Water Footprint)
WWF	World Wide Fund for Nature

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Motivação	21
1.2	Estrutura	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1.	Economia Circular e Logística Reversa	24
2.2.	Gerenciamento de resíduos.....	36
2.2.1.	Panorama dos resíduos plásticos	36
2.2.2.	Panorama legal da gestão de resíduos sólidos (RSU) no Brasil	40
2.3.	O Plástico PET	44
2.3.1.	Principais Características do Plástico PET	46
2.3.2.	Modelos de fabricação e reciclagem de plástico PET	48
2.3.3.	Método de Comparação de Tecnologias – Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	57
3	METODOLOGIA.....	61
3.1.	Entrevistas com Especialistas	61
3.2.	Revisão Literária – LCA.....	62
3.2.1.	Critério de Seleção.....	62
3.2.2.	Parâmetros estudados	63
4	RESULTADOS	67
4.1.	Resultados das Entrevistas	67
4.1.1.	Entrevista A	67
4.1.2.	Entrevista B	75
4.1.3.	Entrevista C	81
4.1.4.	Entrevista D	84
4.2.	Resultados da Revisão Bibliográfica	87
4.2.1.	Comparação de Unidades Funcionais	90
4.2.2.	Comparação de Categorias de Impacto	91
4.2.3.	Comparação de Escopos (Geográfico, Temporal e Sistêmico)	91
4.2.4.	Comparação de Tecnologias.....	93
4.2.5.	Análise dos dados da revisão bibliográfica	94
5.	CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a contextualização e relevância do trabalho realizado, sua motivação, objetivos e estrutura geral.

A sustentabilidade é um tema que apresenta crescente preocupação, recebendo atenção de instituições renomadas mundialmente, como a Organização das Nações Unidas (ONU).

Em 2015, a ONU criou um documento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), composta por 17 tópicos que buscam promover ações de melhoria em três âmbitos principais: social, ambiental (biosfera) e econômica (Figura 1).

Figura 1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU, 2015

A Economia Circular (EC) apresenta-se como um instrumento para atingir objetivos relacionados à todas as esferas analisadas, buscando transformar o paradigma de linearidade do modelo econômico atual ‘*take-make-dispose*’, que apresenta grandes impactos ambientais devido à extração contínua e exacerbada de recursos finitos, e à grande geração de resíduos, juntamente à sua disposição inadequada.

Através da utilização de resíduos como matéria-prima para processos, a EC promove a criação de uma cadeia “berço ao berço”, utilizando-se de sistemas e tecnologias relacionadas à logística reversa de produtos, ao *re-design* sustentável e à promoção da reutilização, remanufatura e reciclagem.

1.1 Motivação

A motivação do trabalho envolve fatores econômicos, ambientais, sociais e legais.

Os impactos ambientais gerados pela economia linear do plástico apresentam um grande desafio mundial, devido à grande geração de resíduos, que muitas vezes não são dispostos de maneira adequada, aos impactos gerados pela constante extração de recursos finitos para sua produção e à crescente demanda por este tipo de produto.

Além disso, as técnicas de reciclagem e reintrodução de plástico na cadeia de valor, apesar de apresentarem-se como soluções de grande potencial econômico e geração de empregos, promovem grandes emissões de gases, gastos energéticos e de água associados, que não recebem a devida atenção quando se trata do gerenciamento de resíduos plásticos.

Por fim, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), principal legislação em relação ao gerenciamento de resíduos plásticos, atualiza-se constantemente, adicionando normas e restrições à produção de plástico PET, tornando necessária a busca por maneiras alternativas de introdução e reintrodução de plástico na cadeia de valor para cumprir com as regras estabelecidas.

Desta maneira, o presente estudo busca analisar o cenário bibliográfico de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida de plástico PET, afim de avaliar a possibilidade de comparação de diferentes tecnologias de reciclagem de plástico PET.

Entrevistas com especialistas sobre a metodologia utilizada para a construção dos indicadores, sobre as tecnologias de reciclagem e sobre as principais obrigações legais associadas a este mercado foram realizadas para complementar tal cenário e entender as limitações existentes.

1.2 Estrutura

O presente trabalho está estruturado em seis tópicos principais: Introdução, Revisão da Literatura, Metodologia, Resultados, Conclusões e Contribuições e Referências.

No presente capítulo, é feita a contextualização do problema abordado no trabalho, os principais tópicos que serão estudados, a apresentação da motivação e dos objetivos do trabalho, e o detalhamento da estrutura que será seguida.

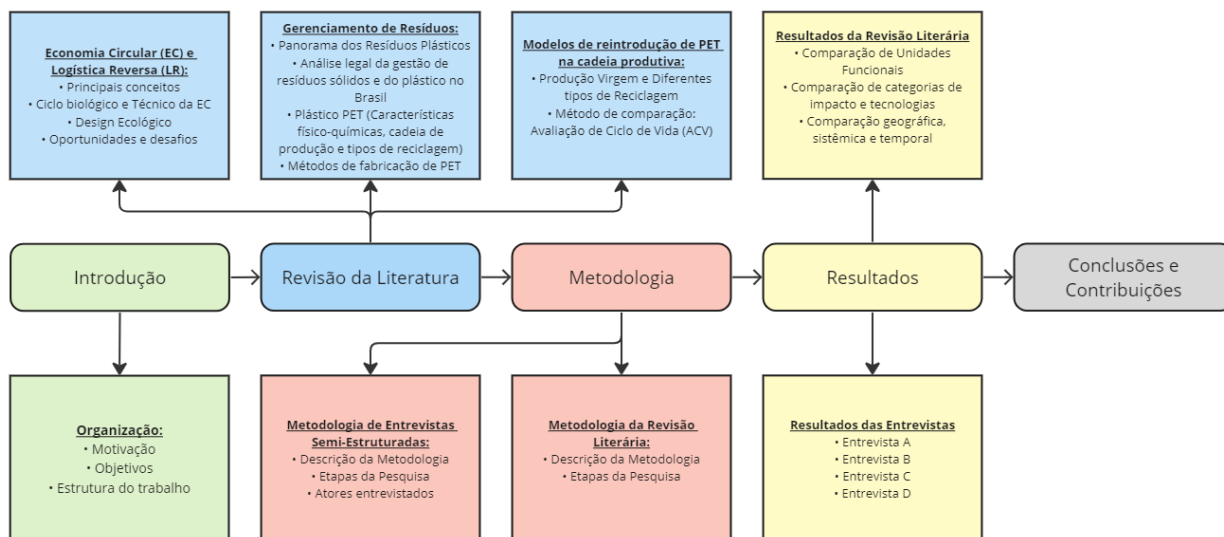
No capítulo seguinte, Revisão da Literatura, foi realizado um estudo bibliográfico sobre os principais tópicos estudados no trabalho, como Economia Circular (EC), Logística Reversa (LR), detalhamento do panorama dos resíduos plásticos no Brasil e no mundo, detalhamento das principais características do Polietileno Tereftalato (PET), e sobre as diferentes técnicas de introdução e reintrodução do plástico PET na cadeia produtiva.

Em seguida, o capítulo Metodologia, traz a maneira como o trabalho foi realizado, apresentando as técnicas e índices que foram implementados para permitir a comparação das diferentes tecnologias selecionadas de produção e reciclagem de plástico PET em relação a seus impactos ambientais, através da revisão bibliográfica de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Além disso, apresenta os atores que serão entrevistados para complementar o estudo realizado através de roteiros semiestruturados.

O quarto capítulo consiste na descrição dos resultados obtidos através da revisão dos estudos de ACV para diferentes localidades geográficas, permitindo a comparação e classificação das tecnologias analisadas, bem como as entrevistas com especialistas.

Por fim, são apresentadas as conclusões, limitações da pesquisa e proposta para trabalhos futuros.

Figura 2: Estrutura do Trabalho Final



Fonte: Produzido pelo autor

2 REVISÃO DA LITERATURA

A etapa de revisão da literatura busca apresentar o cenário atual sobre os principais temas e conceitos que serão discutidos no TF. São eles: economia circular, logística reversa, plástico PET e sua reciclagem, e as estruturas de gerenciamento disponíveis atualmente para a gestão de resíduos. Por fim, será apresentado um quadro teórico para analisar o fenômeno proposto.

2.1. Economia Circular e Logística Reversa

A Economia Circular é um conceito baseado na ideia de que ‘tudo é um *input* para todo o resto’, ou seja, os resíduos descartados, na realidade, podem se tornar matérias-primas para o desenvolvimento de novos produtos.

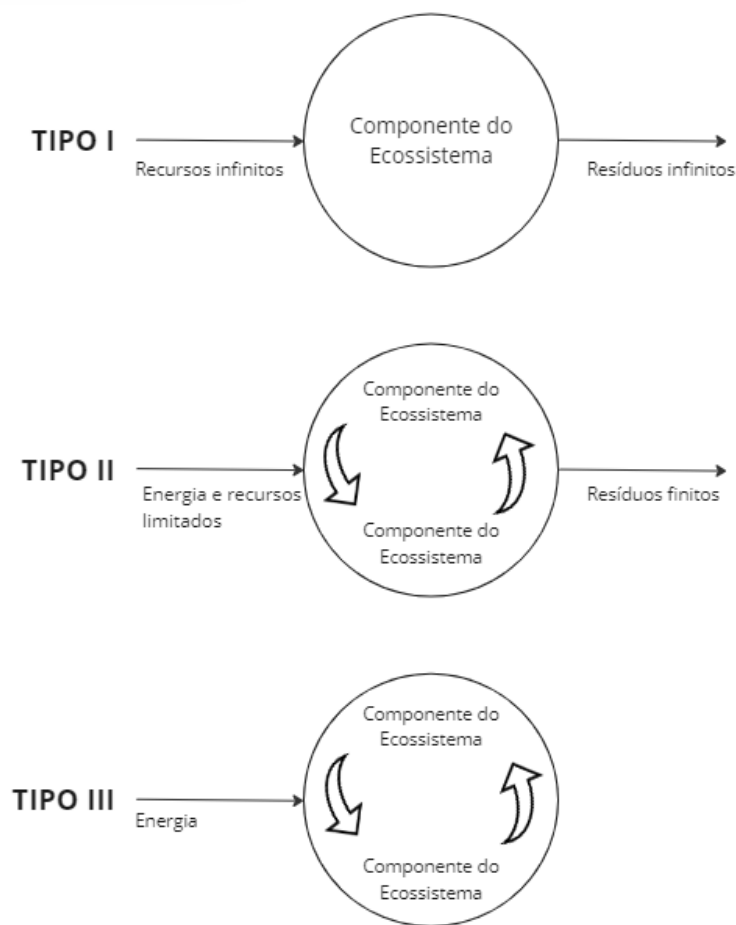
Esse conceito surgiu como oposição ao modelo de economia linear ‘*take-make-dispose*’ (BOKEN, 2017) predominante desde a Revolução Industrial, em que os materiais são extraídos, manufaturados, utilizados e depois descartados sem planejamento de reutilização.

Este modelo torna-se insustentável considerando que os recursos utilizados são finitos, retirados de seus ambientes para consumo e retornando à natureza em concentrações danosas e não degradáveis.

A circularidade promove como objetivo principal o “desenvolvimento de uma economia sustentável, competitiva, eficiente e com baixas emissões de carbono” (European Union, 2015, p.2) através da implementação de ciclos-fechados (*closed loops*) (KORHONEN, 2018).

A comparação entre os modelos industriais-econômicos é coberta pela ecologia industrial (GRAEDEL, 1996), que busca uma análise das atividades industriais a partir da ótica de sistemas biológicos, em que o sistema deve ser integrado entre atividades e recursos, como em ecossistemas naturais. Os tipos de sistemas e ciclos são abordados por Graedel e Allenby (1994).

Figura 3: Diagrama de fluxos de recursos e resíduos



Fonte: Traduzido pelo autor de Graedel e Allenby (1994)

No diagrama de fluxos de recursos, o Tipo I representa o modelo linear teórico, em que se assume uma quantidade infinita de recursos que, após serem inseridos no sistema de manufatura e consumo, produzem resíduos infinitos. Já o Tipo II representa o sistema linear com algumas características sustentáveis em relação ao Tipo I, com ciclicidade limitada, em que recursos e energia finitos entram no sistema, são utilizados e descartados, produzindo uma quantidade finita de resíduos.

Este sistema não é sustentável a longo prazo, pois continua sendo linear, com os recursos sendo consumidos e descartados sem retorno.

Por fim, o tipo III apresenta um sistema circular fechado, tomando como *input* apenas energia para continuar funcionando, uma vez que, para atingir real sustentabilidade, o sistema deve ser quase completamente cíclico (JELINSKI, 1992). A única entrada nesse tipo de processo seria a energia, que deve ser gerada de maneira limpa e sustentável, para que o sistema esteja em sintonia com sua definição dentro do conceito

de Ecologia Industrial. Este modelo serve de base para o conceito mais abrangente de Economia Circular.

Além da ecologia industrial, a economia circular engloba diversos outros temas e definições importantes cunhados anteriormente (KORHONEN, 2018), como ecossistemas industriais, simbioses industriais, produção limpa, ecoeficiência, design “*cradle-to-cradle*” (do berço ao berço), biomimética e economia de performance.

Os Ecossistemas Industriais (JELINSKI, 1992) se referem à metodologia industrial de otimização do ciclo dos materiais, desde seu estado virgem, até o produto manufaturado e, por fim, como resíduo.

As simbioses industriais (CHERTOW, 2012) referem-se à colaboração entre empresas em um ecossistema industrial, através da conectividade entre diversos setores, para a troca de recursos, conhecimentos e informações, mas com manutenção da autonomia de cada uma, buscando assim uma evolução conjunta e melhoria contínua dos processos em todo o sistema.

O conceito de produção limpa (STEVENSON, 2004) refere-se ao conjunto de técnicas e estratégias que visam reduzir ou eliminar o impacto negativo das atividades industriais no meio ambiente, envolvendo a minimização da utilização de recursos naturais, a redução da geração de resíduos, a prevenção da poluição e a eficiência energética, apresentando uma abordagem preventiva, através da junção de conceitos de colaboração entre indústrias, educação e capacitação, reciclagem, otimização de processos e design sustentável.

A ecoeficiência (HUPPES, 2009) envolve a busca por um modelo sustentável através da melhoria da eficiência de processos de produção, desenvolvida com o intuito de conciliar objetivos econômicos com a redução dos impactos ambientais. Isto ocorre através da identificação de impactos e de indicadores de desempenho sobre eles, seguida pelo estabelecimento de metas de ecoeficiência para tais parâmetros, avaliação de opções técnicas, econômicas e ambientais de melhoria e seus custos-benefícios, e por fim pela implementação de tais opções e a avaliação de seus resultados para que seja feito um novo ciclo de melhoria.

O design “*cradle-to-cradle*”, ou seja, do “berço ao berço” (BRAUNGART, 2007) refere-se à criação de produtos e sistemas ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis ao longo de todo seu ciclo de vida, divergindo do modelo linear em que os produtos são pensados para serem utilizados por um tempo limitado e, após seu uso, serem descartados como resíduos, em uma abordagem “berço ao túmulo”. Este tipo de

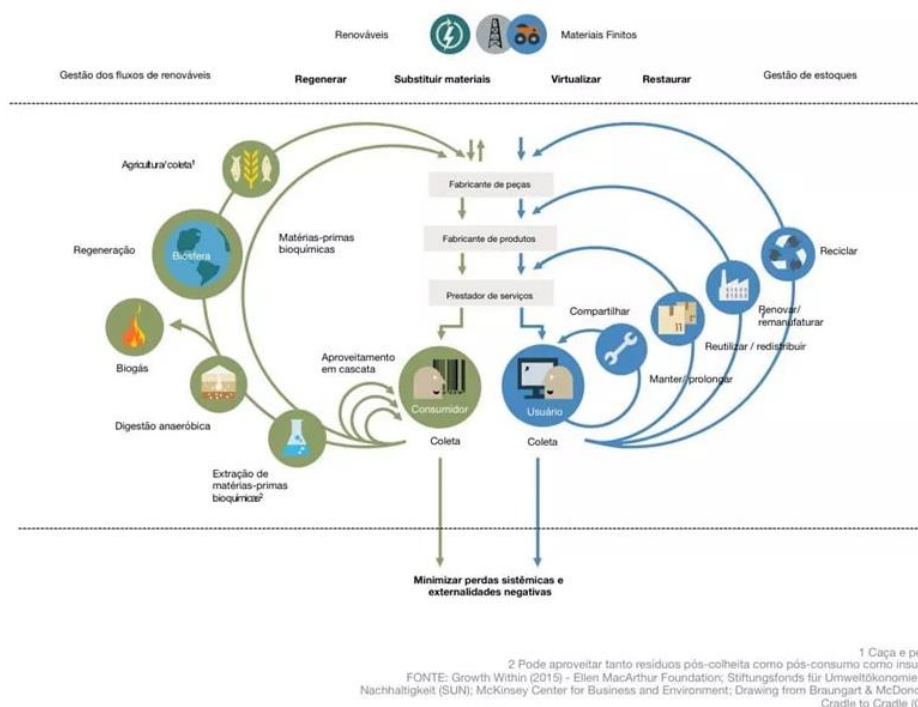
design tem como objetivos projetar produtos levando em consideração a reutilização e reciclagem futuras, com vidas úteis longas e confecção com materiais de fácil separação e reciclagem, e que possam posteriormente ser reintegrados ao meio ambiente.

A Biomimética é um conceito de design que busca soluções tomando como inspiração os processos e padrões encontrados na natureza, combinando “bio” (vida) e “mimese” (imitação). Ele parte do pressuposto que a natureza desenvolveu processos e sistemas sustentáveis ao longo de anos de evolução, através da otimização de estruturas e atividades, e, portanto, os produtos devem basear-se nestes sistemas e buscar harmonia com eles (BENYUS, 2003).

A economia de performance (MACARTHUR, 2013) é abordada no livro “*Towards a Circular Economy*” da Fundação Ellen MacArthur, e propõe uma abordagem alternativa ao modelo linear de produção com foco em maximização do consumo, concentrando-se na entrega de benefícios e valor duradouro aos consumidores, maximizando a satisfação de necessidades em detrimento às vendas. Neste contexto, busca-se o incentivo à produção de produtos com design “*cradle-to-cradle*”, à oferta de produtos-serviços, como aluguel e compartilhamento, e à recompensa e precificação baseados na performance dos produtos, e não no objeto, estimulando fabricantes a projetar produtos eficientes.

Todos estes conceitos fazem parte da estrutura da economia circular, que envolve muitos outros sistemas, processos, atores e relações. Para que seja possível implementar um modelo de economia circular, existem condicionantes que devem ser cumpridos. Eles podem ser sumarizados pelo diagrama de borboleta desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur:

Figura 4: Diagrama de Borboleta de Economia Circular



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2015) – Traduzido pelo Jornal da USP

Neste diagrama (MACARTHUR, 2015), os ciclos internos e menores demandam menos energia e recursos, e são mais econômicos, representando os ciclos a serem maximizados. Sua construção idealmente depende do conceito utópico de um sistema cíclico fechado, que depende 100% de energias renováveis e da reciclagem de todos os materiais, o que não é tecnicamente realista, uma vez que aproximadamente 75% da energia produzida mundialmente é baseada em recursos não-renováveis (KORHONEN, 2018). Tais métodos de produção energética, principalmente aqueles baseados em combustão, liberam emissões de gases em concentrações nocivas que não são assimiláveis pela natureza, demonstrando um exemplo claro das limitações atuais da economia circular.

O diagrama de borboleta proposto pela Fundação Ellen MacArthur é dividido em dois macros grupos: à esquerda, em verde, tem-se o ciclo biológico, que engloba os materiais biodegradáveis, que podem retornar ao meio ambiente de maneira segura, e à direita, em azul, é representado o ciclo técnico, em que os produtos são utilizados, e não consumidos.

O ciclo biológico é composto por produtos consumíveis, como alimentos, e também materiais como madeira, algodão e outros materiais orgânicos que podem ser

extraídos do ciclo técnico e serem transferidos para o ciclo biológico quando já sofreram degradação a um ponto que não podem mais ser utilizados em produtos.

Neste subgrupo da Economia Circular, têm-se processos que retornam os nutrientes à natureza, compostos pela Regeneração (*Regeneration*), Agricultura e Coleta (*Farming/Collection*), Compostagem e Digestão Anaeróbica (*Anaerobic Digestion*), ciclos de Cascadeamento (*Cascades*) e Extração de matéria prima (*Extraction of biochemical feedstock*). A Regeneração envolve o retorno de materiais biológicos para o solo, para que haja tanto uma destinação para os resíduos orgânicos, quanto uma melhoria na qualidade dos solos.

A agricultura no contexto do ciclo biológico refere-se à gestão de fazendas, florestas e da pesca de maneira positiva para a natureza, mantendo a saúde e qualidade do solo estáveis, melhorando a qualidade da água e do ar e armazenando o máximo de carbono no solo possível. Para atingir estes objetivos, é necessária a implementação de técnicas de agricultura regenerativa (MUHIE, 2022), aquacultura restauradora (BARRETT, 2022), agroecologia (KERR, 2023), agroflorestas e agricultura conservativa (LI, 2018), além de contar com fluxos de coleta e retorno dos nutrientes ao solo através de compostagem e digestão anaeróbica.

A compostagem refere-se à quebra da matéria orgânica por microrganismos na presença de oxigênio, como fungos e bactérias, podendo ser utilizada para tornar restos de alimentos e outros materiais biodegradáveis em compostos que melhoram a qualidade do solo.

A Digestão Anaeróbica é uma maneira alternativa à compostagem para recuperação de materiais orgânicos através de processos envolvendo microrganismos na ausência de oxigênio. Ambos os processos descritos podem gerar biogás, que pode ser ainda, utilizado como fonte de energia.

As cascatas referem-se à utilização de materiais que já estão presentes na economia, como a utilização de cascas de laranja para fazer materiais têxteis (MACARTHUR, 2015), o design de novos alimentos através de materiais orgânicos antes tratados como resíduo, tanto voltados para o consumo humano como para produção de ração animal, por exemplo.

Por fim, tem-se o ciclo de extração de matéria-prima bioquímica, através de biorrefinarias, que podem produzir uma gama de produtos através de materiais orgânicos.

Já o ciclo técnico é composto por 5 subciclos: compartilhamento (*sharing*), manutenção (*maintaining*), reutilização (*reusing*), redistribuição (*redistribution*), remanufatura (*refurbish/remanufacture*), e reciclagem (*recycle*).

Segundo MacArthur, o ciclo mais econômico, Compartilhamento, consiste na utilização de um mesmo produto por diferentes pessoas, diminuindo a necessidade de produção de diversos produtos que serão utilizados poucas vezes em seu ciclo de vida, como ferramentas, ou que têm horários de utilização diferentes, como no caso de compartilhamento de veículos.

Já o ciclo de Manutenção refere-se à importância de manter os produtos com alta qualidade por um longo período através de fornecimento de serviços de reparo, aumentando sua vida útil e postergando sua transformação em resíduo.

Seguindo a abertura dos ciclos, tem-se o Fluxo de Reuso, que consiste na utilização de um produto que já foi alguma vez utilizado, mantendo sua forma e propósito originais, como embalagens e sacolas reutilizáveis, mas que podem passar por um serviço de redistribuição para diferentes usos e usuários.

A Remanufatura refere-se ao retorno dos produtos com defeito, que antes tornavam-se resíduo, para o fabricante, para que ele seja atualizado ou receba uma substituição de peças ou partes novas, e possa ser distribuído novamente como produto para outro usuário.

Por fim, o ciclo menos econômico e que demanda mais energia é a Reciclagem, que se aplica a produtos que não podem sofrer manutenção ou remanufatura, e representam uma tentativa de manter os materiais do produto na cadeia produtiva, evitando que se tornem resíduos. A reciclagem retira o valor do produto, mas possibilita manter seus materiais para que sejam utilizados como matéria prima na fabricação de outros produtos.

Para que a reciclagem e todos os outros processos do ciclo técnico sejam possíveis, dois conceitos tornam-se extremamente importantes: design sustentável e logística reversa.

O design sustentável (BRAUNGART, 2007) refere-se à abordagem do design que busca a criação de produtos e sistemas compatíveis com os princípios de economia circular de eliminação de desperdício e poluição, circularidade de produtos e materiais em seu mais alto valor e regeneração da natureza (MACARTHUR, 2015), através do desenvolvimento de produtos com longo ciclo de vida, que possam ser compartilhados, reutilizados, remanufaturados ou reciclados com facilidade. Este conceito foi

aprofundado por Hallsteadt (HALLSTEADT, 2017), que identificou os principais critérios que devem ser atendidos pelo design sustentável, criando índices de sustentabilidade baseados na aplicabilidade, lógica e simplicidade, clareza, relevância e possibilidade de realização dos projetos em relação aos objetivos de minimização da quantidade de matérias-primas utilizadas, da redução da porcentagem de materiais e matérias-primas que já apresentam escassez, e da consideração da disponibilidade futura dos materiais utilizados.

Através destes critérios, desenvolveu-se uma escala de conformidade de Sustentabilidade (Sustainability Compliance Index - SCI, *scale*) (HALLSTEADT, 2017), que avalia entre 0-10 a conformidade de projetos com a Matriz Conformidade de Critérios Sustentáveis.

