



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DANILO LINS SANT'ANA DE LIMA**

**AVALIAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES E TECNOLOGIAS DE  
TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E PLÁSTICOS  
NA UNIÃO EUROPEIA, EUA E BRASIL**

Salvador

2024

**DANILO LINS SANT'ANA DE LIMA**

**AVALIAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES E TECNOLOGIAS DE  
TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E PLÁSTICOS  
NA UNIÃO EUROPEIA, EUA E BRASIL**

Dissertação submetida ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Química  
da Universidade Federal da Bahia-UFBA,  
como requisito parcial para obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Magalhães Pontes

Salvador

2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete  
Sinay Neves, Escola Politécnica - UFBA.

---

L732 Lima, Danilo Lins Sant'ana de.  
Avaliação das legislações e tecnologias de tratamento de resíduos  
sólidos e plásticos na União Europeia, EUA e Brasil / Danilo Lins Sant'ana  
de Lima. – Salvador, 2024.  
116f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Magalhães Pontes.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Química, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2024.

1. Resíduos sólidos – tratamento - legislação. 2. Plásticos. 3.  
Reciclagem. I. Pontes, Luiz Antônio Magalhães. II. Universidade Federal  
da Bahia. III. Título.

CDD: 628.44

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



A Comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação “**AVALIAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES E TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E PLÁSTICOS NA UNIÃO EUROPEIA, EUA E BRASIL**” como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Salvador, 15 de fevereiro de 2024.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 LUIZ ANTONIO MAGALHAES PONTES  
Data: 14/02/2024 19:38:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dr. LUIZ ANTONIO MAGALHAES PONTES, UFBA**

Examinador Interno ( Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 LEILA MARIA AGUILERA CAMPOS  
Data: 14/02/2024 20:01:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**LEILA MARIA AGUILERA CAMPOS, UFBA**

Examinadora Interna

Documento assinado digitalmente  
 JOSE CARLOS COSTA DA SILVA PINTO  
Data: 15/02/2024 10:34:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dr. JOSÉ CARLOS COSTA DA SILVA PINTO, UFRJ**

Examinador Externo à Instituição

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão à minha família, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e ajudando com o meu futuro. Ao meu pai, agradeço o constante apoio, as conversas e momento preciosos compartilhados no cotidiano. À minha mãe, reconheço sua incrível dedicação, mesmo diante da sobrecarga de trabalho, sempre encontrando tempo para estar ao meu lado. À minha irmã, agradeço por ser mais do que uma irmã, sendo também uma amiga confiável, sempre pronta a oferecer suporte quando necessário. Ao meu irmão, agradeço a amizade sincera e pelas inúmeras conversas enriquecedoras sobre variados temas. Expresso minha gratidão a Zezé, que desempenha o papel de uma segunda mãe em minha vida. Agradeço ao meu cachorro Dudu por sua constante presença, proporcionando-me uma distração nos momentos mais desafiadores.

Um agradecimento especial vai para meu amigo Pontes, que além de ser meu orientador, esteve sempre disponível para conversas amigáveis e conselhos valiosos sobre a vida. Agradeço-lhe pela paciência, pela orientação fundamental durante o mestrado e pela ajuda na conclusão deste projeto. Agradeço a Alisson pela amizade ao longo do último ano, superando dificuldades juntos e oferecendo apoio fundamental na reta final do mestrado.

Não posso deixar de expressar minha profunda gratidão aos amigos que fizeram parte da minha infância e continuam presentes em minha vida, proporcionando horas de descontração e esquecimento dos problemas cotidianos por meio de conversas, jogos e encontros esporádicos.

À PPEQ/UFBA e Unifacs, agradeço o apoio em disponibilizar um ambiente propício e ferramentas essenciais que facilitaram minha jornada acadêmica. Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos durante o mestrado.

Por fim, agradeço a todos que me apoiaram, desejando sinceramente que todos alcancem a felicidade. Espero, no futuro, retribuir esse apoio da mesma forma que tenho recebido.

Obrigado!

## RESUMO

A destinação dos resíduos sólidos é um problema global, sendo a disposição crescente e indiscriminada no solo e nas águas de rios e oceanos a causa de impactos ambientais de difícil solução. Os resíduos plásticos, em particular, possuem o agravante de demorar centenas de anos para se decompor, em conjunto aos microplásticos, que têm afetado toda a cadeia alimentar. Enquanto a não geração de resíduos plásticos é quase uma utopia, a implementação de novas tecnologias e modernização da legislação visando a disposição e o tratamento de resíduos com menos impacto ambiental é de suma importância para a sustentabilidade global. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os avanços na legislação no mundo ocidental, tendo como modelo a União Europeia, os Estados Unidos e o Brasil, e analisar as tecnologias de tratamento e de disposição dos resíduos sólidos e plásticos, comparando o grau de maturidade de sustentabilidade entre as nações estudadas. Para isso, foi realizado uma extensa pesquisa em banco de dados oficiais sobre a legislação nesses países e na literatura mundial, realizando a compilação e a análise crítica dos dados. Como resultado, verificou-se, através das linhas cronológicas das legislações traçadas, que a Europa sempre esteve na vanguarda na problemática dos resíduos plásticos, apresentando alto grau de reciclagem (45%) e recuperação energética (34%) buscando a diminuição do uso de aterros, que, ainda, é a principal forma de disposição nos Estados Unidos (79%). O Brasil, embora tenha realizado grandes avanços na legislação ainda não conseguiu pôr em prática, de forma eficiente, os planos de ação traçados. O País apresenta resultados incipientes com o aterro em céu aberto ou soterrado, denominados “lixões” e “aterros controlados” representando 39% da disposição final de resíduos sólidos. Na avaliação das tecnologias de disposição e tratamento de resíduos plásticos, verifica-se que a reciclagem é a forma mais eficiente de diminuir os impactos ambientais causados pelo uso do plástico. A reciclagem mecânica é a mais utilizada atualmente, mesmo apresentando limitações que possibilitam o surgimento de novas tecnologias de tratamento, como a pirólise, um dos processos de reciclagem química que tem sido alvo de pesquisas e inovações visando maior economicidade e sustentabilidade dos processos.

Palavras-chave: Legislação, Plásticos, Destinação de resíduos sólidos, Tratamento de resíduos plásticos, Reciclagem de plásticos

## **ABSTRACT**

The destination of solid waste is a problem that affects all nations, and the increasing and indiscriminate disposal on land and in the waters of rivers and oceans has caused environmental problems that are difficult to solve. Plastic waste has the aggravating factor of taking hundreds of years to decompose, and microplastics have affected the entire food chain. While the non-generation of plastic waste is almost a utopia, the implementation of new technologies and the modernization of legislation aimed at the disposal and treatment of waste with less environmental impact are of major importance for global sustainability. In this context, the objective of this work was to evaluate advances in legislation in the Western world, using the European Union, the United States, and Brazil as models, and to analyze technologies for the treatment and disposal of solid and plastic waste, comparing the degree of sustainability maturity among the nations studied. To achieve this, extensive research was conducted in official databases on legislation in these countries and in global literature, compiling and critically analyzing the data. As a result, it was observed, through the chronological timelines of the traced legislations, that Europe has always been at the forefront of the issue of plastic waste, showing a high degree of recycling (45%) and energy recovery (34%) aiming to reduce the use of landfills, which remains the primary disposal method in the United States (79%). Brazil, although making significant advances in legislation, has not yet been able to efficiently implement the outlined action plans. The country has incipient results with open-air or buried landfills, referred to as "lixões" and "aterro controlado", representing 39% of the final disposal of solid waste. In the evaluation of plastic waste disposal and treatment technologies, it is evident that recycling is the most efficient way to reduce environmental impacts caused by plastic. Mechanical recycling is currently the most worldwide used practice, despite its limitations, enabling the emergence of new treatment technologies, such as pyrolysis, one of the chemical recycling processes, which has been the focus of research and innovations aiming for greater cost-effectiveness and sustainability of processes.

Keywords: Legislation, Plastics, Solid Waste Destination, Plastic Waste Treatment, Plastic Recycling

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das etapas aplicadas no desenvolvimento da metodologia ...	14
Figura 2: Esquema representativo do planejamento da pesquisa desenvolvida.....	15
Figura 3: Etapas do método para a comparação das destinações de resíduos plásticos .....	18
Figura 4: Metodologia para a coleta de informações na Scopus .....	19
Figura 5: Linha cronológica da legislação europeia.....	20
Figura 6: Linha cronológica da legislação americana.....	26
Figura 7: Linha cronológica da legislação brasileira .....	33
Figura 8: Resíduo plástico tratado (MT) e percentagem em aterros adequados e inadequados .....	44
Figura 9: Percentagem de resíduos plásticos no tratamento por recuperação energética e por reciclagem. ....	46
Figura 10: Tipos de destinação por país em 2010.....	48
Figura 11: Tipos de destinação por país em 2020.....	49
Figura 12: Produção de plástico em MT de 1950 até 2021 .....	52
Figura 13: Tipos e aplicação dos plásticos produzidos no mundo em 2021 .....	52
Figura 14: Principais setores consumidores de plástico no Brasil .....	53
Figura 15: Disposição dos resíduos de plásticos na UE e no EUA em 2020 .....	54
Figura 16: Disposição dos resíduos de plásticos no Brasil em 2022 .....	54
Figura 17: Visão linear de produção dos plásticos .....	55
Figura 18: Visão circular de produção dos plásticos .....	56
Figura 19: Identificação e simbologia das embalagens plásticas .....	57
Figura 20: Benefícios da reciclagem dos materiais plásticos.....	58
Figura 21: Esquematização dos métodos de reciclagem e ciclo das resinas poliméricas .....	59
Figura 22: Fluxo da reciclagem mecânica de plásticos .....	60
Figura 23: Tipos de reciclagem química.....	62
Figura 24: Estrutura da ACV .....	64
Figura 25: Procedimento para geração do ICV .....	66
Figura 26: Distribuição dos artigos encontrados no Scopus .....	67
Figura 27: Quantidade de artigos sobre ACV comparativos das destinações de resíduos plásticos .....	68

Figura 28: Percentagem de artigos por região .....	69
Figura 29: Hierarquia da sustentabilidade das destinações finais de resíduos plásticos .....	81
Figura 30:Quantidade de resíduos plásticos por categorias de resíduos na UE.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resíduos plásticos no EUA em toneladas .....	32
Tabela 2: Índice de reciclagem de resíduos secos provenientes de embalagens.....	39
Tabela 3: Metas e Indicador global do Planares.....	40
Tabela 4: Comparação da progressão das metas em 2022 .....	41
Tabela 5: Destinação final dos resíduos plásticos no Brasil em toneladas .....	42
Tabela 6: Hierarquia das destinações finais .....	70
Tabela 7: Quantidade de artigos por destinação final .....	73
Tabela 8: Comparação entre as destinações finais .....	74
Tabela 9: Total de resíduo plástico tratado na UE em toneladas .....	111
Tabela 10: Resíduos plásticos aterrados na UE em toneladas .....	112
Tabela 11: Resíduos plásticos incinerados na UE em toneladas .....	113
Tabela 12: Recuperação energética dos resíduos plásticos na UE em toneladas..	114
Tabela 13: Reciclagem dos resíduos plásticos na UE em toneladas.....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria de Plástico
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ACV	Análise do ciclo de vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANCAT	Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
APR	The Association of Plastic Recyclers
CE	Comissão Europeia
CCRLR	Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa
CERE	Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EUA	Estados Unidos
Eurostat	Gabinete de Estatística da União Europeia
HDPE	Polietileno de alta densidade
ICV	Inventário do ciclo de vida
LCA	Life Cycle Assessment
MT	Milhões de toneladas
Planares	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PE	Poli(eteno)
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PP	Poli(propeno)
PS	Poli(1-feniletileno)
PVC	Poli(cloreto de vinila)
RCRA	Resource Conservation and Recovery Act
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SICV Brasil	Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida
SMM	Gerenciamento Sustentável de Materiais
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UE	União Europeia

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>2 MÉTODOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 LEGISLAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	14
2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS DESTINAÇÕES FINAIS PARA OS RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	18
<b>3 LEGISLAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA UNIÃO EUROPEIA, NOS ESTADOS UNIDOS E NO BRASIL</b> .....	<b>20</b>
3.1 LEGISLAÇÃO .....	20
3.1.1 Europa .....	20
3.1.2 Estados Unidos .....	26
3.1.3 Brasil .....	33
3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS REGIÕES.....	42
<b>4 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS</b> .....	<b>51</b>
4.1 PLÁSTICOS.....	51
4.1.1 Produção e Mercado .....	51
4.1.2 Resíduos Plásticos.....	53
4.2 TIPOS DE DESTINAÇÃO DOS PLÁSTICOS .....	57
4.2.1 Disposição Adequada .....	57
4.2.2 Disposição Inadequada.....	57
4.2.3 Incineração .....	58
4.2.4 Reciclagem .....	58
4.2.4.1 Reciclagem Primária .....	59
4.2.4.2 Reciclagem Secundária .....	59
4.2.4.3 Reciclagem Terciária.....	61
4.2.4.4 Reciclagem Quaternária.....	63
4.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	64
4.3.1 Definição de Objetivo e Escopo da ACV .....	64
4.3.2 Análise do Inventário de Ciclo de Vida .....	65
4.3.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida .....	66
4.3.4 Interpretação de resultados.....	66

4.4 ACV DOS TIPOS DE DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS .....	67
4.4.1 Artigos do Scopus .....	67
4.4.2 Frequência e regionalidade dos artigos .....	68
4.4.3 Discussão de resultados .....	70
4.4.3.1 Reciclagem mecânica x Pirólise .....	74
4.4.3.2 Reciclagem mecânica x Outras Reciclagens Químicas .....	75
4.4.3.3 Reciclagem mecânica x Recuperação Energética .....	75
4.4.3.4 Reciclagem mecânica x Incineração .....	76
4.4.3.5 Reciclagem mecânica x Aterro .....	76
4.4.3.6 Pirólise x Outras Reciclagens Químicas .....	76
4.4.3.7 Pirólise x Recuperação Energética .....	77
4.4.3.8 Pirólise x Incineração .....	78
4.4.3.9 Pirólise x Aterro .....	78
4.4.3.10 Outras Reciclagens Químicas x Recuperação Energética .....	78
4.4.3.11 Outras Reciclagens Químicas x Incineração .....	79
4.4.3.12 Outras Reciclagens Químicas x Aterro .....	79
4.4.3.13 Recuperação Energética x Incineração .....	79
4.4.3.14 Recuperação Energética x Aterro .....	80
4.4.3.15 Incineração x Aterro .....	80
4.4.4 Hierarquização dos resultados .....	80
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O plástico é um dos mais importantes materiais utilizados no conforto da sociedade, substituindo materiais mais nobres e escassos, devido ao seu baixo custo e facilidade de produção (Zhang et al., 2021). Em 2021, a produção global de plásticos atingiu cerca de 390,7 milhões de toneladas (MT), com tendência da sua duplicação em 2050 (OECD, 2023). No entanto, o aumento exponencial do descarte indiscriminado, principalmente das embalagens plásticas de uso único, tem levado a sérios problemas ambientais, ainda sem solução definitiva e economicamente viável (Miao; Von Jouanne; Yokochi, 2021).

A magnitude do problema é evidenciada pelo fato de que aproximadamente metade dos produtos plásticos poluentes foi gerada após o ano 2000, e perto de 75% de todo o plástico produzido já se transformou em resíduos (Hamilton; Scheer; Stakes Simon Allan, 2019). Destes, a maior parte ainda é encaminhada para aterros ou mal gerenciadas. No mundo, em 2022, apenas 15% do total de resíduo plástico gerado foi reciclado, enquanto 17% foram incinerados, 46% destinado a aterros e 22% mal gerenciados (OECD, 2023).

O consumo exacerbado e a gestão inadequada dos resíduos são motivos para a intervenção governamental no âmbito legislativo, nas diferentes partes do mundo (Molloy et al., 2022). A conscientização do problema e a implementação de regulamentações cada vez mais rígidas refletem um esforço global para mitigar os danos ambientais causados pelo descarte do plástico na natureza (Conti et al., 2021). A abordagem desses desafios envolve uma complexidade intrínseca que requer planejamento, investimento, gestão confiável e políticas públicas bem fundamentadas (Matthews; Moran; Jaiswal, 2021). A implantação de práticas de gestão de resíduos deve levar em consideração abordagens eficazes adaptadas às realidades locais, sempre considerando fatores culturais e econômicos (Shahnawaz; Sangale; Ade, 2019).

Dessa forma, a junção da limitação na produção de plásticos (não geração) com a gestão devida dos resíduos produzidos é necessária para combater a poluição e seus danos ao ambiente. Avanços na legislação, descarte consciente e o desenvolvimento de novas tecnologias e inovações em processos de reaproveitamento dos plásticos são desafios para maior sustentabilidade. A

reciclagem é uma das soluções possíveis para reduzir a disposição inadequada (Zappitelli et al., 2021). Na reciclagem mecânica, obtêm-se materiais plásticos de baixo valor agregado com propriedades mecânicas inferiores e podendo ter presença de contaminantes (Schyns; Shaver, 2021). A reciclagem química é capaz de agregar valor aos resíduos plásticos, com obtenção de produtos como óleos ou gases (Rorrer; Beckham; Román-Leshkov, 2021). Na pirólise, método consolidado na indústria química, o resíduo polimérico é craqueado termicamente na ausência de oxigênio, formando hidrocarbonetos de cadeia curta. Com a adição de água, forma-se gás de síntese, que pode produzir energia diretamente, ser usado na formação de combustíveis ou mesmo na síntese de novos produtos químicos (Park; Lee, 2021). O óleo resultante ainda pode ser misturado à nafta petroquímica para obtenção de novos monômeros (Qureshi et al., 2020). Junto a reciclagem, a recuperação energética é um processo de tratamento dos resíduos plásticos parcialmente sustentável, transformando resíduo em energia, sendo substituto da disposição em aterros (Arena; Parrillo; Ardolino, 2023).

A evolução das políticas para disposição e tratamento de resíduos sólidos tem levado a novas regulamentações no uso e forma de descarte, agregando valor à cadeia do plástico (Mederake; Knoblauch, 2019). A transição para uma economia circular é estratégia-chave a ser adotada para solução da poluição causada, reconhecendo o valor intrínseco do plástico (Syberg et al., 2021). Nesse contexto, é necessário avaliar o ciclo de vida completo desde a produção, o consumo e o tratamento adequado com ênfase na reutilização e reciclagem (Kwon et al., 2023)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode avaliar, quantificar e comparar os impactos ambientais dos processos de reciclagem, identificando os mais sustentáveis. Os critérios de impacto podem ser quantificados utilizando métodos disponíveis na literatura (Santos; Barbosa-Póvoa; Carvalho, 2019). Os métodos desenvolvidos permitem a comparação do impacto de cada categoria avaliada fazendo uso de inventários associados a softwares específicos (Park et al., 2020).

A União Europeia (UE) foi uma das primeiras regiões a dar importância ao tratamento mais sustentável dos resíduos sólidos e continua empenhada no desenvolvimento de medidas regulatórias de sustentabilidade ambiental (Chioatto; Sospiro, 2023). No início da década de 90, alguns países começaram a desenvolver medidas de combate à poluição de embalagens plásticas. A Alemanha, em 1991, aplicou a primeira legislação sobre embalagens de uso único, taxando o uso individual

de sacolas plásticas visando a diminuição da quantidade, o desenvolvimento do produto mais sustentável e de seu reaproveitamento (Vuk; Szűcs; Bauerné Gáthy, 2023).

Os Estados Unidos (EUA) publicaram suas primeiras leis sobre resíduos sólidos na década de 60, sendo a criação da Agência de Proteção Ambiental (EPA) um ponto de virada histórico. A EPA tornou-se a principal arquiteta e executora das políticas públicas de gestão de resíduos no país. Em um marco recente, a Estratégia Nacional para Prevenir a Poluição por Plásticos, proposta em 2023, delineou ações voluntárias com o objetivo ambicioso de eliminar a liberação de resíduos plásticos provenientes de fontes terrestres no meio ambiente até 2040 (EPA, 2023). Em paralelo, a EPA também implementou a Estratégia Nacional de Reciclagem, que busca prevenir a poluição por plásticos através de medidas destinadas a reduzir, reutilizar, reciclar, coletar e capturar plásticos e outros resíduos provenientes de fontes terrestres. Estas ações são consideradas de extrema importância para alcançar reduções substanciais a longo prazo nos níveis de plásticos e outros resíduos presentes nos ecossistemas aquáticos e oceanos (EPA, 2020b).

No Brasil, apenas em 2010 com a primeira Política Nacional de Resíduos Sólidos e posteriormente com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos em 2012 que começou a se definir metas e estratégias para o combate à poluição desses resíduos (Brasil, 2010; Ministério Do Meio Ambiente, 2012). O principal combate estava ligado ao mal gerenciamento e a disposição inadequada dos resíduos no Brasil, que levam a danos ambientais visíveis. Em particular, a poluição marinha é um dos problemas ambientais mais graves e, especialmente na Europa Ocidental (Mederake; Knoblauch, 2019), governos têm respondido com incentivos fiscais, planos de ação e regulamentações que visam aumentar as taxas de reciclagem e melhorar o gerenciamento de resíduos plásticos, como a Diretiva *Single-Use Plastics* pela UE e o *Save our Seas ACT* pelos EUA (Law et al., 2020).

A urgência da questão transcende barreiras geográficas e econômicas, com países de diferentes níveis de desenvolvimento buscando estratégias para lidar com os impactos ambientais e a acumulação de resíduos plásticos (Tumu; Vorst; Curtzweiler, 2023). No entanto, é possível afirmar que o sucesso dos planos de gestão depende, em grande parte, de leis mais rigorosas e bem estruturadas que atribuam responsabilidades a todas as partes envolvidas (Jimenez; Nebra, 2021).

Nesse contexto, o estudo dos tipos de tratamento e suas tecnologias servem para definir os melhores processos que possam levar a um desenvolvimento mais sustentável da gestão de resíduos. Além disso, a análise das legislações vigentes em diferentes regiões é essencial para a definição do caminho para a sustentabilidade. Para isso, a comparação da legislação e do cenário atual, com os desafios regulatórios para descarte e reuso de resíduos sólidos, em particular de plásticos na União Europeia, nos Estados Unidos e no Brasil, servirá como guia para a diminuição da poluição global de resíduos sólidos.

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos. O primeiro apresenta uma breve introdução ao tema e delinea os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo explora a metodologia adotada para elaboração dos próximos capítulos. O terceiro aborda a legislação relacionada a resíduos sólidos e plásticos na União Europeia, nos Estados Unidos e no Brasil, enfocando suas destinações finais. Por fim, o quarto capítulo realiza uma análise dos impactos ambientais associados a cada destinação final para determinar a mais sustentável.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as tecnologias de tratamento e de disposição final dos resíduos sólidos e plásticos, realizando a comparação dos avanços na legislação, na regulamentação e nos planos de ações da União Europeia, dos Estados Unidos e do Brasil

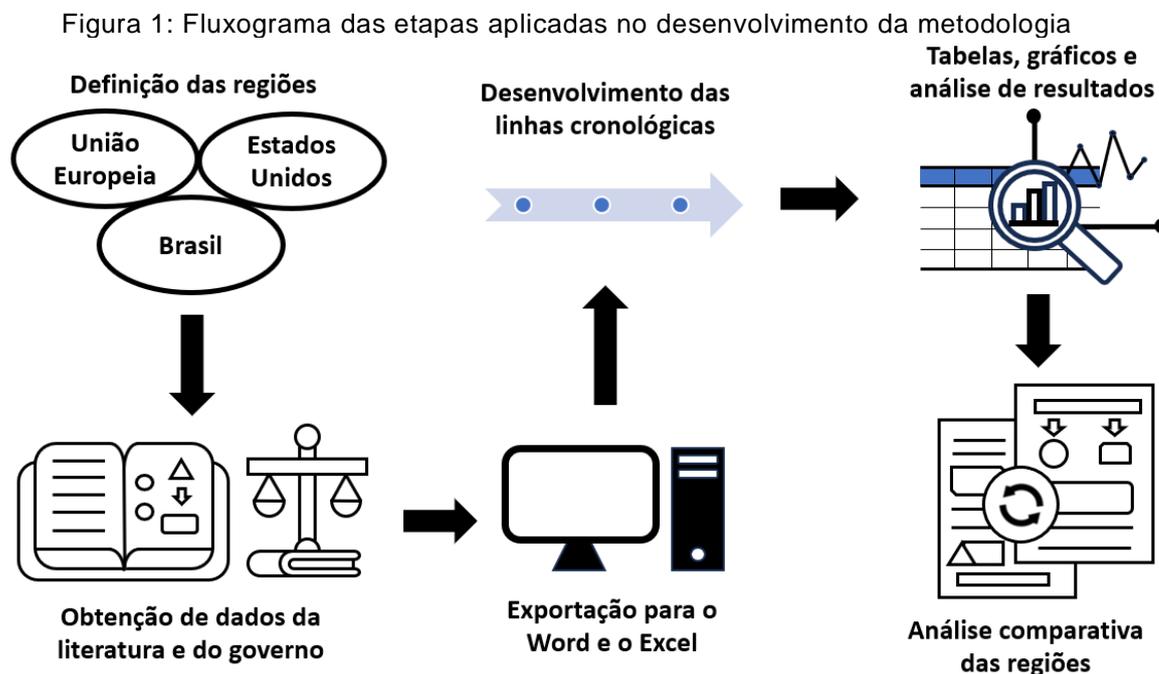
## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma análise dos avanços legislativos no tratamento de resíduos sólidos e plásticos comparando as ações e resultados com foco no tipo de destinação final na União Europeia, nos Estados Unidos e no Brasil;
- Analisar as tecnologias dos processos de tratamento dos resíduos plásticos desde as técnicas de disposição de resíduos até as novas tecnologias e inovações visando a recuperação energética e a reciclagem;
- Realizar a hierarquização da sustentabilidade das destinações finais de resíduos plásticos sugerindo caminhos para a economia circular.

## 2 MÉTODOS

### 2.1 LEGISLAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

O estudo dos avanços das legislações e dos cenários atuais das regiões analisadas se divide em 6 etapas, representado na Figura 1.

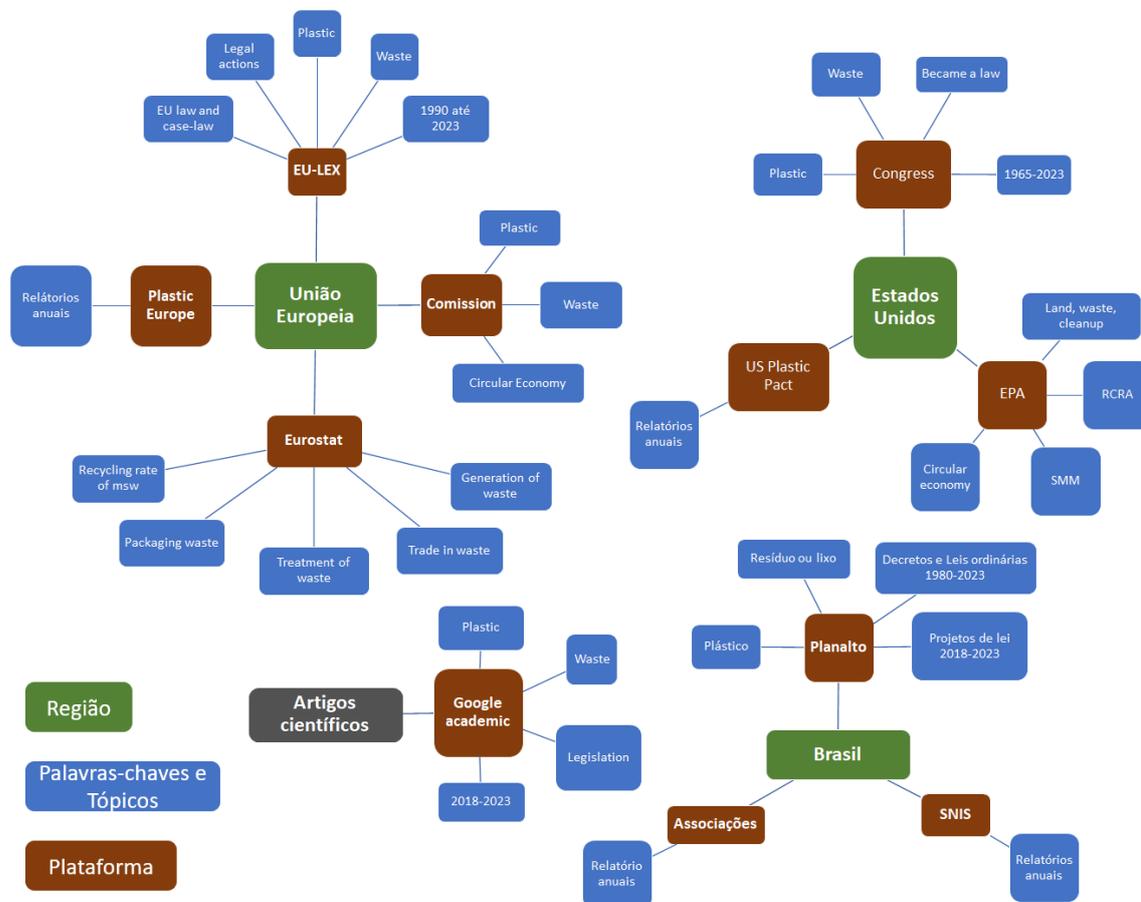


A definição das regiões que foram analisadas consiste a primeira etapa da pesquisa. As regiões escolhidas foram a UE, como a região mais desenvolvida; os EUA, como potência mundial, que ainda está consolidando suas políticas de tratamento de resíduo, e o Brasil representando uma região que ainda não está no patamar econômico e social das demais. Essas regiões foram determinadas com base no fator do nível atual de maturidade das legislações e na estrutura de tratamento de resíduos plásticos. Outro fator determinante foi a quantidade de dados disponíveis para a realização da análise. Esse estudo analisou mais de 200 referências, incluindo sites governamentais, organizacionais, corporativos e literatura científica, que abordam o desenvolvimento de políticas, estratégias e regulamentações relacionados ao tratamento dos resíduos sólidos e, principalmente, dos plásticos das regiões.

A segunda e terceira etapas consistem na coleta e copilação de dados de cada região. O esquema do planejamento da pesquisa adotado neste trabalho está representado na Figura 2, que mostra as plataformas das instituições consultadas, as

bases de dados utilizadas, as referências de busca com as palavras chaves e informações que foram utilizadas na análise crítica no tema de legislação de resíduos sólidos e plásticos.

Figura 2: Esquema representativo do planejamento da pesquisa desenvolvida



Fonte: Autoria Própria

As principais ferramentas utilizadas para encontrar as informações da UE foram as plataformas online EUR-LEX, *European Commission*, *Plastic Europe* e *Eurostat*. A EUR-LEX é um dos websites oficiais da UE de acesso público a todas as políticas até então desenvolvidas e publicadas no *Official Journal of the European Union*. A *European Commission* é outro website oficial da UE que traz todas as informações exigidas pelas políticas desenvolvidas, além de relatórios, estratégias e publicações científicas sobre temas abordados pela Comissão Europeia (CE). A *Eurostat* é outro canal oficial que funciona como o banco de dados governamentais sobre as metas das políticas desenvolvidas na UE. A quarta plataforma utilizada foi a *Plastic Europe* que é uma associação de empresas que procuram desenvolver tecnologias para obter

a maior sustentabilidade do plástico, realizando análises do cenário europeu que envolvem a produção e aplicação de plásticos no mercado e os seus resíduos e tipos de tratamento.

As ferramentas utilizadas para os EUA foram as plataformas *Congress, U.S. Plastic Pact* e, principalmente, pela EPA. A *Congress* é a plataforma online oficial do governo que disponibiliza as documentações das leis aprovadas no Congresso Americano, desde a proposta inicial até as leis promulgadas. A EPA é a agência responsável pela regulamentação, fiscalização, criação de estratégias, publicação de informações e pesquisa com o objetivo de proteger a saúde humana e o meio ambiente. A *U.S. Plastic Pact* é uma associação de empresas que procuram desenvolver tecnologias para obter a maior sustentabilidade do plástico, realizando análises do cenário americano na produção, na aplicação, no mercado e nos resíduos de plásticos.

A legislação brasileira é disponibilizada pelo Governo Federal na plataforma online denominada de Planalto. O Planalto é o site oficial do governo brasileiro e disponibiliza todas as políticas discutidas e em discussão nas câmeras governamentais. O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) é outro canal oficial que disponibiliza informações sobre o saneamento de água e esgoto, resíduos sólidos e das águas pluviais. Outros dados foram encontrados nas plataformas de associações de empresas que estão trabalhando diretamente no estudo e combate à poluição de resíduos sólidos e plásticos. São elas: Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAT), Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), Associação Brasileira da Indústria de Plástico (ABIPLAST), Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). Observa-se que todos os dados coletados e utilizados podem possuir uma tendência ligada a associação ou órgão, visto que não há um banco de dados confiável semelhante ao que se observa na Europa.

A quarta etapa utilizou as bases de dados consultadas em cada região para a criação de linhas cronológicas desenvolvidas neste trabalho considerando os avanços no controle e gerenciamento de resíduos plásticos e no nível de prioridade governamental no seu tratamento sustentável. Uma avaliação crítica foi realizada da quantidade e da frequência das publicações de leis e regulamentações bem como das ações, metas e averiguação do cumprimento das políticas propostas, em cada região.

As últimas duas etapas consistiram em organizar os dados e resultados obtidos em tabelas e gráficos realizando uma análise crítica comparativa do atual nível de maturidade na implantação de ações relativas aos resíduos plásticos tendo como parâmetros a geração e tipos de tratamento consolidados em cada uma das regiões avaliadas.

A quantidade produzida bem como a disposição e o tratamento de resíduos sólidos em cada país da UE estão apresentadas em 45 categorias de resíduos (definidas por códigos), para os últimos 20 anos, na plataforma do Gabinete de Estatística da União Europeia (Eurostat) (Eurostat, 2023b, 2023a). Dessas, 8 contêm resíduos plásticos, a saber: *healthcare and biological waste* (W05); *plastic waste* (W074); *discarded equipment* (W08A); *discarded vehicles* (W081); *batteries and accumulators* (W0841); *household and similar wastes* (W101); *mixed and undifferentiated materials* (W102) e, *mineral waste from construction and demolition* (W121). A Eurostat também estima a quantidade de resíduo plástico contida em cada categoria de resíduo sólido (% w/w), presente no relatório “*Task 3: Study of plastics in EU*” (Anexos). A Equação (1, aqui proposta, faz o cálculo da quantidade total de resíduo plástico tratado por país através das 8 categorias. A equação também é utilizada para o cálculo da quantidade de resíduo plástico destinado para cada tratamento. O peso da categoria W121 foi alterado para acompanhar melhor os dados do Eurostat.

$$\begin{aligned} \text{Quantidade de Resíduo Plástico} = & W05 \times 0,3 + W074 \times 1 + \\ & W08A \times 0,27 + W081 \times 0,11 + W0841 \times 0,1 + W101 \times 0,13 \\ & + W102 \times 0,42 + W121 \times 0,001 \end{aligned} \quad (1)$$

Os EUA apresentam, através do relatório da EPA “*Advancing sustainable materials management: 2018*”, dados sobre geração de resíduos sólidos até 2018 e estima-se que 13,2 % (w/w) dos resíduos sólidos gerados foram resíduos plásticos (EPA, 2020a, 2023). Não foram encontradas informações sobre a geração de resíduos sólidos por categorias como a UE apresenta. O resíduo plástico é quantificado como: *durable goods*, *non-durable goods* e *plastic containers and packaging*. As informações sobre disposição e tratamento, encontrados no EPA, dividem-se em reciclagem, incineração com recuperação energética e aterro, dados em toneladas/ano. A *Association of Plastic Recycler* (APR) faz, há mais de 10 anos, um levantamento dos

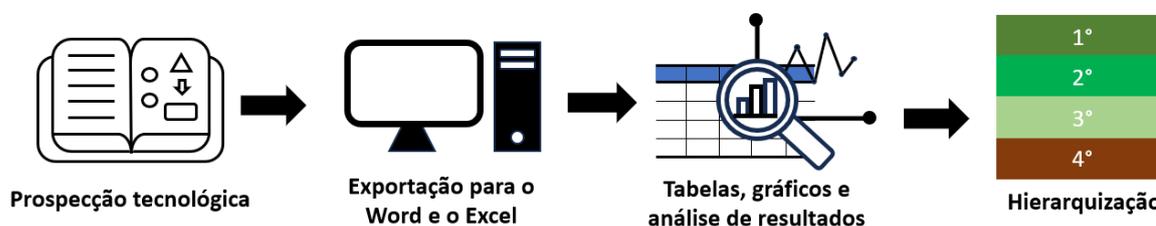
plásticos reciclados no País, especificando a composição do plástico (PET, PE, PP, filmes e outros) (APR, 2020).

No Brasil, a ABRELPE, atual ABREMA, produz anualmente um Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil com informações da quantidade de resíduos sólidos gerada, coletada e dispostas adequadamente (aterro sanitário) e inadequadamente (aterro controlado e lixão). Além disso, estima-se que, no Brasil, a quantidade de resíduo plástico dispostos correspondem a 16,8% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (Ministério Do Meio Ambiente, 2022). A ABIPLAST produz anualmente um Perfil nacional que informa dados de produção de plásticos e seus transformados, além dos seus resíduos e a reciclagem no Brasil.

## 2.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS DESTINAÇÕES FINAIS PARA OS RESÍDUOS PLÁSTICOS

As legislações dos países seguem uma ordem arbitrária dos tipos de destinações consideradas as mais sustentáveis, podendo ter variações entre regiões. Por conta disso, é necessário a avaliação científica da sustentabilidade dentre as destinações de resíduos plásticos. A Figura 3 apresenta as etapas realizadas nessa seção do trabalho.

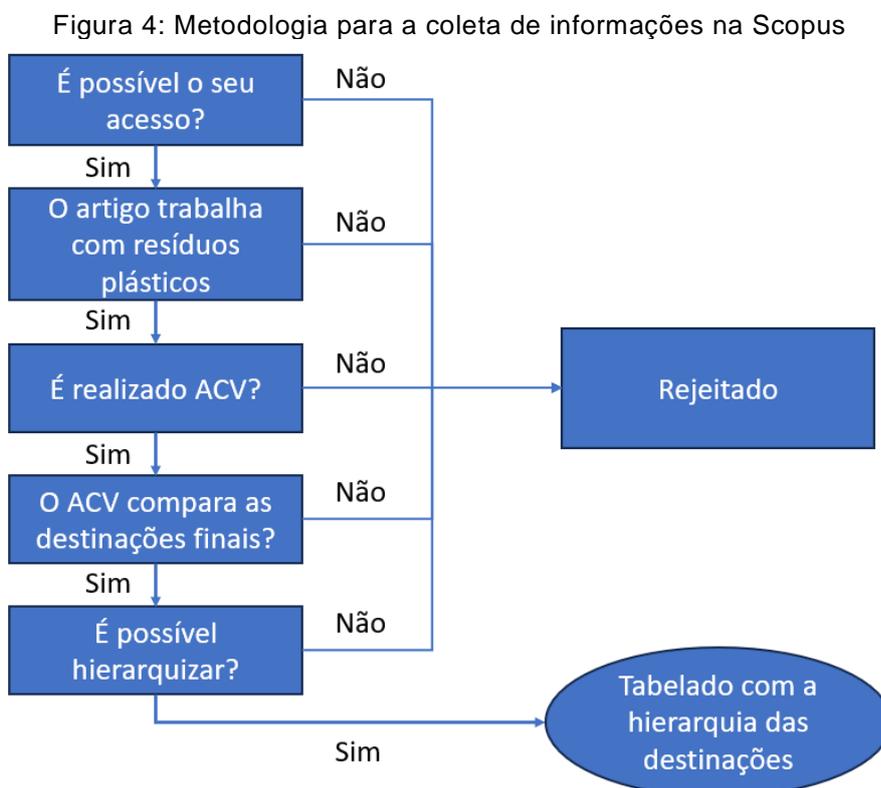
Figura 3: Etapas do método para a comparação das destinações de resíduos plásticos



Fonte: Autoria Própria

A prospecção tecnológica foi realizada na plataforma Scopus, banco de dados de resumos e citações de artigos acadêmicos. As palavras-chaves “*plastic*”, “*waste*” e “*LCA*” foram utilizadas na pesquisa, com a procura nos títulos, resumos e *keywords*. Essas palavras-chaves foram definidas para limitar a pesquisa em estudos que trabalham com ACV (em inglês – *Life Cycle Assessment (LCA)*), que possuem resultados numéricos e comparáveis, possibilitando a hierarquização das destinações finais. A partir dessa pesquisa, todos os resumos dos artigos foram lidos e copiados

no Excel com o propósito de separar os que não atendem a pesquisa, seguindo a lógica apresentada na Figura 4.



Fonte: Autoria Própria

As destinações analisadas foram Reciclagem Mecânica, Pirólise, Outras Reciclagens Químicas, Recuperação Energética, Incineração e Aterro. A reciclagem química contém diversos processos que estão sendo investigado cientificamente e todos eles foram encaixados na categoria Outras Reciclagens Químicas. A pirólise foi a única separada da reciclagem química por ser um dos processos mais investigados no âmbito acadêmico e industrial e por possuir mais dados dos demais tratamentos químicos. Os dados compilados foram analisados criticamente, com o intuito de se entender os motivos principais da ordenação criada. Além disso, também foi realizado a comparação da quantidade e crescimento das publicações acadêmicas e das regiões mundiais que estão mais interessadas com o tema. Observa-se que todos os artigos analisados podem possuir tendências em seus resultados a depender dos interesses dos autores, sendo necessário uma posterior avaliação individual de cada artigos para avaliar e identificar essas características.

### 3 LEGISLAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA UNIÃO EUROPEIA, NOS ESTADOS UNIDOS E NO BRASIL

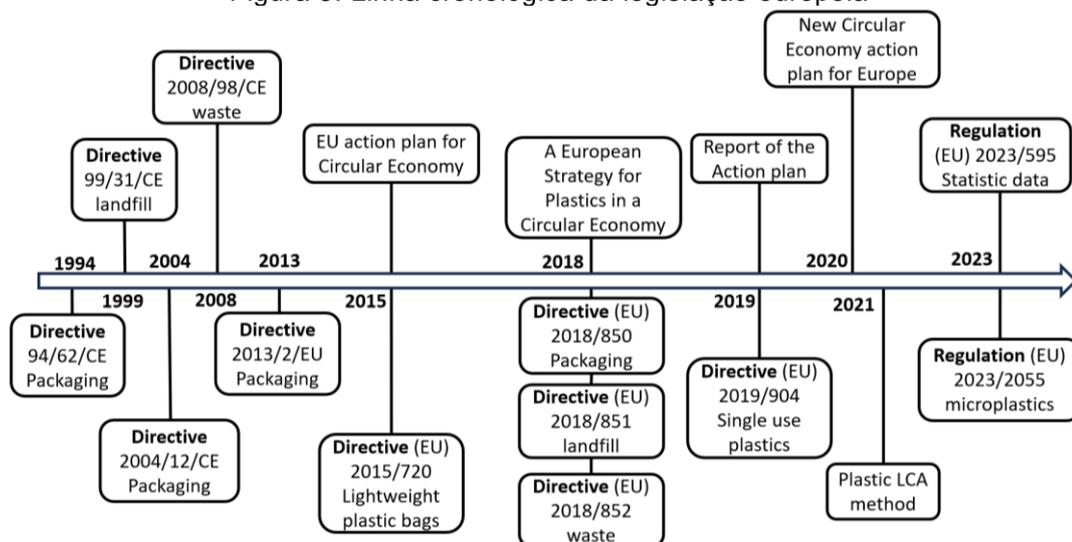
#### 3.1 LEGISLAÇÃO

A visão governamental sobre o lixo ainda é muito diferente a depender da região em estudo. Muitos países não dão tanta ênfase ao tratamento dos resíduos sólidos. O estudo da legislação em diferentes regiões, com diferentes culturas e grau de desenvolvimento, é importante para que se possa comparar e entender a situação da poluição dos resíduos plásticos. O comércio de resíduos plásticos e do lixo entre países não soluciona o problema da poluição do planeta. É necessária uma ação global para diminuição da geração dos resíduos plásticos e novas tecnologias devem ser desenvolvidas e disponibilizadas a todos os países caso se queira estancar a poluição dos resíduos plásticos nos oceanos.

##### 3.1.1 Europa

Desde a década de 1990, o parlamento europeu definiu o resíduo como um material que pode ser reaproveitado na economia. A partir dessa intervenção, a UE começou a dar importância a sustentabilidade econômica e ambiental que pode ser aplicada aos resíduos sólidos. A cronologia de implementações de leis, regulamentações e diretrizes gerais definidas pelo parlamento europeu está apresentada na Figura 5

Figura 5: Linha cronológica da legislação europeia



Fonte: Autoria Própria

A UE definiu, nos últimos 30 anos, 10 diretivas além de planos, ações e definição de estratégias que contribuíram diretamente no combate a produção de resíduos sólidos em seu território. As diretivas apresentam a problemática e define as metas que cada Estado-Membro deveria alcançar dentro de prazos bem definidos. A cada 4 anos, há uma avaliação e nova discussão sobre o tema, com auxílio de relatórios de resultados obtidos por cada nação. Com essa avaliação, novas metas mais rigorosas são propostas para se atingir maior sustentabilidade no tratamento de resíduos na UE, que foi a primeira região a desenvolver o conceito de economia circular, com metas e ações bem definidas. A UE também foi exemplo para a criação de métodos para a coleta de informações e criação de um banco de dados para a fiscalização regional, o Eurostat (Eurostat, 2023a).

A primeira legislação foi a Diretiva 94/62/EC que harmonizou as medidas para diminuir a geração de embalagens e seus resíduos promovendo reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação na UE. A partir dela, diversas outras foram definidas alterando as metas e aumentando as exigências no controle de resíduos sólidos e de embalagens. Embora cada país esteja em um grau diferente de maturidade, os europeus são *bench marketing* no enfrentamento do problema e estão mais avançados que o resto do mundo.

Em 1994, foram criadas normas para análise do ciclo de vida das embalagens e verificação de substâncias nocivas. Os Estados-Membros foram encarregados de estabelecer sistemas de retorno, coleta e recuperação para direcionar embalagens usadas para opções de gestão de resíduos mais adequadas. Esse sistema promoveu a reutilização e recuperação, com metas específicas de 50% a 65% do peso total dos resíduos de embalagens recuperados e de 25% a 45% do peso total reciclados, como mínimo de 15% de reciclagem para cada tipo de material até 2004 (European Union, 1994). No avanço das regulamentações, a Diretiva 2004/12/CE alterou a Diretiva 94/62/CE ampliando a definição de embalagens, com redefinição do conceito de itens descartáveis e estabelecendo novas metas para os Estados-Membros em relação à recuperação, incineração com recuperação de energia e reciclagem de resíduos de embalagens até 2008. Foi a primeira legislação que encorajou a recuperação de energia quando não fosse possível a reciclagem e incentivou o uso de reciclados na fabricação de embalagens. Sendo assim, as novas metas de recuperação e reciclagem passaram a ser, respectivamente, de no mínimo 60% e 55% do peso total

das embalagens, com um mínimo de 22,5% de reciclo para as plásticas em 2008 (European Union, 2004).

A Diretiva 2008/122/CE priorizou a prevenção, preparação para reutilização, reciclagem, outras formas de recuperação e, trouxe à tona a questão da disposição. A responsabilidade do produtor foi ampliada para fortalecer a reutilização, reciclagem e prevenção, incentivando o design de produtos sustentáveis. A Diretiva ainda definiu um aumento para no mínimo 50% em peso a preparação para reutilização e reciclagem de materiais de resíduos domésticos, promovendo tecnologias de coleta e triagem, com suporte ao reuso e ao reparo. Além disso, eleva para no mínimo 70% em peso a preparação para reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação de resíduos de construção (European Union, 2008). Essa diretiva alavancou significativamente a mudança da utilização de aterros para a recuperação energética e reciclagem, mudando a concepção de resíduos de algo inservível para aproveitável e reutilizável com tratamento (reciclagem ou recuperação energética).

Em 2013, a Diretiva 2013/2/EU apresentou uma nova definição de embalagem, atendendo a pedidos dos Estados-Membros e operadores econômicos para fortalecer a sua implementação e promover equidade no mercado interno (European Union, 2013). Isso foi pré-requisito para que, em 2015, a Diretiva (EU) 2015/720 alterasse a Diretiva 94/62/CE no que diz respeito ao fornecimento gratuito de sacos plásticos leves de transporte por pessoa. Os sacos plásticos leves passaram a estar sujeitos a uma contribuição visando promover um comportamento mais sustentável e consciente dos consumidores, dos produtores e dos comerciantes. Também estavam previstos relatórios sobre a possibilidade de substituir esses sacos de transporte por sacos oxodegradáveis e uma avaliação do ciclo de vida dos impactos dos sacos de transporte de plástico muito leves, com a possibilidade de propostas legislativas adicionais (European Union, 2015a).

Em 2018, a Diretiva (EU) 2018/852 alterou a 94/62/CE visando impulsionar uma economia circular. Os Estados-Membros passariam a adotar esquemas de responsabilidade ampliada do produtor, como ações preventivas e programas nacionais. Novas metas específicas de reciclagem até 2025 e 2030 foram estabelecidas para materiais classificados como plástico, madeira, metais, alumínio, vidro, papel e papelão. Os controles de qualidade e rastreabilidade começaram a ser exigidos. Esquemas de responsabilidade ampliada do produtor para todas as embalagens foram implementadas até dezembro de 2024. Metas adicionais para

reciclagem de 65% do peso total dos resíduos de embalagens serão reciclados até 2025 e 70% em 2030, além de 50% de reciclagem de plásticos até 2025 e 55% até 2030 (European Union, 2018a).

Em 2019, a Diretiva (EU) 2019/904 atuou visando prevenir e reduzir os impactos ambientais e na saúde humana causados por produtos plásticos de utilização única, plásticos oxodegradáveis e artigos de pesca com plástico, especialmente em ambientes aquáticos. Os Estados-Membros tiveram que adotar medidas para reduzir de forma sustentável o consumo dos produtos plásticos de utilização única. Desde então, a colocação no mercado de alguns produtos plásticos de uso único e de produtos oxodegradáveis foram proibidas. Além disso, os Estados-Membros deveriam garantir a coleta separada para reciclagem, com previsão de 77% desses produtos até 2025 e 90% até 2029, em relação aos produtos colocados no mercado (European Union, 2019a). A CE, a partir dessa diretiva, desenvolveu um relatório técnico em 2021 com a metodologia de ACV de plásticos para o cenário da Europa. O método teve como objetivo fornecer suporte científico baseado em evidências ao processo de formulação de políticas da UE e fornecer regras metodológicas comuns e harmonizadas. Isso permitiu que empresas e profissionais conduzissem estudos de ACV de forma mais consistente, reproduzível, robusto e verificável para produtos plásticos provenientes de diferentes fontes de matéria-prima no nível da UE (Nessi et al., 2021).

Outro marco importante e inédito visando diminuir a poluição no planeta, e, em particular na UE, foi publicado pela Diretiva 1999/31/CE, que definiu rigorosos requisitos operacionais e técnicos sobre resíduos e aterros. Essas medidas e orientações foram concebidas com o propósito de prevenir ou mitigar os impactos negativos dos resíduos e dos aterros ao meio ambiente, tais como a poluição de águas superficiais, águas subterrâneas, solo e ar, bem como no ambiente global, incluindo o efeito estufa, e qualquer risco resultante para a saúde humana (European Union, 1999). Essa diretiva teve como metas diminuir para 75% do total de resíduos biodegradáveis em aterro até 2004, 50% até 2009 e 35% até 2014.

Diante da poluição gerada pelos aterros, após 20 anos, a Diretiva (EU) 2018/850 alterou a 1999/31/CE com o objetivo de reduzir o aterramento de resíduos, especialmente os passíveis de reciclagem. Até 2030, os Estados-Membros deverão evitar o aterramento de resíduos adequados para reciclagem, exceto quando o aterro for a opção ambientalmente mais vantajosa. Além disso, até 2035, a quantidade de

resíduos municipais aterrados precisará ser reduzida para 10% ou menos do total gerado. A Diretiva também incentivou o uso de instrumentos econômicos para promover a aplicação da hierarquia de resíduos (European Union, 2018b). Na Diretiva (2018/851), a CE promoveu uma modificação da 2008/98/CE, que visou monitorar os critérios de cada país no que tange ao de fim de vida de materiais e resíduos, ampliando a responsabilidade do produtor e estabelecendo requisitos mínimos para os Estados-Membros. Em paralelo a isso, a diretiva incentivou o consumo de produtos sustentáveis, a gestão adequada de produtos no final de sua vida útil e a disseminação de campanhas para a população (European Union, 2018c).

No ano de 2023, duas regulamentações cruciais foram promulgadas para abordar questões previamente negligenciadas. A Regulamentação (EU) 2023/595 definiu o formato para resíduos de embalagens de plástico não reciclados (European Union, 2023a). Paralelamente, a Regulamentação (EU) 2023/2055 evidenciou um marco como a primeira legislação a tratar especificamente do problema dos microplásticos. A poluição causada pelos microplásticos, frequentemente inadvertida, resulta da decomposição de resíduos plásticos maiores, desgaste de pneus, tinta de estradas e até mesmo da lavagem de roupas sintéticas. Tanto fragmentos minúsculos de polímeros sintéticos quanto polímeros naturais quimicamente modificados, usados ou adicionados a produtos, são abordados pela regulamentação, o que proíbe a comercialização desses polímeros como substâncias isoladas ou em misturas com concentração igual ou superior a 0,01% em peso. Os fornecedores desses polímeros devem fornecer instruções sobre o uso e a disposição para prevenir a liberação de micropartículas no ambiente. Além disso, será exigido a rotulação "Este produto contém microplásticos" aos produtos após 2031 (European Union, 2023b).

Em 2015, a CE lançou o Plano de Ação da UE para a Economia Circular em resposta aos desafios ambientais e econômicos enfrentados pela UE. O plano visa a transição para uma economia circular, promovendo a manutenção de produtos, materiais e recursos mais sustentáveis na economia pelo maior tempo possível. O plano também abrange áreas como legislação de resíduos, eco-concepção de produtos e responsabilidade ampliada do produtor, sendo base para a criação de estratégias específicas de materiais e o desenvolvimento das próximas diretrizes (European Union, 2015b). Em 2019, um relatório assegurou que o plano de 2015 estava em curso, com 54 ações entregues ou em andamento, ultrapassando o previsto (European Union, 2019b).

A continuação do plano envolveu a formulação de estratégias específicas para diferentes tipos de materiais. A Estratégia Europeia para os Plásticos numa Economia Circular, lançada em 2018, foi a primeira e estabeleceu os alicerces para uma nova economia de plásticos. Nessa abordagem, o *design* e a produção passaram a contemplar previamente a reutilização, reparação e reciclagem, promovendo a produção de materiais mais sustentáveis. O objetivo da Estratégia foi fomentar a inovação para gerar maior valor agregado para os plásticos, ao mesmo tempo em que reduzia a poluição e o impacto ambiental adverso. Metas ambiciosas foram estabelecidas para o horizonte de 2030, incluindo tornar todas as embalagens de plástico na UE reutilizáveis ou economicamente viáveis para reciclagem. Outras metas visavam mudanças na produção e *design* de plásticos, com o intuito de aumentar as taxas de reciclagem, almejando reciclar mais da metade dos resíduos plásticos gerados na Europa. Além disso, propuseram-se requisitos mais rigorosos para embalagens, com o objetivo de torná-las reutilizáveis ou facilmente recicláveis (European Union, 2018d).

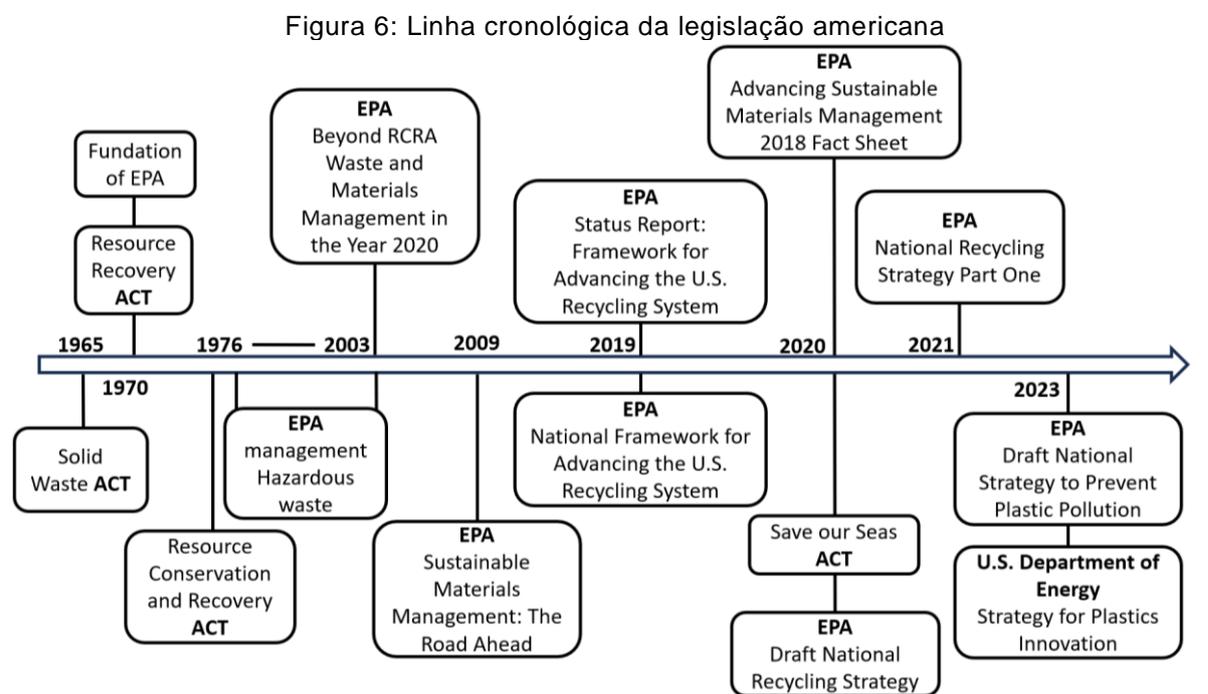
Em 2020, houve a atualização do Plano de 2015, com o Novo Plano de Ação para a Economia Circular, que delineou uma estratégia ambiciosa para transformar a economia da UE em um modelo neutro em carbono, eficiente em recursos e altamente competitivo até o ano de 2050. O cerne desta abordagem foi a transição de uma economia linear para um modelo de crescimento regenerativo, no qual o consumo de recursos é mantido dentro dos limites planetários, desacoplando assim o crescimento econômico do uso de recursos. O plano estabeleceu um conjunto abrangente de iniciativas para fortalecer o quadro de políticas de produtos, abordando aspectos como durabilidade, reutilização, reparabilidade, eficiência energética e de recursos, conteúdo reciclado, remanufatura, pegadas de carbono, obsolescência prematura, modelos de produto como serviço e digitalização da informação do produto.

Especificamente para embalagens, a CE revisará as Diretivas para garantir que todas as embalagens no mercado da UE sejam reutilizáveis ou recicláveis de maneira economicamente viável até 2030. Além disso, serão implementadas medidas para reduzir o excesso de embalagem, incentivar o design para reutilização e reciclabilidade, e lidar com a presença de microplásticos no meio ambiente. A estratégia para plásticos na economia circular será intensificada, considerando requisitos obrigatórios para conteúdo reciclado e medidas de redução de resíduos em produtos-chave. A CE também abordará os desafios dos plásticos biodegradáveis e

compostáveis, garantindo que a rotulagem não induza à má disposição (European Union, 2020).

### 3.1.2 Estados Unidos

Os EUA publicaram suas primeiras leis sobre resíduos sólidos nas décadas de 60 e 70. A primeira foi a *Solid Waste Disposal Act*, de 1965, que teve o propósito de promover a salvaguarda da saúde e do meio ambiente e preservação de recursos materiais e energéticos, promovendo práticas como de substituição de processos, recuperação de materiais, reciclagem adequada e reuso (United States, 1965). A Figura 6 apresenta os avanços legislativos do EUA.



Em 1970, tornou-se evidente que a Lei de 1965 não foi suficiente para enfrentar os perigos representados pelo aumento de resíduos sólidos e perigosos. Diante disso, o *Resource Recovery Act* de 1970 foi promulgado para oferecer, principalmente, assistência financeira na construção de instalações de descarte de resíduos sólidos e aprimorar programas de pesquisa relacionados a essa legislação (United States, 1970).

A mudança fundamental no gerenciamento de resíduos nos EUA ocorreu em 1976 com a promulgação do *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), que,

embora uma emenda à da lei de 1965, foi tão abrangente que passou a ser referida sem mencionar a lei original (EPA, 2002). O crescimento econômico e populacional impulsionou a produção industrial e o consumo, gerando uma quantidade crescente de resíduos. Para gerenciar os resíduos, o RCRA impulsionou o progresso tecnológico nas etapas de fabricação, embalagem e comercialização de produtos de consumo. As práticas impostas pelo RCRA reduziram a disposição de alguns resíduos sólidos em aterros, o que evitou o enterro desnecessário de materiais recuperáveis. No contexto energético, o RCRA destacou que os resíduos sólidos representam uma fonte potencial de combustível sólido, óleo ou gás que podem ser convertidos em energia. Além de proibir o despejo a céu aberto e incentivar a reciclagem e descarte seguro de resíduos municipais, também estabeleceu a criação do Escritório de Resíduos Sólidos dentro da EPA. O Escritório conferiu autoridade ao Administrador (EPA) para prescrever regulamentações, fornecer assistência técnica e financeira, além de coordenar esforços de pesquisa e desenvolvimento (United States, 1976).

Em 1979, a EPA estabeleceu as condições de *design* e operação para aterros sanitários que recebiam resíduos municipais e lixo. Essas condições representaram o primeiro passo em direção ao fechamento de todos os lixões a céu aberto. Em 1985, os aterros sanitários de resíduos perigosos e lagoas de rejeitos que não cumpriram os requisitos de garantia financeira e monitoramento de águas subterrâneas foram obrigados a fechar. Desde então, os EUA gerenciaram resíduos sob a RCRA, resultando em melhorias significativas nas práticas de gestão de resíduos. Milhares de locais contaminados foram limpos, as taxas de reciclagem pós-consumo melhoraram e houve ganhos na prevenção da poluição nas indústrias (EPA, 2002).