Além dessa matriz, que busca avaliar um projeto já desenvolvido, há também matrizes para outras etapas do desenvolvimento de um projeto ou produto.

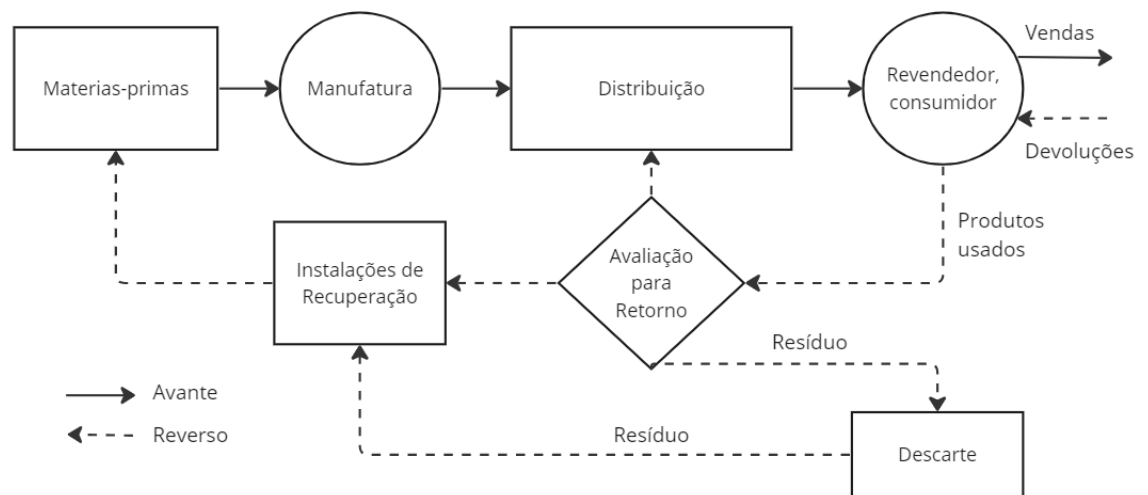
A Matriz de Critérios Sustentáveis Abrangente tem o objetivo de ajudar na tomada de decisão no desenvolvimento de novos conceitos. Já a Matriz de Critérios Sustentável Absoluta busca prover suporte para continuar, mudar ou parar o desenvolvimento de um conceito em suas primeiras fases de design.

De acordo com o Conselho Executivo Americano de Logística Reversa, a logística reversa (LR) pode ser definida como “*O processo de planejamento, implementação e controle do fluxo eficiente e econômico de matérias-primas, materiais em processamento e materiais acabados, juntamente às informações correlatas, do ponto de consumo ao ponto de origem, com o propósito de recapturar valor ou para descarte adequado*” (ROGERS, 1998, p.?).

Através desse processo, é possível tomar decisões em relação aos resíduos relacionados ao diagrama de borboleta proposto pela Fundação Ellen MacArthur, com a possibilidade de reciclagem para obter matérias-primas, remanufatura para revenda, manutenção e por fim, descarte dos materiais que não podem ser mais reutilizados em locais adequados, seguindo as normas ambientais propostas (GOVIDAN, 2015).

A logística reversa apresenta-se como a solução para fechar o ciclo da cadeia de suprimentos, que na economia linear apenas avança, mas que pode ser revertida através desse processo. O fechamento do ciclo pode ser observado no diagrama proposto por Tonanont (2008):

Figura 5: Diagrama da cadeia de suprimentos avançando e retornando



Fonte: Traduzido pelo autor de Tonanont (2008)

A definição de logística reversa evoluiu ao longo dos anos, e pode ser melhor definida como o “*design, controle e operação de um sistema para maximizar a criação de valor ao longo de todo ciclo de vida de um produto, com recuperação dinâmica de valor através de diferentes tipos e volumes de retorno ao longo do tempo*” (GUIDE, VAN WASSENHOVE, 2009, p.?).

Juntamente à economia circular, essa nova visão de logística reversa levou à criação de um conceito mais abrangente, a cadeia de suprimentos circular (VEGTER, 2020), que se refere à coordenação entre as cadeias de suprimentos para frente e reversa para criar valor através da redução, manutenção e recuperação de recursos naturais, englobando também conceitos de cadeias de suprimento fechadas (“*closed-loop supply chains*”).

Para que a cadeia de suprimentos circular possa ocorrer, é necessário analisar determinadas características dos produtos e resíduos que trafegam ao longo da cadeia de suprimentos, seguindo a visão de design sustentável:

Figura 6: Características dos produtos para possibilitar uma cadeia de suprimentos circular e logística reversa

Características dos Produtos		Referências
	Composição Facilidade de desmontagem, homogeneidade dos componentes do produto, presença de materiais perigosos, e nível de padronização/customização	(Cline et al., 2015; Ortegon et al., 2013; Van Der Wiel et al., 2012)
	Deterioração Uma característica determinando o nível de funcionalidade restante em um produto para usos futuros ou recaptação do valor residual de suas partes/componentes	(Abdessalem et al., 2012; Van Der Wiel et al., 2012; Xie & Breen, 2014)
	Dimensão Produtos pequenos tendem a ser descartados ou armazenados. Produtos maiores apresentam um desafio maior de transporte e manuseio	(Ortegon et al., 2013; Xie & Breen, 2014)
	Padrão de Uso A maneira como o produto é utilizado; pode variar dependendo do tipo de consumidor (<i>business-to-business</i> ou <i>business-to-consumer</i>), localização do uso do produto e intensidade de uso	(Van Der Wiel et al., 2012)
	Contaminação Contaminações podem originar-se de produtos restantes em embalagens ou manuseio descuidado do produto durante sua remoção quando destruições estão na carga	(Cline et al., 2015)
	Necessidade no mercado principal Necessidade de produtos retornados no mercado primário em que os produtos são vendidos. Distinto do mercado secundário (venda de produtos retornados ou reprocessados)	(Abdessalem et al., 2012;)

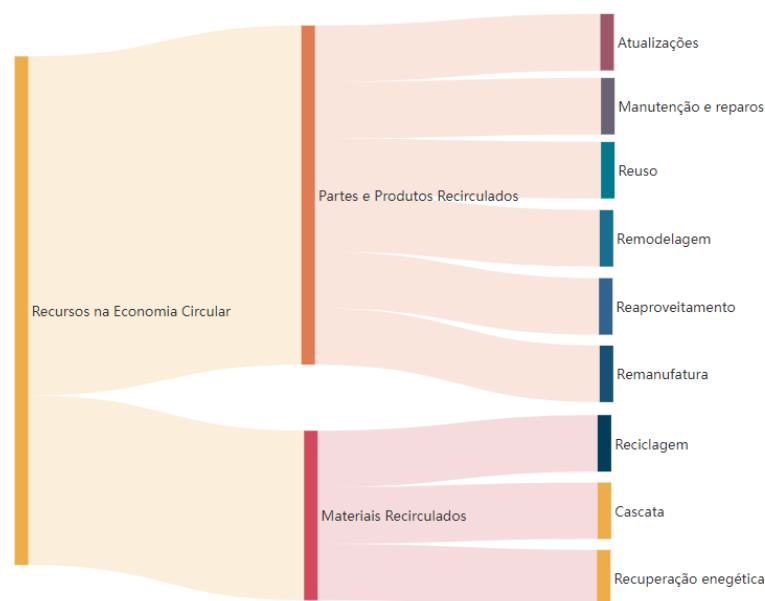
Fonte: Traduzido pelo autor de Mallick (2023)

Através da tabela, é possível identificar as principais características dos produtos que devem ser analisadas para determinar a viabilidade da aplicação de um sistema de logística reversa, possibilitando uma cadeia de suprimentos circular. Primeiramente, analisa-se a composição dos produtos, se eles são facilmente desmontáveis, se seus componentes são homogêneos, a presença de materiais perigosos e o nível de padronização ou customização (CLINE, 2015).

Depois analisam-se as características de deterioração dos produtos, ou seja, o nível de funcionalidade restante do produto para posterior recuperação do valor residual de suas partes ou componentes (XIE, BREEN, 2014). Analisa-se também as dimensões do produto, que podem representar dificuldades de transporte (ORTEGON, 2013). O padrão de uso do material fornece informações sobre os locais e intensidade de uso (VAN DER WIEL, 2012). As características de contaminação (CLINE, 2015) e as necessidades no mercado também são analisadas para determinar a viabilidade de aplicação de logística reversa para determinado produto.

Após a análise das características dos produtos, decide-se em qual dos ciclos do diagrama de borboleta ele se encaixa, podendo seguir o seguinte fluxo de economia circular:

Figura 7: Fluxo de recursos na economia circular



Fonte: Traduzido pelo autor de Mallick (2023)

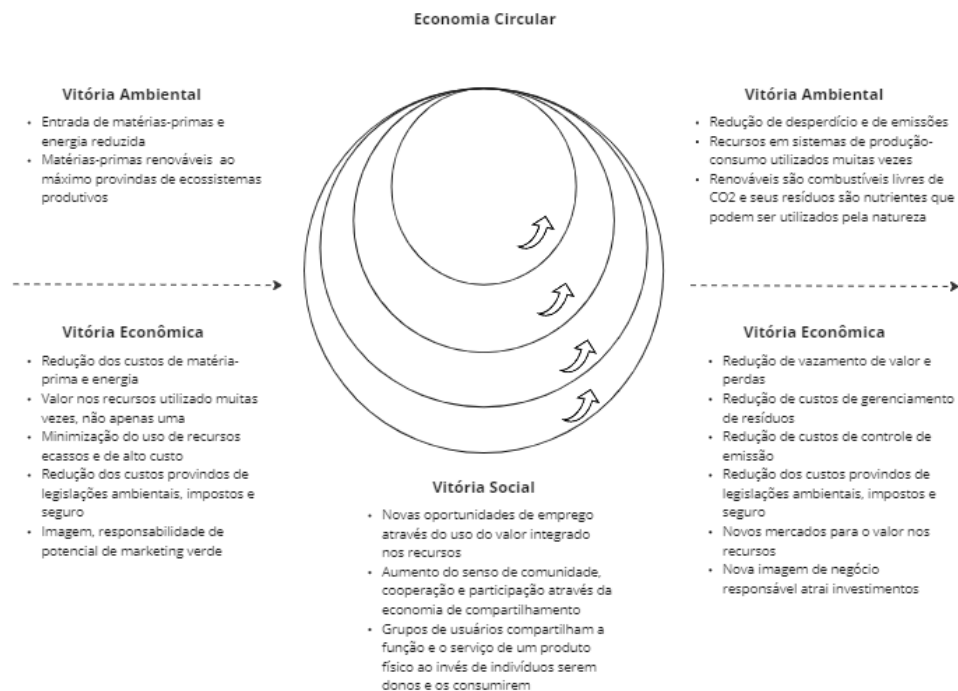
Por fim, analisam-se os componentes do *framework* de logística reversa a ser aplicado para determinado produto, iniciando pelo porquê da aplicação desse processo, e como ele será aplicado, englobando os atores envolvidos e suas razões para participação (DE BRITO, 2004). Analisa-se também a viabilidade tecno-econômica da aplicação da LR, o custo de sistemas de reciclagem, de investimentos em estrutura, financiamento e impactos socioeconômicos (SGARBOSSA e RUSSO, 2017).

Juntamente a estas análises, ocorre a *Value Chain Analysis* (VCA), que mapeia os *stakeholders* e atividades na cadeia de valor da LR para reduzir custos e criar valor para o consumidor (DE SOUZA e D'AGOSTO, 2013).

Finalmente, são utilizados também modelos de maturidade (PEÑA-MONTOYA, 2020) para definir o nível de formalidade, sofisticação e integração da cadeia atual do produto a fim de identificar pontos de melhoria e desenvolvimento.

Através do sucesso de todos os componentes da logística reversa e do design sustentável, torna-se viável a criação de um cenário para a aplicação da economia circular, que se apresenta com um grande potencial de “win-win” (ganha-ganha), visualizado no diagrama proposto por Korhonen (2008):

Figura 8: Diagrama de Benefícios Globais da Economia Circular



Fonte: Traduzido pelo autor de Korhonen (2008)

A proposta de ganho fornecida por este sistema é global, envolvendo quesitos ambientais, sociais e econômicos.

Ambientalmente, há uma redução no *input* de materiais virgens e de energia no sistema, através da reutilização e reciclagem de materiais, do aumento da eficiência dos processos e do crescimento de produção de energias limpas e renováveis, e também a redução da produção de resíduos e emissões de substâncias em concentrações nocivas no lado dos *outputs* do sistema.

Economicamente, há uma redução nos custos de materiais e energia no input do sistema, e uma redução nos custos de gerenciamento de resíduos, de controle de emissões, de vazamentos e perdas e de alinhamento com a legislação, pagamentos de taxas e seguros no *output*, além da possibilidade de criação de novos mercados para captar e reutilizar os resíduos.

Socialmente, ocorre a geração de novos mercados e, portanto, de novos empregos, além da criação de um senso de comunidade e colaboração através de uma economia de compartilhamento, com grupos de usuários dividindo os mesmos produtos, em detrimento à posse e uso individual.

Entretanto, mesmo sendo um conceito muito estudado em artigos teóricos, existem poucos exemplos concretos sobre a viabilidade econômica de economias circulares (PALEA, 2023).

Para que a economia circular tenha um impacto positivo, é necessário que ela promova aumento de lucratividade, menor custo de capital e aumento na avaliação de ações no mercado, encorajando empresas a adotarem medidas em favor deste novo sistema.

No tópico a seguir, serão analisados *frameworks* presentes na literatura de Economia Circular, focando principalmente em produtos plásticos.

2.2. Gerenciamento de resíduos

Estudos práticos demonstram resultados positivos da aplicação de práticas circulares, no meio ambiente (ROSSI e BERTASSINI, 2020; BJØRNBET, 2021), no design de produtos (BOCKEN, 2016) e no gerenciamento da cadeia produtiva (BARROS e SALVADOR, 2021).

Em 2022, um estudo concluiu que materiais no fim de seu ciclo de vida são suficientes para suprir aproximadamente 37% da demanda de insumos para fabricação de veículos elétricos até 2040, e 45% da demanda material dos fabricantes de sistemas de armazenamento a bateria e turbinas de vento até 2040, com uma previsão de 81% e 96% até 2050, respectivamente (KARALI, 2022). Outros estudos promovem a ênfase do design sustentável como principal chave para o aumento da eficiência no consumo de recursos e na diminuição de emissões danosas (LEWANDOWSKI, 2016).

2.2.1. Panorama dos resíduos plásticos

A indústria e o mercado de polímeros estão entre as atividades que geram maior impacto ambiental.

Os resíduos plásticos, que normalmente provém de produtos descartáveis com pequeno ciclo de vida, são liberados em enormes quantidades no meio ambiente, estimando-se aproximadamente 23 milhões de toneladas sendo descartadas em rios, lagos

e mares por ano (LIM, 2022). No ano de 2016, foram descartados aproximadamente 25 milhões de toneladas de plástico em solo terrestre (BORRELLE, 2020).

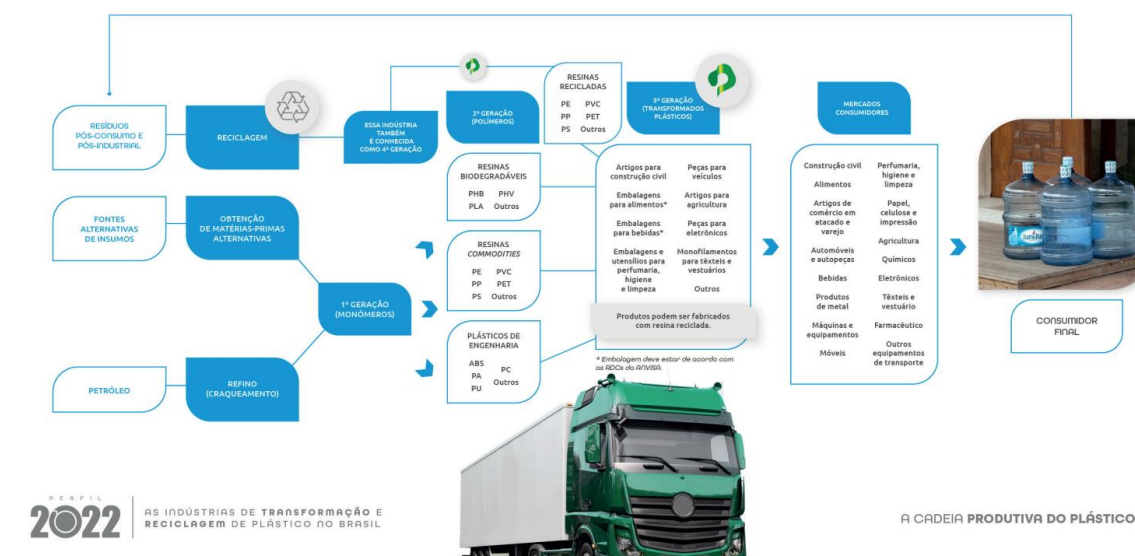
Existem muitos métodos de separação e reciclagem de plásticos (GUNDUPALLI, 2017), mas as técnicas de separação possuem altos custos, levando a uma baixa taxa de reciclagem para o material, em torno de 27,2% mundialmente, enquanto 36,4% são dispostos em aterros e outros 36,4% são incinerados (VIEIRA, 2022), causando grandes emissões de gases estufa, contaminação do solo e da água.

Além disso, o consumo de plástico deve dobrar nos próximos 20 anos, com plásticos para embalagens representando 26% do consumo total. Apesar disso, apenas 14% dos plásticos utilizados em embalagens são coletados e reciclados, e destes, apenas 5% do valor do material é retido (MACARTHUR, 2017).

Grande parte do plástico residual produzido pelos países desenvolvidos era exportado para países em desenvolvimento (aproximadamente 70% da produção) da região asiática do Pacífico até o aumento das restrições de importação de resíduos impostas pela China em 2017, resultando em um total de aproximadamente 111 milhões de toneladas de plástico sem destino até 2030 (BROOKS, 2018). Esta mudança de cenário levou a uma necessidade instantânea de países desenvolvidos de processar seus próprios resíduos (KING, 2022).

No Brasil, a cadeia produtiva de plástico é extremamente complexa, podendo receber materiais de diversas origens (refino através de craqueamento de petróleo, resíduos pós-consumo, resíduos pós-industriais e fontes alternativas de insumo) para a síntese de uma ampla gama de polímeros diferentes, como PVC (Policloreto de Vinila), PET (Polietileno Tereftalato), PP (Polipropileno), entre muitos outros, para atender inúmeros setores, desde artigos para construção civil, embalagens de alimentos, peças para eletrônicos e materiais para as mais variadas indústrias (Figura 9).

Figura 9: Cadeia produtiva de plástico no Brasil



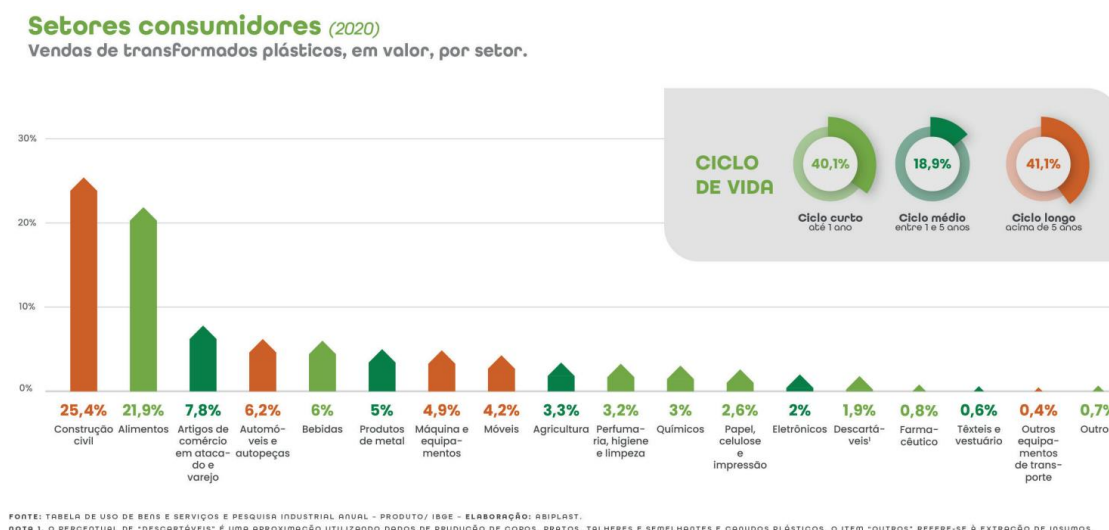
Fonte: Associação Brasileira da indústria plástica - ABIPLAST, 2022

O Brasil produz aproximadamente 2% de todo o plástico mundial (PLASTIC EUROPE), totalizando 11.339 empresas, que empregam mais de 340.000 pessoas (RAIS, CAGED, 2022) para a produção de aproximadamente 6,7 milhões de toneladas de plástico, em um mercado de R\$117,5 bilhões (ABIPLAST, 2022).

Mas, apesar de ser o 8º maior produtor de plástico no mundo (STATISTA, 2022), o Brasil é o 4º maior gerador de lixo plástico mundialmente, produzindo cerca de 11,3 milhões de toneladas de lixo plástico por ano, com uma taxa de reciclagem de 1,28% (WWF, 2022), muito abaixo da média de 9% dos 10 países que mais produzem lixo plástico, como Estados Unidos (34,6%) e China (21,9%), sendo o único país com uma taxa inferior a 5%.

Em relação ao ciclo de vida médio dos produtos plásticos consumidos no país, aproximadamente 40% deles possui um ciclo de vida curto, de até 1 ano, destinados principalmente aos setores de construção civil (25,4%) e de alimentos (21,9%), como pode ser observado na Figura 10 (ABIPLAST, 2022).

Figura 10: Setores consumidores e Ciclo de Vida dos plásticos no Brasil



Fonte: ABIPLAST (2022)

Estima-se que aproximadamente 2,4 milhões de toneladas de plástico são descartadas de maneira irregular em lixões a céu aberto no Brasil, 7,7 milhões de toneladas são destinados a aterros sanitários e mais de 1 milhão de toneladas não são recolhidas pelos sistemas de coleta (WORLD BANK, 2019), evidenciando os grandes problemas da indústria do plástico: grande produção, produtos com pequeno ciclo de vida, descartáveis e com baixa eficiência e qualidade dos sistemas de gerenciamento de resíduos.

A má gestão de resíduos plásticos, somada à grande demanda por produtos deste material, fazem com que aproximadamente 75% de todo o plástico já produzido pela humanidade seja lixo (WORLD BANK, 2019), e que aproximadamente um terço de todo plástico descartado seja inserido na natureza como poluição terrestre e nos corpos d'água (MACHADO, et al., 2018).

Desta maneira, torna-se inviável manter o atual sistema linear de manufatura e consumo de plástico, tornando-se necessário encontrar modelos alternativos que não apresentem tantos impactos ambientais, mas que sejam economicamente e tecnicamente viáveis.

Diversas tecnologias específicas para possibilitar a implementação de um sistema circular para plástico foram desenvolvidas ao longo dos anos, como pesquisas de química verde (SHELDON, NORTON, 2020), soluções para embalagens plásticas (MEYS, 2020), tecnologias de reciclagem química (KHADKE, 2021), pirólise (SHARUDDIN, 2016), *Block Chain* (KHADKE, 2021) e manufatura aditiva (CRUZ, 2020), que buscam

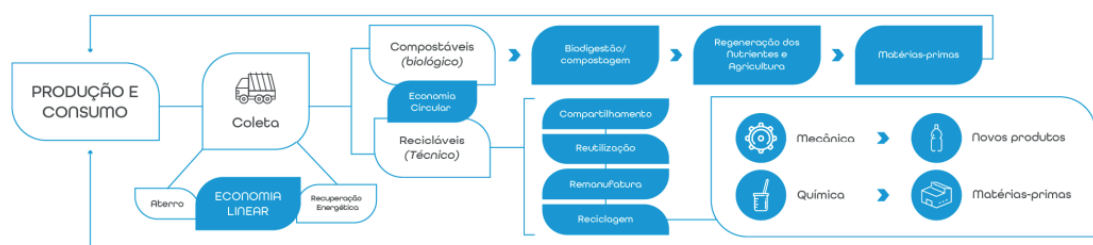
solucionar os problemas de gestão de plástico em etapas finais da cadeia de suprimentos, quando, na realidade, deveriam ocorrer mudanças em suas etapas iniciais.

Portanto, torna-se clara a necessidade da criação de *frameworks* de gestão de resíduos plásticos, adaptados para cada localização e cultura em que serão implementados.

É necessário estudar modelos de economia circular para o mercado de plástico, visando implementar de maneira conjunta os conceitos de Redução do consumo, Recusa de recursos ou produtos desnecessários, Redesenho de produtos e modelos, como economia de compartilhamento, Reutilizar produtos, Reparar, Restaurar, Remanufaturar, Reaproveitar e Reciclar, conhecidos como os 9 R's da economia circular, na cadeia produtiva do plástico.

A Figura 11 detalha os possíveis caminhos do plástico pós-consumo no Brasil, que pode seguir a trajetória de economia linear, sendo destinado a aterros ou queimado para recuperação energética, ou o ciclo técnico da economia circular, podendo ser compartilhado, reutilizado, remanufaturado ou, finalmente, reciclado mecanicamente ou quimicamente.

Figura 11: Economia Linear x Circular do Plástico



Fonte: ABIPLAST (2022)

2.2.2. Panorama legal da gestão de resíduos sólidos (RSU) no Brasil

Além das necessidades ambientais apresentadas, como a grande geração de resíduos e os impactos gerados pela produção de plástico PET através de material virgem, existem também exigências legislativas que promovem a necessidade da criação de sistemas de gerenciamento de resíduos eficientes.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei n° 12.305/2010) foi estabelecida apenas em 2010, após 20 anos de elaboração (DOS SANTOS, VILLAC 2019), como um desdobramento da Política Nacional do Meio ambiente, com o intuito de

responsabilizar os atores econômicos em relação aos resíduos sólidos gerados (MUNDO PLÁSTICO, 2020).

Baseada nas hierarquias de gerenciamento de RSU das legislações norte-americanas (US-EPA, 2009) e da União Europeia (EU, 2008), a PNRS ordena como prioridade a não geração, seguida da redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final de rejeitos. As últimas duas etapas englobam materiais que não apresentam possibilidade de recuperação através de processos tecnológicos economicamente viáveis, e, portanto, sua única possibilidade é a disposição final no meio ambiente de maneira adequada (NASCIMENTO, 2015).

A PNRS institui a obrigatoriedade de logística reversa, com a responsabilidade de coleta e restituição dos resíduos ao setor empresarial sendo dividida entre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (MUNDO PLÁSTICO, 2020), e seu não cumprimento expõe os transgressores a punições da Lei de Crimes Ambientais, que podem variar de multas à detenção e prisão, dependendo da gravidade do caso.

Existem 15 principais objetivos da PNRS (ECYCLE, 2023):

1. Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
2. Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada de rejeitos;
3. Estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
4. Adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
5. Redução do volume e da periculosidade de resíduos perigosos;
6. Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
7. Gestão integrada de resíduos sólidos;
8. Articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
9. Capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
10. Regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação

dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007;

11. Prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
 - a. produtos reciclados e recicláveis;
 - b. bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
12. Integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
13. Estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
14. Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos, mas também ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
15. Estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

Para cumprir esses objetivos, a PNRS prevê o uso de instrumentos como o programa de crédito de reciclagem “Recicla+”, instituído no Decreto nº 11.044, de 13 de abril de 2022, um “sistema voluntário de emissão e aquisição decorrente da devolução à cadeia produtiva de produtos sujeitos à logística reversa” (MATTOS FILHO, 2022).

O Certificado de Crédito de Reciclagem consiste em um documento que atesta o retorno de massa equivalente dos materiais sujeitos à logística reversa à cadeia produtiva, sendo medido a cada tonelada de material reciclável. Para garantir a governança do sistema, o decreto também prevê a formação de um Grupo de Acompanhamento de Performance, para realizar o monitoramento da implementação da logística reversa e reportar os resultados ao Ministério do Meio Ambiente.

Além disso, em 2022 foi adicionado à PNRS o Projeto de Lei nº 2524/2022, que estabelece regras relativas à economia circular do plástico, com o objetivo de reduzir a geração de resíduos plásticos descartáveis e promover a economia circular.

Esse projeto de lei estabelece metas de reuso e reciclagem, respeitando a hierarquia do artigo 9º da PNRS (a hierarquia segue a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos - CAMARA DOS DEPUTADOS, 2017), uma vez que o Brasil ainda não possui uma legislação nacional sobre economia circular do plástico (MATTOS FILHO, 2022).

Através desse plano, estabelecem-se regras para limitação da produção, importação, distribuição, uso e comercialização de plásticos de uso único no país, a fim de prevenir a geração de resíduos plásticos desse tipo e dos microplásticos gerados por eles.

Outro instrumento de governança é o Projeto de Lei nº 1755/2022, que institui a Política de Economia Circular e o Selo Produto Economicamente Circular para os produtos que atendam às exigências nele previsto (MATTOS FILHO, 2022), com o intuito de estimular o consumo sustentável e desestimular o consumo de bens que não atendam os princípios da economia circular.

Existem diversos outros instrumentos que buscam garantir o cumprimento dos princípios da PNRS, da economia circular e logística reversa, como o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR), que comprova a restituição da massa equivalente dos produtos ao ciclo produtivo, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral (CERE) e o Certificado de Crédito de Massa Futura, que permite à empresa antecipar o cumprimento de sua meta de logística reversa dos próximos anos. Todos estes instrumentos devem atuar de maneira integrada para garantir a governança e cumprimento da PNRS (MATTOS FILHO, 2022).

Apesar de sua extensa história, a PNRS não apresentou os resultados esperados. Há o descumprimento do prazo para o fim dos lixões, transformados em aterros sanitários, vencido em 2014 e, posteriormente, prorrogado até 2021. Mesmo assim, estima-se que ainda existam aproximadamente 3 mil lixões nos 1610 municípios brasileiros, com a região Nordeste apresentando o menor índice de coleta, apesar de ser a segunda maior produtora de lixo do país (22,4% de participação no total de resíduos sólidos urbanos coletados) (REDE ASTA, 2022).

Houve também a falha em atingir a meta, estabelecida em 2015, de que 22% das embalagens produzidas tivessem destinação correta (MUNDO PLÁSTICO, apud. PEREIRA, 2020).

Além disso, o volume de resíduos destinados a lixões apresentaram um aumento de 3% entre 2016 e 2017 (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, 2017), e de 2017 a 2022, 45 milhões de toneladas de materiais recicláveis foram enviados a lixões, levando à perda de possíveis 3 bilhões de reais em produtos que poderiam ser reutilizados por cooperativas, usinas e processadoras do setor (REDE ASTA, 2022).

Diversas outras propostas foram sugeridas e adicionadas à PNRS (Figura 12) ao longo dos anos, como a organização de coleta seletiva de recicláveis e orgânicos para atender a toda a população, de responsabilidade do poder público, a separação de lixo nas residências e o treinamento de catadores, porém com poucos resultados.

Figura 12: Antes e Depois (esperado) da PNRS (2010)

	Antes	Depois (esperado)
Poder Público	Pouca prioridade para a questão dos resíduos sólidos	Municípios devem traçar um plano para gerenciar os resíduos sólidos da melhor maneira possível, buscando a inclusão dos catadores
	A maioria dos municípios destinava os dejetos para lixões a céu aberto	Lixões passam a ser proibidos e devem ser erradicados até 2014, com a criação de aterros que sigam as normas ambientais
	Não há aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos (RSO)	Municípios devem instalar a compostagem para tratar os RSO
	Coleta seletiva ineficiente e pouco expressiva	Prefeituras devem organizar a coleta seletiva de recicláveis e orgânicos para atender toda a população, fiscalizar e controlar os custos desse processo
População	Separação inexpressiva de lixo reciclável nas residências	População deve separar o lixo reciclável na residência
	Falta de informações	Realização de campanhas educativas sobre o tema dos resíduos sólidos e a sua importância
	Atendimento da coleta seletiva pouco eficiente	A coleta seletiva deverá ser expandida
Catadores	Manejo do lixo feito por atravessadores, com riscos à saúde	Catadores deverão se filiar a cooperativas de forma a melhorar o ambiente de trabalho, reduzir os riscos à saúde e aumentar a renda
	Predominância da informalidade no setor	Cooperativas deverão estabelecer parcerias com empresas e prefeituras para realizar a coleta e reciclagem
	Problemas tanto na qualidade quanto na quantidade dos resíduos	Aumento do volume e melhora da qualidade dos resíduos que serão reaproveitados ou reciclados
	Catadores sem qualificação	Os trabalhadores passarão por treinamentos para melhorar a produtividade

Fonte: Nascimento (2015).

2.3. O Plástico PET

Aproximadamente 42% da produção global de plástico é destinada a embalagens (ULISES, et al., 2023).

Um dos principais compostos plásticos utilizados em embalagens é o Polietileno Tereftalato (PET), sendo este, o terceiro polímero mais utilizado na indústria de

embalagens, e representando aproximadamente 16% de todo o consumo europeu de plástico nesse mercado (NISTICÒ, 2020).

É utilizado principalmente para a produção de garrafas de água, refrigerantes e sucos (70%), no formato de filmes (14%), embalagens de alimentos (9%) e para embalagens de produtos não alimentícios, como na indústria de cosméticos (6%) (PLASTIC INSIGHT, 2016). Além da indústria de embalagens, o PET é utilizado também na produção de fibras têxteis, nas indústrias de biomedicina e automotiva, entre outras (NISTICÒ, 2020).

As propriedades físico-químicas deste material garantem diversas vantagens em seu uso na indústria de embalagem, principalmente para bebidas: a transparência e possibilidade de ausência de cor do material permitem que o consumidor possa ver o conteúdo da embalagem. Sua baixa densidade em relação a outros materiais da indústria de embalagens e garrafas, como o alumínio e o vidro, tornam os recipientes destes materiais leves e de fácil transporte. Sua propriedade de atuar como barreira de gases e de umidade torna-o uma boa opção para bebidas gaseificadas. É um polímero inerte quando comparado aos demais, e não requer aditivos plastificantes em sua produção, como o PVC, evitando a contaminações dos alimentos que envolvem. Dessa maneira, o plástico PET apresenta-se como uma das melhores alternativas de material para o desenvolvimento de recipientes.

A criação do composto polietileno tereftalato ocorreu em 1941, por químicos da empresa francesa DuPont, durante experimentos para a criação de novos materiais têxteis produzidos a partir de polímeros, devido à escassez de produtos causada pela Segunda Guerra Mundial (PARKER, 2019), com o objetivo de substituir algodão, linho e lã por fibras de poliéster.

Mas seu uso como material para garrafas plásticas aconteceu somente após 30 anos, em 1973, quando Nathaniel Wyeth, um cientista da DuPont, patenteou a primeira garrafa PET: leve, com baixo custo de produção, resistente e reciclável, rapidamente substituindo o vidro e o alumínio.

Grandes empresas como PepsiCo e Coca-Cola aderiram à essa tecnologia na década de 1990, com a introdução das marcas Aquafina (1994) e Dansani (1999), contribuindo para o crescimento de aproximadamente 284% no consumo de água engarrafada nos Estados Unidos entre 1994 e 2017, segundo o *Beverage Marketing Corporation*.

O rápido crescimento no consumo de bebidas engarrafadas levou à compra de aproximadamente 1 milhão de garrafas plásticas a cada minuto no mundo em 2017 (LAVILLE, 2017), totalizando mais de 480 bilhões de garrafas vendidas no ano.

Além disso, representam aproximadamente 75% do peso total de embalagens plásticas nos Estados Unidos, de acordo com a *Plastics Industry Association* em 2019.

No Brasil, o uso do PET se popularizou em 1993, impulsionado pelo setor de refrigerantes gaseificados, e cresceu exponencialmente ao longo dos anos, representando aproximadamente 6% a 8% do consumo brasileiro entre todos os plásticos (ABIPLAST, 2021).

Diferentemente do cenário mundial, em que mais de 65% do PET é usado na extrusão de filamentos, e apenas 25% na indústria de embalagens, no Brasil 70% da demanda do polímero é voltada a embalagens, principalmente para produção de garrafas (SOARES, 2021), compondo 97% das garrafas de óleo comestível, 94% das garrafas de água mineral e 72% das garrafas de refrigerante (PLASTICO VIRTUAL, 2022).

Em 2019, a capacidade de produção brasileira de plástico PET chegou a 450 mil toneladas por ano (PLASTICO MODERNO, 2021), com o mercado de plástico PET virgem avaliado em R\$11,6 bilhões, e o de reciclado R\$5,8 bilhões, totalizando aproximadamente R\$17,5 bilhões em um mercado crescente com estimativas de desenvolvimento na ordem de 4% para 2023, superior aos 3,3% de crescimento registrados entre 2021 e 2022 (Associação Brasileira da Indústria do PET - ABIPET, 2022).

Dessa maneira, evidencia-se a grande demanda pelo material e seu constante crescimento, desenhando um cenário preocupante em relação ao gerenciamento de resíduos sólidos e à emissão de gases estufa, devido à característica descartável da maioria dos produtos PET e ao principal processo de síntese do material.

Por outro lado, observa-se um quadro de oportunidades, com novas tecnologias de reciclagem, sistemas de gestão de resíduos sólidos e design de produtos que permitem o desenvolvimento de um sistema circular na cadeia de plástico PET no Brasil.

2.3.1. Principais Características do Plástico PET

O polietileno tereftalato pertence à família dos poliésteres, obtido através da polimerização do monoetilenoglicol (MEG) e do ácido tereftálico (PTA), e apresenta grande resistência a impacto, umidade e solventes (OMENXUS, 2023).

Em seu estado natural, é uma resina semicristalina altamente flexível e incolor. Suas principais propriedades (Tabela 1) incluem baixa densidade e alta resistência mecânica e química, facilitando seu transporte e promovendo durabilidade aos produtos compostos pelo material. Estima-se que garrafas produzidas pelo material demorem até 450 anos para decompor-se (World Wide Fund for Nature - WWF, 2021).

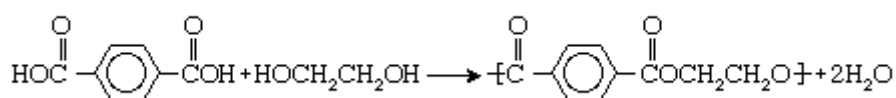
Tabela 1: Propriedades físicas do polietileno tereftalato

Propriedade	Valor/Unidade
Densidade PET cristalino	1.45 g/cm ³
Ponto de ruptura da resistência à tração	172 Mpa
Ponto de ruptura da resistência à compressão	80 – 120 Mpa
Ponto de ruptura da resistência transversal	50 – 70 Mpa
Temperatura de Fusão	255 – 265 oC
Absorção de água em 24 horas	0.3%
Alongamento Máximo	12 – 55%

Fonte: Traduzido pelo autor de Sudako (2019)

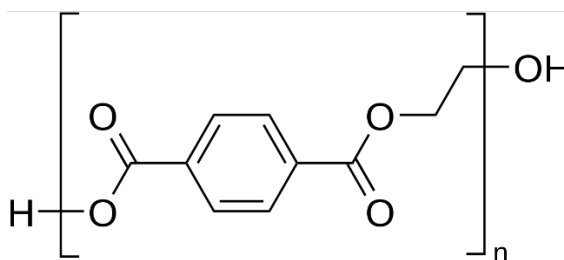
O polietileno tereftalato é composto por uma cadeia carbônica, formada através da reação entre MEG e PTA, auxiliada pela introdução de calor e catalisadores químicos. Em termos químicos, MEG é um diol, um álcool que contém dois grupos hidroxila (OH), e PTA é um ácido dicarboxílico aromático, com uma estrutura molecular que contém um anel aromático e dois grupos carboxila (CO₂H), que reagem para formar grupos éster (CO – O) (Figura 13), que servirão de ligação entre as diversas unidades de PET para formar uma longa cadeia polimérica (Figura 14) (BRITANNICA, 2023).

Figura 13: Reação de formação do PET



Fonte: Enciclopédia Britannica, 2023

Figura 14: Estrutura do monômero de PET



Fonte: Wikipedia, 2023

Por ser um termoplástico, o PET pode ser reciclado quando exposto a altas temperaturas.

Termoplásticos são uma classe de polímeros que podem ser deformados e fundidos em alta temperatura, e endurecidos novamente inúmeras vezes sem perder suas características físico-químicas. Materiais pertencentes a essa classe podem sofrer o processo de reciclagem diversas vezes, tanto química quanto física (PLASTICS EUROPE, 2023).

Estima-se que o índice de reciclagem de PET no Brasil seja de aproximadamente 56,4%, com capacidade instalada para reciclar cerca de 480 mil toneladas de plástico por ano (ABIPET, 2022).

O Plástico PET possui diversas maneiras de ser introduzido à cadeia de valor, sendo exposto a processos que podem ser classificadas em seis grupos principais:

- produção virgem a partir de combustíveis fósseis;
- produção derivada de biomassa;
- reciclagem mecânica;
- reciclagem química;
- queima para recuperação energética;
- reciclagem biológica.

2.3.2. Modelos de fabricação e reciclagem de plástico PET

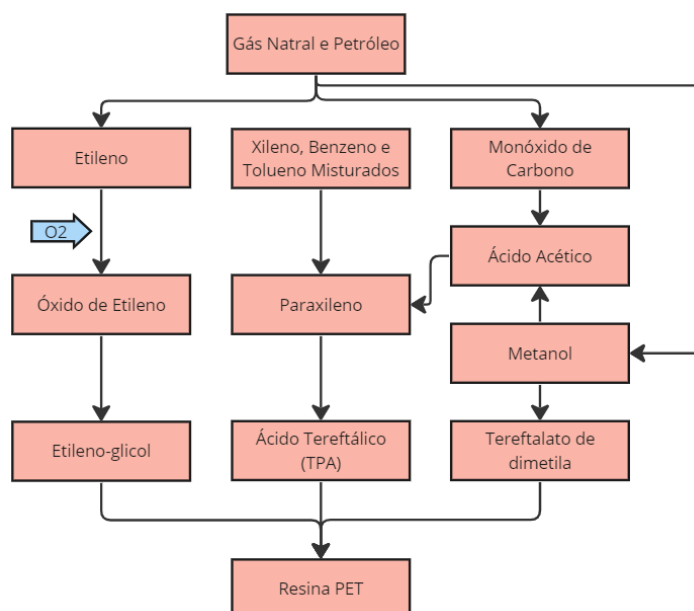
Com o crescimento da demanda por produtos que utilizam plástico PET, e das necessidades de retorná-los à cadeia produtiva, promovidas tanto por novas legislações, quanto pelo impacto ambiental e social causado pelo seu descarte inadequado e pelas oportunidades econômicas envolvidas no mercado de reciclagem deste material, é necessário avaliar os impactos das diferentes maneiras de fabricação deste material.

Para realizar uma análise de sustentabilidade de cada um dos processos de produção do plástico PET, pode-se avaliar o consumo de combustíveis fósseis, água e energia envolvidos, além da emissão de gases do efeito estufa (GEE) e análise do ciclo de vida (ACV) dos produtos.

Fabricação de PET virgem a partir de combustíveis fósseis

A fabricação de pet virgem a partir de combustíveis fósseis, como gás natural e petróleo, pode ocorrer de diversas maneiras (Figura 15), através da reação entre Etilenoglicol (EG) e TPA ou da reação entre Tereftalato de Dimetila (DMT) e EG (BENAVIDES, et al., 2018).

Figura 15: Produção de PET a partir de combustíveis fósseis

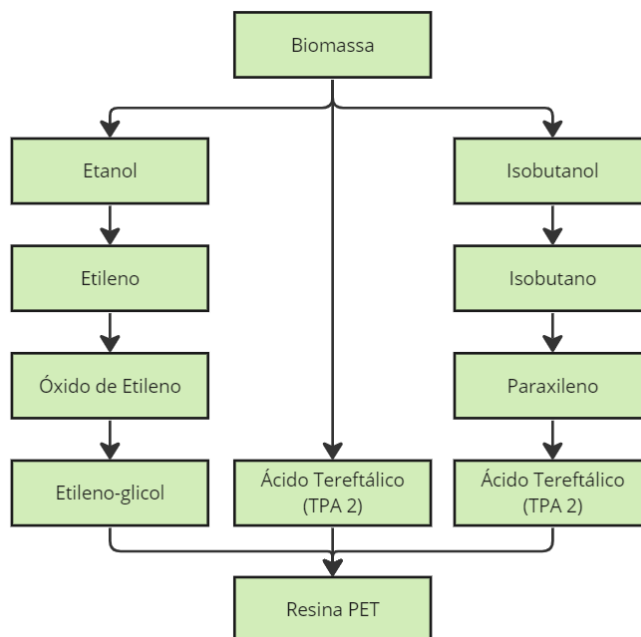


Fonte: Traduzido de BENAVIDES, et al. (2018)

Fabricação de PET virgem a partir de biomassa

A fabricação de pet virgem a partir de biomassa também possui diversas rotas de fabricação (Figura 16), com a produção de EG e TPA a partir de biomassa. No estudo considerado (BENAVIDES, et al., 2018), foram analisadas duas formas de produção: fermentação direta de açúcares (TPA1), com fermentação aeróbica para converter biomassa oxigenada diretamente em TPA, e via intermediários de isobutano (TPA2), com oxidação parcial para produção de TPA.

Figura 16: Produção de PET a partir de biomassa



Fonte: Traduzido de BENAVIDES (2018)

Métodos de Reciclagem

Métodos de reciclagem são outra maneira de produção de produtos de PET, sendo alternativas para a produção virgem do material e uma possível solução parcial para o problema de descarte inadequado e geração de lixo.

Apesar de apresentar grandes vantagens em relação à fabricação virgem do plástico, como redução do uso de combustíveis fósseis, redução do volume de lixo, e utilização de menos energia para a produção durante os processos de fabricação, existem diversos problemas envolvidos com a reciclagem de PET, como logística reversa, altos custos e investimentos em maquinário, gastos energéticos, de água e pegada de carbono indiretas, e decaimento da qualidade do material resultante.

Um dos principais problemas relacionados ao decréscimo da qualidade do PET é relacionado à contaminação, que pode ocorrer em diversas etapas do processo de reciclagem. As contaminações mais comuns são contaminação por água, por pigmentos adicionados para conferir colorações diversas ao material e contaminação por metais pesados através de tintas, rótulos e adesivos adicionados às embalagens, ou durante o processo de transporte e separação. Tais contaminações podem influenciar negativamente nas propriedades físico-químicas dos materiais reciclados, tornando-os menos duráveis,

ou até mesmo nocivos à saúde humana, devido à presença de contaminantes ou da degradação precoce do produto (DAMAYANTI, et al., 2021).

Os métodos de reciclagem podem ser divididos em quatro grandes grupos (Figura 17): reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária (SOONG, 2022).

Os processos de reciclagem primária e secundária ocorrem através da reciclagem mecânica; os processos de reciclagem terciária e quaternária ocorrem através da reciclagem química ou biológica.

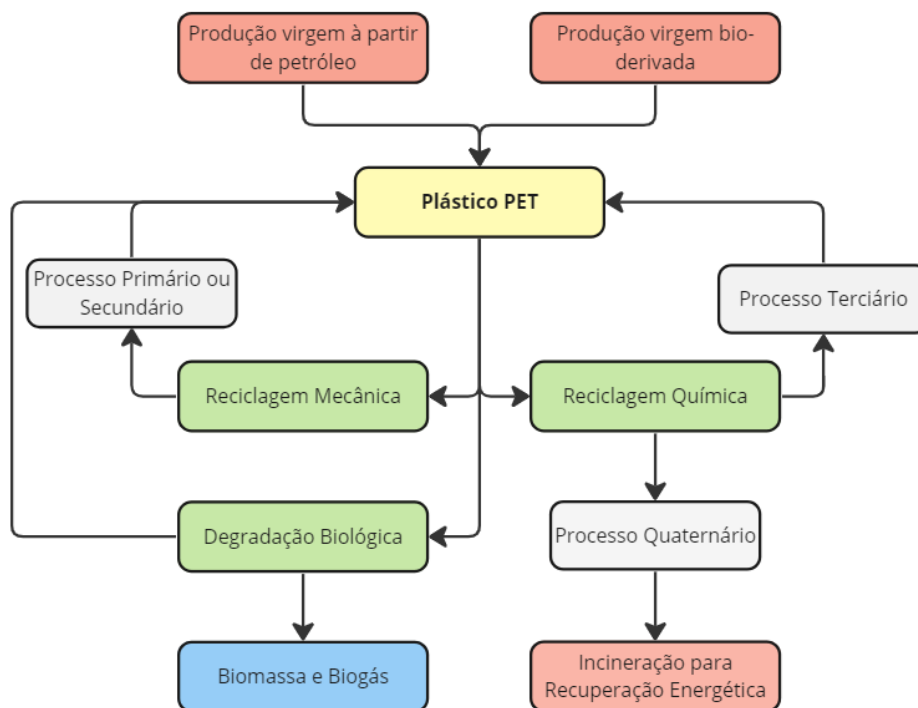
A reciclagem primária (reciclagem mecânica) consiste no processo de reconversão de plásticos de tipos únicos, limpos e não contaminados, em sua forma de resina, mantendo a performance, características e propriedades físico-químicas próximas às originais.

Já na reciclagem secundária (reciclagem mecânica), ocorre a conversão de resíduos plásticos em produtos com menor performance.

A reciclagem terciária (reciclagem química) envolve o processo de decomposição do plástico em monômeros, oligômeros, misturas de hidrocarbonetos e outros fragmentos de baixa massa molecular, que podem ser utilizados como matéria prima para produção de outros materiais plásticos ou para a produção de combustíveis.

Por fim, a reciclagem quaternária, também conhecida como recuperação energética (reciclagem química), consiste na recuperação da energia contida nos plásticos, que contém alto valor calorífico, através de incineração, sendo extremamente eficaz no gerenciamento do volume do material, mas mantendo pouco valor e liberando substâncias tóxicas à atmosférica e ao solo através das fumaças e cinzas resultantes do processo.