Apesar desses êxitos, o programa RCRA enfrentou críticas, especialmente em relação à identificação de materiais como "resíduos", afetando negativamente a reciclagem e a recuperação de energia. Outra crítica foi em relação à distinção entre resíduos e materiais. Desde então, houve debates sobre o foco excessivo em controles "no final do processo" e maiores intervenções *upstream*, com prevenção da poluição. (EPA, 2003). A gestão de materiais e produtos com base no ciclo de vida foi vista como prioridade para criar uma economia verde, resiliente e competitiva. Essa abordagem mais abrangente permitiria a identificação de fluxos de materiais prejudiciais, suas origens e destinos, contribuindo para uma estratégia mais eficaz em termos ambientais e econômicos (EPA, 2009).

Em 2018, a EPA formulou o Compromisso de Reciclagem da América que começou a impulsionar uma série de ações, estratégias e políticas para a economia circular americana. A primeira ação foi o *National Framework for Advancing the U.S. Recycling System*, assinado por 45 organizações nacionais, que estabeleceu metas e começou a discussão nacional sobre reciclagem. Entretanto, houve necessidade de aprimoramento da medição e metodologias consistentes para medir a taxa de reciclagem em todo o país. A solução para isso foi a padronização e alinhamento de métodos de medição entre as organizações nacionais, que foram vistas como essenciais para melhor informar decisões políticas e investimentos, permitindo uma avaliação mais clara do progresso no gerenciamento de materiais recicláveis nos Estados Unidos (EPA, 2019a, 2019b).

Em 2020, entrou em vigor a Lei *Save Our Seas 2.0*, marcando um avanço significativo na legislação ambiental dos EUA. Essa foi a primeira legislação após RCRA a abordar especificamente a problemática da poluição por resíduos plásticos. A iniciativa surgiu como resposta à alarmante poluição marinha, notadamente causada por resíduos, sobretudo plásticos. A legislação tornou-se ainda mais relevante um ano após a promulgação da Diretiva (EU) *Single-Use Plastic* em 2019, focada em plásticos de uso único em praias e no oceano (European Union, 2019a). A Lei também criou a Fundação de Resíduos Marinhos, uma entidade dependente do governo, com captação de doações privadas, cujo objetivo consiste em promover a avaliação, prevenção, redução e remoção de resíduos marinhos, em particular os plásticos, com incentivos ao avanço de tecnologias de produção de embalagem visando a reciclagem e reuso. Entre as metas da Fundação, destacam-se: avaliação das contribuições dos EUA para a diminuição do lixo plástico global; levantamento dos resíduos plásticos presentes nas águas navegáveis dos EUA e um exame detalhado das importações e exportações de resíduos plásticos, abordando destinos, condições ambientais e infraestrutura de gestão.

O envolvimento da Fundação com parceiros internacionais em fóruns multilaterais contribuiu para aprimorar a cooperação global, desenvolver melhores práticas e incentivar a pesquisa científica em áreas como microfibras e microplásticos. A legislação também destacou a necessidade de colaboração em avanços tecnológicos na gestão de materiais pós-consumo e plásticos reciclados para incentivar a economia circular. Além disso, orientou os EUA para criar parcerias com países estrangeiros sobre o desenvolvimento e execução de políticas regulatórias

relacionadas à redução de resíduos sólidos. Finalmente, a lei estabeleceu prazos para a EPA desenvolver estratégias de gestão de materiais pós-consumo e infraestrutura, com o objetivo de reduzir resíduos plásticos e outros materiais pós-consumo em cursos d'água e oceanos (United States, 2020).

Na Cúpula de Reciclagem da América de 2020, a EPA anunciou o propósito de elevar a taxa nacional de reciclagem para 50% até 2030. Para isso, as ações estratégicas foram estabelecidas: A primeira buscou reduzir a contaminação na corrente de reciclagem, permitindo a produção de materiais reciclados de maior qualidade. A segunda concentrou-se em aumentar a eficiência da infraestrutura de processamento, necessitando de investimentos e inovações para acompanhar o rápido crescimento do fluxo de materiais recicláveis. Já a terceira buscou melhorar os mercados domésticos para materiais recicláveis, integrando os materiais reciclados em designs de produtos e embalagens. A implementação dessas ações estratégicas será um processo interativo, com melhorias a serem alcançadas gradativamente, alinhando-se ao compromisso da EPA em construir um sistema de reciclagem eficaz nos EUA (EPA, 2020b).

Em sequência, novas medidas definidas pelo EPA foram adotadas nos EUA esmiuçando ações específicas para diminuir a poluição de forma abrangente e com foco nos resíduos plásticos. O Gerenciamento Sustentável de Materiais (SMM) da EPA atuou no uso e reuso de materiais da maneira mais sustentável ao longo de todo o ciclo de vida. O relatório da EPA de 2020 apresentou e analisou a geração de materiais e produtos, bem como o gerenciamento dos RSU, e indicadores econômicos que afetaram os RSU de 1960 até 2018 (EPA, 2020c, 2020a).

A EPA publicou a Resolução sobre Gestão Nacional Sustentável de Materiais com o objetivo de colaborar com estados e territórios para integrar a gestão de materiais como uma abordagem estratégica essencial na resposta aos desafios ambientais. A Resolução destaca a importância do uso de gestão de ciclo de vida de materiais em programas existentes, bem como a educação de consumidores sobre o fortalecimento de mercados secundários para reciclagem. A abordagem da gestão de ciclo de vida minimiza o consumo de materiais, energia e água, de modo a reduzir os impactos climáticos e ambientais (EPA, 2022a, 2022b).

A Estratégia Nacional de Reciclagem é parte integrante da série sobre a Construção de uma Economia Circular e visou aprimorar a eficácia do sistema nacional de reciclagem de RSU. A estratégia enfatizou que o avanço na reciclagem

de RSU por si só não é suficiente para alcançar uma economia circular, reconhecendo a importância de esforços mais amplos, incluindo *redesign* de produtos, redução de resíduos e reutilização. Além disso, o escopo dos esforços de reciclagem vai além do processamento de RSU em instalações de recuperação de materiais e inclui diversos materiais, como eletrônicos, têxteis e resíduos de alimentos. Alinhada com a Meta Nacional de Reciclagem de aumentar a taxa para 50% até 2030, a Estratégia de 2021 apresenta cinco objetivos estratégicos para criar um sistema nacional de reciclagem mais resiliente e economicamente eficaz. Esses objetivos incluem a melhoria dos mercados para commodities de reciclagem, o aumento da coleta e aprimoramento da infraestrutura de gestão de materiais, a redução da contaminação na corrente de materiais reciclados, o aprimoramento de políticas para apoiar a circularidade, e a padronização da medição e aumento da coleta de dados para avaliar com precisão o desempenho do sistema de reciclagem. Um ponto importante é que a EPA deve envolver estados e territórios em esforços de educação sobre o fortalecimento de mercados para reutilização e reciclagem (EPA, 2021).

O *U.S. Plastics Pact*, estabelecido em 2020, emergiu como um agente transformador ao apresentar dados inéditos sobre plásticos e instigar empresas a reduzir o desperdício, mesmo diante as condições de mercado desafiadoras. Um objetivo importante é um esforço colaborativo para estabelecer uma economia circular para embalagens plásticas americano. O *U.S. Plastics Pact* definiu uma lista de embalagens plásticas problemáticas ou desnecessárias, com medidas para eliminar esses itens até 2025. Além disso, a previsão otimista é que 100% das embalagens plásticas sejam reutilizáveis, recicláveis ou compostáveis até 2025. O pacto visou também alcançar a reciclagem ou compostagem eficaz de 50% das embalagens plásticas até 2025, com uma média de 30% de conteúdo reciclado ou de origem biológica responsável nesse tipo de embalagem até o mesmo ano. Além dessas metas, o *U.S. Plastics Pact* propõe uma meta de redução de embalagens plásticas virgens, eliminar 11 materiais problemáticos e desnecessários, apoiar inovadores em reutilização e garantir que garrafas de PET e HDPE atendam a diretrizes específicas de *design* para reciclabilidade. No âmbito político, o pacto apoia políticas que facilitem a coleta e seleção de garrafas de bebidas, incluindo sistemas de retorno de depósito, responsabilidade estendida do produtor e mandatos de uso de resina reciclada pós-consumo em desenvolvimento (US Plastic Pact, 2022).

Ressalta-se pela Estratégia para Inovação em Plásticos do Departamento de Energia dos Estados Unidos inovações que reduzam drasticamente a disposição de plástico em oceanos e aterros sanitários. A Estratégia visa tornar o processamento doméstico de resíduos plásticos mais eficiente e economicamente viável, ao mesmo tempo em que desenvolve novos materiais plásticos sem as preocupações de fim de vida associadas aos materiais existentes. Ela também lança um desafio de posicionar os Estados Unidos como líder global em tecnologias avançadas (químicas) de reciclagem de plásticos e na fabricação de novos plásticos projetados para serem recicláveis. Quatro metas estratégicas foram estabelecidas para redefinir o paradigma do gerenciamento de plásticos: *Deconstruction*; *Upcycling*; *Recyclable by Design* e *Scale and Deploy*. Elas englobam a criação de novas vias para a degradação de resíduos plásticos e inovações tecnológicas destinadas a agregar valor aos produtos intermediários da degradação, com ênfase no desenvolvimento de produtos recicláveis e na expansão da tecnologia de reciclagem. A Estratégia estabelece ainda objetivos específicos tais como, desenvolver tecnologias para que mais de 90% dos materiais plásticos atinjam um destino de fim de vida adequado; proporcionar pelo menos 50% de economia de energia em comparação com a produção de material virgem; atingir menos de 75% de utilização de carbono a partir de plásticos reciclados e, desenvolver estratégias de reciclagem que mitiguem pelo menos 50% das emissões de gases de efeito estufa em comparação à produção de resina virgem. Busca ainda criar plásticos recicláveis por *design* e processos de reciclagem economicamente competitivos com os materiais e processos existentes. (U.S. Department of Energy, 2023).

A Estratégia Nacional para Prevenir a Poluição por Plásticos, desenvolvida em 2023, delinea ações voluntárias visando eliminar a liberação de resíduos plásticos de fontes terrestres no meio ambiente até 2040. Esta iniciativa, buscando uma abordagem inovadora e equitativa, pretende não apenas reduzir, recuperar e prevenir a poluição por plásticos, mas também salvaguardar a saúde humana e o meio ambiente, particularmente em comunidades já afetadas pela poluição. Em conjunto com a Estratégia Nacional de Reciclagem da EPA, busca prevenir a poluição por plásticos e reduzir, reutilizar, reciclar, coletar e capturar plásticos e outros resíduos de fontes terrestres. A EPA busca atuar com intervenções efetivas em diversas etapas do ciclo de vida dos produtos plásticos. O foco abrange a redução da poluição durante a produção, aprimoramento da gestão de materiais após o uso e prevenção da entrada

de lixo e micro/nanoplásticos nos cursos d'água, além da remoção de resíduos que escaparam para o ambiente. Essas ações são consideradas cruciais para atingir reduções significativas a longo prazo de plásticos e outros resíduos nos ecossistemas aquáticos e oceanos (EPA, 2023).

O cenário atual nos Estados Unidos está em constante evolução no que se refere à legislação para combater a poluição plástica, embora ainda não tenha se traduzido totalmente na prática. A situação atual do país enfatiza a urgência de estabelecer políticas, estratégias e metas mais rigorosas para uma gestão mais sustentável dos resíduos plásticos, ressaltando a necessidade de um comprometimento efetivo por todos os responsáveis envolvidos. A Tabela 1 apresenta os avanços conquistados na gestão dos resíduos plásticos nos EUA desde a década de 60.

Tabela 1: Resíduos plásticos no EUA em toneladas

<b>Ano</b>	<b>Geração</b>	<b>Aterro e Incineração</b>	<b>Recuperação Energética</b>	<b>Reciclagem</b>
<b>1960</b>	390.000	390.000	0	0
<b>1970</b>	2.900.000	2.900.000	0	0
<b>1980</b>	6.830.000	6.670.000	140.000	20.000
<b>1990</b>	17.130.000	13.780.000	2.980.000	370.000
<b>2000</b>	25.550.000	19.950.000	4.120.000	1.480.000
<b>2005</b>	29.380.000	23.270.000	4.330.000	1.780.000
<b>2010</b>	31.400.000	24.370.000	4.530.000	2.500.000
<b>2015</b>	34.480.000	26.030.000	5.330.000	3.120.000
<b>2017</b>	35.410.000	26.820.000	5.590.000	3.000.000
<b>2018</b>	35.680.000	26.970.000	5.620.000	3.090.000
<b>2020</b>	36.288.000	28.489.035	5.620.000	2.178.965

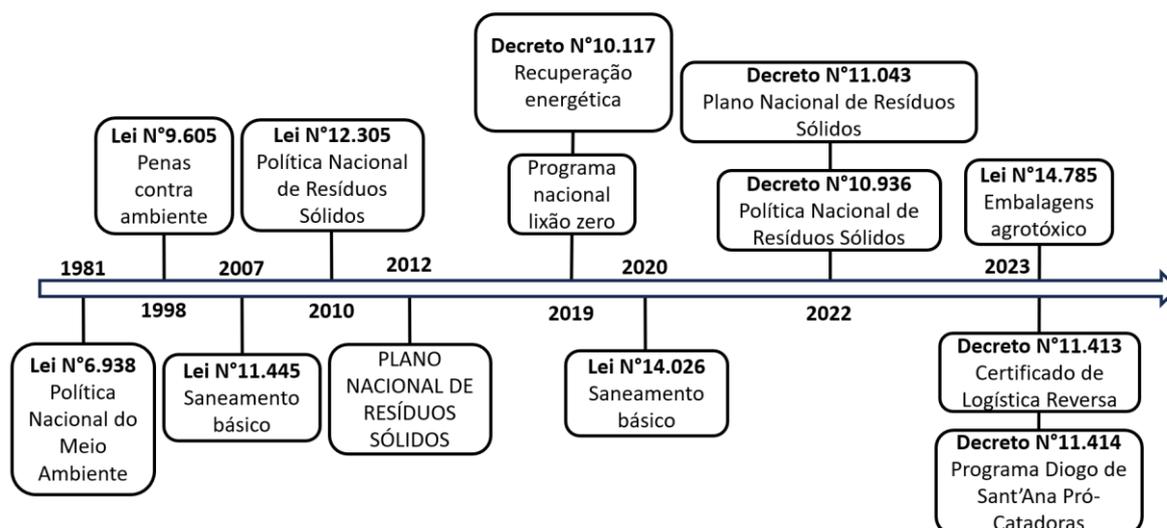
Fonte: EPA (2020c) e APR (2020)

Nota-se que uma das prioridades iniciais do EUA foi a transição das incineradoras para unidade de recuperação de energia. O pico de unidades de incineração foi na década de 80, a partir desse ponto começou a se ver a transição para a recuperação energética (Energy Justice Network, 2022). Outro ponto importante é que a reciclagem diminuiu bastante em 2020, uma queda de aproximadamente 30% em relação ao ano de 2018. Esse período foi atípico devido à presença da COVID-19 que afetou os índices de coleta de resíduos sólidos no país (US Plastic Pact, 2022). É importante ressaltar que alguns estados têm apresentado resultados bons que podem ser comparáveis aos relatados por países europeus.

### 3.1.3 Brasil

Diferente dos EUA e UE, o Brasil só apresentou interesse nos resíduos sólidos a partir do ano de 2010, quando definiu uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei nº 12.305 e originou um Plano Nacional em 2012, que não teve o prosseguimento desejado em relação ao gerenciamento de lixo. O tema voltou a discussões governamentais entre 2019 e 2023, com a promulgação de cinco decretos e de uma nova política e plano nacional de resíduos sólidos, em 2022. Assim como os EUA, o governo brasileiro apenas definiu as políticas nacionais de resíduos sólidos passando aos estados e municípios a responsabilidade das ações políticas e das estratégias para gestão dos resíduos. Entretanto, a disposição dos resíduos sólidos ainda é incipiente no Brasil, com as prefeituras tendo dificuldades de construção de aterros em substituição aos “lixões”, que é a disposição do lixo urbano de forma inapropriada no solo. A baixa fiscalização e envolvimento do governo central do país, com o desenvolvimento ambiental, levou ao descumprimento da lei em várias cidades do País. A Figura 7 mostra a cronologia de legislativa do Brasil na evolução de medidas para lidar com os resíduos sólidos.

Figura 7: Linha cronológica da legislação brasileira



Fonte: Autoria Própria

A Lei nº 6.938 de 1981 foi o primeiro marco para a definição da Política Nacional do Meio Ambiente, que buscou promover a harmonia entre o desenvolvimento econômico-social e a preservação ambiental. Além disso, regulou diversas questões relacionadas ao uso sustentável dos recursos naturais e ao aumento a proteção do

equilíbrio ecológico. No entanto, a lei não abordou a gestão de resíduos sólidos, sugerindo a necessidade de atualizações (Brasil, 1981).

A Lei nº 9.605 de 1998 estabeleceu as sanções penais e administrativas e definiu como infração as ações prejudiciais ao meio ambiente que possam causar poluição em níveis capazes de ocasionar danos à saúde humana, a mortalidade de animais ou a destruição da flora. Entre os meios pelos quais a poluição pode ocorrer, destaca-se o descarte inadequado de resíduos sólidos, líquidos, gasosos, detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as normas estabelecidas por leis ou regulamentos (Brasil, 1998).

Após nove anos, uma nova lei foi promulgada (Lei nº 11.445), que estabeleceu as diretrizes nacionais para serviços públicos especializados de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, as atividades operacionais relacionadas à coleta, transbordo, transporte, triagem para reutilização ou reciclagem, tratamento, incluindo compostagem, e destinação final de resíduos domésticos, resíduos de atividades comerciais, industriais e de serviços, e resíduos originários dos serviços públicos de limpeza urbana. No contexto do saneamento básico, a lei também promoveu novas melhorias que abrangeram aspectos, desde o abastecimento de água até o manejo de resíduos sólidos para promover melhorias na salubridade ambiental (Brasil, 2007).

A Lei nº 12.305 de 2010 estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que introduziu a gestão integrada e o gerenciamento eficaz dos resíduos sólidos no Brasil, com foco na proteção da saúde pública e da qualidade ambiental. Estabeleceu a ordem de prioridade da gestão de resíduos seguindo a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos também foi considerada, desde que comprovada sua viabilidade técnica e ambiental, com monitoramento de emissão de gases tóxicos. A legislação propõe ainda incentivar padrões sustentáveis de produção e consumo, o desenvolvimento de tecnologias limpas, a redução da periculosidade dos resíduos, o estímulo à indústria da reciclagem, e a gestão integrada desses resíduos. Além disso, também destaca a importância de aquisições e contratações governamentais priorizarem produtos reciclados, recicláveis e ambientalmente sustentáveis. Visando inclusão social, a legislação enfatizou a integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações relacionadas à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, estimulou a implementação da avaliação do ciclo de vida do produto, incentivou o

desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial para a melhoria dos processos produtivos e o reaproveitamento de resíduos sólidos, incluindo a recuperação e o aproveitamento energético, além de promover o estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável. A disponibilidade de “catadores” é um diferencial no País, onde as discrepâncias sociais levam pessoas a formarem cooperativas para “catar” latas de alumínio, vidros, papelão e plásticos nos lixos das empresas e mesmo nos aterros urbanos (Brasil, 2010).

A lei insere o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, abrangendo diagnóstico da situação atual, proposição de cenários, metas para redução, reutilização, reciclagem, aproveitamento energético, eliminação de “lixões”, programas e ações, normas para acesso a recursos federais, e diretrizes para gestão regionalizada dos resíduos sólidos, com horizonte de 20 anos para cumprimento das metas. Fica proibida a disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos em praias, no mar ou em corpos hídricos, o lançamento *in natura* a céu aberto (exceto resíduos de mineração) e a queima a céu aberto, sem licença (Brasil, 2010).

O Plano também define o contexto da atividade de “catação” de recicláveis, apontando caminhos para a inclusão social dos catadores, sustentabilidade econômica de sua atividade e desenho de uma política pública eficaz voltada a esta categoria. As Diretrizes e Estratégias estabelecidas relativas aos resíduos sólidos urbanos buscam principalmente a melhoria da gestão e do gerenciamento dos resíduos sólidos como um todo, o tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a inserção social dos catadores e materiais reutilizáveis e recicláveis. Entre esses, o foco principal foi a erradicação e reabilitação das áreas de lixões a céu aberto e de soterramento de lixões (denominados “aterros controlados”), visando reduzir impactos ambientais, tais como a contaminação do solo, de águas superficiais e subterrâneas, e migração de gases poluentes para áreas externas à massa de resíduos. Para amenizar esses impactos, o desenvolvimento de tecnologias que minimizem a disposição final de resíduos em aterros sanitários foi estimulado pela Pesquisa & Desenvolvimento, que incentiva a inovação tecnológica por meio da colaboração com Instituições de Ensino Superior. Essa abordagem visa impulsionar a reutilização e reciclagem no país, tanto por parte dos consumidores quanto pelos setores público e privado. Para isso, buscou-se o local de implantação de reaproveitamento e reciclagem de materiais em polos regionais o que amplia ainda mais a inclusão social dos catadores com a qualificação e fortalecimento das

cooperativas de catadores, com estimativa de precisar de pelo menos 600.000 catadores (Ministério Do Meio Ambiente, 2012).

Tais estratégias englobam ações direcionadas à coleta seletiva nos municípios, destinação adequada, implementação da Logística Reversa (especialmente de embalagens), e participação efetiva dos catadores nesse processo. A ênfase recai na eficiente triagem do material, alinhada aos padrões estabelecidos para aproveitamento em unidades recicladoras, bem como na gestão global dos resíduos sólidos (Ministério Do Meio Ambiente, 2012).

Apesar dos avanços na legislação brasileira, nenhuma das 6 metas propostas em 2012 foram alcançadas em 2020, como pode se avaliar nos dados contidos no novo Plano Nacional em 2022. Uma das grandes decepções foi a determinação de eliminação total dos lixões até o ano de 2014, que ainda está longe de ser alcançada, mesmo em 2024.

Nove anos após a promulgação da lei 12.035, o Decreto Nº 10.117, de 2019, estabeleceu as diretrizes para a qualificação de projetos destinados à ampliação da recuperação energética a partir de resíduos sólidos urbanos, em conjunto com o setor privado. A criação da Lei Nº 14.026 de 2020 ampliou os serviços de manejo de resíduos sólidos em serviços de saneamento básico, que também incluem o abastecimento de água, esgotamento sanitário, e drenagem de águas pluviais (Brasil, 2019).

Em um esforço para acelerar o combate aos lixões, estabeleceu também que a disposição final dos rejeitos deveria ser implantada com os seguintes prazos: até 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana; até 2022, para Municípios com população superior a cem mil habitantes; até 2023, para Municípios com população com mais cinquenta mil habitantes e, até 2024, para Municípios com população inferior a cinquenta mil habitantes (Brasil, 2020). Novamente as metas não foram cumpridas em sua totalidade, uma vez que muitas cidades menores não possuíam projetos técnicos aprovados para obterem financiamento governamental. Ressaltam-se as ações positivas do legislativo para vencer os desafios que, lastimavelmente, não encontram apoio em regulamentações para que centenas de pequenas cidades possam ter auxílio técnicos para desenvolver seus projetos de disposição adequada dos resíduos.

Com ênfase na coleta seletiva para auxiliar no atingimento das metas dos planos de resíduos sólidos, o Decreto Nº 10.936 de 2022 aprimorou a Lei nº 12.305

de 2010 na qual a separação de resíduos secos e orgânicos foi impulsionada com a participação de cooperativas de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis. Além disso, a legislação enfatizou a implementação da logística reversa, visando a otimização da infraestrutura física e logística, ganhos de escala e sinergia entre os sistemas. A legislação também destaca a importância das cooperativas de catadores, incentivando a formalização, o empreendedorismo, a inclusão social e a emancipação econômica. As instituições financeiras federais poderiam criar linhas de financiamento específicas para aquisição de máquinas, investimentos em gestão de resíduos e recuperação de áreas contaminadas (Brasil, 2022a). O Decreto Nº 11.043 de 2022 aprovou o novo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) que desenvolveu metas e estratégias desde a coleta até a destinação final, enfatizando a importância da hierarquia na gestão de resíduos (Brasil, 2022b). O Planares alinhou-se com o Programa Nacional Lixão Zero e teve início com o diagnóstico da situação dos resíduos sólidos no país e, com base nas premissas consideradas, foram propostas as metas, diretrizes, projetos, programas e ações voltadas à consecução dos objetivos da Lei para um horizonte de 20 anos (Ministério Do Meio Ambiente, 2022).

Algumas estratégias foram definidas para alcançar as novas metas propostas no combate a disposição inadequada, principalmente em municípios que ainda utilizam lixões e aterros controlados. A definição de orientações técnicas para o encerramento dessas áreas e a recuperação de regiões afetadas ainda é um desafio grande no Brasil, além de levantamentos e mapeamentos abrangentes de lixões e aterros controlados, acompanhados da disponibilização de recursos para o encerramento. A assistência técnica também foi enfatizada, de modo a apoiar a elaboração de projetos, processos licitatórios e gestão técnica, orçamentária e financeira. Outras estratégias para melhorar a gestão de resíduos sólidos incluem a redução do consumo de produtos de uso único, a priorização de municípios responsáveis pelo gerenciamento de resíduos, a criação de bancos de alimentos para evitar o desperdício e a promoção da educação ambiental. No contexto do aumento da reciclagem de resíduos sólidos, procura-se incentivar o mercado da reciclagem, que ainda está superando obstáculos técnicos, econômicos e tributários à ampliação do conteúdo reciclado na produção nacional. Além disso, sugere-se a instituição de tratamentos tributários diferenciados, mecanismos para desincentivar produtos não-recicláveis e a divulgação de informações padronizadas sobre reciclabilidade e descarte adequado (Ministério Do Meio Ambiente, 2022).

Para incentivar o mercado da reciclagem, dois decretos e uma nova lei foram publicados em 2023. O de nº 11.413 instituiu três certificados no âmbito dos sistemas de logística reversa: o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa (CCRLR), o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral (CERE) e o Certificado de Crédito de Massa Futura. O CCRLR foi um comprovante da restituição ao ciclo produtivo de produtos ou embalagens sujeitos à logística reversa. O CERE certificou empresas como titulares de projetos estruturantes de recuperação de materiais recicláveis, garantindo a restituição ao ciclo produtivo. Já o Certificado de Crédito de Massa Futura permitiu que empresas antecipassem o cumprimento de suas metas de logística reversa, proporcionando investimentos financeiros para sistemas estruturantes e desvio de materiais recicláveis de aterros, considerando impactos socioambientais. Esses certificados representaram um avanço significativo na promoção da economia circular, no estímulo à reciclagem e na redução do impacto ambiental, destacando a importância da colaboração entre setores público e privado na gestão responsável dos resíduos sólidos (Brasil, 2023a).

O segundo decreto de 2023 foi o de nº 11.414, uma iniciativa importante na promoção da inclusão socioeconômica e melhoria das condições de trabalho dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis. Este decreto instituiu o Programa Diogo de Sant'Ana Pró-Catadoras e Pró-Catadores para a Reciclagem Popular com o objetivo de integrar e articular ações da administração pública federal, estadual, distrital e municipal em prol dos direitos humanos desses profissionais, fortalecendo suas organizações, melhorando as condições de trabalho, promovendo a inclusão socioeconômica e expandindo iniciativas como coleta seletiva, reutilização, reciclagem, logística reversa e educação ambiental e a criação do Comitê Interministerial para Inclusão Socioeconômica de Catadoras e Catadores de Materiais Reutilizáveis e Recicláveis (Brasil, 2023b).

A Lei nº 14.785 de 2023 estabeleceu normas abrangentes sobre a pesquisa, experimentação, produção, embalagem, rotulagem, transporte, armazenamento, comercialização, utilização, importação, exportação, destino final dos resíduos e embalagens, registro, classificação, controle, inspeção e fiscalização de agrotóxicos, produtos de controle ambiental, produtos técnicos relacionados e afins. Dentre esses requisitos, destaca-se a necessidade de que as embalagens sejam projetadas e fabricadas de forma a impedir vazamentos, evaporação, perda ou alteração do conteúdo. Além disso, é enfatizado que as embalagens devem facilitar operações

como lavagem, classificação, reutilização e reciclagem. Essas medidas visam garantir a segurança, eficiência e sustentabilidade no manuseio desses produtos, minimizando impactos ambientais e promovendo práticas responsáveis ao longo de sua cadeia de produção e utilização (Brasil, 2023c).

A partir de uma análise atual da situação dos resíduos plásticos no Brasil, verificou-se que os índices de reciclagem dos principais materiais no Brasil permanecem em patamares consideravelmente baixos, com exceção das latas de alumínio, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Índice de reciclagem de resíduos secos provenientes de embalagens

<b>Resíduos Recicláveis de Embalagens</b>	<b>Índice de Reciclagem</b>	<b>Ano-base</b>	<b>Referência</b>
<b>Latas de Alumínio</b>	97,40%	2020	Abralatas/Abal
<b>Papel/Papelão</b>	66,90%	2019	Ibá
<b>Latas de Aço</b>	47,10%	2019	Abeaço
<b>Embalagem multicamada</b>	42,70%	2020	Cempre/TetraPak
<b>Vidro</b>	25,80%	2018	Abividro
<b>Plástico</b>	22,10%	2018	Abiplast

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2022)

Atualmente, há pouca disponibilização de caixas coletoras e baixa adesão da população aos sistemas de coleta seletiva. Os mercados locais de comercialização e reciclagem de materiais ainda é inexistente ou mal estruturados; a cadeia logística oscilante e descontinuada, e há uma elevada tributação incidente sobre as diferentes etapas da reciclagem, principalmente sobre a matéria-prima secundária e concorrência desleal com alternativas de destinação final inadequadas mais baratas (lixões e aterros controlados).

A recuperação energética dos resíduos no Brasil acontece quase de forma experimental com a conversão de resíduos sólidos em combustível, energia térmica ou eletricidade, por meio de processos, como digestão anaeróbia, recuperação de gás de aterro sanitário, incineração e coprocessamento. Um ponto a ressaltar foi a inclusão da recuperação energética de RSU, como uma fonte específica, nos leilões de compra de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração, a partir de 2021. O País conta com incineradores para resíduos industriais e de serviços de saúde e diversas unidades de recuperação energética estão começando a ser instaladas, marcando um diferencial na substituição de aterros diversificando o destino dos resíduos sólidos no país.

O Planares estabeleceu nove metas para 2040, com indicadores que precisam alcançar certos valores a cada quatro anos. Para avaliar o progresso dessas metas, analisou-se os valores alcançados de seis metas em 2022 com valores esperados para 2024. As últimas três metas não possuem dados disponíveis para a devida comparação. A análise foi feita com o indicador global de cada meta como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Metas e Indicador global do Planares

<b>Metas</b>	<b>Descrição</b>	<b>Indicador global</b>
<b>1</b>	Aumentar a sustentabilidade econômico-financeira do manejo de resíduos pelos municípios	Percentual dos municípios que cobram pelos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos por instrumento de remuneração específica
<b>2</b>	Aumentar a capacidade de gestão dos municípios	Percentual dos municípios com planos intermunicipais, microrregionais ou municipais de gestão de resíduos
<b>3</b>	Eliminar práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados	Quantidade de lixões e aterros controlados que ainda recebem resíduos
<b>4</b>	Reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada	Percentual da massa total recuperada
<b>5</b>	Promover a inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis	Percentual dos municípios com presença de catadores com contrato formalizado de prestação de serviços de manejo de materiais recicláveis por cooperativas e associações de catadores
<b>6</b>	Aumentar a recuperação da fração seca dos RSU	Percentual de recuperação de materiais recicláveis

Fonte: Ministério Do Meio Ambiente (2022)

Foram comparados os resultados obtidos em 2022 por cada indicador global das seis metas a serem cumpridas pelo Planares. Os dados de 2022 foram obtidos no Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Visão Geral 2023 disponibilizado pela SNIS e os valores de 2020 e 2024 estão presentes no Planares. A Tabela 4 apresenta os resultados alcançados no Brasil após dois anos do cenário inicial (2020) e mostra a percentagem de progressão das metas para o desejado em 2024.

Tabela 4: Comparação da progressão das metas em 2022

Metas	Resultados			Progressão
	2020	2022	2024	
1	29,2%	40%	100%	15%
2	40%	46,4%	51,8%	54%
3	2612	2120	0	19%
4	2,2%	5,5%	13,8%	28%
5	7,9%	26,8%	24,5%	>100%
6	2,2%	2,37%	5,7%	5%

Fonte: Ministério Do Meio Ambiente (2022) e SNIS (2023)

Observando a Tabela 4, constata-se que, em 2022, todas as metas registraram avanços em relação a 2020, com destaque para a meta 5, que já ultrapassou as expectativas estabelecidas para 2024. Além dessa, apenas a meta 2 atingiu o resultado esperado em dois anos de análise, apresentando um progresso superior a 50%, resultado que idealmente seria replicado em todas as metas, e mostrando que está tendo avanços no desenvolvimento de planos municipais de gestão dos resíduos sólidos. No entanto, é notável que a meta 3, relacionada à eliminação de lixões e aterros controlados, não apresenta resultados favoráveis, com 2120 unidades ainda operando em 2022, apesar do plano inicial de encerrar essas instalações em 2014, conforme delineado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2012.

As metas 4 e 6, diretamente ligadas ao tratamento de resíduos plásticos, mostram progresso limitado durante esse período. Isso é atribuído ao fato de que apenas 15% da população urbana é atendida pela coleta seletiva, um requisito essencial para a coleta e triagem adequadas dos materiais, direcionando efetivamente os resíduos para a reciclagem. Uma gestão mais eficiente e o apoio a catadores e associações de coleta podem resultar em melhorias significativas. Observa-se que, para alcançar as metas propostas para 2024, é necessário um comprometimento mais expressivo, incluindo a implementação de punições, regulamentações e fiscalização. A tabela 5 apresenta, como mencionado nos métodos, os dados calculados e compilados dos dados apresentados no Panoramas da ABRELPE (2004 a 2022) e da

ABREMA (2023) e dos dados de reciclagem de resíduos plásticos da ABIPLAST (2010 a 2022).

Tabela 5: Destinação final dos resíduos plásticos no Brasil em toneladas

Ano	Geração	Coleta	Aterro	Reciclagem	Aterro controlado	Lixão	Total Inadequado
2000	7.386.533	6.902.476	2.374.452	690.248	1.622.082	2.215.695	3.837.777
2004	7.993.983	7.993.983	3.277.533	745.103	1.838.616	2.078.436	3.917.052
2008	9.069.484	9.069.484	4.978.239	980.855	1.532.743	1.577.647	3.110.389
2010	10.787.012	9.592.761	4.568.496	953.097	2.356.941	1.714.226	4.071.168
2011	11.022.212	9.885.820	4.662.707	1.077.000	2.404.231	1.741.881	4.146.113
2012	11.054.431	9.843.707	4.652.223	1.086.658	2.382.177	1.722.649	4.104.826
2013	11.184.382	10.109.847	4.839.151	1.065.000	2.436.473	1.769.223	4.205.696
2014	11.506.593	10.433.945	5.127.990	955.000	2.535.449	1.815.506	4.350.955
2015	11.675.258	10.596.033	5.379.871	840.000	2.553.644	1.822.518	4.376.161
2016	11.337.927	10.316.195	5.196.555	890.000	2.424.306	1.805.334	4.229.640
2017	11.457.665	10.450.276	5.085.513	1.090.600	2.393.113	1.881.050	4.274.163
2018	11.663.434	10.731.706	5.285.765	1.099.600	2.468.292	1.878.049	4.346.341
2019	11.722.210	10.784.551	5.227.308	1.189.500	2.480.447	1.887.296	4.367.743
2020	12.133.531	11.194.047	5.485.816	1.253.000	2.535.452	1.919.779	4.455.231
2021	12.165.906	11.260.056	5.402.334	1.410.000	2.533.513	1.914.210	4.447.722
2022	12.050.613	11.213.807	5.335.446	1.516.190	2.489.465	1.872.706	4.362.171

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 5, além de destacar volumes expressivos de resíduos ainda sendo destinados inadequadamente, mostra que o Brasil ainda não coleta 100% dos seus resíduos plásticos, evidenciando a má gestão desses materiais. Ao analisar o alinhamento com as metas estabelecidas pelo Planares, especialmente no que diz respeito ao combate aos lixões, à coleta seletiva e à separação de materiais secos, é possível constatar a ausência de avanços significativos em sua implementação. A lenta progressão na definição de novas legislações no Brasil continua a ser um fator limitante no esforço do país para recuperar o tempo perdido e atingir patamares mais elevados na redução e tratamento dos resíduos sólidos.

### 3.2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS REGIÕES

Verificou-se que a UE aprimorou o desenvolvimento de sua legislação ambiental na década de 90 com melhorias progressivas no planejamento e gerenciamento dos resíduos sólidos e, em particular, dos plásticos. O rigor na fiscalização e cobrança no cumprimento metas, bem como a disponibilização de apoio

técnico e financeiro tem permitido o avanço em todos os países da UE. Ressalta-se que a legislação europeia, desde cedo, deu importância aos resíduos sólidos plásticos, propondo novos métodos de aproveitamento e de reciclagem, sendo ainda a protagonista na ACV dos plásticos com desafio de ter todas as embalagens 100% recicladas até 2030.

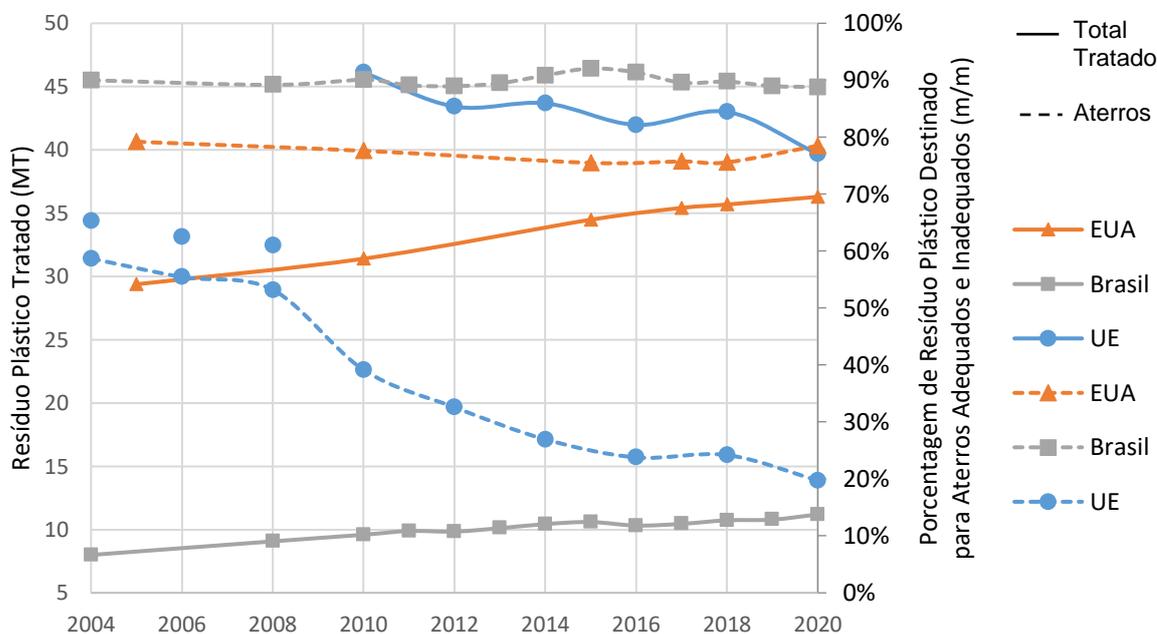
Os EUA têm se mostrado atrasados na aprovação de políticas nacionais de gerenciamento dos resíduos sólidos, embora muitos estados tenham tomado ações específicas neste sentido. O foco nacional foi na gestão geral de resíduos sólidos, com descarte em aterros sem a coleta seletiva e sem dar a devida importância aos materiais contidos nesses resíduos. Mais recentemente, novas legislações têm priorizado o reaproveitamento de resíduos, através da recuperação energética e a reciclagem. Os planos nacionais definidos pelo EPA mostraram foco no desenvolvimento de novas tecnologias e de técnicas de gestão para melhorar a sustentabilidade. Os plásticos se tornaram prioridade devido a contaminação em águas e a nova meta é alcançar 50% de reciclagem de embalagens plásticas até 2025.

No Brasil, assim como em boa parte das nações em desenvolvimento, as políticas de gerenciamento dos resíduos sólidos ainda são precárias. Apenas em 2010 foram publicadas as primeiras leis sobre o assunto, mas as regulamentações seguintes não foram acompanhadas de disponibilização de recursos financeiros e de fiscalização, o que resultou em metas não sendo atingidas. Em 2022, um novo esforço legislativo foi empreendido, culminando na criação da nova Política Nacional de Resíduos Sólidos e no Planares. Os desafios estão na ampliação da coleta de lixo (que está em torno de 93% da massa total) e na remoção das formas de disposição inadequada dos resíduos em “lixões”, que ainda representam 39% do total. Os resíduos plásticos, tais como as latas de alumínio, papelão e vidro estão englobados na classificação de resíduos secos. Embora haja sucesso no reaproveitamento do alumínio, que é próximo de 100%, os plásticos reciclados representam apenas 13% do total coletado. As cooperativas de “catadores” têm sido incentivadas pois ajudam a mitigar o problema social relacionado à população de baixa renda e pode alavancar a reciclagem no País nos próximos anos.

Os dados das Figura 8 a Figura 11 foram obtidos a partir de informações coletadas nas fontes governamentais citadas na metodologia, agrupados, calculados e ajustados para construção dos gráficos apresentados. A Figura 8 mostra que quantidade total de resíduo plástico tratado na UE e no Brasil aumentou muito pouco

nos últimos 10 anos enquanto no EUA houve um aumento de 10%. Assim, apesar da política dos países desenvolvidos de buscar a mitigação do uso do plástico esteja em vigor há muitos anos, a não geração de resíduos plásticos não foi alcançada.

Figura 8: Resíduo plástico tratado (MT) e percentagem em aterros adequados e inadequados



Fonte: Autoria Própria

A geração de resíduos plásticos e posterior tratamento está diretamente ligada ao nível socioeconômico de um país. Os EUA e a UE têm tratado mais de 35 MT de plásticos por ano, enquanto no Brasil esse valor é de 11 MT (ABREMA, 2023; EPA, 2020c; Plastics Europe, 2022a). Considerando a população das regiões estudadas verifica-se um uso de plástico *per capita* (toneladas/habitantes) de 0,2552 no EUA, 0,1529 na UE e 0,0359 no Brasil em 2020 (ABIPLAST, 2022; OECD, 2022). O consumo individual de plástico nos EUA foi 67% maior do que na UE, refletindo a cultura de consumo dos americanos. Assim, apesar dos esforços de longa data dos países desenvolvidos para mitigar o uso de plástico, o objetivo de não geração de resíduos plásticos está longe de ser alcançado.

Uma menor quantidade de resíduos plásticos tratados na UE foi observada entre 2004 e 2008 devido à falta de informações no Eurostat para algumas categorias de resíduos. Outra consideração relevante diz respeito à queda no gerenciamento de resíduos plásticos na UE durante 2020, em meio à pandemia de COVID-19, que afetou a produção, o uso e a geração de resíduos plásticos (OCDE, 2022).

O desafio principal não reside apenas na diminuição da produção de plástico, mas na necessidade essencial de estabelecer sistemas eficazes para a sua coleta e subsequente tratamento após o uso. A coleta de resíduos sólidos na UE e nos EUA em 2020 é próxima dos 100% (EPA, 2020b; Plastics Europe, 2022a), e no Brasil está em torno de 93% (ABREMA, 2023). Dentre as regiões, o Brasil apresenta a maior percentagem de resíduos plásticos dispostos em aterros sanitários e aterros inadequados, um pouco acima dos níveis encontrados nos EUA com 80%. Observa-se que a UE está conseguindo alterar o seu modo de destinação final, tendo uma diminuição de 39% desde 2004. Nota-se que a partir da Diretiva 2008/122/EC, tratando de resíduos e suas disposições, uma queda significativa foi verificada para o uso dos aterros de resíduos plásticos na UE.

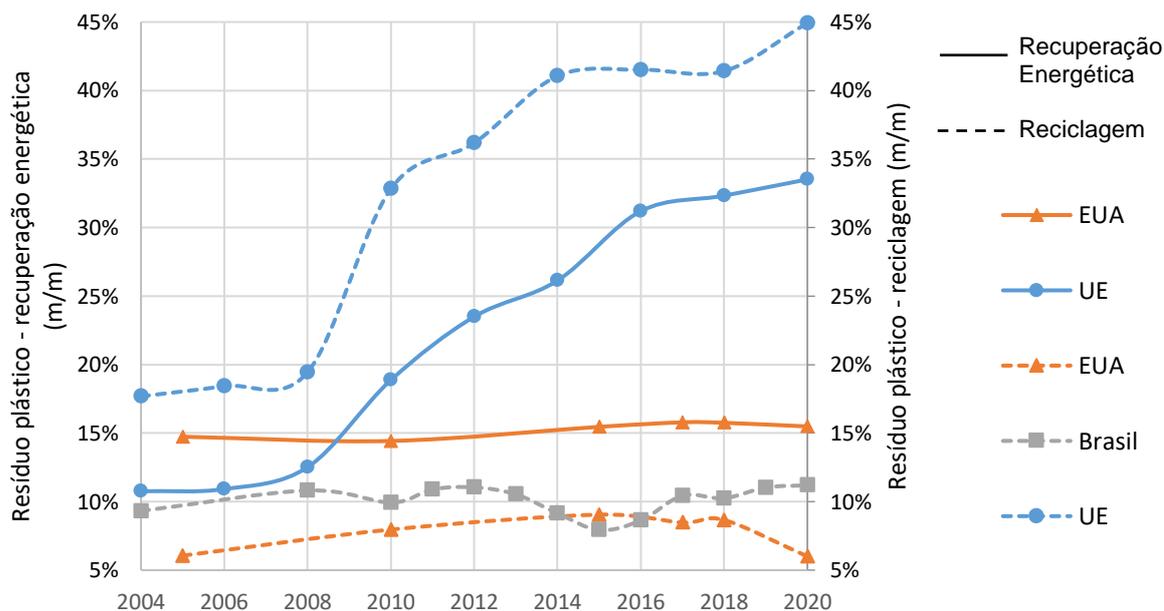
Os resíduos plásticos coletados podem ter destinos diversos tais como disposição em aterro, recuperação energética, reciclagem, incineração e disposições inadequadas. Mesmo com as tecnologias atuais que aumentam a segurança da disposição, ela ainda possui altos impactos ambientais e riscos à saúde humana. A incineração tem sido descontinuada na Europa e nos EUA. Em 2010, 9% dos resíduos plásticos eram incinerados na Europa e esse número caiu para 1,8% em 2020. Nos EUA, a quantidade de incineradoras comerciais vem diminuindo, de cerca de 185 unidades em 1988 para aproximadamente 65 unidades em 2021 (Energy Justice Network, 2022). Os dados disponíveis pela EPA somam as quantidades de resíduos levados para a incineração sem recuperação energética e os aterros (EPA, 2020c). No Brasil, segundo o Planares, a incineração nunca foi adotada para o tratamento de RSU e o baixo nível de maturidade da destinação de resíduos é evidenciado pela disposição direto na natureza devido ao mal gerenciamento dos resíduos com consequências na poluição, principalmente, das águas.

Assim, incentivos ao aumento da reciclagem e da recuperação energética têm sido propostas na legislação em anos recentes. Neste contexto, é notório os avanços obtidos na UE visando a substituição de aterros por processos mais amigáveis ambientalmente. Nos EUA, o aterro é a principal destinação final de seus resíduos, inclusive os plásticos. Um novo plano nacional em 2023 prevê alterações com expectativa de até 2030 ter de 50% dos resíduos plásticos em peso na reciclagem ou na recuperação energética. As informações sobre a disposição em aterro no Brasil estão distorcidas, evidenciadas em 2022, na qual apenas 44% da massa total de

resíduos plásticos foram encaminhados a aterros sanitários, enquanto 36% foram dispostos inadequadamente em lixões a céu aberto ou com soterramento.

A Figura 9 apresenta a percentagem de recuperação energética e reciclagem de plásticos que substituíram a disposição em aterros. A UE tem aplicado novas tecnologias desde o início dos anos 2000, aumentando o tratamento por reciclagem nos últimos 20 anos. Nos EUA, nos últimos 20 anos, apenas 15% do total de resíduo plástico coletado é usado na produção de energia. Recentemente, as políticas nacionais a definiram como forma preferencial ao uso de aterro (EPA, 2021). Os efeitos dessa transição deverão acontecer num futuro próximo, se as políticas forem bem aplicadas. No Brasil esta tecnologia é inexistente, porém, em 2019, houve maior incentivo legislativo à recuperação energética e as primeiras plantas estão sendo construídas para operarem nos próximos anos. Assim como ilustrado na Figura 8, observa-se que a mudança na destinação dos resíduos plásticos na UE ocorreu a partir da implementação da Diretiva de 2008 sobre resíduos.

Figura 9: Percentagem de resíduos plásticos no tratamento por recuperação energética e por reciclagem.



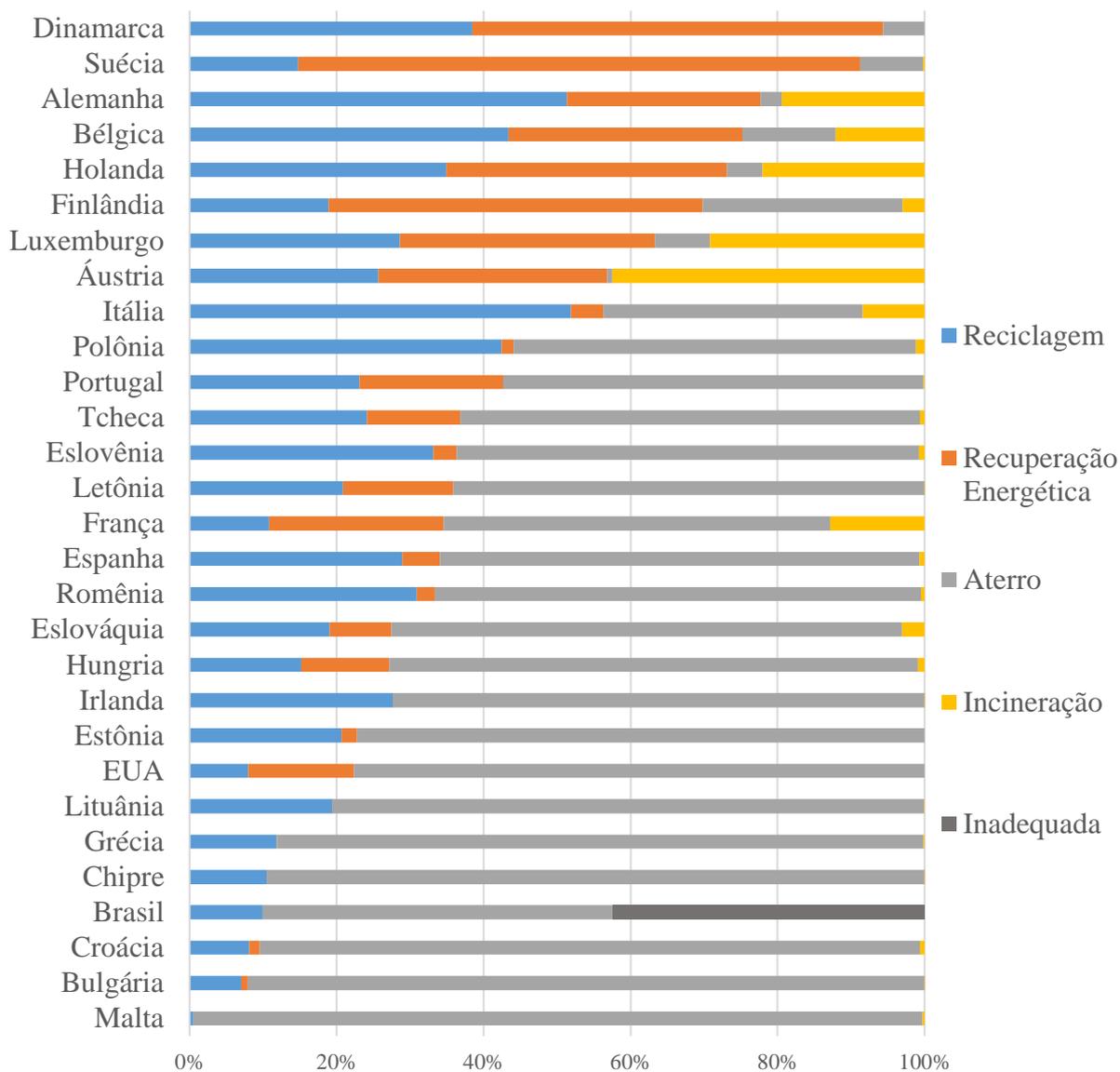
Fonte: Autoria Própria

A reciclagem é o destino ambientalmente mais indicado para os resíduos plásticos. A reciclagem primária é realizada internamente na indústria e não há estatística sobre esses dados na literatura. A reciclagem mecânica é mais utilizada, atualmente, para tratamento de resíduos plásticos em todo o mundo. Novas

tecnologias têm sido desenvolvidas para a reciclagem química, principalmente os processos de pirólise, gaseificação e solvólise. A Figura 9 mostra que a UE tem obtido grandes avanços na substituição da disposição do resíduo plástico no aterro através da reciclagem (aproximadamente 45% do total). Nos EUA e no Brasil, cerca de 10% foram reciclados nos últimos 20 anos, sendo que a queda na quantidade de plásticos reciclados nos EUA em 2020 é atípica e pode ser atribuída a interrupções na cadeia de reciclagem causadas pela pandemia de COVID-19 (APR, 2020). Isso mostra que esses países não têm conseguido transformar suas políticas, que visam a diminuição dos impactos ambientais, em resultados. Verifica-se que o eficiente gerenciamento e a fiscalização fazem com que as legislações europeias possam ter suas metas atingidas.

A análise dos tipos de destinação aplicadas por país é importante para obter o entendimento do nível atual de sustentabilidade que eles se encontram. As Figura 10 e Figura 11 apresentam as percentagem de cada tipo de destinação aplicada nos anos de 2010 e 2020 dos países da UE, EUA e Brasil.

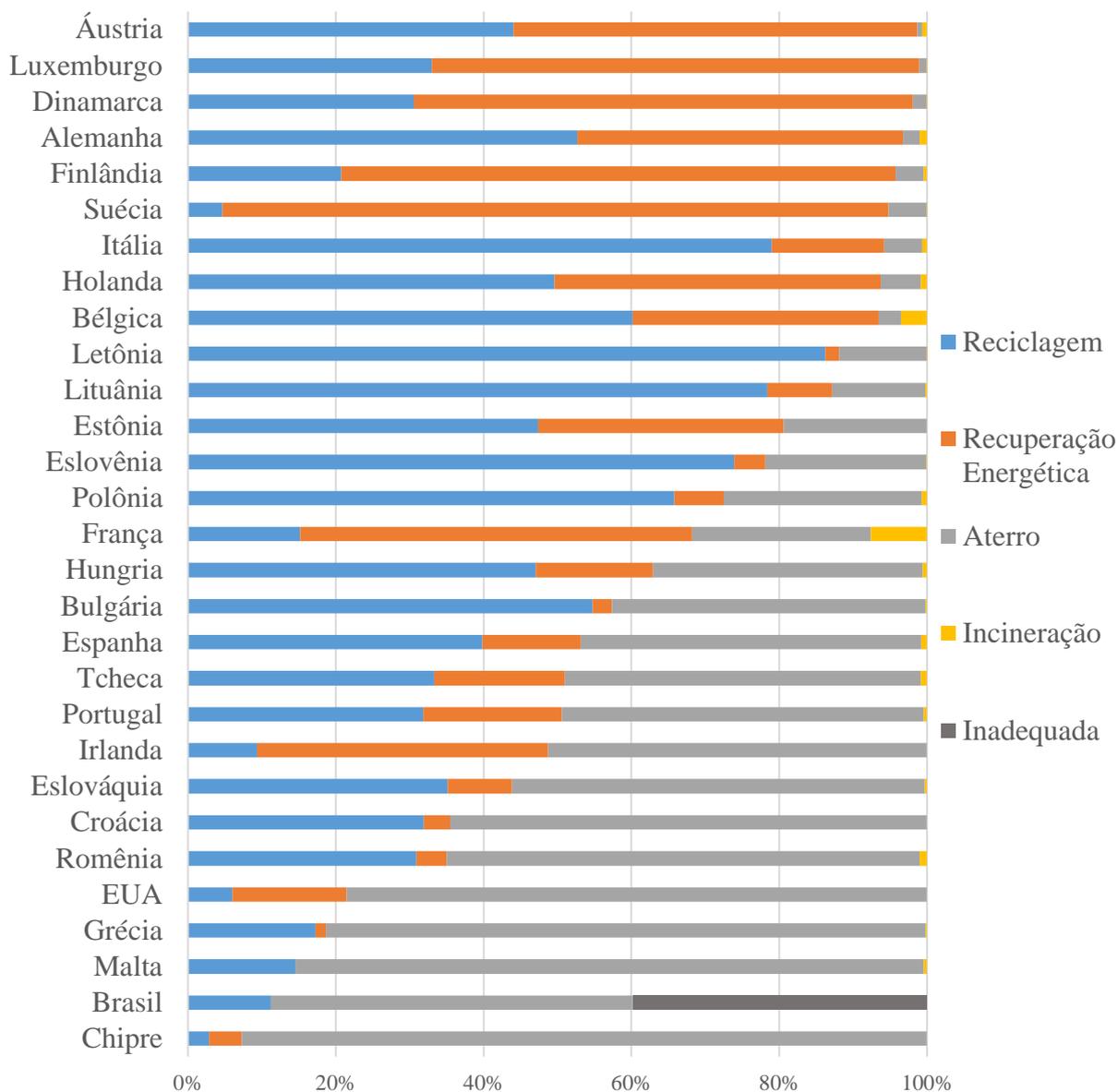
Figura 10: Tipos de destinação por país em 2010



Fonte: Autoria Própria

Em 2010, a disposição em aterro predominava como a principal forma de destinação final na maioria dos países. Importante ressaltar que, nessa época, nenhum país, com exceção do Brasil, possuía disposições inadequadas ativas na gestão de seus resíduos sólidos, indicando que essa é uma prioridade urgente a ser enfrentada por nações que ainda as utilizam ao redor do mundo. Nota-se que tanto os EUA como o Brasil são um dos países que menos utilizam tratamentos sem ser aterros, indicando a menor importância ao gerenciamento de resíduos plásticos dos países. Na Europa, verifica-se que, mesmo com a maior parte dos resíduos sendo disposta em aterro, a mudança da gestão está acontecendo em todos os países.

Figura 11: Tipos de destinação por país em 2020



Fonte: Autoria Própria

Em relação aos EUA e ao Brasil, destaca-se a ausência de mudanças significativas em seus métodos de tratamento de resíduos plásticos ao longo dos anos analisados. Em contrapartida, a maioria dos países europeus evidenciou um progresso notável nessa transição, impulsionado por alterações na hierarquia das destinações e por uma transformação na visão sobre resíduos em geral, juntamente com as atualizações nas metas estabelecidas para cada país ao longo do tempo.

Adicionalmente, alguns países europeus, em anos anteriores, ainda recorriam à incineração como parte de sua gestão de resíduos plásticos. Entretanto, em 2020, essa prática foi consideravelmente reduzida, sendo substituída pela recuperação

energética, uma opção que tem se mostrado como uma alternativa intermediária mais sustentável em relação à disposição em aterros. Vale ressaltar que, até o momento, o Brasil não implementou nenhuma dessas duas opções de forma expressiva. Além disso, observa-se que em países mais ao norte da Europa, a adoção da recuperação energética é mais intensa, respondendo à alta demanda energética dessa região.

## 4 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

### 4.1 PLÁSTICOS

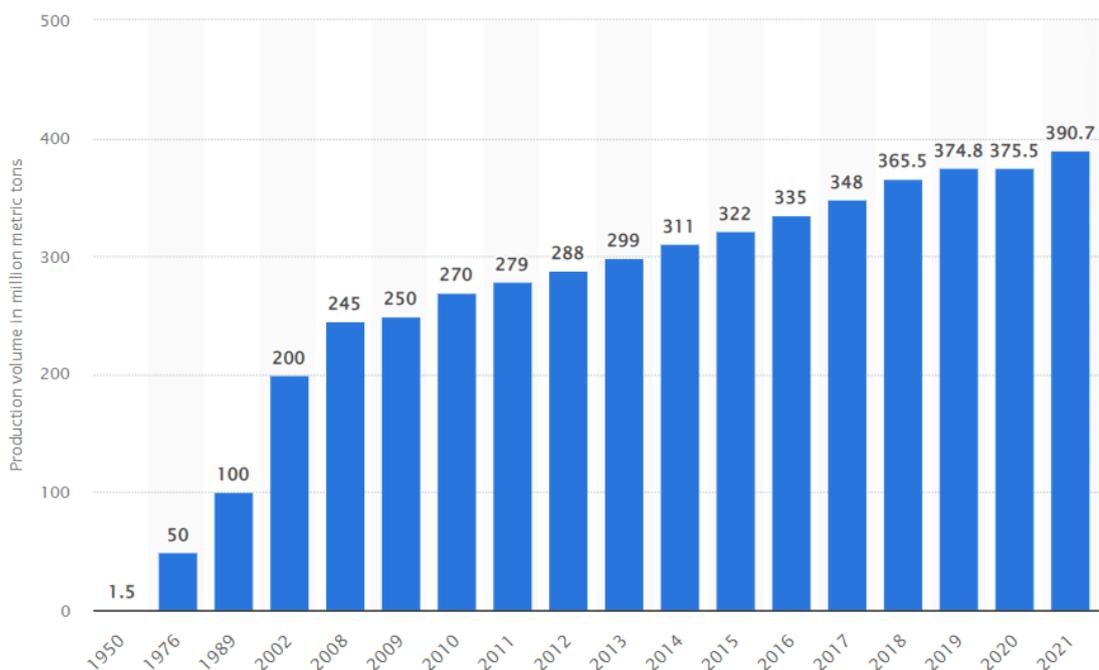
O plástico representa uma ampla classe de materiais poliméricos que atendem diversos propósitos na sociedade atual, dependendo de suas propriedades mecânicas e químicas, como, por exemplo, para embalagens, materiais de construção, transporte, eletrônicos, agricultura etc. (Faraca; Astrup, 2019). Isso advém dos diversos monômeros que constituem esses polímeros que influenciam na massa molar, composição, estrutura química e interações moleculares que resultam em uma ampla variedade de produtos com características químicas e físicas distintas (Schwarz et al., 2021).