Figura 17: Processos de introdução de plástico PET na cadeia produtiva



Fonte: Produzido pelo autor

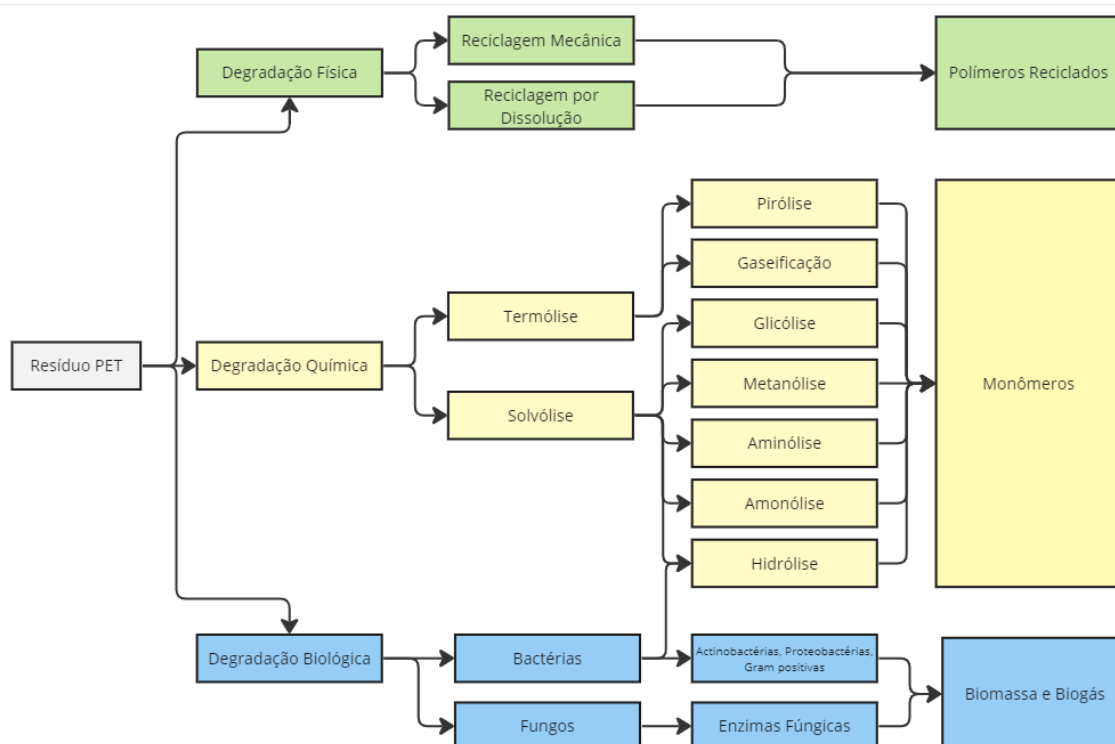
Outra maneira de dividir os processos de reciclagem consiste nos diferentes tipos de degradação de resíduo possíveis (Figura 18): física, química e biológica.

A degradação física envolve os processos de reciclagem mecânica e de dissolução através de solventes, e resulta em polímeros reciclados.

A degradação química pode ser dividida nos processos de termólise e despolimerização por solvólise. A termólise envolve os processos de pirólise e gaseificação, enquanto a solvólise envolve os processos de glicólise, metanólise, aminólise, amonólise e hidrólise, resultando em monômeros constituintes do plástico PET.

Pode ocorrer também a degradação biológica através de degradação enzimática ou metabolismo microbiano, resultando em monômeros ou biomassa e biogás (SOONG, 2022).

Figura 18: Possíveis fluxos de degradação do plástico PET



Fonte: Adaptado de SOONG (2022)

Reciclagem Mecânica

A Reciclagem Mecânica é o método mais comum para a reciclagem de plástico PET, e consiste em diversas etapas (ver Figura 19) como coleta, triagem, separação automática ou manual, lavagem, trituração, extrusão e granulação (BHANDERI, et al., 2023).

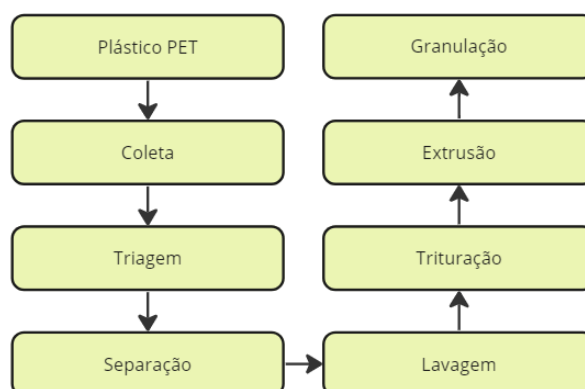
Um dos maiores problemas relacionados à reciclagem mecânica do PET está relacionada com a heterogeneidade dos resíduos PET, o que pode levar à deterioração das propriedades dos produtos a cada processo de reciclagem, uma vez que pequenas quantidades de outros polímeros, que podem prover de outros componentes de produtos, como rótulos e tampas de garrafas, ou do ambiente durante o transporte reverso, podem alterar as cadeias poliméricas e tornar os materiais mais frágeis.

Além disso, pode ocorrer uma degradação do produto durante seu uso por fatores como temperatura, radiação ultravioleta, oxigênio, ozônio e estresse mecânico, alterando as propriedades do material e reduzindo a performance do rPET em comparação com o material virgem (PARK, et al., 2014).

Desta maneira, as etapas de triagem, separação e lavagem são de extrema importância para garantir a qualidade do produto final da reciclagem mecânica de PET, o que pode elevar os custos de fabricação devido a necessidade de equipamentos confiáveis para realizar tais atividades.

Por fim, a maior desvantagem da reciclagem mecânica está relacionada à redução do peso molecular ou da viscosidade intrínseca do material através de degradação hidrolítica ou térmica (PARK, et al., 2014).

Figura 19: Fluxograma das etapas básicas da Reciclagem Mecânica de PET



Fonte: Produzido pelo autor

Reciclagem Química

A Reciclagem Química engloba diversos tipos de processos, e consiste na transformação da cadeia de PET através da despolimerização, purificação e subsequente re-polimerização dos compostos nos monômeros iniciais do polímero, permitindo o reprocessamento para a produção de produtos de maior valor agregado (BAGHETTO, 2021). O principal objetivo da reciclagem química do PET é a degradação do produto em diversos monômeros, como TPA, DMT e EG, através da reação inversa da formação do PET.

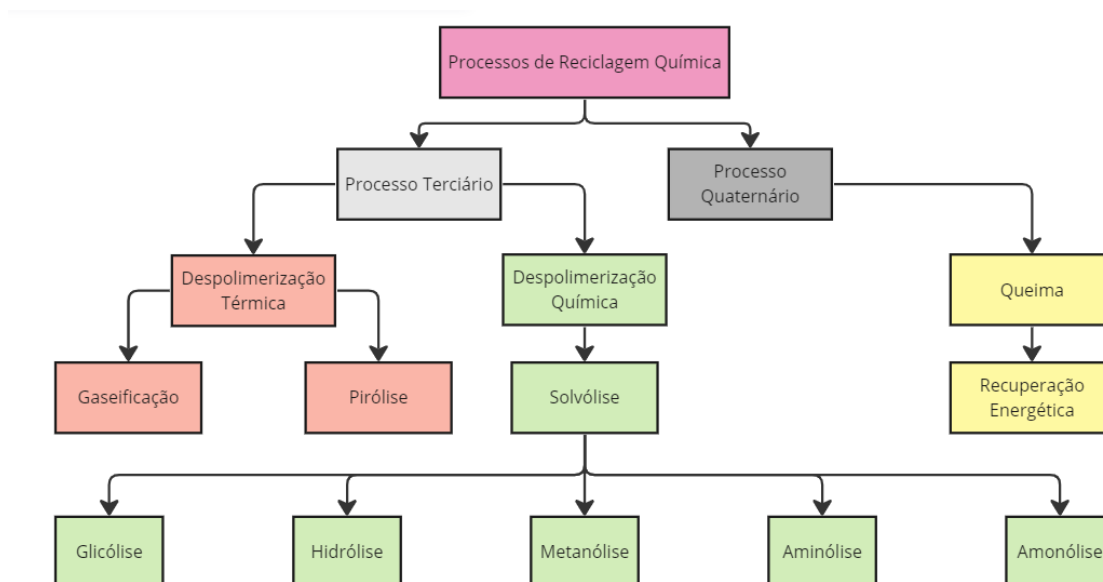
Para realizar a decomposição do material, podem ser utilizados os processos de recuperação terciários, em que ocorre a despolimerização do polímero em seus compostos básicos, ou quaternários, em que ocorre a recuperação de energia.

Dentre os processos terciários, os principais métodos de reciclagem englobam a termólise e a solvólise (ver Figura 20).

A solvólise consiste na quebra das ligações hidrolisáveis de um polímero na presença de água ou de um álcool, e envolve processos como: glicólise, hidrólise, metanólise, amonólise e aminólise (BARNARD, 2021).

Já os processos térmicos da termólise consistem na pirólise, em que ocorre a degradação em alta temperatura e pressão sem presença de oxigênio para a produção de um produto reciclado de alta qualidade, com baixa presença de contaminantes e pequena pegada de carbono, e o processo de gaseificação, que ocorre sob altas temperaturas e na presença de oxigênio, pouco utilizado na indústria atualmente devido à sua grande necessidade de investimento em maquinário (KINGSBURY, 2022).

Figura 20: Processos de Reciclagem Química



Fonte: Produzido pelo autor

Queima para recuperação energética

A queima para recuperação energética é um processo de reciclagem química quaternária, em que se busca recuperar a energia presente no plástico e a redução do volume de resíduos gerados através da incineração. Apesar de apresentar-se como uma alternativa de baixo custo, com possibilidade de reutilização energética e com pouca geração de resíduos sólidos, este processo apresenta grandes impactos ambientais devido à liberação de gases nocivos à saúde humana e ao meio ambiente (CHIRAYIL, et al., 2019), e pode ser realizado apenas em instalações especializadas que possuam filtros adequados para lidar com a emissão de gases.

O processo de incineração do polietileno tereftalato ocorre à temperatura de 500 °C, com calor de 22,7 MJ/kg (CHIRAYIL, et al., 2019), e através da combustão são liberados compostos químicos tóxicos como dioxinas, bifenis policlorados, e GEEs como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso (SOONG, 2022). Além disso, a queima do resíduo plástico não reduz a demanda por matéria prima para a produção do material.

Reciclagem Biológica

O processo de reciclagem biológica ocorre através da degradação microbiana de polímeros (Figura 21), por microrganismos que são capazes de utilizar plásticos como fonte de carbono e que se ligam ao material, colonizando a superfície e formando uma camada de biofilme (SOONG, 2022).

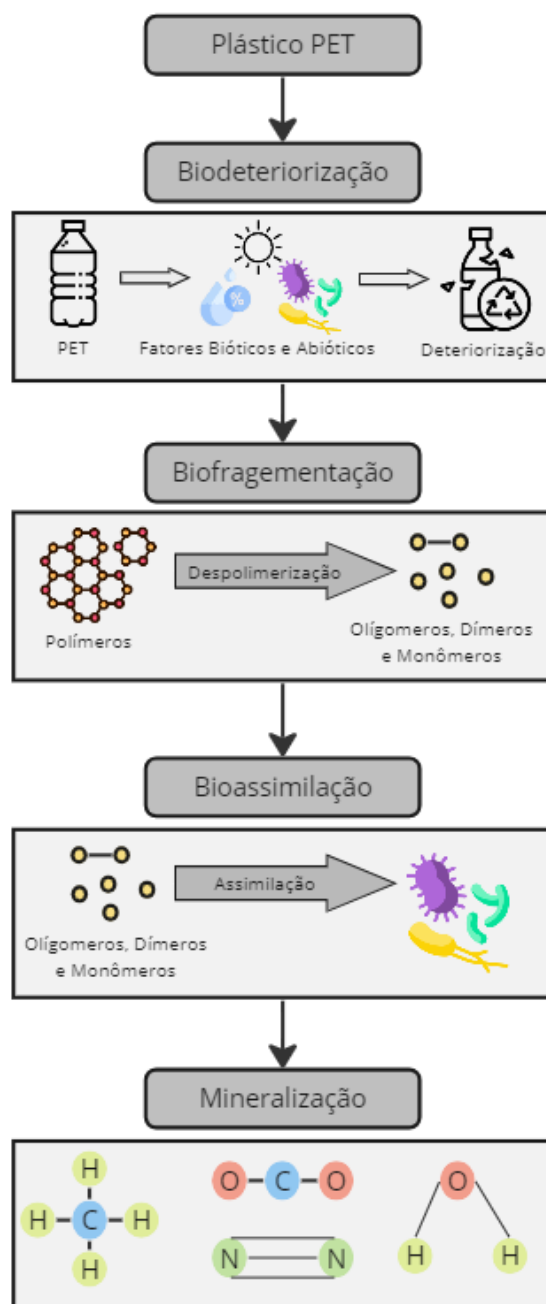
O crescimento da população microbiana no biofilme causa biodeteriorização do material, permitindo o aumento do tamanho dos poros e rachaduras causadas por fatores bióticos e abióticos (como luz solar, irradiação, oxigênio, pH, temperatura, umidade, pressão e abrasão), levando a biofragmentação do material.

A biofragmentação consiste na ação de enzimas extracelulares que realizam a degradação polimérica, como oxigenases, ureases, esterases, lipases, proteases, depolimerases, entre outras, liberadas pelas colônias microbianas. Estas enzimas atuam diminuindo as cadeias carbônicas dos polímeros através da despolimerização em oligômeros, dímeros e monômeros que podem ser assimilados pelas células.

A bioassimilação refere-se à integração de pequenas moléculas internamente nas células, permitindo a metabolização delas em biomassa. A última etapa da biodegradação polimérica consiste na mineralização, a excreção dos metabólitos oxidados completos, como CO₂, CH₄, N₂ e H₂O.

O plástico PET pode sofrer despolimerização microbiana através da ação de enzimas de actinobactérias e proteobactérias através de hidrólise, formando monômeros como TPA e EG, ou formando biomassa e biogás ou através da ação de enzimas de fungos, formando biomassa e biogás (SOONG, 2022).

Figura 21: Etapas da Reciclagem Biológica



Fonte: Adaptado de SOONG (2022)

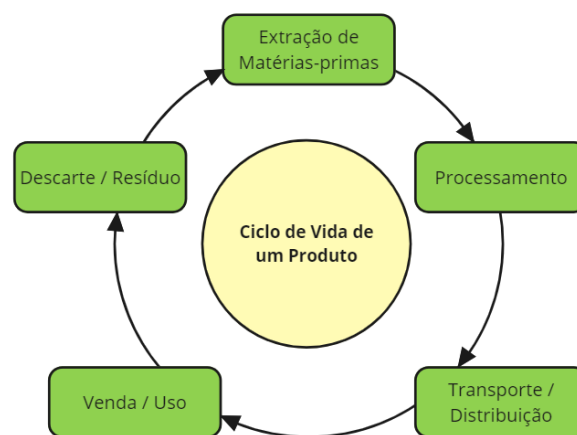
2.3.3. Método de Comparação de Tecnologias – Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é um método de análise do impacto ambiental associado com os estágios da vida de um produto. Existem diversos modelos de ACV, que avaliam diferentes quantidades de etapas do ciclo de vida dos produtos. O ciclo de vida de um produto consiste em 5 etapas (ECOCHAIN, 2023):

1. Extração de Matéria Prima
2. Processamento
3. Transporte / Distribuição
4. Venda / Uso
5. Descarte / Resíduo

O método de ACV possui uma estrutura fixa de acordo com o padrão ISO 14040.

Figura 22: Ciclo de Vida de um Produto



Fonte: Adaptado de ECOCHAIN (2023)

O método “cradle-to-grave” (berço ao túmulo) consiste em uma análise que se inicia desde a extração da matéria-prima, processamento e fabricação do produto, distribuição, uso e descarte (IYYANKI, et al., 2017).

O modelo “cradle-to-gate” avalia o produto até sua saída das fábricas, não levando em conta as etapas que se iniciam a partir do transporte para o consumidor.

Por fim, o modelo “cradle-to-cradle” é o método de ACV associado com a Economia Circular, substituindo a etapa de resíduo do produto por reciclagem, reutilização ou remanufatura, fechando o ciclo de vida do produto.

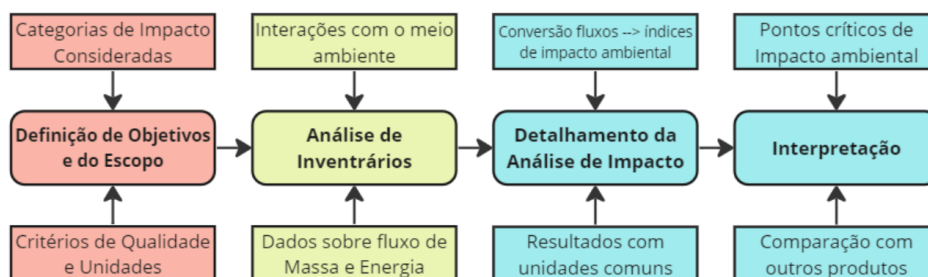
O estudo da Avaliação do Ciclo de Vida de um produto consiste em 4 etapas (IYYANKI, et al., 2017):

1. Definição dos Objetivos e do Escopo: definição dos limites do estudo, os critérios de qualidade e as categorias de impacto a serem consideradas. Nesta etapa, há definição do escopo geográfico (aonde o estudo será realizado),

temporal e sistêmico (quais serão as etapas analisadas dentro do ciclo de vida do produto), além da definição da Unidade Funcional estudada.

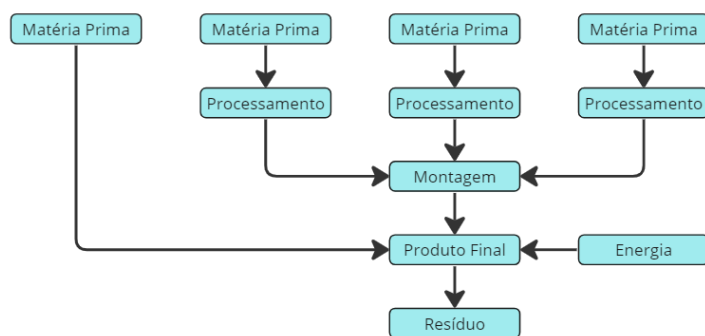
2. Análise de Inventários: coleta de dados sobre o fluxo de massa e energia das diversas etapas do ciclo de vida do produto em relação aos indicadores e limites estabelecidos na etapa anterior, sua interação com o meio ambiente, consumo de matérias-primas e emissões ao meio. Nesta etapa, é necessário criar os fluxogramas (Figura 23) de massa e energia do ciclo de vida do produto, descrevendo *inputs* e *outputs* envolvidos na extração, fabricação, distribuição, logística reversa e reciclagem do produto, como os descritos a seguir (Figura 24) (ECOCHAIN, 2023).
3. Detalhamento da Análise de Impacto: fluxos definidos na Análise de Inventários são convertidos em índices de impacto ambiental, multiplicando valores brutos por fatores de equivalência para atingir resultados em unidades comuns.
4. Interpretação dos resultados: ao final da ACV, busca-se comparar os resultados do estudo com outros produtos e processos, identificar os pontos críticos de impacto ambiental e possíveis melhorias nas etapas do ciclo de vida do produto.

Figura 23: Etapas da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 24: Fluxograma básico de Inventário de Ciclo de Vida (LCI)



Fonte: Adaptado de ECOCHAIN (2023)

3 METODOLOGIA

O trabalho foi realizado através da revisão da literatura sobre Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para plástico PET, complementado por entrevistas com especialistas.

Foram realizadas pesquisas em bases de dados de artigos renomadas, com o intuito de analisar e comparar os diferentes estudos disponíveis sobre o assunto a partir de quatro parâmetros centrais aos resultados de estudos de ACV:

1. Unidade Funcional
2. Categorias de Impacto
3. Escopo (Geográfico, Temporal, Sistêmico)
4. Tecnologias estudadas

As entrevistas foram realizadas através de roteiros semiestruturados (MIGUEL, 2007), com perguntas previamente elaboradas, complementadas por questões momentâneas à entrevista (MAZINI, 2003), para complementar o estudo realizado pela revisão bibliográfica. A seleção dos atores entrevistados foi realizada com objetivo de englobar diversas faces do panorama de reintrodução de plástico PET na cadeia produtiva no Brasil.

3.1. Entrevistas com Especialistas

Para construir uma visão mais completa sobre os diversos componentes do cenário do mercado de plástico PET no Brasil foram selecionadas organizações e especialistas que representassem diferentes etapas envolvidas na cadeia de valor do material.

Primeiramente, entrevistou-se um professor da Universidade de São Paulo (Entrevista A), especialista em Avaliação de Ciclo de Vida, afim de aprofundar o entendimento sobre a técnica e suas particularidades para comparação de diferentes tecnologias de produção e reciclagem de polímeros em diferentes regiões.

Em seguida, foi realizada entrevista com uma advogada ambiental (Entrevista B) que atua no mercado de resíduos sólidos, com o intuito de promover uma visão legal e social sobre o cenário de polímeros no Brasil, além de entender as principais limitações e oportunidades das leis que envolvem gerenciamento de resíduos e reciclagem no país.

As entrevistas seguintes foram realizadas com professores do departamento de engenharia de materiais de uma renomada universidade brasileira, afim de detalhar as tecnologias de reciclagem sob a visão técnica e financeira

As entrevistas foram realizadas tanto de maneira remota, através da plataforma Google Meets, quanto presencialmente (Tabela 2):

Tabela 2: Descrição das entrevistas realizadas

Entrevista	Cargo	Formato	Data	Duração
A	Professor/Pesquisador	Videochamada	09/11/2023	45 minutos
B	Advogada	Videochamada	09/11/2023	75 minutos
C	Professor Senior	Videochamada	16/11/2023	30 minutos
D	Mestranda cujo tema da dissertação é aplicação de ACV para plásticos	Assíncrona	16/11/2023	-

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2. Revisão Literária – LCA

3.2.1. Critério de Seleção

Para a pesquisa sobre modelos de Avaliação de Ciclo de Vida de diferentes processos de introdução e reintrodução de plástico PET, foram utilizadas as bases de dados Web of Science e Scopus.

As palavras de busca foram “LIFE CYCLE ASSESSMENT” AND “PET”. A pesquisa na plataforma Web of Science resultou em 48 artigos, enquanto Scopus resultou em 393 artigos. Em seguida, foi realizado um processo de seleção, em que se removeram artigos listados em ambas as plataformas, artigos de revisão e artigos em línguas que não o inglês.

Depois do processo de seleção, foi implementado um filtro temporal para manter apenas artigos escritos nos últimos 5 anos (2018-2023) e que tratassem de ACV de plástico PET especificamente. Dessa maneira, dos 441 resultados iniciais, selecionou-se apenas 57 artigos que respeitavam todos os critérios.

Após a leitura desses artigos, restaram 23 artigos que possuíam informações sobre os parâmetros de comparação escolhidos para a construção do paralelo entre tecnologias de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia produtiva.

Para realização da comparação entre os estudos selecionados foram selecionados quatro parâmetros: Unidade Funcional (UF), Categorias de Impacto, Escopo (Geográfico, Temporal e Sistêmico) e Técnicas Estudadas.

3.2.2. Parâmetros estudados

Unidade Funcional (UF)

A Unidade Funcional (UF) utilizada no estudo de Avaliação de Ciclo de Vida é de extrema importância, pois determina se dois estudos de ACV são comparáveis. Para que estudos sejam comparáveis, eles devem possuir as mesmas unidades funcionais, que consideram a real função do produto final e estabelecem uma quantidade padrão para análise das categorias de impacto.

Em um estudo de ACV, a etapa de Inventário de Ciclo de Vida é realizada baseada na unidade funcional definida, e deve ser mantida durante todo o estudo. No caso de reciclagem de plástico, a UF deve definir o tipo de material e a quantidade a ser analisada (como determinada massa ou volume), podendo ser tanto de entrada (uma tonelada de resíduos urbanos, ou uma tonelada de resíduos plásticos, por exemplo), ou de saída (produção de uma tonelada de resina PET em grânulos, ou fibras, ou até mesmo produtos como garrafas).

Categorias de Impacto

Outro fator de grande variabilidade nos estudos de ACV é a escolha de quais índices de impacto ambiental serão analisados. As entradas, saídas e transformações analisadas na etapa de Inventário de Ciclo de Vida são transformadas em índices de impacto ambiental, e a escolha desses índices depende do tipo de metodologia utilizada para a ACV. Para comparação de diferentes estudos de ACV, é necessário que sejam analisadas as mesmas categorias de impacto sob a visão da mesma unidade funcional.