Os plásticos são categorizados em termoplásticos e termofixos. O primeiro apresenta propriedade de reversibilidade, podendo ser fundidos e resfriados múltiplas vezes. Enquanto os termofixos possuem estruturas mais rígidas que impedem essa reversibilidade. A maior parte dos plásticos comerciais são da categoria termoplásticos, tendo então características favoráveis a reciclagem mecânica. Por outra via, os termofixos são plásticos que apenas conseguem ser transformados em matéria através da reciclagem química ou energia pela recuperação energética (Schelte; Hendrickx; Severengiz, 2023).

#### 4.1.1 Produção e Mercado

Ao longo das últimas décadas, testemunhamos um notável crescimento na produção global de plásticos. Em 1950, a produção tinha começado, totalizando apenas 1,5 MT. Contudo, essa cifra disparou de forma extraordinária ao longo do tempo, atingindo a impressionante marca de 390,7 MT em 2021, conforme ilustrado pela Figura 12. Esse aumento substancial reflete a importância e a crescente demanda por produtos plásticos em diversas indústrias e setores ao redor do mundo.

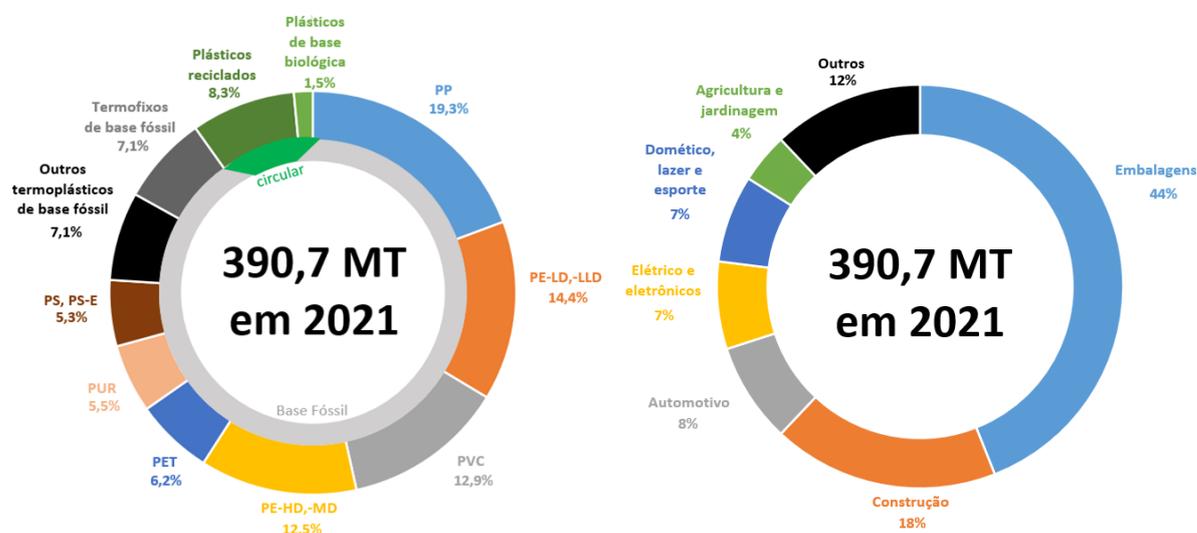
Figura 12: Produção de plástico em MT de 1950 até 2021



Fonte: Statista Research Department (2022)

Em 2021, a UE produziu cerca de 57,2 MT de plásticos, o EUA cerca de 70 MT e o Brasil cerca de 6,7 MT, mostrando que o EUA ainda é um dos principais produtores do mundo, ficando atrás apenas da China que produziu cerca de 125 MT (ABIPLAST, 2022; Plastics Europe, 2022a). Dessa produção mundial, pode-se dividir pelo tipo e pela aplicação dos plásticos gerados como apresenta a Figura 13.

Figura 13: Tipos e aplicação dos plásticos produzidos no mundo em 2021



Fonte: Plastics Europe (2022a)

Observa-se na Figura 13 que mais de 90% dos plásticos no mercado ainda são produzidos a partir de fontes fósseis, sendo as embalagens plásticas a categoria predominante. No Brasil, 40,1% dos plásticos produzidos são considerados de vida curta, ou seja, são descartados em apenas um ano de uso, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Principais setores consumidores de plástico no Brasil



Fonte: ABIPLAST (2022)

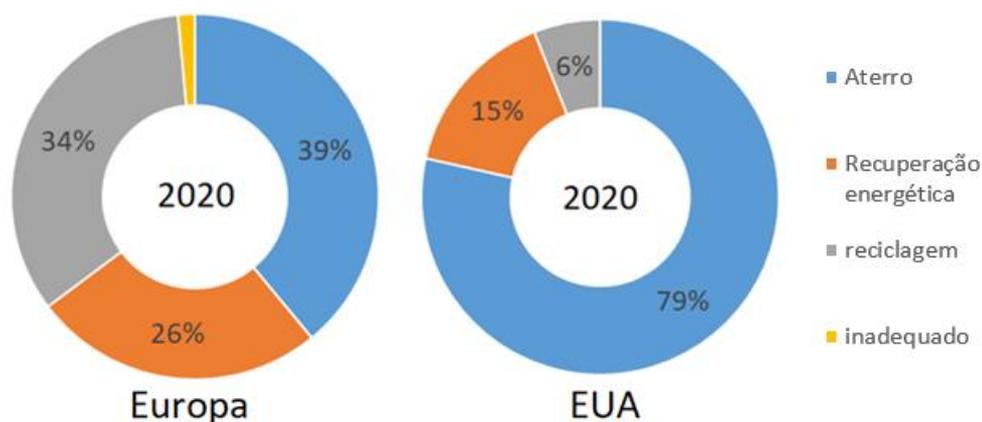
A produção em larga escala desses plásticos, aliada a uma administração deficiente de resíduos, provoca significativos desafios ambientais, incluindo a poluição de solos, oceanos e rios por plásticos em diferentes escalas, desde macroscópicos até nanoestruturas (Gandhi et al., 2021). Nesse contexto, é essencial enxergar os resíduos plásticos não como lixo, mas como matéria-prima pós-consumo, visto que a reciclagem contribui para a redução do consumo de derivados de petróleo (Khoo, 2019).

#### 4.1.2 Resíduos Plásticos

No Brasil, a quantidade de material plástico nos resíduos sólidos urbanos chegou a 16,8% em peso total no ano de 2018 (Ministério Do Meio Ambiente, 2022), sendo 23,2% em peso dos materiais reciclados secos em 2022 (ABRELPE, 2022). Esse grande volume de resíduos plásticos gera uma exigência para a identificação de possíveis soluções para o seu destino final.

A UE, em 2020, apresentou altos níveis de reciclagem e de recuperação energética. Em contrapartida, o tratamento de resíduos plásticos nos EUA apresenta uma configuração bem diferente da UE. A Figura 15 ilustra este cenário.

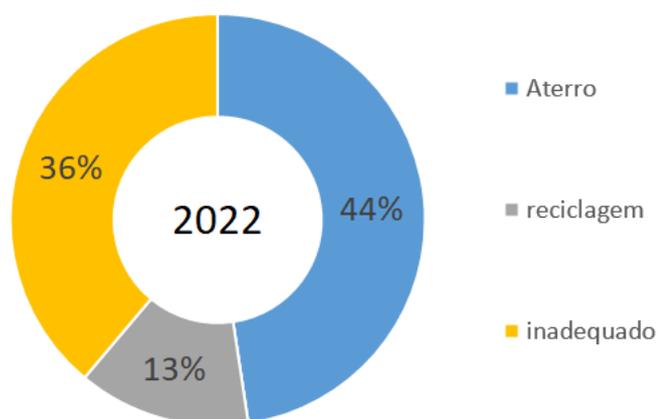
Figura 15: Disposição dos resíduos de plásticos na UE e no EUA em 2020



Fonte: Autoria Própria

De acordo com dados do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil da ABREMA, foram gerados no Brasil aproximadamente 77 milhões de toneladas de RSU em 2022. A Figura 16 apresenta os tipos de disposição final adotado pelo Brasil no ano de 2022 (ABREMA, 2023).

Figura 16: Disposição dos resíduos de plásticos no Brasil em 2022



Fonte: Autoria Própria

A disposição inadequada gera graves problemas de contaminação de solo e dos lençóis freáticos, que podem gerar doenças para a população local. Baseando-se em dados do SNIS, em 2020, aproximadamente 51% dos municípios do Brasil utilizavam formas inadequadas no seu tratamento de resíduos sólidos (SNIS, 2021).

Esse problema advém do pensamento ultrapassado de que resíduo é um material sem potencial para ser matéria-prima, ou seja, que é para ser descartado. A visão linear de produção dos produtos poliméricos, explica o processo atual no Brasil e no EUA, como apresenta a Figura 17.

Figura 17: Visão linear de produção dos plásticos



Fonte: ABIPLAST (2019)

O real problema desse tipo de gestão dos resíduos sólidos está interligado com as propriedades intrínsecas do material polimérico. A alta resistência à degradação dos plásticos contribuem bastante para o acúmulo de resíduos nos aterros, gerando problemas ambientais (Ahmad et al., 2019). O caso mais famoso do impacto ambiental dos resíduos plásticos é o *The Great Pacific Garbage Patch* no Oceano Pacífico, na qual correntes marinhas propulsionaram a criação de ilhas de plástico devido à alta quantidade de plástico lançada nos oceanos (National Geographic Society, 2022).

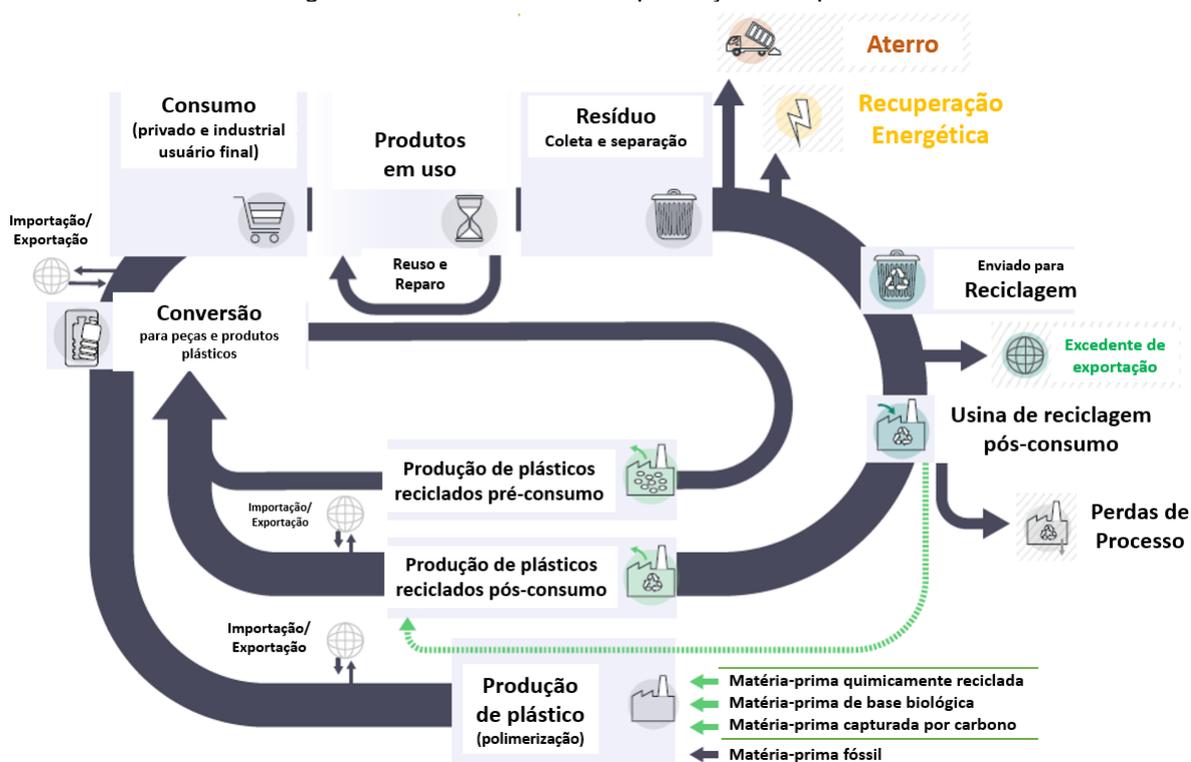
Os impactos ambientais também estão atrelados ao consumo dos resíduos plásticos por animais, especialmente os marinhos. Esse problema ainda não possui estudos suficientes que apontam o prejuízo à saúde humana, porém há um acúmulo

desses resíduos na cadeia alimentar, capaz de chegar aos humanos se não for tratado de forma adequada (Waring; Harris; Mitchell, 2018).

Além disso, muitas pesquisas estão em curso para analisar o efeito na saúde humana da poluição decorrente dos microplásticos e nanoplásticos, os quais são produzidos para fins industriais ou resultam da decomposição de materiais plásticos. Embora ainda haja escassez de estudos a respeito, as legislações globais estão começando a emergir para abordar essa crescente preocupação. Esses impactos ambientais têm implicações diretas na qualidade de vida das pessoas, uma vez que provocam danos à saúde e contaminam as fontes de alimento do planeta (Jung et al., 2022).

Por essas razões, a visão global do sistema de produção está mudando com o desenvolvimento da lógica de economia circular, em que se procura aproveitar ao máximo o potencial dos plásticos, reduzindo a demanda por material virgem e a emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), ilustrado na Figura 18 (Plastics Europe, 2022b).

Figura 18: Visão circular de produção dos plásticos



Fonte: Plastics Europe (2022b)

Os resíduos plásticos já são identificados por símbolos específicos em embalagens, visando facilitar e agilizar o processo de coleta e separação, como apresenta a Figura 19. No entanto, a ausência de instruções claras e planos eficazes

de coleta resulta na subutilização dessas nomenclaturas, comprometendo a eficiência na gestão desses resíduos (ABIPLAST, 2019).

Figura 19: Identificação e simbologia das embalagens plásticas



Fonte: ABIPLAST (2022)

## 4.2 TIPOS DE DESTINAÇÃO DOS PLÁSTICOS

### 4.2.1 Disposição Adequada

A gestão ambiental eficiente de resíduos é um componente vital, com o intuito de reduzir os efeitos prejudiciais no ecossistema, na saúde coletiva e impulsionar a sustentabilidade. A disposição final adequada, por meio de aterros sanitários, consiste na organização sistemática de rejeitos em locais designados, aderindo às regulamentações operacionais particulares para prevenir quaisquer ameaças à saúde pública e à segurança, além de reduzir ao máximo os impactos ambientais adversos (Brasil, 2010).

### 4.2.2 Disposição Inadequada

Aterros controlados e lixões são considerados formas inadequadas para a disposição final de resíduos, pois carecem de medidas efetivas de tratamento e proteção ambiental. A preocupante realidade global revela que aproximadamente 22% dos resíduos sólidos são mal gerenciados e dispostos de maneira inadequada, destacando a urgência de aprimorar práticas sustentáveis (OECD, 2023). É crucial ressaltar que a destinação inadequada de resíduos plásticos não apenas contribui para o desperdício de energia e massa, mas também intensifica os desafios ambientais. Isso ocorre devido à baixa biodegradabilidade e ao elevado poder calorífico dos resíduos plásticos, ressaltando a necessidade premente de adotar abordagens mais eficazes para o gerenciamento de resíduos sólidos (Duailibe, 2018). A implementação de práticas sustentáveis e estratégias avançadas de disposição final

é crucial para mitigar os impactos negativos no meio ambiente e promover uma gestão mais responsável e eficiente dos resíduos.

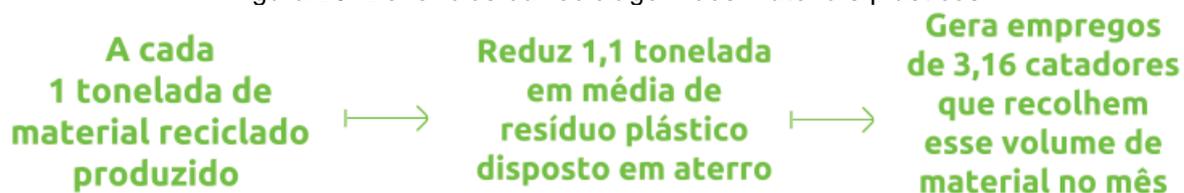
### 4.2.3 Incineração

A incineração é reconhecida como uma destinação adequada, caracterizada pela submissão dos resíduos a um tratamento térmico controlado, realizado em instalações especialmente projetadas para esse fim. O propósito fundamental desse processo é a redução do volume e da massa dos resíduos, ao mesmo tempo em que possibilita a recuperação de energia, metais e outros materiais (Ministério Do Meio Ambiente, 2022).

### 4.2.4 Reciclagem

A reciclagem do plástico tem como objetivo o aproveitamento total do potencial dos plásticos, gerando diversos benefícios socioambientais, além de contribuir para a redução da emissão de gases do efeito estufa (ABIPLAST, 2021). Apesar dos impactos relacionados ao transporte ou à demanda por material reciclável no mercado atual, a reciclagem mostra vários benefícios significativos, como a prevenção da criação de novos plásticos a partir de recursos virgens, redução da disposição em aterros e criação de novos empregos como mostra a Figura 20.

Figura 20: Benefícios da reciclagem dos materiais plásticos

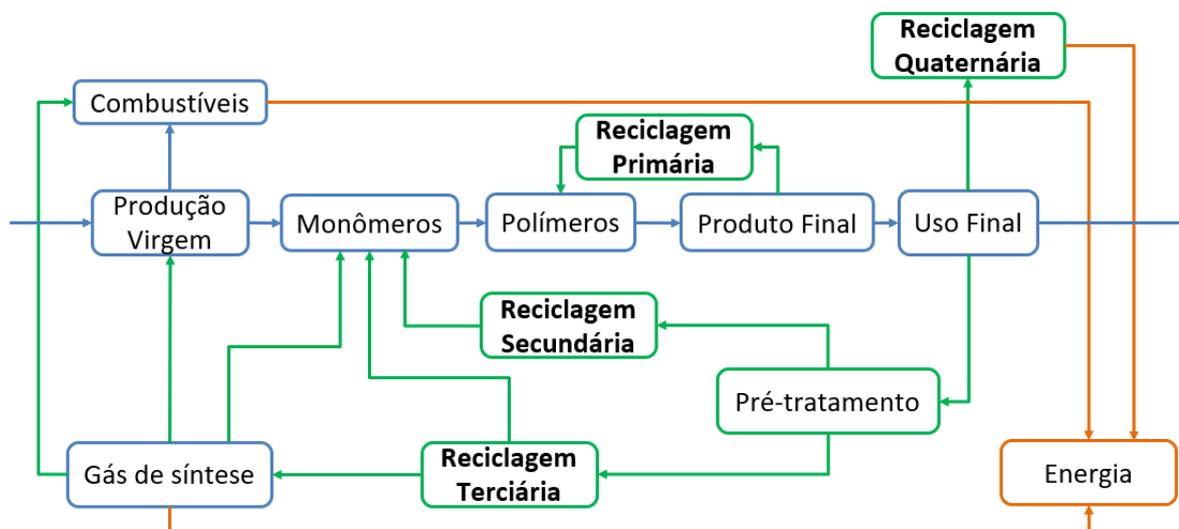


Fonte: ABIPLAST (2019)

É importante notar que existem vários fatores que contribuem para um plano de reciclagem nacional. A logística da coleta seletiva junto com a separação dos plásticos nos resíduos urbanos é o primeiro passo para uma boa gestão de resíduos. No Brasil, apenas 15% da população urbana é atendida com a coleta seletiva em 2021 (ABREMA, 2023). Destes, os catadores contribuíram com cerca de 35%, representando a importância no setor no País. Em 2022, cerca de 205 mil toneladas

de resíduos plásticos foram coletadas e separadas para reciclagem pelo mecanismo de coleta seletiva (SNIS, 2022). Existem quatro rotas fundamentais para a reciclagem dos resíduos plásticos, representadas em verde pela Figura 21.

Figura 21: Esquematização dos métodos de reciclagem e ciclo das resinas poliméricas



Fonte: Autoria Própria

#### 4.2.4.1 Reciclagem Primária

A reciclagem primária, ou reprocessamento, consiste na reintrodução do resíduo de plástico resultante do próprio processo produtivo. Este tipo de reciclagem, muito comum em indústrias, não é fiscalizado e computado como reciclagem para resíduos sólidos, já que o material não passou para a etapa de consumo. O plástico é limpo e ainda não apresenta contaminação, facilitando a sua reintrodução no processo industrial (Schelte; Hendrickx; Severengiz, 2023).

#### 4.2.4.2 Reciclagem Secundária

A reciclagem secundária, ou mecânica, consiste no processo de recuperação por vias mecânicas, sendo o processo de reciclagem mais utilizado em todo o mundo para os resíduos plásticos (Huysveld et al., 2022). Esse tipo de reciclagem funciona principalmente para os materiais termoplásticos, por apresentar propriedades de reversibilidade. Por conta disso, o processo de reciclagem mecânica não demanda altos níveis de energia e complexidade dos demais métodos de reciclagem (Dieterle;

Seiler; Viere, 2017). A Figura 22 ilustra de forma resumida o processo de reciclagem mecânica.

Figura 22: Fluxo da reciclagem mecânica de plásticos



Fonte: ABIPLAST (2022)

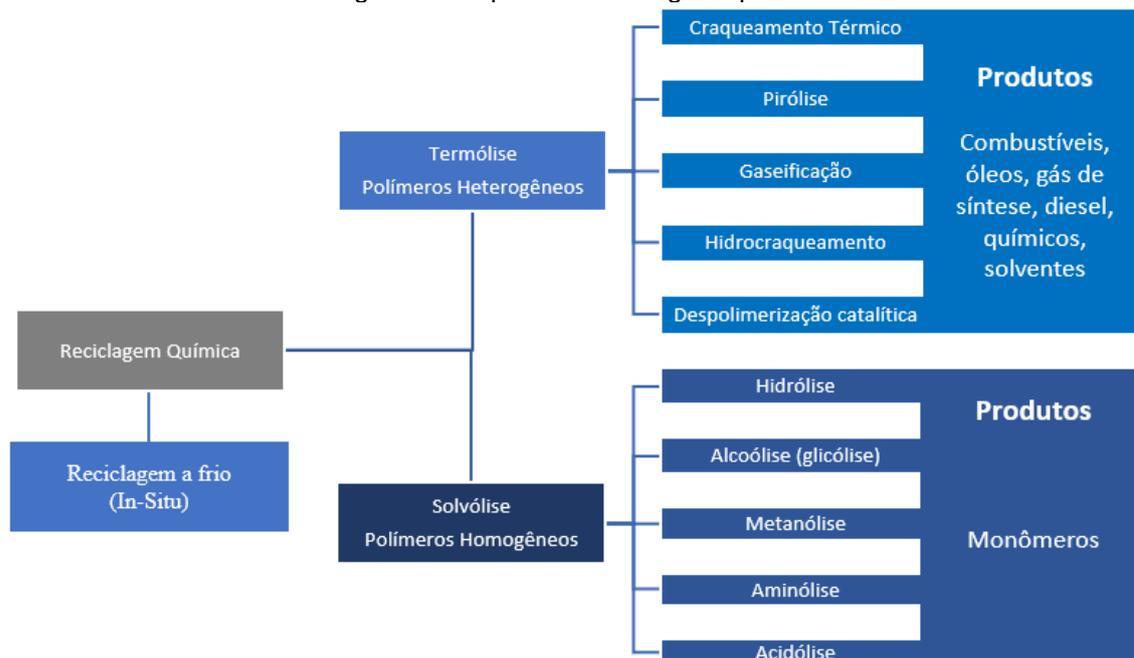
A primeira etapa do processo é a moagem dos resíduos plásticos para reduzi-los em granulados, pó ou flocos. A próxima etapa contempla a separação por tipo de plástico e a sua lavagem que necessita de altos níveis de água para a remoção de contaminantes, seguindo para a área de secagem para a remoção da água residual. Os flocos lavados e secos seguem para reprocessamento, que pode ser por extrusão, injeção ou intrusão (Jeswani et al., 2021). Enquanto o processamento por extrusão é empregado na produção de grânulos, a técnica de injeção se realiza ao preencher um molde fechado com material fundido. A intrusão, por sua vez, bombeia o material extrudado diretamente para preencher os moldes da injetora. (Civancik-Uslu et al., 2021b).

A reciclagem mecânica de plásticos enfrenta desafios significativos, como a degradação dos polímeros durante o reprocessamento devido à elevada temperatura no extrusor, gerando radicais livres. A incompatibilidade entre alguns plásticos e a presença de contaminantes na corrente reciclada também prejudicam as propriedades do produto final. Quando as propriedades do plástico são afetadas, a única opção é utilizá-lo em aplicações de baixa exigência, conhecido como rebaixamento (Almadhi; Abdelhadi; Alyamani, 2023). Além disso, os plásticos presentes nos RSU possuem contaminantes externos e internos que dificultam ou impedem a reciclagem mecânica (Lim et al., 2021). O desgaste mecânico do material reciclado pode gerar propriedades inferiores ao plástico virgem, que é combatida com a adição de mais material petrolífero, diminuindo a sustentabilidade do processo e limitando o seu ciclo infinito. Portanto, apesar de ser uma técnica consolidada, a reciclagem mecânica enfrenta limitações relacionadas a plásticos termofixos, níveis de contaminantes e materiais já reciclados (Demetrious; Crossin, 2019a).

#### 4.2.4.3 Reciclagem Terciária

A reciclagem terciária, ou química, consiste na conversão de polímeros em moléculas menores, geralmente líquidos ou gases, que podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de novos produtos petroquímicos e combustíveis. Esses processos podem ter base termoquímica, química ou biológica (Azam; Vete; Afzal, 2022). Ela surge como forma alternativa à reciclagem mecânica devido às suas limitações e se torna uma excelente alternativa para viabilizar a obtenção de produtos com características similares ou até idênticas ao produto virgem. Conforme a carga polimérica e o objetivo final da degradação, podem ser aplicadas as tecnologias de pirólise, gaseificação e por solvente. A Figura 23 mostra os tipos de reciclagem química em pesquisa no mundo.

Figura 23: Tipos de reciclagem química



Fonte: OECD (2023)

A reciclagem química ainda está no processo de maturação, sendo que além do processo de solvólise das garrafas de PET, ainda não se tem em prática plantas de outros processos com alta produção no mundo. Dentre as tecnologias presentes, a pirólise vem sendo a mais estudada por ser um processo consolidado para outras produções químicas e ter produtos desejados, como gás de síntese, óleo de pirólise e carvão.

Na pirólise térmica, ocorre uma reação endotérmica, caracterizada pela decomposição térmica de polímeros na ausência de ar, resultando principalmente em óleos e gases (Park; Lee, 2021). Essa degradação provoca a quebra das longas cadeias poliméricas em moléculas menores e menos complexas, gerando coque que pode ser utilizado como combustível no processo ou como matéria-prima em indústrias petroquímicas. Polímeros como o polietileno, polipropileno e poliestireno ao passarem pelo processo de degradação térmica, produzem hidrocarbonetos de alto valor agregado (Andooz et al., 2023). No entanto, a mistura de polímeros pode limitar esse método, resultando em produtos diferentes devido à aleatoriedade das rotas reacionais. A presença de impurezas, como compostos oxigenados, também pode modificar a distribuição do produto final, gerando metanol, formaldeído, monóxido de carbono e gás carbônico.

A pirólise catalítica é conhecida também como craqueamento térmico catalítico e seu processo segue a utilização de um catalisador (Duailibe, 2018). O emprego de catalisadores proporciona a vantagem da seleção do produto final desejado, da redução da temperatura necessária para a reação e do consumo de energia, bem como do aumento da taxa de produção de voláteis e da maior seletividade ao produto final. Contudo, é essencial destacar que esse processo acarreta um custo mais elevado em comparação com a pirólise térmica, devido aos custos associados à utilização do catalisador (Miandad et al., 2016).

A pirólise destaca-se como uma das principais opções para converter resíduos plásticos, sendo preferida por pesquisadores devido ao seu potencial para transformar grande parte da energia contida nesses resíduos em produtos como óleos, gases e cinzas, sendo o primeiro um provável produto de alto valor agregado (Anuar Sharuddin et al., 2016). A aplicação pretendida para o produto oleoso obtido tem sido estudada visto que os resíduos plásticos apresentam elevado poder calorífico, semelhante aos combustíveis comerciais. Taxas de aquecimento lentas em baixas temperaturas e elevado tempo de residência na operação favorecem a formação de sólidos, como o coque, com potenciais aplicações em combustíveis, como adsorvente e como matéria-prima na produção de carvão ativado. Outro produto obtido na pirólise, o gás, é favorecido com a utilização de elevadas temperaturas e tempos de residência (Yuan et al., 2022).

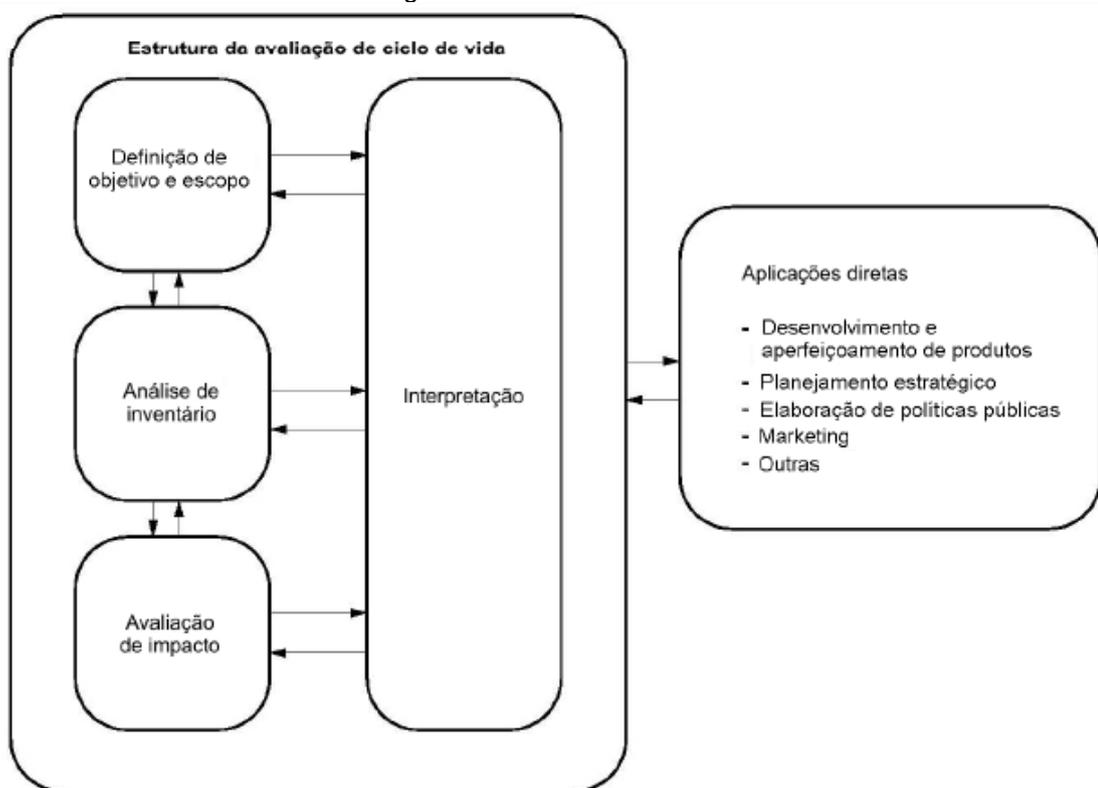
#### 4.2.4.4 Reciclagem Quaternária

A reciclagem quaternária, ou energética, consiste na recuperação energética a partir da destruição térmica dos resíduos sólidos, produzindo idealmente dióxido de carbono e água (além de outros produtos indesejados de combustão), além de energia, que pode ser recuperada na forma de calor, vapor ou eletricidade (Schelte; Hendrickx; Severengiz, 2023). A reciclagem energética apresenta vantagens na redução de volume e massa de resíduos, diminuição dos custos da planta de incineração e maior controle na emissão dos gases (Khan et al., 2021). No entanto, alguns desafios ainda não foram solucionados, já que parte dos materiais são de alto valor agregado ou nocivos que não deveriam ser queimados.

### 4.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma ferramenta que avalia os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço em um período de sua vida útil. Ela pode ser definida como o cálculo dos impactos ambientais das entradas e das saídas de materiais e energia para o meio ambiente (Antelava et al., 2019). As normas ABNT NBR ISO 14040:2009 (Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura) e ABNT NBR ISO 14044:2009 (Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações) foram desenvolvidas para padronizar os estudos de ACV. A norma ISO 14040 define a ACV em quatro etapas detalhadas na Figura 24.

Figura 24: Estrutura da ACV



Fonte: ABNT (2009a)

#### 4.3.1 Definição de Objetivo e Escopo da ACV

O escopo de um estudo de ACV, conforme a norma brasileira, abrange elementos essenciais, como a determinação do sistema a ser estudado, especificação das funções do sistema, definição da unidade funcional mensurável e clara, estabelecimento da fronteira do sistema delimitada em diversas dimensões, e a aplicação de procedimentos de alocação quando os ciclos de vida de diferentes

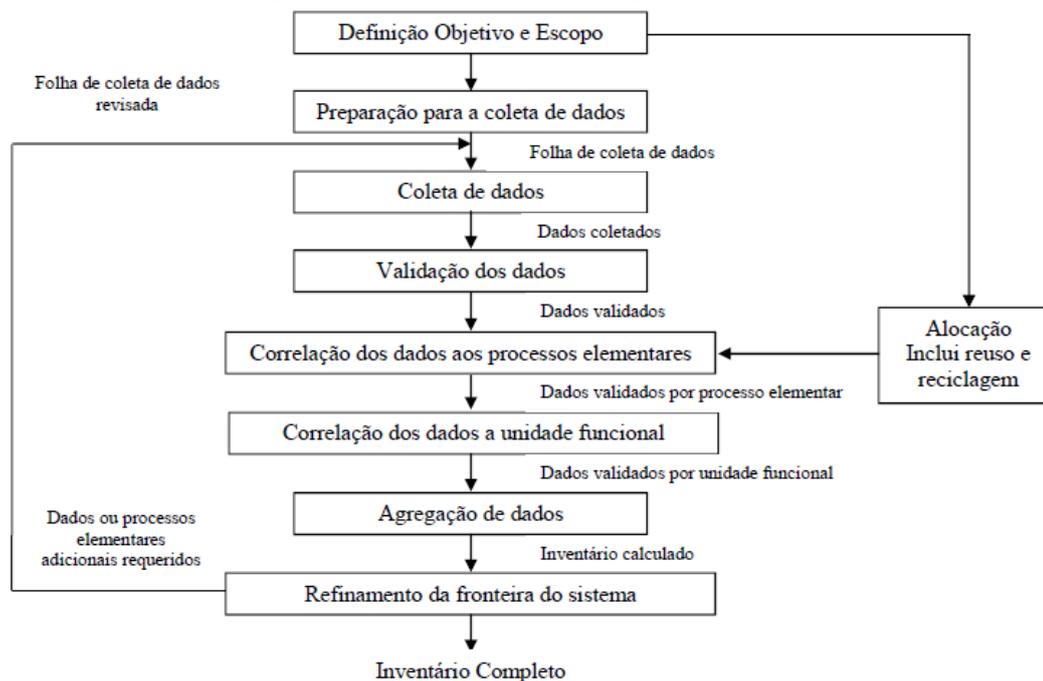
produtos estão interligados. A alocação distribui contribuições dos aspectos ambientais entre coprodutos do sistema, podendo ser realizada com base no fluxo de massa, em propriedades físicas ou no valor comercial. A análise pode ser usada para a avaliação dos impactos de apenas um sistema ou pode ser usado para comparar dois ou mais sistemas com a mesma fronteira (Voss; Lee; Fröhling, 2022).

A fronteira de uma ACV é definida pelas etapas do ciclo de vida que estão sob análise, podendo ser delimitadas em quatro abordagens. Berço ao túmulo considera todo o ciclo de vida de um sistema, desde a extração de matérias-primas até a sua disposição final. A fronteira berço ao portão considera todas as etapas até uma parte específica do processo como a fabricação de um produto em uma planta ou até os descartes de efluentes. O portão ao portão analisa apenas uma parte de todo o ciclo de vida, como transporte ou produção de um produto. Por fim, do portão ao túmulo considera as últimas etapas do ciclo de vida, a exemplo do uso e descarte do produto em análise (Santos; Barbosa-Póvoa; Carvalho, 2019).

#### **4.3.2 Análise do Inventário de Ciclo de Vida**

A etapa de análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) compreende a coleta de dados e cálculos para definir as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto, incluindo energia, matéria-prima, auxiliares e outros aspectos ambientais (ABNT, 2009a). A coleta de dados abrange informações como entrada de energia, matéria-prima, auxiliares e físicas, produtos, coprodutos, resíduos, emissões atmosféricas, água, solo e outros aspectos ambientais. A etapa de tratamento dos dados compreende validação, correlação aos processos elementares e à unidade funcional, além da agregação desses dados. A validação é efetuada por meio de balanços de massa e energia, garantindo a completude e alinhamento das informações com os objetivos e escopo do estudo. A norma recomenda revisões contínuas das fronteiras do sistema, análise de sensibilidade e refinamentos. A análise de sensibilidade verifica a necessidade de exclusão ou inclusão de estágios do ciclo de vida, processos elementares, entradas ou saídas. Ao final dessa etapa, são obtidos os impactos ambientais e energéticos quantificados para cada processo (ABNT, 2009b). A Figura 25 apresenta um fluxograma dos procedimentos de forma simplificada.

Figura 25: Procedimento para geração do ICV



Fonte: ABNT (2009b)

### 4.3.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) visa estudar os impactos ambientais potenciais com base nos resultados do ICV, junto dos métodos de impactos ambientais para fornecer dados para a interpretação. A AICV compreende três fases obrigatórias: seleção, classificação e caracterização. Na seleção de categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização, considera os impactos ambientais quantificados no ICV, mantendo consistência com o objetivo e escopo do estudo (Zhang et al., 2023). A classificação correlaciona e classifica os dados do ICV nas categorias escolhidas, enquanto a caracterização quantifica os dados atribuídos às categorias, buscando uma contribuição total ao ciclo de vida para cada impacto.

### 4.3.4 Interpretação de resultados

Segundo a norma ABNT (2009b), nessa etapa são interpretados a partir da identificação dos locais e categorias com mais impactos ambientais baseando-se nos resultados do ICV e da AICV. Em seguida, a avaliação do estudo verifica a

disponibilidade e completude dos dados necessários para a interpretação, realizando análises de sensibilidade e consistência. Por fim, a conclusão é realizada de forma interativa com as demais etapas da ACV (Mazhandu et al., 2023).

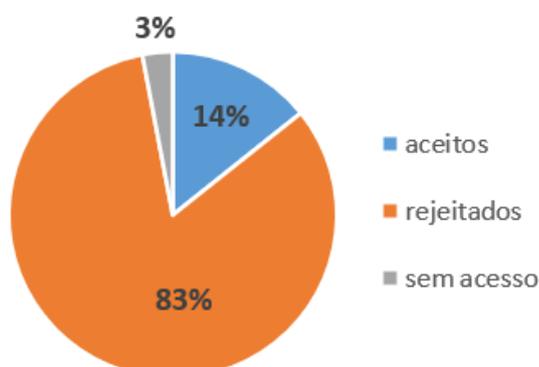
#### 4.4 ACV DOS TIPOS DE DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

A plataforma Scopus possibilita uma pesquisa abrangente, com a capacidade de ser restrita por palavras-chave, ano, área de pesquisa, entre outros critérios. Nesta dissertação, a única limitação adotada na pesquisa foram as palavras-chave "*plastic*", "*waste*" e "*LCA*", com o objetivo de maximizar a quantidade de resultados obtidos. Antes de definir essas palavras-chave, foram consideradas também termos como "*recycle*", "*recycling*", "*mechanical*", "*chemical*" e "*pyrolysis*" para avaliar a quantidade de artigos disponíveis, mas sua utilização acabou restringindo a pesquisa. Assim, optou-se pelo uso de um número reduzido de palavras-chave para ampliar o alcance da pesquisa.

##### 4.4.1 Artigos do Scopus

O Scopus recuperou 807 artigos e *papers* de congressos distintos, cobrindo uma variedade de temas. Cada um deles passou por avaliação conforme os métodos descritos na seção 2.2 da dissertação. No total, houve 24 documentos para os quais não foi possível obter acesso, alguns dos quais não tiveram o documento disponível e outros requeriam acesso pago. Dos documentos restantes, 667 não atenderam a todos os critérios desejados, enquanto 116 atenderam. A Figura 26 apresenta a porcentagem de artigos avaliados na pesquisa.

Figura 26: Distribuição dos artigos encontrados no Scopus



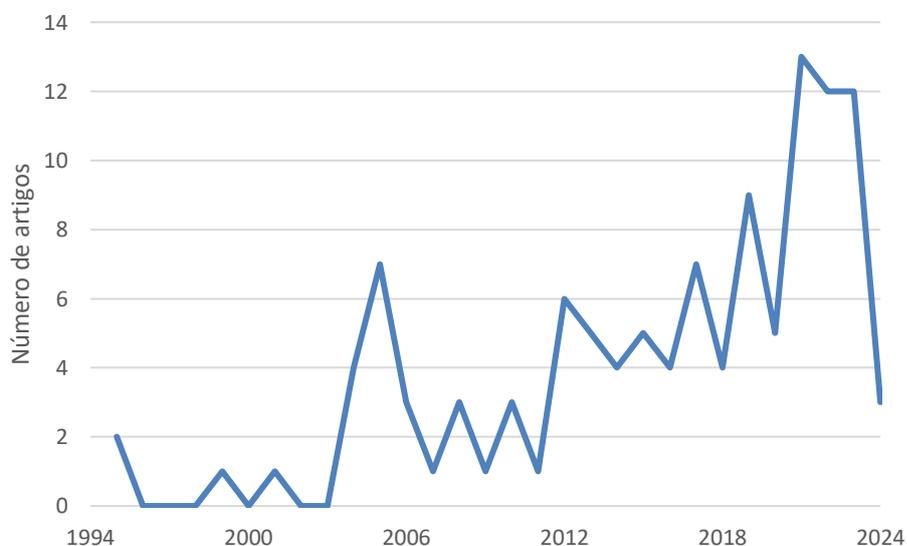
Fonte: Autoria Própria

A maior parte dos artigos rejeitados abordavam temas de ACV sem comparações entre as destinações finais, e se houvesse a comparação, não era de resíduos plásticos. Outros casos, a ACV não era comparativa, sendo apenas analisado os impactos da destinação final analisado ou da produção de algum produto através dos resíduos plásticos.

#### 4.4.2 Frequência e regionalidade dos artigos

As pesquisas de ACV no início dos anos 2000 ainda estavam se desenvolvendo, com estudos principalmente relacionados a processos de produção e comparação entre produtos. Além disso, nota-se que o conceito de resíduos como matéria-prima e a prioridade na mudança da disposição em aterros e da queima em incineradoras para formas mais sustentáveis de destinação final dos resíduos plásticos ganharam destaque entre os anos de 2004 e 2008 nas regiões mais desenvolvidas. Porém o maior investimento nesse tópico começou a ser alavancado novamente com a introdução dos conceitos de economia circular junto das mudanças legislativas da UE no período de 2015 a 2020. A Figura 27 apresenta a quantidade de artigos por ano de sua publicação.

Figura 27: Quantidade de artigos sobre ACV comparativos das destinações de resíduos plásticos

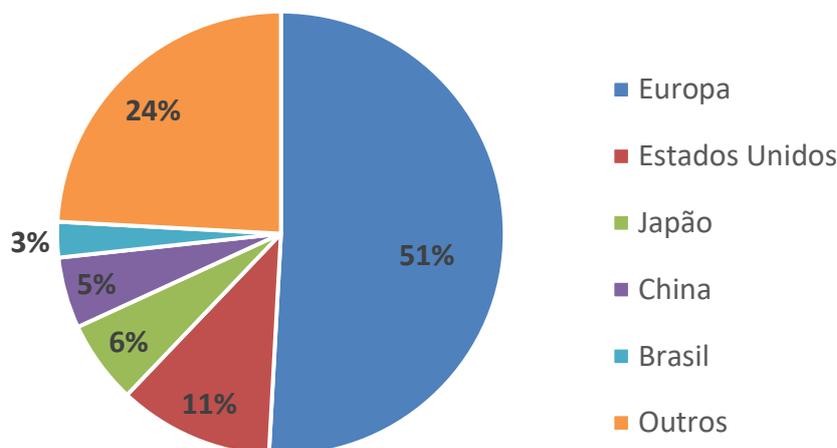


Fonte: Autoria Própria

Além do crescimento da quantidade de artigos publicados, a comparação entre a quantidade por região comprova o seu nível de importância dada a esse tema. Na

Figura 28, nota-se que mais da metade dos artigos foram desenvolvidos na UE, correspondendo ao nível de interesse da região e dos impactos legislativos na procura de tecnologias para a substituição da economia linear para, principalmente a reciclagem.

Figura 28: Percentagem de artigos por região



Fonte: Autoria Própria

Nota-se que mesmo com o cenário atual dos EUA, o País é a segunda região em que se teve mais artigos encontrados, indicando que existe um interesse acadêmico a esse problema. Porém, com pouco investimento e baixo interesse governamental, não se consegue fazer a transição de apenas pesquisas tecnológicas para a implementação no País. O Brasil ainda está muito atrasado, com 3 publicações analisadas com as comparações entre apenas a reciclagem mecânica, recuperação energética, incineração e aterro. Um dos maiores problemas no Brasil para o estudo de ACV é a pouca quantidade de dados disponíveis para calcular os impactos ambientais dos produtos e serviços regionalizados. Um incentivo governamental para a pesquisa está no desenvolvimento do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), ferramenta para armazenar o inventário nacional e facilitar as pesquisas no Brasil.

Também se percebe o interesse em países asiáticos, principalmente o Japão e a China. Apesar de ser a maior produtora de plástico do mundo, a China enfrenta desafios na gestão de seus resíduos, e ações estão sendo implementadas atualmente para amenizar essa situação. Uma delas foi o banimento em 2018 da importação de

resíduos plásticos, que conseguiu diminuir o impacto ambiental dos processos de tratamento da região em torno de 50% (Chen et al., 2019; Huang et al., 2020). O Japão, por outro lado, é um país que dá muita importância para problemas de gestão e saúde humana. O país sendo a terceira região com mais artigos publicados analisados mostra o interesse do tema da região.

#### 4.4.3 Discussão de resultados

Dentro dos artigos aceitos, cada autor realizou comparações dos impactos ambientais de distintos métodos de destinação final de resíduos plásticos. Os resultados obtidos pelos autores foram classificados em ordem decrescente, representando o nível de impacto ambiental das diversas destinações finais analisadas. A maioria dos autores expressou claramente a hierarquia das destinações avaliadas, enquanto outros precisaram ser estimativas com base nas informações e resultados apresentados nas ACV dos artigos. As destinações finais estão classificadas como: A – Reciclagem Mecânica; B – Reciclagem Química (Pirólise); C – Outras Reciclagens Químicas (gaseificação, hidrocraqueamento e solvólise); D – Recuperação Energética; E – Incineração; F – Aterro. A Tabela 6 apresenta os resultados da hierarquia das destinações finais com os respectivos resíduos plásticos avaliados pelos autores.

Tabela 6: Hierarquia das destinações finais

			<b>Continua</b>
<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Tipo de Resíduo Plástico</b>	<b>Hierarquia</b>
Day; Shen; Cooney	1995	Automotivos	B>D>F
Hunt	1995	RSU	F>E
Song; Hyun	1999	Garrafas PET	A>C>B>E>F
Wollny et al.	2001	Embalagens	B>D>C>E>F
Beigl; Salhofer	2004	Embalagens	A>E>F
Kondo; Nakamura	2004	Eletrônico	B>F
Muñoz et al.	2004	RSU	A>D>F
Finnveden et al.	2005	RSU	A>D>E>F
Eriksson et al.	2005	Embalagens (PE)	A>D>E>F
Lindahl; Winsnes	2005	Cabos	D>A>B>E
Perugini; Mastellone; Arena	2005	RSU	A>B>C>E>F
Antón et al.	2005	Agrícola	E>F
Daigo et al.	2005	Eletrônico	F>C>D>E
Morris	2005	RSU	A>D>E>F
Muñoz et al.	2006	Automotivo	A>D>E>F
Dodbiba et al.	2006	Eletrônico	A>D
Boughton; Horvath	2006	Automotivo	A>C>F
Dodbiba et al.	2007	Eletrônico	A>D

## Continuação

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Tipo de Resíduo Plástico</b>	<b>Hierarquia</b>
Takahashi et al.	2007	Eletrônico	A>D
Dodbiba et al.	2008	Eletrônico	A>D
Bos; Makishi; Fischer	2008	Agrícola	A>F>D
Foolmaun; Ramjeanwon	2008	Eletrônico	D>F
Zhao et al.	2009	Hospitalar	D>E>F
Lazarevic et al.	2010	RSU	A>D>E>F
Xie et al.	2010	Embalagens (PE)	A>E>F
Chilton; Burnley; Nesaratnam	2010	Garrafas PET	A>D
Morselli et al.	2011	Automotivo	A>C>E>F
Komly et al.	2012	Garrafas PET	A>C>B>D
Iribarren; Dufour; Serrano	2012	RSU	B>E>F
Merrild; Larsen; Christensen	2012	RSU	A>D
Ncube; Boridin	2012	Garrafas PET	A>D>F
Foolmaun; Ramjeeawon	2012a	Garrafas PET	D>A>F
Foolmaun; Ramjeeawon	2012b	Garrafas PET	A>D>F
Rajendran et al.	2013	Pré-consumo	A>D
Kuczynski; Geyer	2013	Garrafas PET	A>F
Rochat et al.	2013	Garrafas PET	A>C>D>F
Minoglou; Komilis	2013	RSU	F>E
Witik et al.	2013	Reforçados com fibra de carbono	B>D>F
Al-Salem; Evangelisti; Lettieri	2014	RSU	A>B>C>F
Simões; Pinto; Bernardo	2014	HDPE	A>D>F
Ferreira et al.	2014	Embalagens (PE)	A>E>F
Kandananond	2014	Cadeira (PP)	E>F
Arafat; Jijakli; Ahsan	2015	RSU	C>D
Borodin; Aliferova; Ncube	2015	Garrafas PET	A>D>F
Huysman et al.	2015	RSU	A>D
Wäger; Hischier	2015	Eletrônico	A>E
Sevigné-Itoiz et al.	2015	RSU	A>D>F
Nakem et al.	2016	PVC	A>F>D
Li; Bai; Mckechnie	2016	Reforçados com fibra de carbono	A>D>F
Galve et al.	2016	HDPE	A>E>F
Firdaus Pambudi; Dowaki; Adhiutama	2016	RSU	A>D>F
Yi et al.	2017	Embalagens	A>E
Cossu et al.	2017	Embalagens	D>F>C
Dieterle; Seiler; Viere	2017a	Reforçados com fibra de carbono	A>E>C>B
Dieterle; Seiler; Viere	2017b	Reforçados com fibra de carbono	C>B>A>E
Huysman et al.	2017	Pré-consumo	A>D
Hottle; Bilec; Landis	2017	PET, HDPE, LDPE	A>F
Amato; Rocchetti; Beolchini	2017	Eletrônico	A>E>F
Sommerhuber et al.	2017	Composto de madeira plástica	A>D
Choi; Yoo; Park	2018	Embalagens	F>A>D
Khalil	2018	Reforçados com fibra de carbono	B>C
Gear et al.	2018	RSU	B>D>F
Hou et al.	2018	Embalagens	A>D>F
Beigbeder et al.	2019	PP	A>D>F

<b>Continuação</b>			
<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Tipo de Resíduo Plástico</b>	<b>Hierarquia</b>
Chen et al.	2019	RSU	A>D>F
Khoo	2019	RSU	A>B>D>C
Ahmad et al.	2019	Hospitalar	B>F>E
Pillain et al.	2019	Reforçados com fibra de carbono	B>C>F>E
Antelava et al.	2019	RSU	B>C>D>F
Demetrious; Crossin	2019	Embalagens	F>B>D
Faraca; Martinez-Sanchez; Astrup	2019	RSU	A>B
Aryan; Yadav; Samadder	2019	RSU (PET e PE)	A>D>F>E
Rickert; Cerdas; Herrmann	2020	PET	C>D
Horodytska; Kiritsis; Fullana	2020	Embalagens	D>A
Petrakli et al.	2020	Reforçados com fibra de carbono	B>D>E>F
Bora; Wang; You	2020	PP	A>B>C>D>F
De Almeida; Borsato	2020	Eletrônico	D>A
Schwarz et al.	2021	Pré-consumo	A>C>B>D>E
Gandhi et al.	2021	Pré-consumo	A>E>F
Martin et al.	2021	Garrafas PET	A>F>D
Ardolino; Cardamone; Arena	2021	Eletrônico	A>B>C>D
Lim et al.	2021	Embalagens (PS)	A>F>E
Anshassi; Sackles; Townsend	2021	RSU	D>F
Cornago et al.	2021	PET	C>A
Anshassi; Townsend	2021	RSU	A>D>F
Khan et al.	2021	Embalagens (PE)	B>A>D
Civancik-Uslu et al.	2021	Embalagens	A>B>D
Hossain et al.	2021	RSU	D>A>F
Jeswani et al.	2021	RSU	A>B>D
neo et al.	2021	RSU (HDPE, LDPE, PP e PET)	A>D>F
Arce-Bastias	2022	RSU	A>F
Marsola; De Oliveira; Neto	2022	Recipientes	A>D>F
Ögmundarson et al.	2022	Embalagens	A>D>E>F
Azam; Vete; Afzal	2022	RSU (HDPE)	C>B
Huysveld et al.	2022	Embalagens	A>B>D
Lee; Chang; Tan	2022	Recipientes	D>F
Kooduvalli et al.	2022	Reforçados com fibra de carbono	B>C
Helmes et al.	2022	Embalagens (PET)	B>A>E
Helmes et al.	2022	Embalagens (HDPE)	A>B>E
Vadoudi et al.	2022	Embalagens	A>E
Kamalakkannan et al.	2022	Produtos de único uso	A>E>F
Voss; Lee; Fröhling	2022	Embalagens	C>D
Van Der Hulst et al.	2022	RSU	C>D
Yap et al.	2023	RSU	A>D
Schelte; Hendrickx; Severengiz	2023	Resina (Bisfenol A)	D>C
Arena; Parrillo; Ardolino	2023	RSU	C>B>D
Mazhandu et al.	2023	RSU	A>D>C>F
Almadhi; Abdelhadi; Alyamani	2023	RSU	A>B>D>F
Zhang et al.	2023	RSU	A>D>B>C>F

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Tipo de Resíduo Plástico</b>	<b>Conclusão</b>
			<b>Hierarquia</b>
Schulte et al.	2023	Embalagens (LDPE)	C>A
Gracida-Alvarez et al.	2023	Embalagens (PET)	A>C
Xayachak et al.	2023	PE e PP	B>C>D>F
Schulte et al.	2023	Eletrônico	B>D
Stančin; Strezov; Mikulčić	2023	RSU	B>D>F
Zhao; Ren; Huang	2023	RSU	B>D
Patria et al.	2024	RSU	A>D>F
Ahamed et al.	2024	Embalagens (PET)	A>C
Klotz et al.	2024	RSU	A>C>B>D

Fonte: Autoria Própria

Observa-se que, em muitos estudos, poucas formas de destinação final são avaliadas, sendo a reciclagem mecânica, a recuperação energética e o aterro as formas mais abordadas. Isso se deve ao fato de que, o aterro, é a disposição final mais comumente utilizada, servindo como base de comparação nas regiões mais desenvolvidas e representa a forma menos sustentável que está sendo substituída pelos outros tratamentos. Os métodos mais avançados, como a reciclagem química, ainda possuem menos dados disponíveis na literatura de ACV comparativa. No entanto, essa tendência está mudando à medida que as legislações globais buscam alternativas mais promissoras para o tratamento de resíduos plásticos. A Tabela 7 fornece informações sobre a quantidade de artigos em que cada método de tratamento está presente.

Tabela 7: Quantidade de artigos por destinação final

<b>Destinação Final</b>	<b>Quantidade de artigos</b>
<b>Reciclagem Mecânica</b>	83
<b>Pirólise</b>	40
<b>Outras Reciclagens Químicas</b>	32
<b>Recuperação Energética</b>	79
<b>Incineração</b>	36
<b>Aterro</b>	72

Fonte: Autoria Própria

A partir dos dados das Tabela 6 e Tabela 7, foi contabilizado a quantidade de artigos em que cada destinação final apresentou menores impactos ambientais comparado com as demais. Para uma análise mais completa, os artigos que apresentavam mais de duas destinações finais tiveram cada uma delas comparadas

entre si. Portanto, a Tabela 8 apresenta o número de artigos em que cada destinação final possui menos impactos ambientais comparado aos demais tratamentos.

Tabela 8: Comparação entre as destinações finais

Melhor destinação final	Tipos de tratamento					
	Reciclagem mecânica	Pirólise	Outras Reciclagens Químicas	Recuperação Energética	Incineração	Aterro
<b>Reciclagem mecânica</b>	-	18	17	51	26	48
<b>Pirólise</b>	3	-	12	23	11	18
<b>Outras reciclagens Químicas</b>	3	8	-	14	8	13
<b>Recuperação Energética</b>	5	2	6	-	14	42
<b>Incineração</b>	0	1	1	0	-	22
<b>Aterro</b>	1	1	2	6	7	-

Fonte: Autoria Própria

Os resultados consideram apenas os impactos ambientais de cada destinação final. É importante salientar que a depender do material e da região em que os autores realizaram o estudo, os resultados podem variar drasticamente. A seguir será analisado cada comparação apresentada na Tabela 8.

#### 4.4.3.1 Reciclagem mecânica x Pirólise

Foram encontrados 21 trabalhos que comparavam a reciclagem mecânica com a pirólise. Desses, 18 (86%) consideram a reciclagem mecânica a forma mais sustentável e 3 preferiram a pirólise. Dada a rápida inovação com aperfeiçoamento de novas tecnologias mais sustentáveis e eficientes, é possível a pirólise possua menores impactos no futuro (Zhang et al., 2023). Helmes et al. (2022) analisam que a reciclagem mecânica apresenta o menor impacto para plástico tipo HDPE, enquanto a pirólise é melhor para o tratamento do PET. Ressalta-se que a pirólise transforma o resíduo plástico em novos produtos, enquanto os processos mecânicos produzem um reciclado de menor qualidade que necessita de cada vez mais material virgem em sua subsequente reciclagem, aumentando seu impacto ambiental total. (Komly et al., 2012). Verifica-se que ainda há poucas análises da literatura que comparam a ACV da degradação causada pela reciclagem mecânica com outros processos de tratamento, fato importante para a análise total dos impactos ambientais das

destinações finais. Segundo Almadhi; Abdelhadi e Alyamani (2023), a combinação de reciclagem mecânica e pirólise apresenta o menor impacto ambiental global com maior ganho na economia circular. É necessário avaliar os contaminantes existentes no resíduo plástico bem como o número máximo que se pode realizar a reciclagem mecânica para definir o reaproveitamento mecânico como primeira opção.

#### 4.4.3.2 Reciclagem mecânica x Outras Reciclagens Químicas

Dos 20 documentos analisados, 17 (85%) encontraram a reciclagem mecânica como sendo a mais sustentável. Da mesma forma que a pirólise, as outras reciclagens químicas conseguem cobrir as limitações geradas pela reciclagem mecânica. Outro ponto de discussão apresentado por Schulte et al. (2023) refere-se à qualidade necessária dos plásticos para serem utilizados como embalagens de alimentos. Os autores afirmaram que nem a reciclagem mecânica nem a química atendem as especificações exigidas nas legislações, por conta da degradação durante o processo de reciclagem. Porém a reciclagem química está mais perto de alcançar essas especificações, ainda mais se usado em conjunto com material virgem.

#### 4.4.3.3 Reciclagem mecânica x Recuperação Energética

A análise crítica dos 56 artigos analisados mostrou que em 51 (91%), a reciclagem mecânica é a opção mais sustentável. Em contraste as reciclagens, a recuperação energética não aproveita os resíduos materialmente, apenas o seu potencial energético. Por essa razão, o impacto de aquecimento global é o mais relevante para esse tratamento. Porém, a depender das condições envolvidas no país, o resultado pode ser diferente. Foolmaun e Ramjeeawon (2012) afirmaram que a incineração com recuperação de energia é a destinação com os menores impactos ambientais na República das Ilhas Maurícias para as garrafas PET. Isso ocorre porque foi adicionado todo o impacto de exportação desses resíduos plásticos no cálculo de reciclagem mecânica, por falta de infraestrutura e tecnologia no local. Ainda afirmam que se a reciclagem fosse realizada em Maurício, os resultados do estudo teriam sido diferentes e provavelmente teria a reciclagem como a opção de gestão de resíduos com o menor impacto ambiental. Da mesma forma, a falta de fabricantes

locais de plásticos e os altos custos de reciclagem podem dificultar a reciclagem e produção de recursos secundários, o que poderia resultar em uma taxa de reciclagem muito baixa em Hong Kong (Hossain et al., 2021). Segundo Almeida e Borsato (2020), que estudaram metodologias aprimoradas de ACV para tipos de destinação final, a hierarquia clássica das estratégias de fim de vida pode ser desafiada a depender do tipo de material analisado. Os autores discutiram que a recuperação energética pode possuir maior sustentabilidade que a reciclagem mecânica quando o material possui altos poderes caloríficos.