Existem diversas categorias de impacto, como Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Ecotoxicidade, Potencial de Acidificação, Depleção de Recursos abióticos, entre outros, como pode ser observado na tabela a seguir (Tabela 1):

Tabela 3: Categorias de Impacto

Categoria de Impacto	Descrição
Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Aumento de temperatura causado pela emissão de gases do efeito estufa, como CO ₂ , metano, óxidos de nitrogênio, que refletem ou absorvem radiações infravermelhas. Expressa em equivalentes de kg de CO ₂ .
Potencial de Ecotoxicidade (ETP)	Impacto da emissão de substâncias tóxicas para o ar, água e solo. Expresso em equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (DB)/kg de emissão
Potencial de Acidificação (AP)	Impacto de processos que causam chuva ácida causados pela emissão de produtos químicos (óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e amônia. Expresso em quilogramas de equivalentes de SO ₂ .
Depleção de Recursos Abióticos (AD)	Utilização de recursos naturais, incluindo minerais e energia, mas excluindo combustíveis fósseis. Os recursos naturais podem ser renováveis (repostos rapidamente) ou não renováveis (não repostos dentro de 500 anos). Expresso em quilogramas de equivalente de antimônio (kg Sb-eq).
Depleção de Recursos Abióticos Fósseis (FDP)	Utilização de combustíveis fósseis (não renováveis), esta categoria também é conhecida como Potencial de Esgotamento Fóssil. Expresso em MJ de energia produzida.
Potencial de Eutrofização (EP)	Enriquecimento dos ecossistemas aquáticos com elementos nutricionais (compostos de nitrogênio e fósforo, causando crescimento excessivo de algas, que liberam toxinas prejudiciais às formas de energia superiores, e reduz a luz e o oxigênio na água, prejudicando outras formas de vida aquática. Expresso em quilogramas de equivalentes de PO ₃ .
Toxicidade Humana (HT)	Efeito das substâncias tóxicas na saúde humana, dividido em HT (cancerígeno) e NHT (não cancerígeno), dependendo se a substância é cancerígena. Expresso em equivalentes de 1,4 DB/kg de emissão de substância.

Potencial de Oxidação Fotoquímica (POP)	Formação de ozônio na troposfera (nível do solo). Oxidantes fotoquímicos são poluentes atmosféricos secundários formados pela reação da luz solar com monóxido de carbono e hidrocarbonetos reativos na presença de óxidos de nitrogênio. Expresso em quilogramas de etano equivalente.
Potencial de Depleção de Ozônio Estratosférico (ODP)	Emissões de substâncias estáveis contendo cloro ou bromo para a atmosfera, que podem atingir a estratosfera e destruir a camada de ozônio, aumentando a incidência de raios UV que atingem a superfície da Terra. Expresso em quilogramas de equivalentes de CFC-11.
Potencial de Formação de Material Particulado (PMFP)	Medição da liberação de material particulado (PM10) no ar, partículas respiráveis com diâmetro < 10 µm, que são perigosas para a saúde humana. Partículas primárias (por exemplo, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, amônia) reagem para formar substâncias secundárias de maior diâmetro (por exemplo, nitrato de amônio, sulfato de amônio). Expresso em quilogramas de equivalente PM10.

Fonte: Adaptado de ALHAZMI (2021)

Escopo Geográfico, Temporal e Sistêmico

O escopo sistêmico consiste na descrição das atividades que estão inclusas ou exclusas do estudo de ACV, que pode envolver diversas etapas do ciclo de vida dos produtos. As mesmas categorias de impacto, expressas para as mesmas unidades funcionais de estudos “*cradle-to-cradle*” não podem ser comparados com as de estudos “*gate-to-grave*”, por exemplo, sem as devidas alterações e proporcionalidades, uma vez que consideram diferentes etapas e processos dentro de um mesmo ciclo de vida.

Dessa maneira, é importante definir quais são os escopos sistêmicos (etapas inclusas ou exclusas), a área geográfica de realização (o impacto ambiental pode variar em diferentes regiões, uma vez que pode depender de diferentes infraestruturas, matrizes energéticas ou ofertas hídricas), e o horizonte temporal (qual janela temporal foi considerada para degradação de poluentes e quais tecnologias eram disponíveis na época) para poder realizar a comparação entre diferentes resultados de ACV.

Técnicas de Reciclagem Estudadas

Por fim, deve-se analisar quais são as técnicas de reciclagem que cada estudo de ACV leva em consideração para a construção dos resultados das categorias de impacto, uma vez que estas serão as principais características dos estudos a serem comparados.

4 RESULTADOS

4.1. Resultados das Entrevistas

4.1.1. Entrevista A

A entrevista A foi realizada com um pesquisador e livre-docente do Grupo de Prevenção da Poluição (GP2) do departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PQI-EPUSP). O GP2 possui o intuito de realizar pesquisas nos campos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), Produção mais Limpa (P+L), Ecologia Industrial e Gestão Energo-ambiental.

O profissional entrevistado é engenheiro químico desde 1989, e possui mestrado e doutorado em engenharia química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, além de pós-doutorado pelo Centro de Ecologia Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. O especialista é membro do laboratório GP2 desde 1998, e possui diversos artigos científicos publicados em revistas renomadas como *Journal of Cleaner Production*, *The International Journal of Life Cycle Assessment* e *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*.

O objetivo da entrevista A foi o detalhamento da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida para polímeros, buscando evidenciar os processos e principais práticas que devem ser realizados para a elaboração de um estudo adequado de ACV para diferentes tecnologias de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia de valor no Brasil.

Primeiramente, buscou-se entender se a ACV é suficiente para avaliar os impactos ambientais de tecnologias de reciclagem e gerenciamento de resíduos plásticos, afim de construir comparações entre tais técnicas, fornecendo uma classificação em termos de sustentabilidade para que os atores responsáveis pela escolha dos métodos de gestão de resíduos possam realizar decisões baseadas em dados.

Segundo o especialista, ambientalmente, a ACV é suficiente para a avaliação comparativa de diferentes técnicas de reciclagem, uma vez que permite quantificar a função de produtos, processos e serviços através de diagnósticos de desempenho ambiental para o cumprimento de índices técnicos padronizados. Dessa maneira, para uma mesma taxa de reciclagem, por exemplo, pode-se analisar o impacto ambiental de diferentes processos:

“A ACV é capacitada para avaliar a efetividade ambiental de um método ambiental de reciclagem. Ela gera diagnósticos ambientais de produtos, processos e serviços, (...) mais precisamente de funções.”

Para o desenvolvimento de uma visão sistêmica destes processos, entretanto, é necessário combinar outros métodos de avaliação de diferentes dimensões ao estudo de ACV. Para essa construção, é necessário manter um padrão sobre as operações, processos e etapas do ciclo de vida do produto nas diferentes técnicas. As principais metodologias complementares citadas pelo professor foram Custo de Ciclo de Vida (Life Cycle Cost - LCC), associado à dimensão econômica do sistema, analisando custos diretos e indiretos das etapas analisadas pela ACV ambiental. Em relação à dimensão social, foi citada a Avaliação Social de Ciclo de Vida (Social Life Cycle Assessment - SocialLCA), que analisa impactos sociais associados a todas as etapas do ciclo de vida do material.

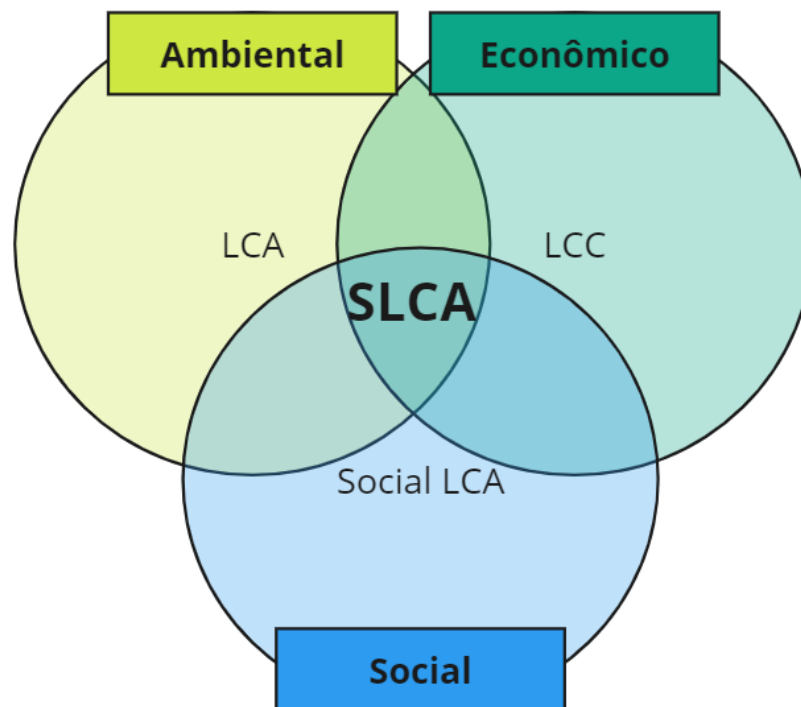
“Devemos combinar métodos que olhem outras dimensões, que não a ambiental, mas que tenham elasticidade para ver isso sobre a mesma perspectiva que a ACV. (...) A técnica escolhida para isso deve ter também um caráter sistêmico. Não adianta que se restrinja apenas a reciclagem per se. Eu calculo os impactos ambientais desde a hora que coleta o plástico até gerar a resina no final, tendo o diagnóstico de desempenho ambiental para isto. O custo vou estimar apenas em relação aos transportes. Não, pois ficaria desbalanceado.”

Dessa maneira, através da utilização de critérios quantitativos de uma mesma base de dados, é possível realizar uma sobreposição das diferentes dimensões para a construção da solução Avaliação de Ciclo de Vida Sustentável (Sustainable Life Cycle Assessment - SLCA), área em que há a maximização ou minimização dos índices de todos estes métodos (Figura 25):

“Isto te permitiria, então, respeitando o caráter sistêmico e as limitações de cada um dos métodos, que você fizesse uma sobreposição e encontrasse como solução uma coisa chamada Sustainable Life Cycle Assessment. É um exercício clássico de álgebra booleana, com um indicador ambiental, cruzado com um indicador econômico, cruzado com um indicador social, cada um com um range de validade e, quando todos eles são colocados na

mesma base, uma vez que são quantitativos, você encontra uma área de sobreposição em que todos convergem, a resposta sustainable, tirando o melhor dos 3 desempenhos”

Figura 25: Avaliação de Ciclo de Vida Sustentável (Sustainable Life Cycle Assessment)



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa visão sistêmica do ciclo de vida de produtos permite que sejam feitas análises de índices em cada etapa do ciclo de vida de maneira individual, possibilitando a construção de estudos como diagramas de Pareto, permitindo a priorização de problemas para otimização de maneira detalhada.

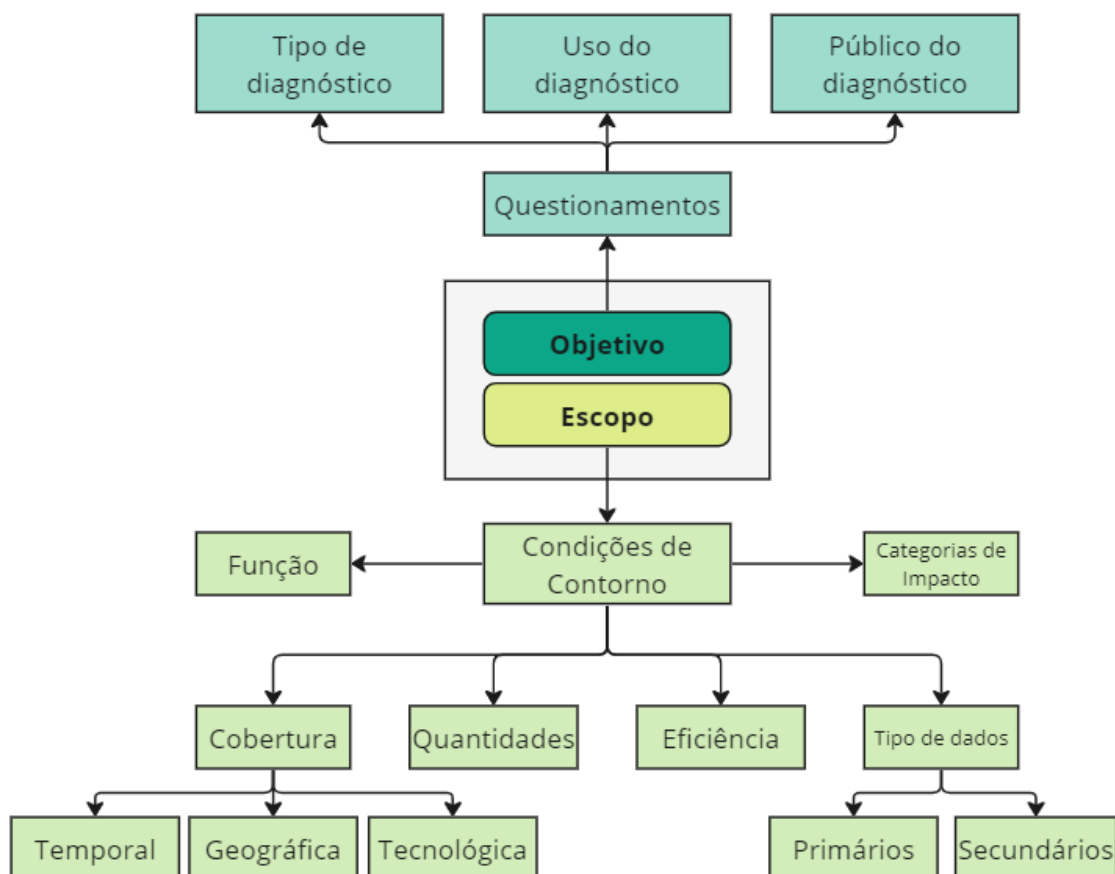
Em relação a realização de uma ACV para polímeros, o professor ressaltou:

“O método de aplicação da ACV mais utilizado no mundo, a partir do momento que a ISO absorveu esta metodologia e ajudou que ela melhorasse, é aquele descrito nas normas 14040 e 14044.”

O especialista detalhou os principais passos para a realização de uma ACV para polímeros, que se inicia através da definição de objetivo e escopo. Essa fase consiste na realização de três questionamentos: qual tipo de diagnóstico deseja-se gerar (o que), para qual uso esse diagnóstico aplica-se (para que) e qual público fará o uso desse diagnóstico (para quem). Estes questionamentos devem ser acompanhados de condições de contorno:

a função para a qual se realizará a análise; quais quantidades e graus de eficiência de processo serão considerados; quais as categorias de impacto; quais os tipos de dados que serão aplicados (primários através de estudos de campo, ou secundários providos de revisões literárias); e para qual cobertura temporal, geográfica e tecnológica será feita a análise (Figura 26).

Figura 26: Primeira etapa de uma ACV



Fonte: Elaborado pelo autor

Existem diversas categorias de impacto ambiental passíveis de serem analisadas pelos métodos padronizados de ACV (Tabela 4):

Tabela 4: Categorias de Impacto da ACV

Categoria de Impacto	Unidade	Descrição
Potencial de Aquecimento Global	kg CO ₂ -eq	Indicador de potencial de aquecimento global devido a emissões de gases do efeito estufa
Potencial de Depleção de Ozônio	kg CFC-11-eq	Indicador de emissões atmosféricas de gases que causam a destruição da camada de ozônio estratosférica
Potencial de Acidificação	kg mol H ⁺	Indicador do potencial de acidificação de solos e águas devido à emissão de gases como óxidos de nitrogênio e de enxofre
Formação de Ozônio Fotoquímico	kg NMVCO-eq	Indicador de emissão de gases que afetam a criação de ozônio fotoquímico na atmosfera catalisada pelo Sol
Toxicidade Humana	CTUh	
Depleção de Recursos Abióticos - Fósseis	MJ	Indicador de depleção de recursos naturais fósseis
Depleção de Recursos Abióticos – Metais e Minerais	kg Sb-eq	Indicador de depleção de recursos naturais não-fósseis
Uso da Terra	Adimensional	Medida de mudanças na qualidade do solo, como produção biótica, resistência à erosões e filtração mecânica
Ecotoxicidade Aquática	CTUe	Impacto de substâncias tóxicas emitidas ao meio ambiente em organismos de água doce
Pegada Hídrica	m ³ eq. no mundo	Indicador relativo da quantidade de água utilizada, baseada em fatores de escassez de água regionais

Emissão de Material Particulado	Incidência de doenças	Indicador do potencial de incidência de doenças devido à emissão de material particulado
---------------------------------	-----------------------	--

Fonte: Adaptado de ECOCHAIN (2023)

A seguir, deve-se realizar a coleta de dados, primários ou secundários, realizando os tratamentos necessários para a criação de um diagnóstico de inventário, permitindo transformar, posteriormente, cada um dos consumos, emissões e transformações do espaço físico em potenciais de impactos ambientais. Estes potenciais representam o custo dos processos analisados ao meio ambiente para que o produto final realize sua função em termos de consumo de recursos, transformação do meio físico e geração de rejeitos.

Para a aplicação da técnica de ACV para comparação de diferentes métodos de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia de valor, o professor destacou que a escolha dos indicadores de desempenho ambiental tem grande influência da demanda do mercado, que muitas vezes se restringe a análise de Potencial de Aquecimento Global e balanço de carbono, uma vez que é a categoria mais consolidada historicamente dentro da metodologia de ACV:

“Fundamentalmente, existem 2 níveis de decisão. Nível 1: aquilo que o mercado quer saber. Para muita gente, a dimensão ambiental se restringe à Aquecimento Global, e o Aquecimento Global a um balanço de carbono. Então olharia Global Warming Potential, um modelo muito bem pavimentado realizado há muitos anos.”

O Potencial de Aquecimento Global (GWP) é um índice criado para permitir a comparação do impacto de diferentes gases no aquecimento global, uma vez que eles possuem diferentes potenciais de absorção de energia (“*radiative efficiency*”) e tempos de permanência na atmosfera (“*lifetime*”). Desta maneira, o índice busca medir quanta energia a emissão de uma tonelada de determinado gás será absorvida em determinado período em relação à emissão de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂). O período padrão de análise de GWP é de 100 anos, e ele apresenta uma unidade de medida comum para análise do impacto de diversos gases do efeito estufa.

O CO₂ possui GWP de 1 independentemente do período utilizado, uma vez que é o gás-referência. O metano (CH₄) possui GWP de aproximadamente 27-30 em um

período de 100 anos, permanecendo na atmosfera em média por uma década, mas absorvendo muita energia. O óxido nitroso (N_2O) possui GWP de 273 vezes o do CO_2 no período padrão. Outros gases do efeito estufa com alto GWP são clorofluorcarbonos (CFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) (EPA, 2023).

Além desta categoria de impacto, o especialista sugeriu a análise da Pegada Hídrica, uma vez que esse indicador fornece não só o uso de água nas etapas do ciclo de vida do produto, mas quanta água foi utilizada em determinada região com disponibilidade hídrica específica, cruzando dados de demanda e oferta de água.

“Além disso, deveria olhar o que acho que é uma tendência de médio prazo, talvez de curto, que é Pegada Hídrica: o consumo de água associado ao processo. É muito provável que o processamento de material virgem consuma menos água que o processamento do material desde bases reaproveitadas. Isso deveria ser considerado não apenas em relação ao consumo de água, mas sim de Pegada Hídrica (...) que te diz quantos litros de água consome-se nessa região com essa disponibilidade hídrica para produzir garrafas.”

Outra categoria de impacto sugerida é Depleção de Recursos Abióticos Fósseis, uma vez que muitos dos processos considerados sustentáveis, como reciclagem, apresentam grande depleção de recursos fósseis “escondidos”. O índice de Potencial de Depleção de Recursos Abióticos Fósseis é calculado através da extração de matérias primas não renováveis de origem fóssil, como petróleo, gás natural e carvão mineral. Este indicador mede o potencial de um produto ou serviço em esgotar recursos abióticos fósseis, e é expresso em unidades de massa do recurso fóssil por unidade de produto, indicando a quantidade necessária de petróleo, por exemplo, necessária para a produção de uma tonelada de determinado produto.

O professor citou também o índice de Uso e Transformação do Solo, principalmente para o caso de plástico produzido através de biomassa. Por fim, em termos de impactos causados pelos processos logísticos, deve-se analisar o Potencial de Formação de Material Particulado, uma vez que, grande parte das movimentações de material são realizados por meios de transporte que utilizam combustíveis fósseis.

Em relação às diferenças de aplicação do método de ACV, o especialista ressaltou que, apesar da adoção e padronização da técnica pela ISO em 2006, a realização de

estudos de ACV possui variabilidade de resultados não pela componente geográfica individualmente, mas devido à diferentes decisões tomadas pelos grupos de pesquisadores, que, culturalmente, possuem vieses que alteram o resultado final das avaliações, mesmo que metodologicamente ambas as decisões possam ser justificadas corretamente.

Outro fator de variabilidade dos resultados de estudos de ACV é relativo as bases de dados utilizadas, que possuem diferentes inventários passíveis de customizações para diferentes cenários. Por fim, a escolha de diferentes metodologias de avaliação de impacto pode causar variabilidade de resultados, uma vez que os métodos são baseados em condições dos locais dos estudos realizados.

Em relação a limitações da ACV, o professor ressaltou a falta de métodos de avaliação de índices importantes, como biodiversidade. Não existem métodos descritos nas regras de padronização de ACV sobre os impactos causados pelo ciclo de vida de um produto ou material em diferentes níveis tróficos e sua propagação ao longo do tempo, por exemplo.

“A supressão de um nível trófico leva a desdobramentos que não são simplesmente lineares, se propagam. Para meu estudo pode ser importante, mas não existe um jeito de medir. Isto é um problema não só no Brasil, mas no mundo, ausência de categorias de impacto consistentes para avaliar coisas que são cada vez mais importantes.”

Além disso, citou a falta de bancos de dados genuinamente brasileiros, uma vez que muitos dos inventários desenvolvidos por brasileiros são destinados à alimentação de bases de dados internacionais pagas, e não são replicadas ao banco nacional SICV (Sistema de Inventário de Ciclo de Vida). Ressaltou também as limitações em relação à construção destas bases:

“Aqui no Brasil nós somos muito ruins de notificação. Temos bancos de dados menos eficientes, ainda que genuínos e proprietários, representando perfeitamente nossa condição, mas não temos uma série histórica com dados médios, tendo apenas um dado, testado para apenas uma condição e circunstância”

Por fim, tratando-se das perspectivas futuras da técnica de ACV, o especialista afirmou que a metodologia vem consolidando-se no mercado, com evolução no número de estudos, bases de dados e consistência de resultados, como um dos melhores

indicadores de impacto ambiental. Além disso, ressaltou que a ACV permitiu transformar avaliadores ambientais, antes pouco estudados, em resultados numéricos, permitindo a análise e melhoria de eficiência de processos em relação a estas respostas.

Dessa maneira a técnica deve passar de apenas um diagnóstico ambiental, para uma avaliação de desempenho ambiental associada a desempenho econômico e social, além de propor estratégias, mudanças e soluções para otimizar os indicadores calculados e atingir a área de Avaliação de Ciclo de Vida Sustentável:

“É para onde eu acho que vamos nos próximos 10 anos, deixando de fazer apenas o diagnóstico, mas atuando de maneira sistêmica sobre todos os estágios do sistema, em países diferentes sob condições diferentes, para chegar ao resultado ótimo para aquela circunstância estudada.”

4.1.2. Entrevista B

A entrevista B foi realizada com uma advogada com mais de 25 anos de experiência na área de direito ambiental. É sócia há 13 anos de uma renomada instituição legal, com passagens em órgãos governamentais ambientais como a CETESB. Atualmente, atua em um escritório de advocacia de grande porte, que reúne mais de 40 áreas do direito.

O objetivo da entrevista B consistiu no detalhamento do cenário legislativo de resíduos sólidos no Brasil, especificamente para o gerenciamento de resíduos plásticos e reciclagem, sob a visão da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Inicialmente, discutiu-se a criação da PNRS em 2010 e a dificuldade de sua implementação, uma vez que as novas regras propostas pela lei causam uma grande mudança no *status quo* mercadológico e nas relações entre os principais atores inseridos na dinâmica do mercado de plásticos no Brasil. A advogada ressaltou que, além das mudanças drásticas propostas pela PNRS, não houve o acompanhamento de recursos financeiros acessíveis para o setor privado, que deveriam ser disponibilizados pela administração pública, para estimular a transição para a economia circular de maneira mais veloz.

“Uma política pública que muda a lógica de um modelo de negócio e de uma indústria inteira, implica em muita remodelagem

econômica, de relacionamento entre as partes interessadas, muitas mudanças pra ter resultados rápidos.”

Nos Estados Unidos, por exemplo, há o *Inflation Reduction Act*, política que garante redução de impostos e custos para empresas privadas que promoverem ações que estejam em pauta com o combate às mudanças climáticas e à economia linear. Dessa maneira, não foram estabelecidas parcerias público-privadas para o estímulo dessa transição, somada ao grande custo inicial de realizar as mudanças, que pode apresentar-se como uma desvantagem competitiva aos precursores de novos métodos e tecnologias mais sustentáveis, em termos financeiros de curto prazo.

Junto a isto, não existem penalidades legais graves para empresas que não estimulam tais práticas, o que torna a implementação e adoção de práticas circulares mais difícil e lenta.

“Há ainda o agravante de não ter vindo o recurso financeiro da administração pública para bancar a transição de uma maneira mais rápida. (...) Em outros países sempre vai ter uma política de adequação econômica junto.”