#### 4.4.3.4 Reciclagem mecânica x Incineração

Todos os 26 artigos avaliados encontraram a reciclagem mecânica como a destinação mais sustentável comparado a incineração. A reciclagem mecânica é o processo mais consolidado para a recuperação de matéria, enquanto a incineração não reaproveita o potencial material ou energético dos resíduos.

#### 4.4.3.5 Reciclagem mecânica x Aterro

A disposição em aterros apresentou menores impactos ambientais que a reciclagem mecânica em apenas um artigo dos 49 (2%) avaliados. Os autores Choi, Yoo e Park (2018) somente analisaram a categoria de aquecimento global em sua ACV de embalagens, fator que favorece o aterro quando analisado em intervalos de curto prazo, já que a produção dos gases de efeito estufa em aterros levam algum tempo e deverão ser analisados.

#### 4.4.3.6 Pirólise x Outras Reciclagens Químicas

Apenas 20 artigos compararam a pirólise com outras reciclagens químicas, sendo que em 12 (60%), a pirólise é a opção mais sustentável. Diante das limitações evidentes na reciclagem mecânica, os processos químicos têm sido objeto de estudo crescente. No entanto, é fundamental realizar mais pesquisas para determinar com segurança qual dessas tecnologias é a mais adequada para implementação no mundo. Para as reciclagens termoquímicas (hidrocraqueamento e gaseificação), os

autores Xayachak et al. (2023) afirmam que a pirólise com aproveitamento material é o tratamento mais sustentável, porém discutem que é possível se ter um viés potencial já que os dados ambientais dos processos químicos são escassos e altamente dispersos e que a pirólise é a tecnologia de reciclagem química com mais produção de pesquisa e dados. Eles sugerem que é necessário um aumento na pesquisa de diferentes processos de reciclagem química, para desenvolver um modelo holístico dos impactos desse grupo de tecnologias. Outros autores também encontraram resultados que favoreceram a gaseificação no lugar da pirólise (ARENA; PARRILLO; ARDOLINO, 2023). Verifica-se que os impactos ambientais foram menores em todos os artigos que comparavam a solvólise de garrafas PET com a reciclagem por pirólise, fato que ratifica a solvólise como um processo consolidado na indústria PET global. Os tipos de resíduos plásticos, os parâmetros da reação, os produtos obtidos, os dados coletados, dentre outras informações favorecem tipos específicos de tratamento que ainda precisam ser mais estudados.

#### 4.4.3.7 Pirólise x Recuperação Energética

Apenas dois trabalhos de 25 (8%) encontraram a recuperação energética como forma de destinação final mais sustentável do que a pirólise. Os resultados de Lindahl e Winsnes (2005) comparam as destinações finais apenas avaliando os impactos ambientais relacionados ao aquecimento global e o consumo de energia. Os processos de pré-tratamento e de separação de materiais para a reciclagem mecânica e para a pirólise obtiveram altas emissões e elevado consumo energético, o que favoreceu a recuperação energética. Já Zhang et al. (2023) afirmou que a pirólise geralmente resulta em maiores impactos ambientais do que tratamentos passivos, como aterro sanitário ou reciclagem mecânica. Os autores ainda afirmam que a recuperação energética alcançou menores impactos ambientais devido as tecnologias atuais, e com o avanço e interesse crescente na área, há uma alta probabilidade de que esses impactos diminuam no futuro com o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e eficientes.

#### 4.4.3.8 Pirólise x Incineração

Dos 12 documento analisados, apenas 1 (8%) obteve a incineração como forma mais sustentável. Dieterle, Seiler e Viere (2017) realizaram a análise dos impactos das destinações finais para os resíduos de polímeros reforçados com fibra de carbono em três cenários. No cenário laboratorial, na qual as quantidades mássicas são pequenas, a incineração obteve menos impactos ambientais do que as reciclagens químicas. Isso se deve ao custo elevado de energia para pirólise e dos impactos dos solvente na solvólise para massas laboratoriais. No entanto, quando houve o escalonamento industrial, a incineração passou a ter os maiores impactos ambientais dentre as destinações finais avaliadas.

#### 4.4.3.9 Pirólise x Aterro

Verifica-se que apenas um dos 19 artigos (5%), a disposição em aterro possuiu menores impactos ambientais que a pirólise. Apenas Demetrious e Crossin (2019) apresentaram resultados muito discrepantes aos demais, com a disposição em aterros sendo a mais sustentável, seguido pela pirólise e a recuperação energética. Esse resultado é devido aos pesos utilizados nas categorias de impactos, na qual, o aquecimento global foi o impacto com a maior prioridade. Além disso, como essa pesquisa foi realizado na Austrália, a falta de dados ou dados regionais diferentes do mundo podem ter favorecido essa disparidade.

#### 4.4.3.10 Outras Reciclagens Químicas x Recuperação Energética

Foram analisadas 20 comparações de ACV entre reciclagens químicas e recuperação energética. Dessas, 14 (70%) encontraram a reciclagem química como destinação final mais sustentável. Da mesma forma que a análise da pirólise com a recuperação energética, Zhang et al. (2023) afirmaram que o problema da disponibilidade de dados confiáveis afetou o seu resultado. Isso também pode ser atribuído aos resultados encontrados por Khoo (2019) e Mazhandu et al. (2023) que realizaram estudos de cenários para os países Singapura e África do Sul, respectivamente. Já Schelte, Hendriks e Severengiz (2023) conduziram um estudo da

recuperação energética junto de um processo de captura de carbono, encontrando menos impacto ambiental comparado a reciclagem química. No entanto, ressaltam a necessidade de mais pesquisas sobre o tema, pois os resultados foram semelhantes. Cossu et al. (2017), por sua vez, realizaram a ACV de resíduos plásticos num forno siderúrgico como forma de energia, alcançando menores impactos em comparação com outras formas de destinação final avaliadas.

#### 4.4.3.11 Outras Reciclagens Químicas x Incineração

Dos 9 documentos analisados, apenas o artigo de Dieterle, Seiler e Viere (2017) indicou, em escala laboratorial, a incineração como a destinação final que possui menos impactos ao ambiente, como dito anteriormente.

#### 4.4.3.12 Outras Reciclagens Químicas x Aterro

Apenas dois artigos de 15 avaliados (13%) encontraram que a disposição em aterro é mais sustentável que os processos de tratamento químico. Cossu et al. (2017) encontrou o aterro tendo menos impacto ambiental que outros processos de reciclagem química, mas com a consideração de um pré-tratamento dos resíduos dispostos no aterro e de que havia, em parte, a recuperação energética dos gases gerados pela aterragem dos resíduos plásticos. Além disso, Daigo et al. (2005) apenas calculou os impactos relacionados ao aquecimento global, favorecendo novamente a disposição nos aterros.

#### 4.4.3.13 Recuperação Energética x Incineração

Todos os 14 artigos analisados concordaram que a recuperação energética possui menos impactos ambientais que a incineração, como deveria ser, já que o princípio da recuperação energética é a transformação de matéria em energia, enquanto a incineração não aproveita esse potencial energético. Como mencionado anteriormente, tanto os EUA, quanto a UE realizaram a transição de apenas incineração para o aproveitamento energético dos resíduos plásticos.

#### 4.4.3.14 Recuperação Energética x Aterro

Verifica-se que do total de 48 trabalhos analisados, apenas 6 (12%) indica que a disposição em aterro possui menores impactos ambientais. Desses, a única categoria avaliada foi o aquecimento global, favorecendo a aterragem dos resíduos plásticos quando avaliada em curtos períodos.

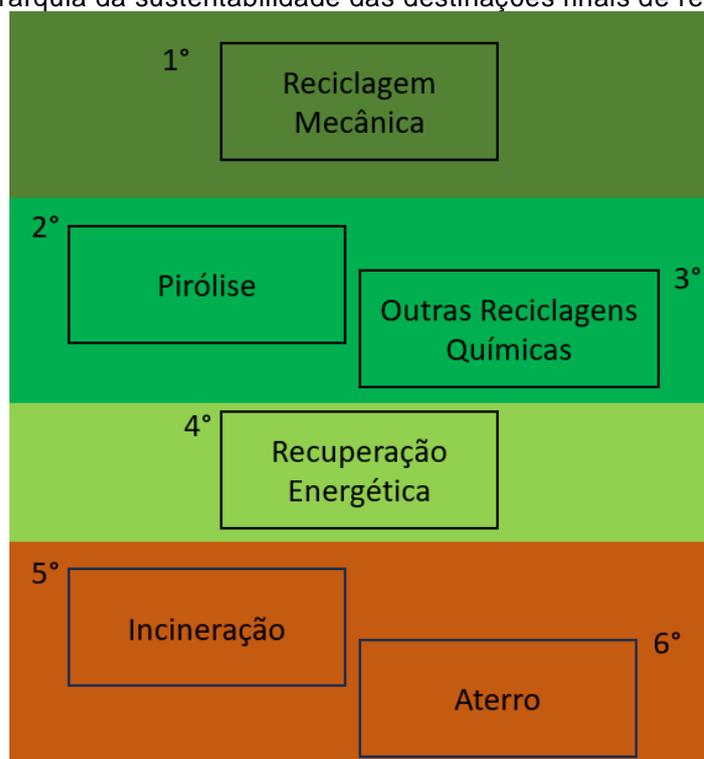
#### 4.4.3.15 Incineração x Aterro

Dos 29 documentos analisados, 22 (76%) apontam a incineração como a destinação com menor impacto ambiental comparado a disposição em aterro. Apesar da quantidade de artigos favorecer claramente a incineração em termos de sustentabilidade, observa-se que os resultados de alguns autores são bastante semelhantes entre as duas destinações. Na prática, ambas as formas de destinação final para os resíduos plásticos serão encerradas num futuro próximo, à medida que as legislações globais amadurecem. Em concordância com a legislação da EU, esse resultado comprova a necessidade de substituição da utilização dos aterros e de incineradoras para usinas de recuperação energética e de reciclagem.

### 4.4.4 Hierarquização dos resultados

Conforme observado, as destinações finais dos resíduos plásticos podem ser categorizadas em faixas que indicam o seu nível de impacto ambiental, como mostra a Figura 29.

Figura 29: Hierarquia da sustentabilidade das destinações finais de resíduos plásticos



Fonte: Autoria Própria

A incineração e o aterro, indicados pela faixa marrom, possuem os maiores impactos ambientais dentre as destinações finais, com a incineração tendo um pouco menos que o aterro. Na próxima faixa, verde claro, a única destinação final é a recuperação energética que é apresentada como forma intermediária ou de transição para os processos de reciclagem. As reciclagens químicas ainda se encontram abaixo da reciclagem mecânica, porém são as tecnologias que apresentam o maior potencial inexplorável no tratamento dos resíduos plásticos.

No Brasil, ainda existe uma faixa abaixo das apresentadas, na qual fica os lixões e os aterros controlados. Para manter o país como um líder em tecnologias verdes, é crucial uma rápida e estratégica transformação na gestão de resíduos sólidos. O mundo está avançando rumo à sustentabilidade, e todos os países, eventualmente, precisarão resolver suas questões de resíduos sólidos, especialmente diante da possibilidade do banimento das transações internacionais de resíduos. A imagem do Brasil está ligada à sustentabilidade, e as relações internacionais estão cada vez mais interessadas nesse comprometimento.

A situação brasileira demanda uma evolução significativa no gerenciamento de resíduos sólidos. Enquanto a UE avança no desenvolvimento dessa gestão, o Brasil deve seguir seu exemplo, adotando uma abordagem progressiva. O primeiro passo essencial é ampliar a cobertura de coleta, visto que é inconcebível que o Brasil ainda permita que 10% do resíduo sólido seja descartado indiscriminadamente na natureza. Em seguida, é crucial avançar para o fechamento de lixões e aterros controlados, com reabilitações adequadas e a transição para a disposição em aterros sanitários. Dado que o Brasil não utiliza incineradoras, a próxima etapa envolve a recuperação energética de gases gerados em aterros, a implementação de usinas de recuperação energética ou o encaminhamento de resíduos secos para queima conjunta em processos industriais. Nesse estágio, é possível aumentar a taxa de coleta seletiva, contando com o apoio de catadores, e aprimorar as tecnologias de reciclagem. A etapa seguinte conduzirá o país a um estágio semelhante ao atual da UE, com pesquisas voltadas para substituir completamente o uso de aterros. O objetivo é encaminhar todos os resíduos para um processo de reaproveitamento, seja com geração de energia em usinas de recuperação energética ou materialmente em recicladoras mecânicas e, possivelmente, químicas. A colaboração entre abordagens mecânicas e químicas impulsionará significativamente o aumento da taxa de reciclagem no país.

Os resultados encontrados enfatizam a necessidade de aumentar a conscientização pública sobre o fim de vida dos resíduos sólidos e dos plásticos, incluindo a separação e reciclagem, juntamente com o desenvolvimento de tecnologias de gestão de resíduos. A separação eficiente de plásticos desempenha um papel crucial na manutenção de rendimento e qualidade do produto. A transição para modelos de Economia Circular exige uma avaliação precisa de desempenho de todos os processos e serviços do País sob uma perspectiva de sustentabilidade. A ACV é uma ferramenta poderosa para fornecer dados sobre o desempenho ambiental, considerando não apenas a produção e a fase de uso, mas também o fim de vida dos produtos. O estudo de ACV das destinações de resíduos plásticos traz as informações necessárias para enfatizar quais as melhores tecnologias e tratamentos que precisam ser utilizados no mundo. Embora a pirólise seja intensiva em energia, ela pode complementar a reciclagem mecânica, transformando os resíduos plásticos em produtos de qualidade comparável aos virgens. A hierarquização pelo impacto ambiental é necessária e importante para dar foco em pesquisas acadêmicas e

políticas nacionais. Outro fator importante é o nível técnico das regiões, mudanças drásticas da forma utilizada não é uma possibilidade facilmente alcançada, ainda mais pela falta de informação e dados regionais. A mudança gradual e consistente deverá ser o foco. O importante é a não estagnação, como os EUA e o Brasil estão tendo nesses últimos 20 anos.

## 5 CONCLUSÃO

Verifica-se que a União Europeia está na vanguarda da legislação ocidental em relação a disposição e tratamento de resíduos sólidos e plásticos, possuindo regulamentações, gerenciamento e fiscalização eficientes que permitem grandes avanços na sustentabilidade em todos os países da Comunidade. Certamente ainda há discrepâncias na gestão dos resíduos entre os Estados-membros, as quais têm sido solucionadas com intensos investimentos, especialmente nos países de economia mais frágil.

Os Estados Unidos promulgaram, nos últimos anos, leis mais rígidas e voltadas para a reciclagem, mas ainda têm o aterro como principal destino de seus resíduos. Falta gerenciamento nacional mais atuante que obrigue os estados e incentive as empresas investirem em tecnologias mais modernas de aproveitamento dos resíduos, embora haja estados que apresentem resultados de sustentabilidade equivalente aos países europeus.

O Brasil possui um legislativo atuante que busca se alinhar às práticas adotadas por países desenvolvidos. Novas leis e regulamentações têm sido publicadas nos últimos anos, mas devido à falta de gerenciamento, financiamento, organização e fiscalização as leis não têm sido obedecidas e na prática o país convive com descarte indiscriminado na natureza, lixões a céu aberto e aterros controlados (soterrados), principalmente em cidades do interior. Ressalta-se a condição do país de desigualdade social com significativo contingente da população próximo a linha de pobreza. A coleta e tratamento de resíduos plásticos pode ser uma fonte de emprego e renda de cooperativas que pode ser mais bem organizada e incentivada.

Adicionalmente, muitos resíduos estão perdendo seu potencial material e energético quando destinados a aterros ou incineradoras, impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento. A recuperação energética e a reciclagem mecânica foram as primeiras a serem implementadas nas legislações globais, iniciando uma transformação na situação mundial. Outros processos químicos, como a pirólise, superam as limitações dos tratamentos aplicados atualmente, permitindo que os produtos sejam reintroduzidos nas torres de craqueamento das indústrias petroquímicas.

Dessa forma, a pirólise destaca-se ao abranger uma gama mais ampla de resíduos, sem restrições quanto ao tipo, nível de contaminação e degradação, e

mantendo um nível de sustentabilidade semelhante à reciclagem mecânica. Diante disso, a implementação de planos que combinem a reciclagem mecânica e química nas destinações finais é crucial para elevar a sustentabilidade na gestão do tratamento de resíduos sólidos no país.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a síntese de um novo processo de reciclagem por pirólise;
- Realizar uma ACV comparativa entre o processo proposto e as demais destinações finais;
- Realizar o Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico (EVTE) e a *valuation* do processo comparando o valor no mercado entre a empresas do setor no Brasil, Europa e EUA;
- Analisar a viabilidade e os impactos ambientais entre os modelos de negócio centralizado e distribuído para a implantação de plantas de reciclagem de plásticos no Brasil;

## REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Perfil 2019.** 2019. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

ABIPLAST. **Perfil 2021.** 2021. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2021/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

ABIPLAST. **Perfil 2022.** 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2022abiplast/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura.** ABNT, 2009a. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/21711/nbriso14040-gestao-ambiental-avaliacao-do-ciclo-de-vida-principios-e-estrutura>. Acesso em: 23 jan. 2023.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações.** ABNT, 2009b. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/28378/nbriso14044-gestao-ambiental-avaliacao-do-ciclo-de-vida-requisitos-e-orientacoes>. Acesso em: 29 jan. 2023.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

AHAMED, Ashiq; HUANG, Peng; YOUNG, Joshua; GALLEGOS-SCHMID, Alejandro; PRICE, Richard; SHAVER, Michael P. Technical and environmental assessment of end-of-life scenarios for plastic packaging with electronic tags. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 201, n. December 2023, p. 107341, 2024.

AHMAD, Riaz; LIU, Gengyuan; SANTAGATA, Remo; CASAZZA, Marco; XUE, Jingyan; KHAN, Kifayatullah; NAWAB, Javed; ULGIATI, Sergio; LEGA, Massimiliano. LCA of hospital solid waste treatment alternatives in a developing country: The case of District Swat, Pakistan. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 13, 2019.

ALMADHI, Abdulmajeed; ABDELHADI, Abdelhakim; ALYAMANI, Rakan. Moving from Linear to Circular Economy in Saudi Arabia: Life-Cycle Assessment on Plastic Waste Management. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 13, 2023.

AL-SALEM, S. M.; EVANGELISTI, S.; LETTIERI, P. Life cycle assessment of alternative technologies for municipal solid waste and plastic solid waste management in the Greater London area. **Chemical Engineering Journal**, v. 244, p. 391–402, 2014.

AMATO, Alessia; ROCCHETTI, Laura; BEOLCHINI, Francesca. Environmental impact assessment of different end-of-life LCD management strategies. **Waste Management**, v. 59, p. 432-441, 2017.

ANDOOZ, Amirhossein; EQBALPOUR, Mohammad; KOWSARI, Elaheh; RAMAKRISHNA, Seeram; ANSARI CHESHMEH, Zahra. A comprehensive review on pyrolysis from the circular economy point of view and its environmental and social effects. **Journal of Cleaner Production**, v. 388, n. January, p. 136021, 2023.

ANSHASSI, Malak; SACKLES, Hannah; TOWNSEND, Timothy G. A review of LCA assumptions impacting whether landfilling or incineration results in less greenhouse gas emissions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, n. July, p. 105810, 2021.

ANSHASSI, Malak; TOWNSEND, Timothy G. Reviewing the underlying assumptions in waste LCA models to identify impacts on waste management decision making. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, n. June, p. 127913, 2021.

ANTELAVA, Ana; DAMILOS, Spyridon; HAFEEZ, Sanaa; MANOS, George; AL-SALEM, Sultan M.; SHARMA, Brajendra K.; KOHLI, Kirtika; CONSTANTINOU, Achilleas. Plastic Solid Waste (PSW) in the Context of Life Cycle Assessment (LCA) and Sustainable Management. **Environmental Management**, v. 64, n. 2, p. 230–244, 2019.

ANTÓN, M. A.; MUÑOZ, P.; CASTELLS, F.; MONTERO, J. I.; SOLIVA, M. Improving waste management in protected horticulture. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 25, n. 4, p. 447–453, 2005.

ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana; ABNISA, Faisal; WAN DAUD, Wan Mohd Ashri; AROUA, Mohamed Kheireddine. A review on pyrolysis of plastic wastes. Energy Conversion and Management. **Energy Conversion and Management**, v. 115, p. 308-326, 2016.

ARAFAT, Hassan A.; JIJAKLI, Kenan; AHSAN, Amimul. Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 233–240, 2015.

ARCE-BASTIAS, Fernando. Beneficios ambientales del reciclaje de residuos plásticos posconsumo para la producción de postes en Mendoza, Argentina. **Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica**, v. 25, n. Supl.1, p. 1–11, 2022.

ARDOLINO, Filomena; CARDAMONE, Giovanni Francesco; ARENA, Umberto. How to enhance the environmental sustainability of WEEE plastics management: An LCA study. **Waste Management**, v. 135, n. September, p. 347–359, 2021.

ARENA, Umberto; PARRILLO, Francesco; ARDOLINO, Filomena. An LCA answer to the mixed plastics waste dilemma: Energy recovery or chemical recycling?. **Waste Management**, v. 171, n. July, p. 662–675, 2023.

ARYAN, Yash; YADAV, Pooja; SAMADDER, Sukha Ranjan. Life Cycle Assessment of the existing and proposed plastic waste management options in India: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1268–1283, 2019.

AZAM, Muhammad Usman; VETE, Akshay; AFZAL, Waheed. Process Simulation and Life Cycle Assessment of Waste Plastics: A Comparison of Pyrolysis and Hydrocracking. **Molecules**, v. 27, n. 22, 2022.

BEIGBEDER, Joana; SOCCALINGAME, Lata; PERRIN, Didier; BÉNÉZET, Jean Charles; BERGERET, Anne. How to manage biocomposites wastes end of life? A life cycle assessment approach (LCA) focused on polypropylene (PP)/wood flour and polylactic acid (PLA)/flax fibres biocomposites. **Waste Management**, v. 83, p. 184–193, 2019.

BEIGL, Peter; SALHOFER, Stefan. Comparison of ecological effects and costs of communal waste management systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 2, p. 83–102, 2004.

BORA, Raaj R.; WANG, Ralph; YOU, Fengqi. Waste polypropylene plastic recycling toward climate change mitigation and circular economy: Energy, environmental, and technoeconomic perspectives. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 8, n. 43, p. 16350–16363, 2020.

BORODIN, Yu V.; ALIFEROVA, T. E.; NCUBE, A. Waste management through life cycle assessment of products. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 81, n. 1, 2015.

BOS, U.; MAKISHI, C.; FISCHER, M. Life cycle assessment of common used agricultural plastic products in the EU. **Acta Horticulturae**, v. 801 PART 1, p. 341–349, 2008.

BOUGHTON, Bob; HORVATH, Arpad. Environmental assessment of shredder residue management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 47, n. 1, p. 1–25, 2006.

BRASIL. Lei N°6.938, de 31 de Agosto de 1981, Dispões da Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário oficial da União**, 1981. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm). Acesso em: 2 jan. 2024.

BRASIL. Lei N°9.605, de 12 de Fevereiro de 1998, Dispõe sanções penais e administrativas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. **Diário oficial da União**, 1998. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%209.605%2C%20DE%2012%20DE%20FEVEREIRO%20DE%201998.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20as%20san%C3%A7%C3%B5es%20penais,ambiente%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%209.605%2C%20DE%2012%20DE%20FEVEREIRO%20DE%201998.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20as%20san%C3%A7%C3%B5es%20penais,ambiente%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs). Acesso em: 28 jun. 2023.

BRASIL. Lei N°11.445, de Janeiro de 2007, Diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário oficial da União**, 2007. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm). Acesso em: 2 jan. 2024.

BRASIL. Lei N°12.305, de 2 de Agosto de 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário oficial da União**, 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 19 jun. 2023.

BRASIL. Decreto N°10.117, de 19 de Novembro de 2019, Qualificação de projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos. **Diário oficial da União**, 2019. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2019/decreto/d10117.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/d10117.htm). Acesso em: 28 jun. 2023.

BRASIL. Lei N°14.026, de 15 de Julho de 2020. **Diário oficial da União**, 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 17 jul. 2023.

BRASIL. Decreto N°10.936, de 12 de Janeiro de 2022, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário oficial da União**, 2022a. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm). Acesso em: 19 jun. 2023.

BRASIL. Decreto N°11.043, de 13 de Abril de 2022, Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário oficial da União**, 2022b. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.043%2C%20DE%2013,que%20lhe%20confere%20o%20art.](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.043%2C%20DE%2013,que%20lhe%20confere%20o%20art.) Acesso em: 19 jun. 2023.

BRASIL. Decreto N°11.413, de 13 de Fevereiro de 2023, Institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura. **Diário oficial da União**, 2023a. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11413.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11413.htm). Acesso em: 28 jun. 2023.

BRASIL. Decreto N°11.414, de 13 de Fevereiro de 2023, Institui o Programa Diogo de Sant'Ana Pró-Catadoras e Pró-Catadores. **Diário oficial da União**, 2023b. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2023/decreto/D11414.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.414%2C%20DE%2013,de%20Materiais%20Reutiliz%C3%A1veis%20e%20Recicl%C3%A1veis.](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/D11414.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.414%2C%20DE%2013,de%20Materiais%20Reutiliz%C3%A1veis%20e%20Recicl%C3%A1veis.) Acesso em: 2 jan. 2024.

BRASIL. Lei N°14.785, de 27 de Dezembro de 2023, Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos. **Diário oficial da União**, 2023c. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2023/lei/L14785.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/L14785.htm). Acesso em: 2 jan. 2024.

CHEN, Yuedong; CUI, Zhaojie; CUI, Xiaowei; LIU, Wei; WANG, Xinlei; LI, Xin Xin; LI, Shouxiu. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, n. December 2018, p. 348–357, 2019.

CHILTON, Tom; BURNLEY, Stephen; NESARATNAM, Suresh. A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1241–1249, 2010.

CHIOATTO, Elisa; SOSPIRO, Paolo. Transition from waste management to circular economy: the European Union roadmap. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 1, p. 249–276, 2023.

CHOI, Bulim; YOO, Seungwoo; PARK, Su Il. Carbon footprint of packaging films made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT blends in South Korea. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2018.

CIVANCIK-USLU Didem; NHU, T.T.; GORP, Bart Van; KRESOVIC, Uros; LARRAIN, Macarena; BILLEN, Pieter; RAGAERT, Kim; DE MEESTER, Steven; DEWULFA, Jo; HUYSELD, Sophie. Moving from linear to circular household plastic packaging in Belgium: Prospective life cycle assessment of mechanical and thermochemical recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, n. March, p. 105633, 2021.

CONTI, Ilaria; SIMIONI, Carolina; VARANO, Gabriele; BRENNNA, Cinzia; COSTANZI, Eva; NERI, Luca Maria. Legislation to limit the environmental plastic and microplastic pollution and their influence on human exposure. **Environmental Pollution**, v. 288, n. July, p. 117708, 2021.

CORNAGO, Simone; ROVELLI, Davide; BRONDI, Carlo; CRIPPA, Maurizio; MORICO, Barbara; BALLARINO, Andrea; DOTELLI, Giovanni. Stochastic consequential Life Cycle Assessment of technology substitution in the case of a novel PET chemical recycling technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, n. April 2020, 2021.

COSSU, R.; GARBO, F.; GIROTTO, F.; SIMION, F.; PIVATO, A. PLASMIX management: LCA of six possible scenarios. **Waste Management**, v. 69, p. 567–576, 2017.

DAIGO, Ichiro; TERASAWA, Takashi; MATSUNO, Yasunari; YAMASHITA, Masaru; ADACHI, Yoshihiro. Environmental and Economic Analysis of Recycling System Using Gasification Plant for Flame Retardance Waste Plastics from Used Home Appliances and Automobile Shredder Residue. **Tetsu-to-Hagané**, v. 91, n. 1, p. 17–19, 2005.

DAY, M.; SHEN, Z.; COONEY, J. D. Pyrolysis: A “recycling” option for automobile shredder residue. **SAE Technical Papers**, 1995.

DE ALMEIDA, Sergio Tadeu; BORSATO, Milton. Extending the RIPEX exergy-based method for selecting End of Life strategy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 152, n. July 2019, p. 104536, 2020.

DEMETRIOUS, A.; CROSSIN, E. Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 4, p. 850–860, 2019.

DIETERLE, Michael; SEILER, Elisa; VIERE, Tobias. Application of eco-efficiency analysis to assess three different recycling technologies for carbon fiber

reinforced plastics (CFRPs). **Key Engineering Materials**, v. 742 KEM, p. 593–601, 2017.

DODBIBA, G.; FURUYAMA, T.; TAKAHASHI, K.; SADAHI, J.; FUJITA, T. Life cycle assessment: A tool for evaluating and comparing different treatment options for plastic wastes from old television sets. **Data Science Journal**, v. 6, n. SUPPL., p. 39–50, 2007.

DODBIBA, Gjergj; TAKAHASHI, Kunihiko; SADAHI, Jun; FUJITA, Toyohisa. Assessing different treatment options for plastic wastes from discarded television sets in the context of LCA. **International Journal of the Society of Material Engineering for Resources**, v. 14, n. 1–2, p. 51–60, 2006.

DODBIBA, Gjergj; TAKAHASHI, Kunihiko; SADAHI, Jun; FUJITA, Toyohisa. The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context of life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 4, p. 458–470, 2008.

DUAILIBE, Alessandra da Rocha Monteiro. **CONTRIBUIÇÃO DA RECICLAGEM QUÍMICA DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. Orientadores: José Carlos Costa da Silva Pinto Jorge Juan Soto Delgado. p. 328. Tese de Doutorado, UFRJ, 2018.

ENERGY JUSTICE NETWORK. **FACT SHEET Trash Incinerator Closures 2000-2022**. 2023. Disponível em: <https://www.energyjustice.net/incineration/closures.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2024.

EPA. **25 Years of RCRA : Building On Our Past To Protect Our Future**. 2002. Disponível em: <https://archive.epa.gov/epawaste/inforesources/web/pdf/k02027.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **Beyond RCRA Waste and Materials Management in the Year 2020**. 2003. Disponível em: <https://archive.epa.gov/oswer/international/web/pdf/vision.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2023.

EPA. **Sustainable Materials Management: The Road Ahead**. 2009. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/vision2.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2023.

EPA. **National Framework for Advancing the U.S. Recycling System**. 2019a. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/national\\_framework.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/national_framework.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **Status Report: Framework for Advancing the U.S. Recycling System.** 2019. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-07/documents/ard\\_status\\_report\\_framework\\_pdf\\_for\\_website\\_july\\_2019\\_1.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-07/documents/ard_status_report_framework_pdf_for_website_july_2019_1.pdf).

Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Tables and Figures Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States.** 2020a. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018\\_tables\\_and\\_figures\\_dec\\_2020\\_fnl\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_tables_and_figures_dec_2020_fnl_508.pdf). Acesso em: 18 dez. 2023.