Além disso, as metas de logística reversa, retorno à cadeia produtiva e reciclagem não são explicitamente definidas pela PNRS, uma vez que a lei descreve um cenário em que estas metas deverão ser construídas em conjunto com o setor privado. Segundo a especialista, conceitualmente esta decisão é benéfica, uma vez que permite um estudo aprofundado técnico-econômico por uma parceria público-privada, mas também apresenta problemas de lentidão e especificidade, uma vez que diferentes atores, que estão inseridos na cadeia de diferentes produtos plásticos de diversos polímeros, possuem particularidades:

“É uma política que estabelece um caminho de cooperação entre o setor público e privado para estabelecer as metas de maneira consensada.”

Em relação aos principais atores envolvidos na construção, desenvolvimento e implementação da PNRS (ver Figura 27), a advogada citou o governo federal, representado pelo presidente e pelo ministério do meio ambiente, através do Departamento de Resíduos Sólidos, criado para validar e promover o estímulo do cumprimento da PNRS (primeiro setor).

“Os catadores representam 1 milhão de eleitores. Isso significa que um presidente que é eleito garantido com 1 milhão de eleitores

de determinado segmento, vai trabalhar para este segmento. Isso fez com que os catadores também fizessem parte da política de maneira muito expressiva.”

Outros atores importantes nesse sistema eram os governos estaduais e municipais. Diferentemente do cenário do setor privado, houve grande disponibilidade de estímulos financeiros para o setor público municipal e estadual, que deveriam apresentar seus planos de resíduos sólidos para receberem o dinheiro disponibilizado pelo edital da PNRS, de aproximadamente R\$6 bilhões.

“O governo disponibiliza o dinheiro para o município, mas cobra a formação de um plano para acessar esse dinheiro. Aí o município tem que fazer uma reforma no lixão para transformar ele num aterro, e parar de deixar chegar tantos resíduos lá. Mas como ele pode fazer isso? Tem que estabelecer centrais de reciclagem e triagem, estabelecer parcerias com empresas privadas, parcerias com catadores. O município tem que exercer papel de gestão do assunto que ele não sabe.”

Segundo a advogada, os municípios não possuíam capacidade técnica suficiente para desenvolver planejamentos de gerenciamento de resíduos sólidos, o que fez com que apenas 100 projetos fossem criados dentre os mais de 6 mil municípios brasileiros, dos quais apenas 10 foram aceitos. Dessa maneira, evidencia-se a dificuldade do país de lidar com problemas complexos multifacetados que envolvem diversos atores.

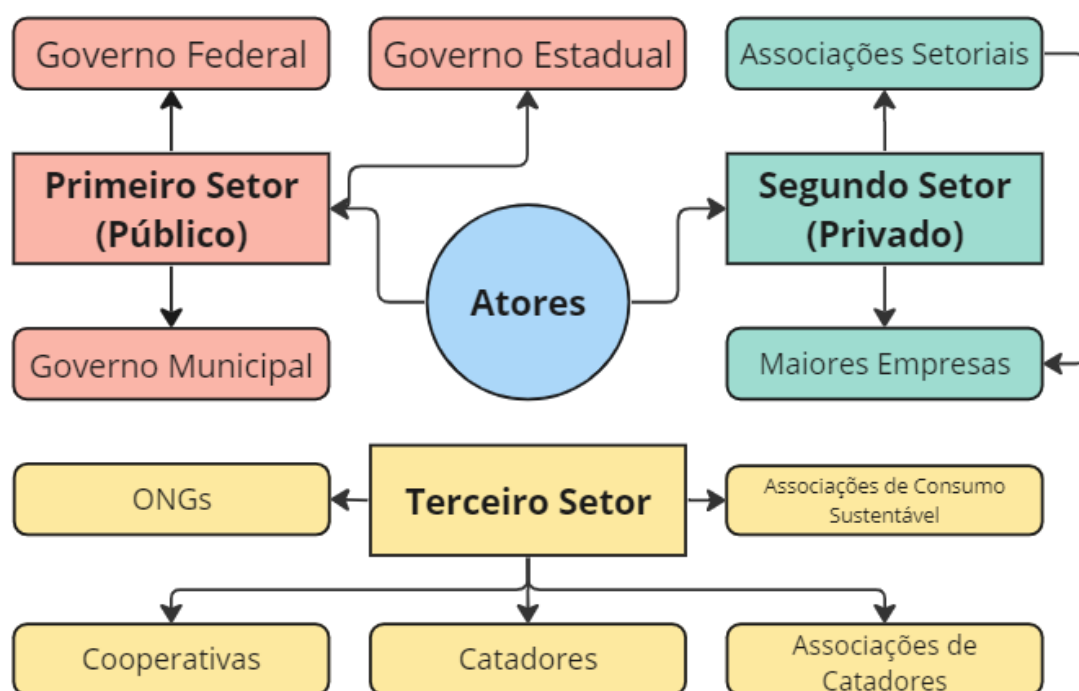
Em relação ao setor privado (segundo setor), os atores dividem-se em relação à cadeia produtiva do plástico, com empresas químicas e petroquímicas fabricantes de resinas (como Dow, Braskem), seguida pelos fabricantes de materiais plásticos, como embalagens. Cada setor responsável pelas etapas da cadeia produtiva do plástico possui uma associação, personificação do setor para facilitar posicionamentos e regras de competição.

“Tem que pensar nas empresas sob duas óticas: como fabricantes de resina que vai acabar virando plástico, mas também como setor, com representação a partir de associações. Já é melhor ter o setor reunido em uma associação, porque ganha uma personificação para se posicionar nas negociações e na competitividade.”

A associação que representa os fabricantes de resina, início da cadeia produtiva, é chamada de ADIRPLAST (Associação Brasileira dos Distribuidores de Resinas Plásticas e Afins), fundada em 2007. Já as associações representantes dos fabricantes dos materiais plásticos são a ABIPLAST e a Plastivida. Há também as associações de fabricantes dos produtos das embalagens e dos distribuidores destes produtos, que muitas vezes englobam as mesmas empresas, como a Coca-Cola. Dessa maneira, segundo a advogada, os atores do setor privado são as associações e as maiores empresas individualmente.

Por fim, o terceiro setor é representado pelas cooperativas, catadores, ONGs e associações de catadores, como a ANCAT (Associação Nacional dos Catadores) e associações de consumo sustentável, como o Movimento Circular.

Figura 27: Atores da PNRS



Fonte: Elaborado pelo autor

A PNRS determina que esses atores trabalhem em conjunto para cumprir a meta de 22% de taxa de retorno dos materiais plásticos à cadeia produtiva. As empresas devem retornar esta proporção de materiais em peso em relação ao tipo de plástico e quantidade

produzida, não necessariamente devolvendo o produto que fabricou, mas sim qualquer plástico do mesmo tipo fabricado, no peso correto.

A advogada ressaltou que a comprovação quantitativa da devolução é um grande desafio atualmente, já que os números de produção e retorno de materiais das empresas é confidencial. As associações realizam parcerias com cooperativas para atingir os objetivos de retorno material, como o programa Mãos Pro Futuro da ABIHPEC (Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos), criado em 2006. O programa contempla fundamentos da sustentabilidade como preservação ambiental, benefício social e viabilidade econômica, presente nos 27 estados brasileiros e envolvendo cerca de 6000 cooperadores.

Essa associação cadastra cooperativas e avalia o volume de material recolhido por elas, que emitem as respectivas notas fiscais, reportando as quantidades recolhidas, que são então vendidas para as empresas que têm a obrigação de cumprimento de metas de retorno de materiais à cadeia produtiva.

Em relação às limitações e oportunidades da PNRS, a advogada ressaltou a defasagem da taxa de 22% de retorno de materiais à cadeia produtiva, que pode ser mais agressiva, e à falta de detalhamento em relação à meta de devolução de cada material, uma vez que atualmente praticamente todos os resíduos sólidos, como papel, plástico e alumínio, apresentam a mesma meta.

Em detrimento à essa meta, as seis maiores empresas produtoras de embalagens plásticas do Brasil (representando mais de 50% do volume de plástico produzido no país) assinaram o Termo de Compromisso para Embalagens, em que houve a criação de três diferentes metas principais: uma de retorno de uma porcentagem do volume de plástico produzido (recuperação), uma meta de conteúdo reciclado e o objetivo de produzir apenas materiais 100% recicláveis (reciclabilidade).

A advogada também criticou a meta simplificada de retorno de materiais:

“Isso não influencia e não muda a lógica de produção e consumo. Ela simplesmente influencia inclusive que continue tendo lixo circulando para ter mais matéria para recolher. É uma lógica errada.”

A especialista também destacou que, mesmo havendo problemas técnicos, tecnológicos e de falta de infraestrutura para a implementação e cumprimento dos objetivos da PNRS, o maior problema, em sua opinião, é a dificuldade de comunicação, de parcerias público-privada e entre os diversos atores com diferentes interesses que

atuam na cadeia de valor do plástico, que representa o maior desafio a ser resolvido em relação ao gerenciamento de resíduos sólidos plásticos no Brasil.

“Como advogada, o desafio institucional, de comunicação, de cooperação e de parceria público-privada e entre players privados do mesmo segmento representam o maior problema do Brasil.”

Evidenciou também a oportunidade que a PNRS apresenta ao setor de plásticos, representando mais que uma lei a ser cumprida, uma vez que estimula novos negócios, processos, pesquisa e desenvolvimento de produtos que atendam às regras estabelecidas.

“É aquele clichê que todos os problemas e riscos são novas oportunidades. O assunto ambiental sempre vai parar em novos negócios. Não é só uma questão de compliance que vai ter que ficar ver se está cumprindo a lei, é negócio. Eu vou ter um produto novo, já tenho a fábrica, a expertise, o laboratório, parcerias com universidades. Todo mundo está tendo que se remodelar.”

Representa também uma obrigatoriedade de revisão dos processos, gastos e impactos ambientais da empresa, o que pode criar a oportunidade de redução de custos com materiais e energia, uma vez que o cálculo dos indicadores que devem ser reportados permite um processo de otimização que antes não existia, devido à falta de pressão por mudanças.

“O melhor jeito de você economizar energia, como empresa privada, é mexer na estrutura de fabricação do seu produto ou do seu serviço. E reduzindo uso de insumos, energia e água, você estará atendendo a PNRS e também diminuindo custos operacionais.”

Em relação ao paralelo entre as legislação brasileira e dos EUA e União Europeia, a advogada ressaltou o rígido controle de importação proposto pelo *Green Deal* (UE), em que apenas produtos que cumpram regras ambientais podem entrar no bloco, o que torna os produtos brasileiros para exportação extremamente caros e pouco competitivos no continente europeu, uma vez que o Brasil não está em um estágio de controle de impactos ambientais tão avançado quanto a Europa, o que torna o cumprimento das normas europeias e a certificação muito custosa.

Mesmo com essa limitação, o *Green Deal* oferece acordos de cooperação para produtores externos que comprovem que o cumprimento de leis ambientais e sua

certificação encarecerão o produto, disponibilizando fundos para melhoria de infraestrutura destes produtores.

4.1.3. Entrevista C

A entrevista C foi realizada com um professor sênior do Departamento de Engenharia dos Materiais de uma renomada universidade brasileira. Ele possui graduação em engenharia química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, mestrado e doutorado pela Universidade de São Paulo, e teve passagens pela indústria química, Copersucar e ministrou aulas em diversas universidades brasileiras sobre os assuntos de reciclagem de polímeros, tecnologias de polímeros e plásticos de engenharia.

O intuito dessa entrevista foi realizar um estudo do cenário técnico e econômico das diferentes técnicas de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia de valor através da visão de um profissional com mais de 50 anos de carreira na área.

Primeiramente, foi necessário estabelecer o cenário de reciclagem brasileiro em que, segundo o especialista, há predominância da utilização de técnicas de reciclagem mecânica. Isto se dá devido às inúmeras vantagens técnicas e econômicas apresentadas pelas tecnologias em comparação com as alternativas presentes no país, como reciclagem química e incineração para recuperação energética.

“No Brasil, as tecnologias mais presentes são bottle-to-bottle, a fabricação de fibras, porque a viscosidade do grau garrafa é perfeita para fazer fibras, e a reciclagem química.”

Do ponto de vista técnico, a simplicidade do processo é um fator preponderante. A reciclagem mecânica se destaca por sua abordagem direta, exigindo menos etapas complexas em comparação com outros métodos, facilitando a implementação e operação por parte das indústrias.

A quantidade de maquinário necessário também desempenha um papel crucial, demandando um investimento inicial menor em comparação com tecnologias mais avançadas, tornando-a mais acessível para empresas de menor porte. Além disso, a facilidade de manutenção das máquinas contribui para reduzir os custos operacionais a longo prazo.

Quanto à qualidade do produto final, a reciclagem mecânica demonstra capacidade de produção de grânulos ou fibras com uma qualidade satisfatória para diversas aplicações, tanto em processos “closed-loop”, transformando garrafas em novas

garrafas a partir de material reciclado, como a técnica *bottle-to-bottle*, quanto de “*open-loop*”, em que o produto final pode vir a desempenhar uma função diferente do material de entrada.

A constante evolução das tecnologias de triagem e limpeza aprimora ainda mais a qualidade do material reciclado, ampliando as oportunidades de mercado devido à sua utilização em diferentes indústrias.

Em termos de geração de renda, a reciclagem mecânica cria oportunidades de emprego em várias etapas do processo, desde a coleta até a separação e produção.

Em relação aos custos, a reciclagem mecânica geralmente apresenta custos operacionais mais baixos devido à simplicidade do processo e à facilidade de manutenção das máquinas. Isso não apenas torna a técnica economicamente acessível, mas também permite que as empresas pratiquem preços competitivos no mercado de produtos reciclados.

“No contexto da reciclagem mecânica, a tecnologia mais barata disponível é de produção de flakes, que consiste na lavagem e moagem, e depois o material é vendido para indústrias que fazem a reciclagem química. Já a mais cara é a de bottle-to-bottle.”

Quando comparada às demais técnicas de produção de plástico PET, a reciclagem mecânica produz materiais de menor qualidade e propriedades físicas inferiores ao PET produzido a partir de petróleo, técnica estabelecida que depende de recursos não renováveis. A produção virgem a partir de combustíveis fósseis possui vantagens como a alta produtividade e escalabilidade, o menor custo de produção entre as tecnologias e a melhor qualidade do material, uma vez que ele não sofre alterações do meio ambiente nem degradação e contaminação no processo de coleta como os materiais utilizados para produzir materiais reciclados.

Entretanto, este tipo de produção é inviável legalmente e ambientalmente, uma vez que depende da extração e refino de combustíveis fósseis para sua produção, apresentando alta pegada de carbono, além de promover grande geração de resíduos sólidos na lógica de uma economia linear. A produção do material depende da crescente extração de matérias-primas não renováveis e, uma vez que o material é utilizado, não possui mais função, e deve, portanto ser descartado, perdendo seu valor e gerando impactos ambientais e sociais.

Em relação à produção virgem a partir de biomassa, com o EG proveniente de palha de milho ou bagaço de cana-de-açúcar, utilizam-se matérias-primas renováveis,

com menor geração de resíduos tóxicos e emissão de gases do efeito estufa em comparação com a produção virgem à partir de combustíveis fósseis, mas ainda é uma técnica com baixa escalabilidade, maior custo de produção e apresenta o problema de uso de terra. Dessa maneira, a produção de plástico por esta técnica representaria uma competição de terras e recursos para a produção alimentar.

A reciclagem química apresenta-se como a alternativa de reciclagem que produz o material de maior qualidade final, com propriedades comparáveis às dos materiais virgens, superando a limitação apresentada pela reciclagem mecânica. Além disso, possui menor dependência da qualidade dos resíduos em relação à técnica de reciclagem mecânica, uma vez que é mais tolerante a impurezas e contaminações devido às características do processo de despolimerização. Entretanto, diferentemente de sua contrapartida mecânica, a reciclagem química apresenta grande complexidade, e exige grandes investimentos em infraestrutura e mão-de-obra especializada, podendo resultar em custos operacionais elevados, inviabilizando a competição com resinas virgens produzidas à partir de combustíveis fósseis. Além disso, apresenta alto consumo energético, especialmente na fase de quebra das moléculas poliméricas, o que pode levar a grandes impactos ambientais e altos custos, principalmente em regiões com matriz energética predominantemente não-renovável.

Por fim, a queima para recuperação energética apresenta-se, segundo o especialista, como um último recurso para lidar com resíduos plásticos, uma vez que há a perda do material, que não poderá ser mais utilizado para produção de outros produtos após o processo de queima:

“A reciclagem energética só é utilizada quando não há mais como fazer outros métodos de reciclagem. Atualmente é mais utilizado no contexto de aterros sanitários, com materiais que não podem ser separados ou estão contaminados.”

Como vantagens deste processo, pode-se citar a geração de energia através da conversão de calor em eletricidade, diversificando a matriz energética e a redução do volume de resíduos através da incineração, aliviando a pressão sobre aterros sanitários.

Entretanto, há grandes emissões de poluentes atmosféricos, o que torna necessário o investimento em filtros e infraestrutura para lidar com óxidos de enxofre, de nitrogênio e material particulado, além de metais pesados e outras substâncias tóxicas.

Além disso, tem o potencial efeito desincentivador da reciclagem, uma vez que se apresenta como uma maneira mais simples e de menor custo de gestão de resíduos em relação à processos de reciclagem.

Após a análise de diferentes técnicas de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia de valor através de visões técnicas, como qualidade final do produto e complexidade do processo, e econômicas, como investimentos em infraestrutura e custo final dos produtos, o especialista concluiu que a técnica recomendada para a realidade brasileira é também a mais utilizada no Brasil: a reciclagem mecânica. Esse processo apresenta uma alternativa de baixo custo, permitindo competição econômica com a produção de plástico virgem a partir de combustíveis fósseis.

4.1.4. Entrevista D

A entrevista D foi realizada com uma mestrande de uma prestigiosa universidade de engenharia em São Paulo, que além de estar realizando um estudo sobre roteirização de coleta de resíduos junto ao Departamento de Engenharia de Produção, na área de Logística, possui experiência em empresas de gerenciamento e coleta de resíduos sólidos.

Primeiramente, buscou-se entender o cenário de logística reversa de plástico PET no Brasil. Segundo a especialista, um dos obstáculos mais marcantes para a eficiência deste processo no país é a falta de conhecimento das pessoas sobre como descartar corretamente as embalagens de PET. A ausência de informações claras sobre como descartar esse material, de campanhas educativas eficazes para a população contribui para essa problemática, resultando em uma má gestão dos resíduos de PET.

“Em relação às limitações da logística reversa para o plástico PET, acho que são dois os maiores problemas: o primeiro é a segregação deste plástico em local apropriado e isolado pelas pessoas, empresas e indústrias.”

Além disso, a coleta eficiente é um grande desafio logístico, uma vez que os sistemas de coleta seletiva, quando existem, não abrangem todas as áreas, deixando lacunas na eficácia da coleta. A falta de infraestrutura adequada, especialmente em regiões menos desenvolvidas, agrava ainda mais o problema. A logística reversa demanda um sistema robusto de coleta, transporte, destinação e reciclagem, e a ausência ou deficiência em qualquer uma dessas etapas compromete o processo como um todo.

“Em segundo, é a coleta propriamente dita. A maioria das cidades oferecem serviço de reciclagem, mas muito abaixo do potencial.”

Outro aspecto a ser considerado é a necessidade de envolver atores diversos na cadeia de logística reversa de PET, desde os consumidores até as indústrias e órgãos governamentais. Incentivar a participação ativa da população, promover a instalação de pontos de coleta eficientes e estabelecer parcerias sólidas entre setores público e privado são passos essenciais para superar esses desafios.

Após a construção do cenário atual da logística reversa no Brasil e suas principais limitações, buscou-se criar um paralelo do cenário de coleta de resíduos entre Brasil e Europa, considerando aspectos culturais, legislativos, de infraestrutura e econômicos.

No Brasil, pelas dimensões e heterogeneidade de políticas, a cultura de reciclagem varia significativamente nas diferentes regiões. Em algumas áreas urbanas, a conscientização sobre a importância da reciclagem pode ser alta, enquanto em outras pode haver uma falta de compreensão sobre os benefícios ambientais. Já na maior parte dos países da Europa a cultura de reciclagem já está bem estabelecida, é uniforme e a população é em geral consciente sobre sua importância. A separação de resíduos é comum e incentivada, com campanhas educativas frequentes.

Outro ponto crucial, segundo a mestranda, são as leis e políticas públicas relacionadas à reciclagem. Muitos países europeus têm políticas rigorosas de gestão de resíduos, com metas específicas de reciclagem e penalidades para o descarte inadequado. Isso cria um ambiente mais propício para a logística reversa eficaz. Além disso, muitos países adotaram o princípio da REP (Responsabilidade Estendida do Produtor), onde os fabricantes têm a responsabilidade de garantir a coleta e reciclagem adequadas de seus produtos no final de sua vida útil. Esta prática ainda não é realizada no Brasil de maneira plena, apesar das tentativas da PNRS de implementar tal relação intersistêmica de responsabilidade.

Por fim, a especialista ressaltou que, na Europa, a economia circular é uma prioridade na agenda ambiental, com esforços concentrados em fechar os ciclos de vida dos produtos, incluindo embalagens de PET, enquanto no Brasil os temas ambientais estão começando a serem discutidos com maior seriedade agora:

“Aqui no Brasil eu não vejo isso. Eu vejo uma tentativa tímida da população de fazer a segregação do plástico, e quando faz, faz do modo errado, com resíduos e sem a lavagem correta.”

Em termos dos potenciais de impacto social da reciclagem, a criação e expansão de programas de reciclagem de garrafas PET podem abrir oportunidades de emprego em diversas etapas do processo. Desde a coleta inicial até a triagem, limpeza e processamento, a cadeia de reciclagem demanda mão de obra, oferecendo empregos diretos e indiretos para pessoas em diferentes níveis de qualificação. Essa dinâmica não apenas contribui para a redução do desemprego, mas também promove a inclusão social ao criar oportunidades para trabalhadores de diversas origens.

“Existe uma indústria muito grande de logística reversa, desde a coleta, reciclagem, tratamento e destinação, que emprega diversas pessoas.”

Outro aspecto social importante é o potencial para programas educativos, como iniciativas de conscientização sobre a importância da reciclagem, especialmente voltadas para escolas e comunidades. Isso não apenas gera uma compreensão mais ampla sobre a gestão de resíduos, mas também pode inspirar práticas ambientalmente responsáveis nas gerações futuras.

“É importante fomentar políticas públicas, incentivos fiscais e pesquisas neste segmento, junto à conscientização da população para a segregação correta do material.”

Em relação às possibilidades de melhoria da cadeia de logística reversa das garrafas PET no Brasil, a especialista ressaltou oportunidades significativas tanto para reduzir impactos ambientais quanto para otimizar custos ao longo do ciclo de vida do plástico.

Em termos de impacto ambiental, investir em tecnologias avançadas de reciclagem é crucial. A implementação de processos mais eficientes de triagem e separação de materiais pode aumentar a taxa de reciclagem, reduzindo a quantidade de garrafas PET destinadas a aterros sanitários. Além disso, a promoção de práticas de reciclagem de alta qualidade contribui para a produção de plástico reciclado com propriedades comparáveis ao plástico virgem, incentivando o uso sustentável e fechando efetivamente o ciclo de vida do material.

No que diz respeito aos custos, a integração eficiente de toda a cadeia de logística reversa é fundamental. Isso inclui o envolvimento de fabricantes (REP), distribuidores, varejistas, e, especialmente, a conscientização dos consumidores sobre a importância da segregação adequada. A otimização do transporte e da coleta, parcerias público-privadas, incentivos fiscais, subsídios e outras formas de apoio governamental para empresas que

adotarem práticas mais sustentáveis, também são movimentos importantes para o aumento da eficiência.

Para o sucesso desses processos, é essencial que se estabeleçam parcerias público-privadas sólidas, amparadas por políticas ambientais claras, legislação abrangente, incentivos fiscais para empresas que adotam práticas mais sustentáveis e penalidades para aquelas que não seguem padrões ambientais. Em paralelo, é importante que se construam mercados mais robustos para o plástico reciclado, impulsionando a demanda e tornando a reciclagem mais economicamente viável.

4.2. Resultados da Revisão Bibliográfica

Um total de 23 artigos foram identificados e selecionados para realizar a comparação bibliográfica de ACV de diferentes técnicas de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia produtiva (Tabela 5):

Tabela 5: Artigos utilizados na revisão bibliográfica

Autor	Ano	Escopo Geográfico	Escopo Sistêmico	Unidade Funcional	Categorias de Impacto	Tecnologias
GILENO, L.A., et al.	2021	Brasil	Cradle-To-Gate	1t de PET-PCR/fibra PET	GWP, ARD, AP, WF, ODP, FETP	Reciclagem Mecânica
ANDREASI, S., et al.	2022	Europa	Cradle-To-Grave	Consumo europeu de embalagens PET	GWP, PMFP	Reciclagem Mecânica
CHAIRAT, S., et al.	2023	Global	Cradle-To-Gate	1kg de rPET	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Mecânica
ITURROND OBEITIA, M., et al.	2023	Global	Gate-To-Gate	1kg de rPET	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Química
INGRAO, C., et al.	2023	Europa	Cradle-To-Gate	Garrafa PET de 1L	GWP, ODP, IR, POFP, AP,	Reciclagem Mecânica, Reciclagem

					EP, LU, ARD	Química, Incineração para Recuperação Energética
LIU, Q., et al.	2023	China	Cradle-To-Gate	1kg de fibra PET	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Mecânica
GARCÍA-VELÁSQUEZ, C., et al.	2022	Global	Cradle-To-Grave	1t de bio-PET	GWP	Produção virgem a partir de Biomassa
LEÓN, N., et al.	2022	Europa	Cradle-To-Grave	1kg de rOPET	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Mecânica, Reciclagem Química
HELMES, R.J.K., et al.	2022	Europa	Use-To-Grave	Embalagem PET de shampoo de 300mL	GWP, ARD	Reciclagem Mecânica, Reciclagem Química (para produtos virgens a partir de petróleo e de biomassa)
TAMOOR, M., et al.	2022	China	Cradle-To-Cradle	1t de rPET	GWP, AP, ODP, LU,	Reciclagem Mecânica, Reciclagem Química
LANG, W.T., et al.	2023	Europa	Use-To-Grave	6,5kt de PET gerenciado	GWP, AP, NP, SW	Reciclagem Química
UEKERT, T., et al.	2022	EUA	Cradle-To-Grave	1kg PET	GWP, AP, EP, ETP, ODP, ARD, WC, HT	Reciclagem Química, Produção Virgem a partir de Petróleo
SUAREZ, A., et al.	2022	Global	Cradle-To-Grave	1kg de bio-PET gerenciado	GWP	Produção virgem a partir de Biomassa
MEYS, R., et al.	2020	Global	Cradle-To-Grave	Tratamento de 1kg de	GWP, ARD	Reciclagem Química,

				resíduo plástico de características definidas		Incineração para Recuperação Energética
VURAL, GURSEL, I., et al.	2021	Europa	Cradle-To-Grave	100 embalagens de 0,5L com no mínimo 9 meses de validade	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Produção virgem a partir de Biomassa e de Petróleo
BALAŽIŅŠ KA, M., et al.	2021	Europa	Use-To-Grave	Garrafa de 500mL de Coca-Cola	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Mecânica, Incineração para Recuperação Energética
RYBACZE WSKA-BLAZEJOWSKA, M., et al.	2020	Europa	Cradle-To-Cradle	1t métrica de plástico	GWP, TAP, EP, HT	Reciclagem Mecânica, Produção Virgem a partir de Biomassa e de Petróleo
SINGH, A., et al.	2021	EUA	Use-To-Grave	Número de ciclos de vida do produto da despolimerização	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Química
CORNAGO, S., et al.	2021	Europa	Use-To-Grave	1kg de grânulos de PET	GWP, ODP, IR, POFP, AP, EP, LU, ARD	Reciclagem Mecânica, Reciclagem Química, Produção virgem
ZHANG, R., et al.	2020	China	Cradle-To-Gate	1t de cobertores de rPET	GWP, AP, EP, EC, SW, WD	Reciclagem Mecânica
HOROWITZ, N., et al.	2018	EUA	Cradle-To-Gate	1 garrafa de 1L	GWP, AP, EP, EC, WD, SW	Reciclagem Mecânica, Produção Virgem à partir de Petróleo
ARYAN, Y., et al.	2019	India	Cradle-To-Grave	1t de resíduo PET	GWP, AP, EP, POCP, ARD, HT, ETP	Reciclagem Mecânica, Incineração para

						Recuperação Energética
BATAINEH, K.M., et al.	2020	Jordania	Cradle-To-Gate	1t de grânulos de PET	EC, WD, GWP, SW	Reciclagem Mecânica

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6: Siglas das Categorias de Impacto

Categoria de Impacto	Categoria de Impacto (ING)	Sigla
Potencial de Aquecimento Global	Global Warming Potential	GWP
Potencial de Acidificação (Aquático, Marinho, Terrestre)	Acidification Potential (Freshwater, Marine, Terrestrial)	AP
Potencial de Eutrofização (Aquático, Marinho, Terrestre)	Eutrophication Potential (Freshwater, Marine, Terrestrial)	EP
Toxicidade Humana (Cancerígeno, não-Cancerígeno)	Human Toxicity (Carcinogenic, non-Carcinogenic)	HT
Uso de Terras	Land Use	LU
Potencial de Depleção de Ozônio	Stratospheric Ozone Depletion	ODP
Consumo de Água	Water Depletion	WD
Pegada Hídrica	Water Footprint / Water Scarcity	WF
Potencial de Ecotoxicidade (Aquática, Marinha, Terrestre)	Ecotoxicity Potential (Freshwater, Marine, Terrestrial)	ETP
Depleção de Recursos Abióticos (Fósseis, Não-Fósseis)	Abiotic Resource Depletion (Fossil, Non-Fossil)	ARD
Formação de Ozônio Fotoquímico	Photochemical Ozone Formation Potential	POFP
Potencial de Formação de Material Particulado	Particulate Matter Formation Potential	PMFP
Radiação Ionizante	Ionizing Radiation	IR
Consumo Energético	Energetic Consumption	EC
Geração de Resíduos	Solid Waste Generation	SW
Nutrição	Nutrition Potential	NP

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1. Comparação de Unidades Funcionais

Como demonstrado na Tabela 5, alguns dos estudos possuem como unidade funcional a produção de um kg de rPET (PET reciclado). Mesmo assim, é possível analisar uma grande variedade de UF nos diferentes trabalhos analisados, devido aos diferentes objetivos de cada um dos estudos de ACV realizados.

Isso torna a comparação dos estudos extremamente difícil, uma vez que dentre os 23 artigos estudados, há mais de 15 unidades funcionais, podendo ser de entrada ou saída, de diferentes produtos e diferentes quantidades.

Apenas nestes artigos analisados, voltados para ACV de diferentes técnicas de produção e reciclagem de PET, pode-se observar o uso de unidades funcionais como fibra de PET reciclado, grânulos de PET reciclado, embalagens de shampoo produzidas, toneladas de cobertor de rPET produzidos, toneladas de resíduos municipais, entre outros.

Como discutido na Entrevista A, para a realização da comparação entre diferentes estudos de ACV, é necessário que as funções dos produtos analisados sejam as mesmas, fator que não foi verificado na revisão bibliográfica realizada.

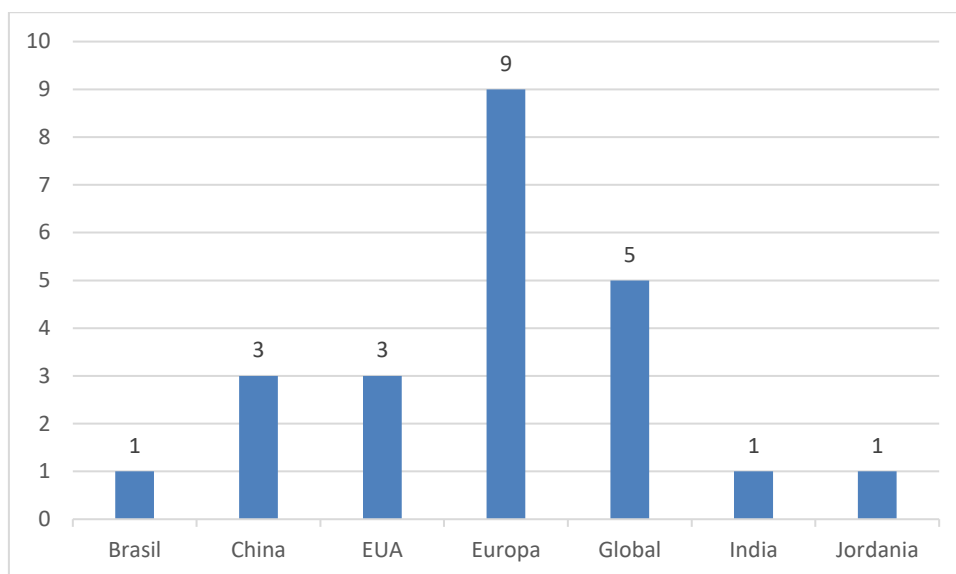
4.2.2. Comparação de Categorias de Impacto

Em relação às categorias de impacto, percebe-se a hegemonia do Potencial de Aquecimento Global, presente em todos os artigos analisados, seguidos pelo Potencial de Acidificação. Esta predominância está alinhada com a fala do especialista na Entrevista A, de que esse índice é o mais consolidado na indústria, e que muitas vezes é o único impacto analisado. A maioria dos estudos segue as categorias de impacto sugeridas pela ISO 14040, permitindo a comparação destes índices com outros estudos de ACV.

4.2.3. Comparação de Escopos (Geográfico, Temporal e Sistêmico)

Os escopos de cada estudo são extremamente diversos dentre os artigos analisados. Em termos geográficos (Gráfico 1), percebe-se a grande quantidade de estudos na Europa (9), seguida pelos Estados Unidos (3) e China (3), regiões avançadas no mercado de reciclagem e preocupações ambientais em relação ao Brasil (1).

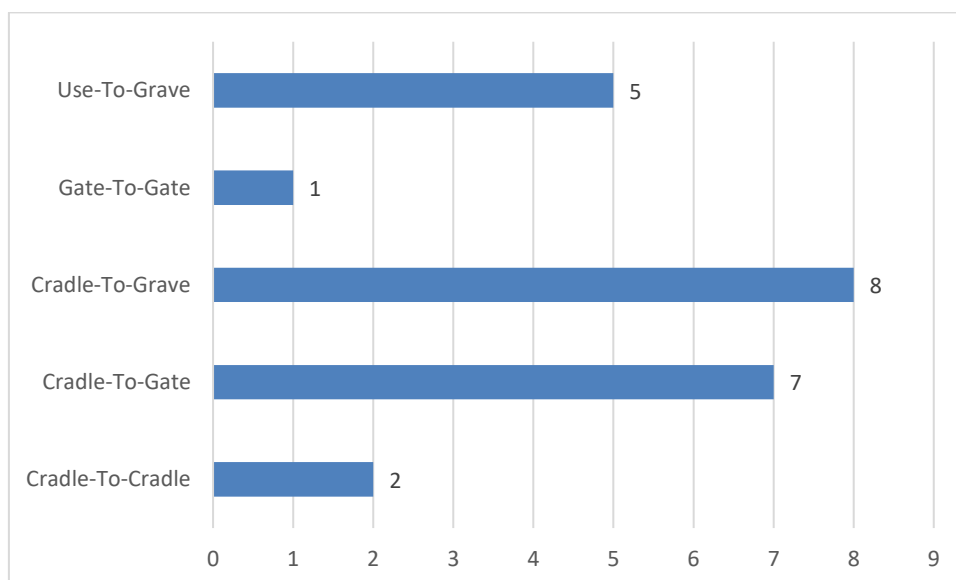
Gráfico 1: Escopo geográfico dos artigos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao escopo sistêmico, a maioria dos artigos selecionados realizou um estudo de ACV berço-ao-túmulo (“*cradle-to-grave*”) ou berço-ao-portão (“*cradle-to-gate*”) (Gráfico 2).

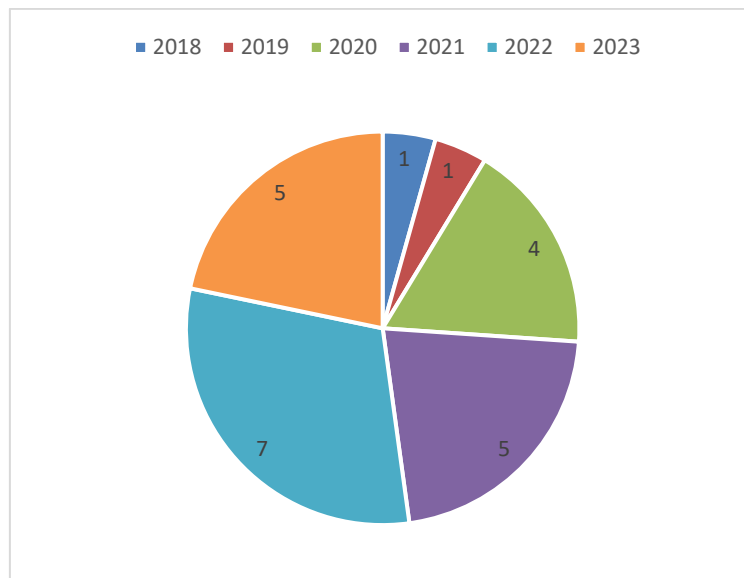
Gráfico 2: Escopo sistêmico dos artigos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

Em termos temporais, foram selecionados apenas artigos publicados nos últimos 5 anos (Gráfico 3).

Gráfico 3: Distribuição temporal de publicação dos artigos analisados

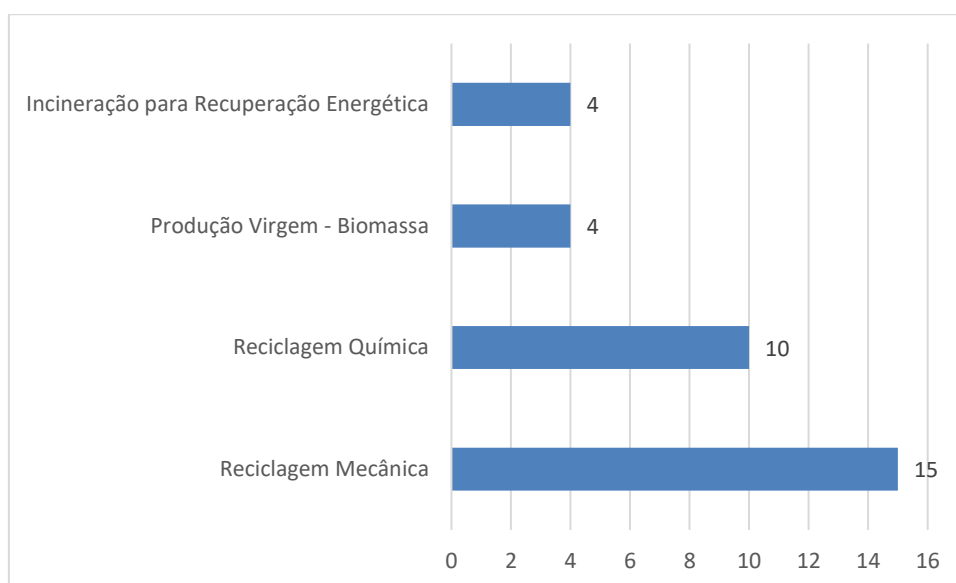


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4. Comparação de Tecnologias

Em relação às tecnologias estudadas nos artigos de ACV selecionados, há predominância de estudos dos impactos de processos de reciclagem mecânica, como os processos de reciclagem *Bottle-to-Bottle* e *Bottle-to-Fiber*, seguidos pela reciclagem química (hidrólise, metanólise, entre outros) e pela produção virgem a partir de biomassa e da incineração para recuperação energética (Gráfico 4).

Gráfico 4: Tecnologias de gerenciamento de resíduos PET dos artigos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.5. Análise dos dados da revisão bibliográfica

Os 23 artigos selecionados para análise tratavam de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida do plástico PET em diferentes países ou regiões que apresentassem unidades funcionais e categorias de impactos descritas seguindo as normas e práticas propostas pela ISO 14040, publicados nos últimos 5 anos.

Através da análise geográfica, percebe-se a predominância de estudos realizados na Europa (9 dos 23 trabalhos) em relação à outras regiões, uma vez que existem leis ambientais mais rígidas e maiores oportunidades econômicas para o setor, como discutido na Entrevista B com a advogada ambiental.

Leis como o *Green Deal* estimulam a realização de estudos de impacto ambiental de diferentes produtos através de uma ótica econômica, o que promove o desenvolvimento de um mercado de avaliações ambientais forte em comparação com o brasileiro, por exemplo, em que existe apenas um artigo publicado nos últimos 5 anos sobre o tema e que seguia as regras de seleção aplicadas. Isto corrobora o argumento da advogada sobre a falta de investimento, comunicação e parcerias público-privadas para resolução do problema de gerenciamento do resíduo plástico no Brasil.

Desta maneira, percebe-se a grande disparidade de preocupação ambiental entre países desenvolvidos, como os países europeus, e países em desenvolvimento, como países da América Latina, que não possuem muitos trabalhos publicados sobre o assunto,

como discutido na entrevista D, ressaltando as grandes diferenças culturais e legais em relação à reciclagem em realidades socioeconômicas diversas.

Os escopos sistêmicos principais desses artigos foram “*cradle-to-grave*” (8 dos 23 artigos analisados) e “*cradle-to-gate*” (7 dos 23 artigos analisados), em comparação com apenas dois estudos de “*cradle-to-cradle*”, o que demonstra a permanência da visão linear da cadeia produtiva mesmo com produtos reciclados nos estudos de ACV realizados mundialmente.

Em relação às tecnologias utilizadas para a reintrodução de PET na cadeia produtiva, a predominância de estudos de Reciclagem Mecânica (15 dos 23 artigos tratavam de técnicas deste grupo de reciclagem) está alinhada com as informações descritas na Entrevista C com o professor especialista, que a apontou como a menos custosa e com maior possibilidade de escalabilidade, além de ser a mais utilizada mundialmente.

A maioria dos resultados dos estudos selecionados demonstrou que as técnicas de reciclagem apresentavam menores impactos ambientais do que a produção virgem do plástico PET ou da queima para recuperação energética, mesmo que algumas categorias de impacto dos processos de reciclagem, como GWP, possam ser maiores do que a produção virgem.

Um estudo realizado na Europa (BALAZINSKA, et al. 2021), por exemplo, demonstrou que a reciclagem mecânica apresentava menores índices de impacto ambiental à saúde humana, ecossistemas e uso de recursos (1,38 mPt) em relação à queima para recuperação energética (2,73 mPt) e descarte em aterros (7,31 mPt), mesmo apresentando maior potencial de aquecimento global que ambas.

Os resultados também permitem a comparação entre técnicas de um mesmo grupo de reciclagem. Um deles (ITURRONDOBEITIA, et al., 2023), demonstrou que a reciclagem química através dos processos de hidrogenólise e aminólise apresentam GWP muito menor (4,3 – 5,8 kg CO₂-eq/kg de resíduo PET) em relação ao processo de glicólise (91,3kg CO₂-eq/kg de resíduo PET).

Já o estudo realizado no Brasil entre diferentes técnicas de reciclagem mecânica (GILENO, et al., 2021), demonstrou que a técnica de reciclagem *Bottle-to-Bottle* apresenta menos impactos ambientais que a técnica *Bottle-to-Fiber* na maioria das categorias de impacto, como GWP, ARD e WF no Brasil, através de uma visão “*cradle-to-gate*”. Este tipo de resultado permite que sejam feitas decisões de escolha de tecnologias para gerenciamento de resíduos de maneira mais assertiva e sustentável.

A falta de estudos de ACV de produtos plásticos no Brasil evidencia as limitações discutidas nas entrevistas A, B e D, com poucos incentivos econômicos e parcerias para a realização de programas que necessitem de avaliações ambientais avançadas no país.

Através da análise dos 23 artigos selecionados, buscou-se descrever o cenário atual de estudos de impacto ambiental através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida em diferentes regiões. Juntamente às informações trazidas pelos especialistas entrevistados, é possível concluir que o Brasil está buscando a aplicação de práticas sustentáveis, cobradas através da implementação de leis mais rígidas, mas não promove o desenvolvimento de ferramentas e estudos que auxiliem na escolha de técnicas de maior efetividade operacional e financeira, e menor impacto ambiental.

A reciclagem de plástico PET, além de apresentar-se como uma solução para o gerenciamento de resíduos plásticos e de cumprimento das leis e regras propostas pela PNRS, demonstra também oportunidades econômicas, ambientais e sociais para o Brasil, através da criação de novos produtos, geração de emprego em diferentes etapas do ciclo de vida dos produtos e diminuição do número de aterros e lixões.

Algumas técnicas de reciclagem, como a reciclagem mecânica, apresentam grande potencial de escalabilidade se aplicadas corretamente. A grande disponibilidade de mão-de-obra, de organizações de catadores e cooperativas, como discutido na entrevista B, garantem ao Brasil um cenário propício para a realização de processos de reciclagem em escala. Mas, como ressaltado na entrevista D pela especialista, ainda existem muitas limitações à aplicação em massa destes processos principalmente por dificuldades de logística reversa, como infraestrutura e acesso ao serviço de coleta seletiva insuficientes, falta de conscientização de segregação e descarte por parte da população, contaminação do material no transporte e altos custos.

Mas, para analisar se estas técnicas são realmente ideais para atingir o ponto de ACVS (Avaliação de Ciclo de Vida Sustentável), descrito na entrevista A, em que há a otimização de indicadores ambientais, econômicos e sociais da metodologia, é necessário realizar mais estudos e relatórios sobre os impactos do ciclo de vida do plástico PET no Brasil.

Para tanto, devem ser feitos estudos futuros de ACV de plástico PET com escopo sistêmico, temporal e unidade funcional padronizados, afim de permitir a compatibilidade entre estudos de diferentes técnicas em diversas regiões do país, para a classificação e

escolha do método que apresente menores impactos ambientais na área considerada através da análise de categorias de impacto padrão descritas nas regras da ISO.

Idealmente, devem ser realizados estudos “*cradle-to-cradle*”, que promovem a análise da cadeia na visão da economia circular, levando em consideração todas as etapas do ciclo de vida do produto para a construção da avaliação de impacto ambiental, desde a extração ou coleta de matéria-prima, transportes, gastos para transformação, distribuição e descarte em uma lógica circular.

Em relação à unidade funcional padrão, deve-se utilizar uma unidade de massa de resíduo PET, como uma tonelada de resíduo plástico PET, permitindo uma análise generalista, uma vez que não considera a transformação em diferentes produtos, como fibras ou grânulos, garantindo maior potencial de comparação entre estudos.

Além disso, como discutido na Entrevista A, as principais categorias de impacto utilizadas devem ser Potenciais de Aquecimento Global, Pegada Hídrica, Depleção de Recursos Abióticos Fósseis, Uso e Transformação do Solo e Potencial de Formação de Material Particulado

Deve-se aplicar estas práticas para permitir a comparação de diferentes técnicas de gerenciamento e reintrodução de resíduo plástico PET na cadeia de valor para diferentes regiões brasileiras através de estudos de ACV, tornando as decisões e escolhas de planejamento de gerenciamento de resíduos sólidos, obrigatória pela PNRS, como o desenvolvimento em infraestrutura e investimentos em maquinário, ambientalmente orientadas através de dados concretos.

5. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo desse trabalho foi investigar a possibilidade de comparação de impactos ambientais entre diferentes modelos de introdução e reintrodução de plástico PET na cadeia de valor no Brasil, através de uma revisão da bibliografia disponível, complementado por entrevistas com especialistas sobre a metodologia de ACV, legislação de resíduos sólidos, aspectos tecno-econômicos e sobre coleta de resíduos.

Juntamente às limitações descritas pelos especialistas entrevistados, entende-se que atualmente, no Brasil, a preocupação com a análise de impactos ambientais, por mais que crescente, ainda é muito recente e superficial, com poucos estudos sendo realizados de maneira padronizada. Isso impossibilitou a comparação de estudos de diferentes técnicas de reciclagem de PET em relação à ACV.

Além disso, a falta de parcerias público-privadas, de infraestrutura e de programas robustos de gestão de resíduos sólidos, somadas à poucos incentivos fiscais para a indústria privada (segundo setor), dificulta a implementação de programas e práticas de estímulo à economia circular, tornando a aplicação de leis, como a PNRS, uma obrigação teórica que dificilmente será imposta plenamente.

Através da análise das entrevistas e da revisão bibliográfica realizada, conclui-se que a aplicação de leis de gestão de resíduos sólidos no Brasil não será eficaz sem o incentivo econômico, sem instrumentos técnicos e logísticos adequados, e sem metodologias de comparação entre modelos de reintrodução de materiais na cadeia de valor que possibilitem tomadas de decisões baseadas em dados concretos pelos atores responsáveis.

Dessa maneira, idealmente, seria necessário realizar, em paralelo, estudos de Avaliação de Ciclo de Vida, Custo de Ciclo de Vida, Avaliação Social de Ciclo de Vida, roteirização de coletas para otimização da logística reversa, e um estudo técnico de qualidade final dos produtos de maneira padronizada, utilizando as mesmas unidades funcionais e escopos sistêmicos para comparar diferentes técnicas em termos de geração de impacto ambiental, custos, impactos sociais, e qualidade final dos produtos, através das mesmas categorias de impacto, em diferentes regiões do país.

Assim, seria possível se construir um cenário completo da situação atual dos resíduos sólidos plásticos no Brasil, possibilitando a escolha de um modelo ótimo de gerenciamento para cada região através da otimização dos índices analisados pelos estudos citados, afim de buscar o ponto de Avaliação de Ciclo de Vida Sustentável, em

que há a maximização ou minimização de índices constantemente para a criação de um sistema mais sustentável, levando em consideração também aspectos econômicos, sociais, logísticos e técnicos para a escolha do modelo mais adequado.

A partir dessa escolha, investimentos tecnológicos e de conscientização da população deveriam ser realizados a fim de garantir a escalabilidade dessa solução, tornando a reciclagem de plástico PET um processo de fechamento de cadeia de valor do material, permitindo a diminuição dos impactos ambientais causados pela produção virgem e o cumprimento das leis propostas pelo Brasil para o gerenciamento de resíduos plásticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST, **Perfil das Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil em 2022**, 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/perfil-2022-da-abiplast-apresenta-dados-atualizados-sobre-a-industria-do-plastico-no-brasil/>

ABNT, **ABNT NBR ISO 14040**. Segunda edição, jul. 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5759669/mod_folder/content/0/NBR%20ISO%2014040%20-%20GA-ACV%20-%20Princ%C3%ADpios%20de%20estrutura.pdf?forcedownload=1

ANDREASI, S., et al., **Environmental and Socioeconomic Impacts of Poly(ethylene terephthalate) (PET) Packaging Management Strategies in the EU**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85121047065&doi=10.1021%2fac.s.est.1c00761&partnerID=40&md5=04b0b4ebe0acab74e9a4f01ddfbecb6f>

ARYAN, Y., et al., **Life Cycle Assessment of the existing and proposed plastic waste management options in India: A case study**. 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85059323519&doi=10.1016%2fj.jclepro.2018.11.236&partnerID=40&md5=122f24e6f2c981e8ccef3daf7865731>

BALAŻIŃSKA, M., et al., **The environmental impact of various forms of waste PET bottle management**. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098599724&doi=10.1080%2f13504509.2020.1865473&partnerID=40&md5=bf1a1495af67004f340b55c0ee7f32d9>

BARNARD, E., et al., **Chemolytic depolymerisation of PET: a review**. Green Chemistry, vol. 23, p. 3765-3789, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/gc/d1gc00887k/unauth>

BARRET, L., **Sustainable growth of non-fed aquaculture can generate valuable ecosystem benefits**. Ecosystem Services, vol. 53, fev. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041621001546>

BARROS, M., SALVADOR, R., **Circular economy as a driver to sustainable business**. Cleaner Environmental Systems, vol. 2, jun. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85120435965&origin=inward&txGid=d43c81596cc5ad328bd2b406a9aa9b6c>

BATAINEH, K.M., et al., **Life-Cycle Assessment of Recycling Postconsumer High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate**. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85082773166&doi=10.1155%2f2020%2f8905431&partnerID=40&md5=f58ab50525a872649c5c3ca4ca866ab1https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84927564255&origin=inward&txGid=826b88428a6bf3d61a5354c17776cba5>

BENAVIDES, P., et al., **Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering., vol. 6, 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acssuschemeng.8b00750>

BENYUS, J., **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. 2003. Disponível em: <https://aracnetool.eu/sites/default/files/biomimicry-innovation-inspired-by-nature-janine-m-benyus-pdf-download-free-book-2bc616e.pdf>

BHANDERI, K., et al., **Recycling of polyethylene terephthalate (PET or PETE) plastics – An alternative to obtain value added products: A review**. Journal of the Indian Chemical Society. vol. 100, jan. 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019452222005052?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8147b96e9c854b41

BJØRNBET, M., **Circular Economy in manufacturing companies: a review of case study literature**. Journal of Cleaner Production, vol. 294, abr. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85100734286&origin=inward&txGid=5173cb6191f5e81e84a4a4de7b0083e0>

BOCKEN, N. **Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy**. Journal of Industrial Ecology, vol. 21, p. 476-482, jun. 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85018432911&origin=inward&txGid=6698987a19a075918ec69dd542ffd9cc>

BORRELLE, S., **Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution**. Science, vol. 369, p. 1515-1518, set. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85091192245&origin=inward&txGid=26136660a47133b6f7ef4b266ef176f8>

BRAUNGART, M., **Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design**. Journal of Cleaner Production, vol. 15, p. 1337-1348, 2007. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-33947508159&origin=inward&txGid=80810438d8fd18b20c9d20b66242aac4>

BROOKS, A.L., **The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade**. Science Advances, vol. 4, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aat0131?rss=1&intcmp=trendmd-adv>

CÂMERA DOS DEPUTADOS, **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 3ª edição, 2017. Disponível em: https://bd.camara.leg.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/14826/politica_residuos_solidos_3ed.reimp.pdf?sequence=20&isAllowed=y#:~:text=Art.,final%20ambientalmente%20adequada%20dos%20rejeitos.

CHAIRAT, S., et al., **Life cycle assessment and circularity of polyethylene terephthalate bottles via closed and open loop recycling**. 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85166334288&doi=10.1016%2fj.envres.2023.116788&partnerID=40&md5=409d130889271d7acfa3a316557582db

CHANDA, M., **Chemical aspects of polymer recycling**. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, vol. 4, jul. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504821000336>

CHERTOW, M., **Organizing Self-Organizing Systems: Toward a Theory of Industrial Symbiosis**. Journal of Industrial Ecology, vol. 16, p. 13-27, 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84858614472&origin=inward&txGid=2c07147b438261ab9982fa3c0fe08463>

CHIRAYIL, C., et al., 3 – **Materials Recovery, Direct Reuse and Incineration of PET Bottles**. Plastics Design Library, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128113615000031>

CLINE, A., **A framework for reverse logistics: the case of post-consumer carpet in the US**. International Journal of Commerce and Management, vol. 25, p. 466-489, nov. 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84946735663&origin=inward&txGid=7a87d5f765884b7d7289dbd3a5694cde>

CORNAGO, S., et al., **Stochastic consequential Life Cycle Assessment of technology substitution in the case of a novel PET chemical recycling technology**. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85107147771&doi=10.1016%2fj.jclepro.2021.127406&partnerID=40&md5=e038c46cd817f8ea4f0dcb1fe912f186>

CRUZ SANCHEZ, F., **Plastic recycling in additive manufacturing: a systematic literature review and opportunities for the circular economy**. Journal of Cleaner Production, vol. 264, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85083723147&origin=inward&txGid=ad473a15758a27594f13e401985ec881>

DAMAYANTI, D., et al., **Strategic Possibility Routes of Recycled PET**. Polymers, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/9/1475>

DE BRITO, M., **A framework for reverse logistics**. 2004. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-24803-3_1

DE PASCALE, A., **A systematic review for measuring circular economy: the 61 indicators**. Journal of Cleaner Production, vol. 281, jan. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85095993160&origin=inward&txGid=2f824f4371aa3c52b3c495a0d625733e>

DE SOUZA, C., D'AGOSTO, M., **Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry**. Resources, Conservation and Recycling, vol. 78, p. 15-25, 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84880716839&origin=inward&txGid=918347ed7e8516dae0617ce2ed2a09a2>

DOS SANTOS, M.C.LM VILLAC, T., **Chapter 7 – Law and Public Management of Solid Waste in Brazil: A Historical-Critical Analysis**. Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches, p. 101-103, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444642004000074>

DOWLATSHAHI, S., **Developing a theory of reverse logistics**. Interfaces, vol. 20, p. 143-155, mai. 2000. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0010896025&origin=inward&txGid=716319e1f495c3ff0cdda790dd91c039>
 ECOCHAIN, **Life Cycle Assessment (LCA) – Complete Beginner’s Guide**. Ecochain, 2023. Disponível em: <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/>

ECYCLE, **O que é Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2023. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/politica-nacional-de-residuos-solidos/>

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, **The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action**. 2017.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, **polyethylene terephthalate**. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/polyethylene-terephthalate>

EUROPEAN PARLIAMENT – EU, **Directive 2008/98/EC**. Disponível em: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/218586/31220081122en00030030.pdf

GARCÍA-VELÁSQUEZ, C., et al., **Design of biobased supply chains on a life cycle basis: A bi-objective optimization model and a case study of biobased polyethylene terephthalate (PET)**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85122931555&doi=10.1016%2fj.spc.2022.01.003&partnerID=40&md5=6ab5f7c725338b1aed1a82bbfafdea13>

GEORGE, N., KURIAN, T., **Recent developments in the chemical recycling of postconsumer poly(ethylene terephthalate) waste**. Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 53, p. 14185-14198, ago. 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84978083032&origin=inward&txGid=5a8401e668cf15c7875342b4ea2e399a>

GILENO, L. A., TURCI, L. F., **Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes**. Cleaner Environmental Systems, vol. 3, dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666789421000490>

GOVIDAN, K., **Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future**. European Journal of Operational Research, vol. 240, p. 603-626, fev. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714005633>

GRAEDEL T.E., **On the concept of Industrial Ecology**. Annual Review of Energy and the Environment, vol. 21, p. 69-98, 1996. Disponível em:

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0030385684&origin=inward&txGid=bf60eb0b25bb8d17fd6122c64c072c62>

GRAEDEL, T.E, ALLENBY, B.R., **Industrial Ecology**. Industrial Ecology, 1994. Disponível em: https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf/e05_0-13-046713-8_01.pdf

GUIDE, V.D.R., VAN WASSENHOVE, L.N., **The evolution of closed-loop supply chain research**. Operations Research, vol. 57, p. 10-18, 2009. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-61449118693&origin=inward&txGid=f613eadf3ceb76e56b050de0a444abec>

GUNDUPALLI, S., **A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling**. Waste Management, vol. 60, p. 56-74, fev. 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84994792251&origin=inward&txGid=dd311cb68526601472d34830307658b6>

GURSEL, I.V., et al., **Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of bio-based and petrochemical PET bottles**. Science of The Total Environment, vol. 793, nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721037141>

HALLSTEAD, S., **Sustainability criteria and sustainability compliance index for decision support in product development**. Journal of Cleaner Production, vol. 140, p. 251-266, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84933575402&origin=inward&txGid=9504161046164ad0be570f864767ff2f>

HALLSTEDT, S.I., **Sustainability Fingerprint – guiding companies in anticipating the sustainability direction in early design**. Sustainable Production and Consumption, vol. 37, p. 424-442, mai. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550923000593#bb0425>

HELMES, R.J.K., et al., **Environmental Impacts of End-of-Life Options of Biobased and Fossil-Based Polyethylene Terephthalate and High-Density Polyethylene Packaging**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85138883887&doi=10.3390%2fsu141811550&partnerID=40&md5=b04c7635f43d79f50408ae904851e834>

HOROWITZ, N., et al., **Life cycle assessment of bottled water: A case study of Green2O products**. 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042646174&doi=10.1016%2fj.wasman.2018.02.043&partnerID=40&md5=fe0aec9474c25b738b8b9719b63bf393>

HUPPES, G., **Eco-efficiency guiding micro-level actions towards sustainability: Ten basic steps for analysis**. Ecological Economics, v. 68, p. 1687-1700, 2009. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-62349133323&origin=inward&txGid=1912a6f6b25313ef7946abd8d853de6d>

INGRAO, C., et al., **Findings from a streamlined life cycle assessment of PET-bottles for beverage-packaging applications, in the context of circular economy.** 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85162172573&doi=10.1016%2fj.scitotenv.2023.164805&partnerID=40&md5=2663ab1dd93b5e12fd0bc533ead836b4>

ITURRONDOBEITIA, M., et al., **Prospective life cycle assessment of poly (ethylene terephthalate) upcycling via chemoselective depolymerization.** 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85172939889&doi=10.1016%2fj.resconrec.2023.107182&partnerID=40&md5=f6c1ecb3b70ea36e9e6c043679a1900c>

IYYANKI, M., et al., **Life Cycle Assessment.** Environmental Management, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128119891000051>

JELINSKI, L.W., **Industrial Ecology: concepts and approaches.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 89, p. 793-797, 1992

KARALI, N., **Bolstering supplies of critical raw material for low-carbon technologies through circular economy strategies.** Energy Research and Social Science, vol. 88, jun. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85124013785&origin=inward&txGid=390feb0f77c774c681332a9c8277ba1d>

KERR, R.B., **Agroecology as a transformative approach to tackle climatic, food and ecosystemic crises.** Current Opinion in Environmental Sustainability, vol. 62, jun. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343523000222>

KHADKE, S., **Efficient plastic recycling and remolding circular economy using the technology of trust-blockchain.** Sustainable Times, vol. 13, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9142>

KING, S., **A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review.** Journal of Cleaner Production, vol. 364, set. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622021047>

KINGSBURY, T., **Chemical Recycling Types: Advantages and Disadvantages.** Energy and Industrials GLG, mai. 2022. Disponível em: <https://glginsights.com/articles/chemical-recycling-types-advantages-and-disadvantages/>

KORHONEN, J. **Circular Economy: The Concept and its Limitations.** Ecological Economics, vol 143, p. 37-46, jan. 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85030676608&origin=inward&txGid=b880d18331e20ea5d3b640a4b4c15e05>

LANG, W.T., et al., **Chemical recycling of polyethylene terephthalate, an industrial and sustainable opportunity for Northwest of England.** 2023. Disponível em:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85166022785&doi=10.1016%2fj.jece.2023.110585&partnerID=40&md5=21ba21d4c56146e170e137bd36eaaab>

LAVILLE, S., TAYLOR, M., **A million bottles a minute: world's plastic binge 'as dangerous as climate change'**. The Guardian, jun. 2017. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>

LEÓN, N., et al., **Implications of the Circular Economy in the Context of Plastic Recycling: The Case Study of Opaque PET**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85141864630&doi=10.3390%2fpolym14214639&partnerID=40&md5=c8e9da23c655c540bfb9b7309d108375>

LEPOITTEVIN, B. et al., **Poly (ϵ -caprolactone)/clay nanocomposites prepared by melt intercalation: mechanical, thermal and rheological properties**. Polymer, vol. 43, 2002. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma020300w?casa_token=Wi4ob2i8PzUAAAAA:ccuFJEbfkbc-9UMUW1YTVgKj56XLzK2h03kGmYq88cXPy4BRx7EL8gQhypKreSuueTw9SEP7NCFLmk3

LEWANDOWSKI, M., **Designing the business models for circular economy – Towards the conceptual framework**. Institute of Public Affairs Jagiellonian University, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/1/43>

LI, Y., **Conservational agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis**. Soil Biology and Biochemistry, vol. 121, jun. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300737>

LIM, J., **Optimal strategy to sort plastic waste considering economic feasibility to increase recycling efficiency**. Process Safety and Environmental Protection, vol. 165, p. 420-430, set. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582022006231>

LIU, Q., et al., **Comparative analysis of the environmental impact of virgin and recycled PET fibers based on life cycle assessment**. 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85175850110&doi=10.12153%2fj.issn.1674-991X.20220835&partnerID=40&md5=d6c712c5a975aa7882a745701f9a1339>

MACARTHUR, E., **Towards the Circular Economy**, Ellen MacArthur Foundation, 2013. Disponível em: https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf

MACHADO, A., et al., **Microplastics as na Emerging Threat to Terrestrial Ecosystemas**. *Global Change Biology*, vol. 4, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

MALLICK, P., **Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review**. *Journal of Environmental Management*, vol. 328, fev. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722025907#bib82>

MANZINI, E. J, **Considerações sobre a elaboração de roteiro para entrevista semiestruturada**. Colóquios sobre pesquisa em Educação Especial, 2003.

MATTOS FILHO, **Livreto de Resíduos Sólidos**. 2022, 2023. Disponível em: <https://www.mattosfilho.com.br/wp-content/uploads/2022/07/220707-livreto-residuos-solido.pdf>

MEYS, R., et al., **Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling**. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85087972211&doi=10.1016%2fj.resconrec.2020.105010&partnerID=40&md5=e436359e6548768bcd953e254c028fdb>

MIGUEL, P. A., **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. *Production*, vol. 17, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/zhVnv4mW8pvWc3hTxvfXt4L/>

MORDOR INTELLIGENCE, **Mercado de embalagens PET – Crescimento, Tendências, Impacto da COVID-19 e Previsões (2023 – 2028)**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/pet-packaging-market>

MUHIE, S., **Novel approaches and practices to sustainable agriculture**. *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 10, dez. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266615432200179X>

NASCIMENTO, V. F., **Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil**. *Revista Ambiente & Água*, vol. 10, dez. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/NrqL6pPNpMRShCvQbKPWDhg/?lang=pt>

NISTICÒ, R., **Polyethylene terephthalate (PET) in packaging industry**. *Polymer Testing*, vol. 90, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941820310333>

OECD, **Overview of the OECD Sustainable Manufacturing Indicators**. 2023. Disponível em: <https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/oecd-sustainable-manufacturing-indicators.htm>

OMNEXUS, **Comprehensive Guide on Polyethylene Terephthalate (PET)**. Disponível em: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet->

plastic#:~:text=It%20is%20recyclable%20and%20shows,%2C%20electronics%2C%20and%20many%20more. (acessado Setembro 2023)

ORTEGON, K., **Preparing for end of service life of wind turbines**. Journal of Cleaner Production, vol. 39, p. 191-199, jan. 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84867573961&origin=inward&txGid=6400cb557cf6a7bed3c8ca27513b7bc2>

PALEA, V. **Are circular economy strategies economically successful? Evidence from a longitudinal panel**. Journal of Environmental Management, 2023

PARK, S. H., KIM, S. H., **Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textile**. Fashion and Textiles, vol. 1 (2014). Disponível em: <https://fashionandtextiles.springeropen.com/articles/10.1186/s40691-014-0001-x>

PARKER, L., **How the plastic bottle went from miracle container to hated garbage**. National Geographic Environment, ago. 2019. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-bottles#:~:text=Polyethylene%20terephthalate%20has%20been%20around,safe%2C%20cheap%E2%80%94and%20recyclable.>

PAYNE, J., **A circular economy approach to plastic waste**. Polymer Degradation and Stability, vol. 165, p. 170-181, jul. 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391019301727?casa_token=ifi-18OXEe0AAAAA:ASZ_Hznxu0w4uWoEDyiSrJF-f50-UUrQhTxsyhk39yvw_cMBi19MDJH6iuI4fDV3e7qZXsBg

PEÑA-MONTOYA, C., **Assessment of maturity of reverse logistics as a strategy to sustainable solid waste management**. Waste Management and Research, vol. 38, p. 65-76, mai. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85081654594&origin=inward&txGid=f34cf61ff644ff0a047b6f4ef33a245a>

PLASTIC INSIGHT, **Polyethylene Terephthalate (PET): Production, Price, Market and its Properties**. 2016.

PLÁSTICO MODERNO, **Em 2020, o PET mostrou sua força e flexibilidade – ABI PET**. Plastico Moderno, jan. 2021. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/em-2020-o-pet-mostrou-sua-forca-e-flexibilidade-abipet/>

PLASTICS EUROPE, **What are thermoplastics**. Disponível em: <https://plasticseurope.org/plastics-explained/a-large-family/thermoplastics/>

QUANDT, A., **Climate change and adaptation through agroforestry: opportunities and gaps**. Current Opinion in Environmental Sustainability, vol. 60, fev. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343522000963>

RASHID, A. **Resource Conservative Manufacturing: an essential change in business and technology paradigm for sustainable manufacturing**. Journal of Cleaner Production, vol. 57, p. 166-177, oct. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613003934#bib13>

REDE ASTA, **O que são resíduos sólidos: Por que o Brasil criou uma legislação para resíduos sólidos**. Jun. 2022. Disponível em: <https://www.redeasta.com.br>

RITCHIE, H., ROSER, M., **Plastic Pollution**. Our World in Data. Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

ROGERS, D.S., **Going backwards: reverse logistics trends and practices**. Reverse Logistics Executive Council, 1998

ROOZENBURG, N., EKELS, J., **Product Design: fundamentals and methods**, 1995

ROSSI, E., BERTASSINI, A. C., **Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-eletronic cases**. Journal of Cleaner Production, vol. 247, fev. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85075451055&origin=inward&txGid=b52e296ebbe56112eaa5b0548f8113a4>

RYBACZEWSKA-BLAZEJOWSKA, M., et al., **Circular economy: Comparative life cycle assessment of fossil polyethylene terephthalate (PET) and its recycled and bio-based counterparts**. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85100179907&doi=10.24425%2fmper.2020.136126&partnerID=40&md5=80a8022ebcb1d0aa67aeb9a27d9fbe4f>

SGARBOSSA, F., RUSSO, I., **A proactive model in sustainable food supply chain: Insight from a case study**. International Journal of Production Economics, vol. 183, p. 596-606, jan. 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84994330124&origin=inward&txGid=f272d2148d803b8fd62c076fe37e563c>

SHAN, C., et al., **Environmental Impact of Plastic Recycling in Terms of Energy Consumption: A Comparison of Japan's Mechanical and Chemical Recycling Technologies**. Energies, fev. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/5/2199>

SHARUDDIN, S., **A review on pyrolysis of plastic wastes**. Energy Conservation Management, v. 115, p. 308-326, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416300619>

SHELDON, R., NORTON, M., **Green Chemistry and the plastic pollution challenge: Towards a circular economy**. Green Chemistry, vol. 22, p. 6310-6332, out. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85095136913&origin=inward&txGid=d463a0bcfec4c99b0d4afdc0bbc3249f>

SINGH, A., et al., **Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly(ethylene terephthalate)**. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114697435&doi=10.1016%2fj.joule.2021.06.015&partnerID=40&md5=6f2a4e368c9fdd9a4e7d4eb8abc0011a>

SOARES, E. A., **Poli(tereftalato de etileno (PET))**. Plástico Industrial, dez. 2021. Disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/1681-Poli\(tereftalato-de-etileno\)-\(PET\).html](https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/1681-Poli(tereftalato-de-etileno)-(PET).html)

SOONG, Y., et al., **Recent advantages in biological recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic wastes**. Bioengineering, fev. 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8945055/>

STEVENSON, R., **Editorial to: Cutting across interests: Cleaner production, the unified force of sustainable development**. Journal of Cleaner Production, vol. 12, p. 185-187, abr. 2004. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0242367281&origin=inward&txGid=6bec63a315a1b46a5ddae52e047b480>

SUAREZ, A., et al., **Rethinking the use of bio-based plastics to accelerate the decarbonization of our society**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135688810&doi=10.1016%2fj.resconrec.2022.106593&partnerID=40&md5=f8afd56706396d4955f16ad84d6c552d>

SUDAKOV, A., et al., **Innovative technology for insulating the borehole absorbing horizons with thermoplastic materials**. E3S Web of Conferences, vol. 123, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Physical-properties-of-polyethylene-terephthalate_tbl1_336728943

TAMMOOR, M., et al., **The Cradle-to-Cradle Life Cycle Assessment of Polyethylene terephthalate: Environmental Perspective**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85126043505&doi=10.3390%2fmolecules27051599&partnerID=40&md5=f769bc6fa94c940d54cf487f6b574a29>

TONANONT, A., **Performance evaluation in reverse logistics with data envelopment analysis**, 2009. Disponível em: <https://rc.library.uta.edu/uta-ir/handle/10106/1904>

UEKERT, T., et al., **Life cycle assessment of enzymatic poly(ethylene terephthalate) recycling**. 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85136162604&doi=10.1039%2fd2gc02162e&partnerID=40&md5=2da64c127a4beed7ee4e725adb328ac6>

ULISES, R., **Circular Economy Sustainability Analysis Framework for Plastics: Application for Polyethylene Terephthalate (PET)**. ACS Sustainable Chemistry Engineering, vol. 11, p. 514-524, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssuschemeng.2c04626?src=getftr>

UN, **Unlocking Circular Economy Finance in Latin America and the Caribbean: The Catalyst for a Positive Change**. UM Environment Programme, mar. 2023. Disponível em: <https://www.unepfi.org/publications/unlocking-circular-economy-finance-in-latin-america-and-the-caribbean-the-catalyst-for-a-positive-change/>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), **Understanding Global Warming Potentials**. 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

UNITED STATES, **Hazardous Waste Characteristics: A User-Friendly Reference Document**, out. 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/user-friendly-reference-document-hazardous-waste-characteristics>

VAN DER WIEL, A., **Reverse logistics for waste reduction in cradle-to-cradle-oriented firms: Waste management strategies in the Dutch metal industry**. International Journal of Technology Management, vol. 60, p. 96-113, set. 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84866507967&origin=inward&txGid=04db56dd59fafaef22b0f23d2c8c163>

VEGTER, D., **Supply chains in circular business models: processes and performance objectives**. Resources, Conservation and Recycling, vol. 162, nov. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85087766543&origin=inward&txGid=29476ca4f36dbb7d2e07451c833d1605>

VIEIRA, O., **A systematic literature review on the conversion of plastic wastes into valuable 2D graphene-based materials**. Chemical Engineering Journal, vol. 428, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721029806?pes=vor>

VURAL, I., et al., **Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of bio-based and petrochemical PET bottles**. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111026412&doi=10.1016%2fj.scitotenv.2021.148642&partnerID=40&md5=28eba5668318e03574039e4d143fbb41>

WORLD BANK, **What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management In 2050**. 2019. Disponível em: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

WWF AUSTRALIA, **The Lifecycle of Plastics**. Jul. 2021. Disponível em: <https://wwf.org.au/blogs/the-lifecycle-of-plastics/>

XIE, Y., **Who cares wins? A comparative analysis of household waste medicine and batteries reverse logistics systems: The case of the NHS (UK)**. Supply Chain Management, vol. 19, p. 455-474, jun. 2014. Disponível em: GILENO, L.A., et al., Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85125770885&doi=10.1016%2fj.cesys.2021.100057&partnerID=40&md5=e08950ad9f3cc1a16fc4d190d25b644b>

ZHANG, R., et al., **PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles**. 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077736141&doi=10.1016%2fj.jenvman.2019.110062&partnerID=40&md5=8f0b51b0c67494eb6297df758d4d5345>