EPA. **National Recycling Strategy.** 2020b. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/draft\\_national\\_recycling\\_strategy.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/draft_national_recycling_strategy.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **Advancing Sustainable Materials Management 2018 Fact Sheet Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States.** 2020c. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018\\_ff\\_fact\\_sheet\\_dec\\_2020\\_fnl\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **National Recycling Strategy Part One of a Series on Building a Circular Economy for All.** 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/final-national-recycling-strategy.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **Building a circular economy for all: Progress toward transformative change.** 2022a. Disponível em: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-09/EPA\\_Circular\\_Economy\\_Progress\\_Report\\_Sept\\_2022.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-09/EPA_Circular_Economy_Progress_Report_Sept_2022.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

EPA. **NATIONAL SUSTAINABLE MATERIALS MANAGEMENT.** 2022b. Disponível em: <https://www.ecos.org/documents/resolution-10-1-national-sustainable-materials-management/>. Acesso em: 26 dez. 2023.

EPA. **Draft National Strategy to Prevent Plastic Pollution Part of a Series on Building a Circular Economy for All.** 2023. Disponível em: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-04/Draft\\_National\\_Strategy\\_to\\_Prevent\\_Plastic\\_Pollution.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-04/Draft_National_Strategy_to_Prevent_Plastic_Pollution.pdf). Acesso em: 28 jun. 2023.

ERIKSSON, O.; REICH, M. Carlsson; FROSTELL, B.; BJÖRKLUND, A.; ASSEFA, G.; SUNDQVIST, J. O.; GRANATH, J.; BAKY, A.; THYSELIUS, L. Municipal

solid waste management from a systems perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 3, p. 241–252, 2005.

EUROPEAN UNION. Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. **Official Journal of the European Communities**, 1994. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31994L0062>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive 1999/31/EC on the landfill. **Official Journal of the European Communities**, 1999. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31999L0031>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. DIRECTIVE 2004/12/EC amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. **Official Journal of the European Union**, 2004. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0012>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive 2008/122/EC on waste and repealing certain Directives. **Official Journal of the European Union**, 2008. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019XC0927\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019XC0927(01)). Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive 2013/2/EU amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. **Official Journal of the European Union**, 2013. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:037:0010:0012:en:PDF>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2015/720 amending Directive 94/62/EC as regards reducing the consumption of lightweight plastic carrier bags. **Official Journal of the European Union**, 2015a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32015L0720>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. **Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy**. 2015b. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF). Acesso em: 18 out. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2018/852 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. **Official Journal of the European Union**, 2018a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/852/oj>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2018/850 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. **Official Journal of the European Union**, 2018b. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018L0850>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste. **Official Journal of the European Union**, 2018c. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018L0851>. Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. **A European Strategy for Plastics in a Circular Economy**. 2018d. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN>. Acesso em: 18 out. 2023.

EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2019/904 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. **Official Journal of the European Union**, 2019a. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>. Acesso em: 23 jan. 2023.

EUROPEAN UNION. **Implementation of the Circular Economy Action Plan**. 2019. Disponível em: [https://commission.europa.eu/publications/report-implementation-circular-economy-action-plan-1\\_en](https://commission.europa.eu/publications/report-implementation-circular-economy-action-plan-1_en). Acesso em: 6 out. 2023.

EUROPEAN UNION. **A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe**. 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>. Acesso em: 18 out. 2023.

EUROPEAN UNION. Regulation (EU) 2023/595 establishing the form for the statement relating to the own resource based on non-recycled plastic packaging waste pursuant to Council Regulation (EU, Euratom) 2021/770. **Official Journal of the European Union**, 2023a. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_impl/2023/595/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/595/oj). Acesso em: 21 jun. 2023.

EUROPEAN UNION. Regulation (EU) 2023/2055 amending Regulation (EC) 1907/2006 regarding synthetic polymer microparticles. **Official Journal of the European Union**, 2023b. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2055/oj>. Acesso em: 18 out. 2023.

EUROSTAT. **Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations**. 2023a. Disponível em:

[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_wastrt\\_\\_custom\\_9079197/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wastrt__custom_9079197/default/table?lang=en). Acesso em: 26 out. 2023.

EUROSTAT. **Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity**. 2023b. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_wasgen/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en). Acesso em: 26 out. 2023.

FARACA, Giorgia; ASTRUP, Thomas. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. **Waste Management**, v. 95, p. 388–398, 2019.

FARACA, Giorgia; MARTINEZ-SANCHEZ, Veronica; ASTRUP, Thomas F. Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 143, n. June 2018, p. 299–309, 2019.

FERREIRA, S.; CABRAL, M.; DA CRUZ, N. F.; SIMÕES, P.; MARQUES, R. C. Life cycle assessment of a packaging waste recycling system in Portugal. **Waste Management**, v. 34, n. 9, p. 1725–1735, 2014.

FINNVEDEN, Göran; JOHANSSON, Jessica; LIND, Per; MOBERG, Åsa. Life cycle assessment of energy from solid waste - Part 1: General methodology and results. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 3, p. 213–229, 2005.

FIRDAUS PAMBUDI, Noorhan; DOWAKI, Kiyoshi; ADHIUTAMA, Akbar. Integrated Index in Consideration of Appropriate Plastic Recycling System in Waste Bank Operation. **MATEC Web of Conferences**, v. 78, 2016.

FOOLMAUN, Rajendra Kumar; RAMJEANWON, Toolseeram. Life Cycle Assessment ( LCA ) of PET bottles and comparative LCA of three disposal options in Mauritius Rajendra Kumar Foolmaun and Toolseeram Ramjeawon. **Environment and Waste Management**, v. 2, p. 125–138, 2008.

FOOLMAUN, Rajendra Kumar; RAMJEEAWON, Toolseeram. Disposal of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) bottles: Comparison of five disposal alternatives in the small island state of Mauritius using a life cycle assessment tool. **Environmental Technology**, v. 33, n. 5, p. 563–572, 2012.

GALVE, José Eduardo; ELDUQUE, Daniel; PINA, Carmelo; JAVIERRE, Carlos. Sustainable supply chain management: The influence of disposal scenarios on the environmental impact of a 2400 L waste container. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 6, p. 1–12, 2016.

GANDHI, Neeti; FARFARAS, Nicholas; WANG, Nien Hwa Linda; CHEN, Wan Ting. Life cycle assessment of recycling high-density polyethylene plastic waste. **Journal of Renewable Materials**, v. 9, n. 8, p. 1463–1483, 2021.

GEAR, Matthew; SADHUKHAN, Jhuma; THORPE, Rex; CLIFT, Roland; SEVILLE, Jonathan; KEAST, Mike. A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes – A case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 735–747, 2018.

GRACIDA-ALVAREZ, Ulises R.; BENAVIDES, Pahola Thathiana; LEE, Uisung; WANG, Michael. Life-cycle analysis of recycling of post-use plastic to plastic via pyrolysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 425, n. September, p. 138867, 2023.

HAMILTON, Adam; SCHEER, Rafaella; STAKES, Thomas; SIMON, Allan, WIT, Wijnand. **Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização**. 2019. Disponível em: <https://promo.wwf.org.br/solucionar-a-poluicao-plastica-transparencia-e-responsabilizacao>. Acesso em: 29 de jan. 2023.

HELMES, Roel J. K.; GOGLIO, Pietro; SALOMONI, Silvia; VAN ES, Daan S.; VURAL GURSEL, Iris; ARAMYAN, Lusine. Environmental Impacts of End-of-Life Options of Biobased and Fossil-Based Polyethylene Terephthalate and High-Density Polyethylene Packaging. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 18, 2022.

HORODYTSKA, Oksana; KIRITSIS, Dimitris; FULLANA, Andrés. Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 1–12, 2020.

HOSSAIN, Md Uzzal; NG, S. Thomas; DONG, Yahong; AMOR, Ben. Strategies for mitigating plastic wastes management problem: A lifecycle assessment study in Hong Kong. **Waste Management**, v. 131, n. July, p. 412–422, 2021.

HOTTLE, Troy A.; BILEC, Melissa M.; LANDIS, Amy E. Resources , Conservation and Recycling Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. **“Resources, Conservation & Recycling”**, v. 122, p. 295–306, 2017.

HOU, Ping; XU, Yifan; TAIEBAT, Morteza; LASTOSKIE, Christian; MILLER, Shelie A.; XU, Ming. Life cycle assessment of end-of-life treatments for plastic film waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1052–1060, 2018.

HUANG, Qiao; CHEN, Guangwu; WANG, Yafei; CHEN, Shaoqing; XU, Lixiao; WANG, Rui. Modelling the global impact of China’s ban on plastic waste imports.

**Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, n. December 2019, p. 104607, 2020.

HUNT, Robert G. LCA considerations of solid waste management alternatives for paper and plastics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 14, n. 3–4, p. 225–231, 1995.

HUYSMAN, Sofie; DE SCHAEPMEESTER, Jonas; RAGAERT, Kim; DEWULF, Jo; DE MEESTER, Steven. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 46–54, 2017.

HUYSMAN, Sofie; DEBAVEYE, Sam; SCHAUBROECK, Thomas; MEESTER, Steven De; ARDENTE, Fulvio; MATHIEUX, Fabrice; DEWULF, Jo. The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 101, p. 53–60, 2015.

HUYSVELD, S.; RAGAERT, K.; DEMETS, R.; NHU, T. T.; CIVANCIK-USLU, D.; KUSENBERG, M.; VAN GEEM, K. M.; DE MEESTER, S.; DEWULF, J. Technical and market substitutability of recycled materials: Calculating the environmental benefits of mechanical and chemical recycling of plastic packaging waste. **Waste Management**, v. 152, n. August 2022, p. 69–79, 2022.

IRIBARREN, Diego; DUFOUR, Javier; SERRANO, David P. Preliminary assessment of plastic waste valorization via sequential pyrolysis and catalytic reforming. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 14, n. 4, p. 301–307, 2012.

JESWANI, Harish; KRÜGER, Christian; RUSS, Manfred; HORLACHER, Maike; ANTONY, Florian; HANN, Simon; AZAPAGIC, Adisa. Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. **Science of the Total Environment**, v. 769, 2021.

JIMENEZ, A. C. Medina; NEBRA, S. Comparative Assessment of Municipal Solid Waste Management plans in European and Brazilian Cities. **ScholArena**. v. 4, n. 1, p. 1–13, 2021.

JUNG, Youn Soo et al. Characterization and regulation of microplastic pollution for protecting planetary and human health. **Environmental Pollution**, v. 315, n. October, p. 120442, 2022.

KAMALAKKANNAN, Sivappirakasam; ABEYNAYAKA, Amila; KULATUNGA, Asela K.; SINGH, Rajeev Kumar; TATSUNO, Miwa; GAMARALALAGE, Premakumara Jagath Dickella. Life Cycle Assessment of Selected Single-Use Plastic Products towards Evidence-Based Policy Recommendations in Sri Lanka. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, 2022.

KANDANANOND, Karin. The life cycle assessment of a polypropylene product, part b: Comparison of fuel options for generating electricity and disposal methods. **Applied Mechanics and Materials**, v. 535, p. 519–522, 2014.

KHALIL, Y. F. Comparative environmental and human health evaluations of thermolysis and solvolysis recycling technologies of carbon fiber reinforced polymer waste. **Waste Management**, v. 76, n. 2018, p. 767–778, 2018.

KHAN, Md Musharof Hussain; LAITINEN, Vilma; HAVUKAINEN, Jouni; HORTTANAINEN, Mika. Carbon footprint of different recovery options for the repulping reject from liquid packaging board waste treatment process. **Waste Management**, v. 136, n. September, p. 93–103, 2021.

KHOO, Hsien H. LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, n. November 2017, p. 67–77, 2019.

KLOTZ, Magdalena; OBERSCHELP, Christopher; SALAH, Cecilia; SUBAL, Luc; HELLWEG, Stefanie. The role of chemical and solvent-based recycling within a sustainable circular economy for plastics. **Science of the Total Environment**, v. 906, n. July 2023, p. 167586, 2024.

KOMLY, Claude Emma; AZZARO-PANTEL, Catherine; HUBERT, Antoine; PIBOULEAU, Luc; ARCHAMBAULT, Valérie. Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 69, p. 66–81, 2012.

KONDO, Yasushi; NAKAMURA, Shinichiro. Evaluating alternative life-cycle strategies for electrical appliances by the waste input-output model. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 4, p. 236–246, 2004.

KOODUVALLI, Komal; UNSER, John; OZCAN, Soydan; VAIDYA, Uday K. Embodied Energy in Pyrolysis and Solvolysis Approaches to Recycling for Carbon Fiber-Epoxy Reinforced Composite Waste Streams. **Recycling**, v. 7, n. 1, 2022.

KUCZENSKI, Brandon; GEYER, Roland. PET bottle reverse logistics - Environmental performance of California's CRV program. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 456–471, 2013.

KWON, Gihoon; CHO, Dong Wan; PARK, Juyeong; BHATNAGAR, Amit; SONG, Hocheol. A review of plastic pollution and their treatment technology: A circular economy platform by thermochemical pathway. **Chemical Engineering Journal**, v. 464, n. February, p. 142771, 2023.

LAW, Kara Lavender; STARR, Natalie; SIEGLER, Theodore R.; JAMBECK, Jenna R.; MALLOS, Nicholas J.; LEONARD, George H. The United States' contribution of plastic waste to land and ocean. **Science Advances**, v. 6, n. 44, p. 1–8, 2020.

LAZAREVIC, David; AOUSTIN, Emmanuelle; BUCLET, Nicolas; BRANDT, Nils. Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 2, p. 246–259, 2010.

LEE, Chie Jian; CHANG, Lam; TAN, Jully. Environmental Sustainability Framework for Plastic Waste Management—a Case Study of Bubble Tea Industry in Malaysia. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, v. 6, n. 2, p. 513–526, 2022.

LI, Xiang; BAI, Ruibin; MCKECHNIE, Jon. Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, n. 2016, p. 451–460, 2016.

LIM, Y. S.; IZHAR, T. N. T.; ZAKARYA, I. A.; YUSUF, S. Y.; ZAABA, S. K.; MOHAMAD, M. A. Life cycle assessment of expanded polystyrene. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 920, n. 1, 2021.

LINDAHL, Mattias; WINSNES, Mats. Recycling of cable plastics - A life cycle assessment of several different alternatives. **Proceedings - Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Eco Design 2005**, v. 2005, p. 539–546, 2005.

MARSOLA, Karina Braga; DE OLIVEIRA, Andréa Leda Ramos; NETO, Belmira. Life Cycle Assessment of reverse logistics of empty pesticide containers in Brazil: Assessment of current and previous management practices. **Production**, v. 32, 2022.

MARTIN, Eduardo J. P.; OLIVEIRA, Deborah S. B. L.; OLIVEIRA, Luiza S. B. L.; BEZERRA, Barbara S. Life cycle comparative assessment of pet bottle waste management options: A case study for the city of Bauru, Brazil. **Waste Management**, v. 119, p. 226–234, 2021.

MATTHEWS, Chris; MORAN, Fintan; JAISWAL, Amit K. A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 125263, 2021.

MAZHANDU, Zvanaka S.; MUZENDA, Edison; BELAID, Mohamed; NHUBU, Trust. Comparative assessment of life cycle impacts of various plastic waste management scenarios in Johannesburg, South Africa. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 28, n. 5, p. 536–553, 2023.

MEDERAKE, Linda; KNOBLAUCH, Doris. Shaping EU plastic policies: The role of public health vs. environmental arguments. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 20, 2019.

MERRILD, Hanna; LARSEN, Anna W.; CHRISTENSEN, Thomas H. Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: The importance of efficient energy recovery and transport distances. **Waste Management**, v. 32, n. 5, p. 1009–1018, 2012.

MIANDAD, R.; BARAKAT, M. A.; ABURIAZAIZA, Asad S.; REHAN, M.; NIZAMI, A. S. Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 102, p. 822-838, 2016.

MIAO, Yu; VON JOUANNE, Annette; YOKOCHI, Alexandre. Current technologies in depolymerization process and the road ahead. **Polymers**, v. 13, p. 449, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. 2012. Disponível em: [https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/plano\\_nacional\\_residuos\\_solidos.pdf](https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/plano_nacional_residuos_solidos.pdf). Acesso em: 17 jul. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano nacional de resíduos sólidos (PLANARES)**. 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mma/pt-br/acao-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf](https://www.gov.br/mma/pt-br/acao-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf). Acesso em: 24 maio 2023.

MINOGLU, Minas; KOMILIS, Dimitrios. Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming - A case study in a Greek region. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 80, n. 1, p. 46–57, 2013.

MOLLOY, Shen; MEDEIROS, Andrew S.; WALKER, Tony R.; SAUNDERS, Sarah J. Public Perceptions of Legislative Action to Reduce Plastic Pollution: A Case Study of Atlantic Canada. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 3, 2022.

MORRIS, Jeffrey. Comparative LCAs for curbside recycling versus either landfilling or incineration with energy recovery. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 4, p. 273–284, 2005.

MORSELLI, Luciano; SANTINI, Alessandro; PASSARINI, Fabrizio; VASSURA, Ivano; CIACCI, Luca. Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. **Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing**, p. 96–99, 2011.

MUNIOZ, Ivan; RIERADEVALL, Joan; DOMTNECH, Xavier; MILFI, Llorenç. LCA Application to Integrated Waste Management Planning in Gipuzkoa (Spain). **Integrated Waste Management Planning LCA Case Studies**, v. 9, n. 4, p. 272–280, 2004.

MUÑOZ, Ivan; RIERADEVALL, Joan; DOMÈNECH, Xavier; GAZULLA, Cristina. Using LCA to assess eco-design in the automotive sector: Case study of a polyolefinic door panel. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 5, p. 323–334, 2006.

NAKEM, Suriyaphong; PIPATANATORNKUL, Jirawadee; PAPONG, Seksan; RODCHAROEN, Thanakorn; NITHITANAKUL, Manit; MALAKUL, Pomthong. Material Flow Analysis (MFA) and Life Cycle Assessment (LCA) Study for Sustainable Management of PVC Wastes in Thailand. **Computer aided Chemical Engineering**, v. 38, p. 1689-1694, 2016.

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY. **Great Pacific Garbage Patch**. 2022. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/great-pacific-garbage-patch/>. Acesso em: 27 set. 2023.

NCUBE, Amos; BORIDIN, Yuri. Life Cycle Assessment Of Polyethylene Terephthalate Bottle. **7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)**, p. 1-6, 2012.

NEO, Edward Ren Kai; SOO, Gibson Chin Yuan; TAN, Daren Zong Loong; CADY, Karina; TONG, Kai Ting; LOW, Jonathan Sze Choong. Life cycle assessment

of plastic waste end-of-life for India and Indonesia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, n. July 2021, p. 105774, 2021.

NESSI, S.; SINKKO, T.; BULGHERONI, C.; GARCIA-GUTIERREZ, P.; GIUNTOLI, J.; KONTI, A.; SANYE MENGUAL, E.; TONINI, D.; PANT, R.; MARELLI, L.; ARDENTE, F. Life Cycle Assessment (LCA) of alternative feedstocks for plastics production. **Publications Office of the European Union**, Luxembourg, 2021.

OECD. **Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. 2022. Disponível em: [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook\\_de747aef-en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en). Acesso em: 18 out. 2023.

OECD. **Towards Eliminating Plastic Pollution by 2040 A Policy Scenario Analysis**. 2023. Disponível em: <https://www.oecd.org/environment/plastics/Interim-Findings-Towards-Eliminating-Plastic-Pollution-by-2040-Policy-Scenario-Analysis.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

ÖGMUNDARSON, Ólafur; KALWEIT, Laura Sophie; VENKATACHALAM, Venkateshwaran; KRISTJÁNSDÓTTIR, Rakei; ENDRES, Hans Josef; SPIERLING, Sebastian. Plastic Packaging Waste Management in Iceland: Challenges and Opportunities from a Life Cycle Assessment Perspective. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 24, p. 1–18, 2022.

ORSINI, Marco; FEMIA, Aldo. SECONDARY RAW MATERIALS AND WASTE Contract n ° 2019 . 0376 Task 3 : Study of plastics in EU. **Eurostat**, 2022. Acesso em: 12 dez. 2023.

PARK, Chanyeong; LEE, Jechan. Pyrolysis of polypropylene for production of fuel-range products: Effect of molecular weight of polypropylene. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 9, p. 13088–13097, 2021.

PARK, Won Jun; KIM, Rakhyun; ROH, Seungjun; BAN, Hoki. Analysis of major environmental impact categories of road construction materials. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 17, 2020.

PATRIA, Raffel Dharma; REHMAN, Shazia; YUEN, Chun-Bong; LEE, Duu-Jong; VUPPALADADIYAM, Arun K.; LEU, Shao-Yuan. Energy-environment-economic (3E) hub for sustainable plastic management – Upgraded recycling, chemical valorization, and bioplastics. **Applied Energy**, v. 357, n. December 2023, p. 122543, 2024.

PERUGINI, Floriane; MASTELLONE, Maria Laura; ARENA, Umberto. A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. **Environmental Progress**, v. 24, n. 2, p. 137–154, 2005.

PETRAKLI, Fotini et al. End-of-life recycling options of (nano)enhanced CFRP composite prototypes waste-a life cycle perspective. **Polymers**, v. 12, n. 9, 2020.

PILLAIN, Baptiste; LOUBET, Philippe; PESTALOZZI, Fadri; WOJDASKY, Joerg; ERRIGUIBLE, Arnaud; AYMONTIER, Cyril; SONNEMANN, Guido. Positioning supercritical solvolysis among innovative recycling and current waste management scenarios for carbon fiber reinforced plastics thanks to comparative life cycle assessment. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 154, n. June, p. 104607, 2019.

PLASTICS EUROPE. **Plastics - the Facts**. 2022a. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

PLASTICS EUROPE. **THE CIRCULAR ECONOMY FOR PLASTICS, A European Overview**. 2022b. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-overview-2/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

QURESHI, Muhammad Saad; OASMAA, Anja; PIHKOLA, Hanna; DEVIATKIN, Ivan; TENHUNEN, Anna; MANNILA, Juha; MINKKINEN, Hannu; POHJAKALLIO, Maija; LAINE-YLIJOKI, Jutta. Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 152, 2020.

RAJENDRAN, S.; HODZIC, A.; SCELSE, L.; HAYES, S.; SOUTIS, C.; ALMA'ADEED, M.; KAHRAMAN, R. Plastics recycling: Insights into life cycle impact assessment methods. **Plastics, Rubber and Composites**, v. 42, n. 1, p. 1–10, 2013.

RICKERT, Julian; CERDAS, Felipe; HERRMANN, Christoph. Exploring the environmental performance of emerging (chemical) recycling technologies for post-consumer plastic waste. **Procedia CIRP**, v. 90, n. March, p. 426–431, 2020.

ROCHAT, David; BINDER, Claudia R.; DIAZ, Jaime; JOLLIET, Olivier. Combining material flow analysis, life cycle assessment, and multiattribute utility theory: Assessment of end-of-life scenarios for polyethylene terephthalate in Tunja, Colombia. Rochat et al. Combining MFA, LCA, and MAUT. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 5, p. 642–655, 2013.

RORRER, Julie E.; BECKHAM, Gregg T.; ROMÁN-LESHKOV, Yuriy. Conversion of Polyolefin Waste to Liquid Alkanes with Ru-Based Catalysts under Mild Conditions. **JACS Au**, v. 1, n. 1, p. 8–12, 2021.

SANTOS, Andreia; BARBOSA-PÓVOA, Ana; CARVALHO, Ana. Life cycle assessment in chemical industry – a review. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 26, p. 139–147, 2019.

SHELTE, Nora; HENDRICKX, Brent; SEVERENGIZ, Semih. Life-cycle based evaluation of the environmental impact of chemical recycling vs. combined waste-to-energy and carbon-capture-and-utilization for selected epoxy resins. **Procedia CIRP**, v. 116, p. 660–665, 2023.

SCHULTE, Anna; LAMB-SCHEFFLER, Moema; BIESSEY, Philip; RIEGER, Tobias. Prospective LCA of Waste Electrical and Electronic Equipment Thermo-Chemical Recycling by Pyrolysis. **Chemie-Ingenieur-Technik**, n. 8, p. 1–15, 2023a.

SCHULTE, Anna; VELARDE, Pamela Ángela Salinas; MARBACH, Lena; MÖRBITZ, Philip. Measuring the circularity potential of recycled LDPE based on quantity and quality conservation - a functional requirement matrix approach. **Resources, Conservation and Recycling Advances**, v. 17, n. December 2022, 2023b.

SCHWARZ, A. E.; LIGTHART, T. N.; GODOI BIZARRO, D.; DE WILD, P.; VREUGDENHIL, B.; VAN HARMELEN, T. Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. **Waste Management**, v. 121, p. 331–342, 2021.

SCHYNS, Zoé O. G.; SHAVER, Michael P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 42, p. 2000415, 2021.

SEVIGNÉ-ITOIZ, Eva; GASOL, Carles M.; RIERADEVALL, Joan; GABARRELL, Xavier. Contribution of plastic waste recovery to greenhouse gas (GHG) savings in Spain. **Waste Management**, v. 46, n. 2015, p. 557–567, 2015.

SHAHNAWAZ, Mohd.; SANGALE, Manisha K.; ADE, Avinash B. Policy and Legislation/Regulations of Plastic Waste Around the Globe. **Bioremediation Technology for Plastic Waste**, p. 113–126, 2019.

SIMÕES, Carla L.; PINTO, Lígia M. Costa; BERNARDO, C. A. Environmental and economic analysis of end of life management options for an HDPE product using

a life cycle thinking approach. **Waste Management and Research**, v. 32, n. 5, p. 414–422, 2014.

SNIS. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos Visão Geral**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1>. Acesso em: 29 jan. 2023.

SNIS. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos Visão Geral**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1>. Acesso em: 3 fev. 2023.

SNIS. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos Visão Geral**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>. Acesso em: 23 jan. 2024.

SOMMERHUBER, Philipp F.; WENKER, Jan L.; RÜTER, Sebastian; KRAUSE, Andreas. Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 117, p. 235-248, 2017.

SONG, Hyun Seob; HYUN, Jae Chun. A study on the comparison of the various waste management scenarios for PET bottles using the life-cycle assessment (LCA) methodology. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 27, n. 3, p. 267–284, 1999.

STANČIN, Hrvoje; STREZOV, Vladimir; MIKULČIĆ, Hrvoje. Life cycle assessment of alternative fuel production by co-pyrolysis of waste biomass and plastics. **Journal of Cleaner Production**, v. 414, n. June, 2023.

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT. **Annual Production of Plastics Worldwide from 1950 to 2021**. 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>. Acesso em: 5 maio 2023.

SYBERG, Kristian; NIELSEN, M. B.; CLAUSEN, L. P. W.; VAN CALSTER, Geert; VAN WEZEL, Annemarie; ROCHMAN, Chelsea; KOELMANS, Albert A.; CRONIN, Richard; PAHL, Sabine; HANSEN, S. F. Regulation of plastic from a circular economy perspective. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 29, p. 100462, 2021.

TAKAHASHI, Kunihiro; DODBIBA, Gjergj; TAKEDA, Takahisa; FURUYAMA, Takashi; FUJITA, Toyohisa. Assessing Different Recycling Options for Plastic Wastes from Discarded Mobile Phones in the Context of LCA. **Resources Processing**, v. 54, n. 1, p. 29–34, 2007.

APR. **U.S. Post-Consumer Plastic Recycling Data Dashboard**. 2020. Disponível em: <https://circularityinaction.com/2020PlasticRecyclingData>. Acesso em: 17 dez. 2023.

TUMU, Khairun; VORST, Keith; CURTZWILER, Greg. Global plastic waste recycling and extended producer responsibility laws. **Journal of Environmental Management**, v. 348, n. September, p. 119242, 2023.

UNITED STATES. **Public Law 89–272 SOLID WASTE DISPOSAL ACT**. 1965. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/89th-congress/senate-bill/306/text/pl?overview=closed>. Acesso em: 28 jun. 2023.

UNITED STATES. **Public Law 91-512 Resource Recovery Act**. 1970. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/91st-congress/house-bill/11833/text/pl?overview=closed>. Acesso em: 26 dez. 2023.

UNITED STATES. **Public Law 94-580 Resource Conservation and Recovery Act**. 1976. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/94th-congress/senate-bill/2150/text/pl?overview=closed>. Acesso em: 28 jun. 2023.

UNITED STATES. **PUBLIC LAW 116–224 Save Our Seas 2.0 Act**. 2020. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/1982/text/pl?overview=closed>. Acesso em: 21 jun. 2023.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Strategy for Plastics Innovation**. 2023. Disponível em: [https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/DOE-strat-for-plastics-innova\\_1-19-23.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/DOE-strat-for-plastics-innova_1-19-23.pdf). Acesso em: 18 dez. 2023.

US PLASTIC PACT. **2021 ANNUAL REPORT**. 2022 Disponível em: <https://usplasticpact.org/2021-report/>. Acesso em: 22 jun. 2023.

VADOUDI, Kiyam; DECKERS, Pieter; DEMUYTERE, Célestin; ASKANIAN, Haroutioun; VERNEY, Vincent. Comparing a material circularity indicator to life cycle assessment: The case of a three-layer plastic packaging. **Sustainable Production and Consumption**, v. 33, p. 820–830, 2022.

VAN DER HULST, Mitchell K. et al. Greenhouse gas benefits from direct chemical recycling of mixed plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 186, n. August, 2022.

VOSS, Raoul; LEE, Roh Pin; FRÖHLING, Magnus. Chemical Recycling of Plastic Waste: Comparative Evaluation of Environmental and Economic Performances of Gasification- and Incineration-based Treatment for Lightweight Packaging Waste. **Circular Economy and Sustainability**, v. 2, n. 4, p. 1369–1398, 2022.

VUK, Aliz; SZÚCS, István; BAUERNÉ GÁTHY, Andrea. Packaging waste and recycle in EU. **International Review of Applied Sciences and Engineering**, p. 1–11, 2023.

WÄGER, Patrick A.; HISCHIER, Roland. Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. **Science of the Total Environment**, v. 529, p. 158–167, 2015.

WARING, R. H.; HARRIS, R. M.; MITCHELL, S. C. Plastic contamination of the food chain: A threat to human health? **Maturitas**, v. 115, n. June, p. 64–68, 2018.

WITIK, Robert A.; TEUSCHER, Remy; MICHAUD, Véronique; LUDWIG, Christian; MÅNSEN, Jan Anders E. Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 49, p. 89–99, 2013.

WOLLNY, Volrad; DEHOUSE, Günter; FRITSCHKE, Uwe; WEINEM, Peter. Comparison of Plastic Packaging Waste Management Options. **Journal of Industrial Ecology**, v. 5, n. 3, p. 1–15, 2001.

XAYACHAK, Tu; HAQUE, Nawshad; LAU, Deborah; PARTHASARATHY, Raj; PRAMANIK, Biplob Kumar. Assessing the environmental footprint of plastic pyrolysis and gasification: A life cycle inventory study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 173, n. February, p. 592–603, 2023.

XIE, Ming Hui; LI, Li; HUANG, Ze Chun; ZHU, Xue Mei; YAN, Da Hai; SUN, Ti Chang. Environmental impacts of milk packaging made from polythene using life cycle assessment. **2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010**, n. 2006, p. 8–11, 2010.

YAP, Ken Shaun; LEOW, Yong Jie; CHUNG, Si Ying; LOKE, Clarice Pei Hua; TAN, Daren Zong Loong; YEO, Zhiquan; LOW, Jonathan Sze Choong. Life Cycle Assessment of Plastic Waste End-of-life Treatments in Singapore. **Procedia CIRP**, v. 116, p. 522–527, 2023.

YI, Yi; WANG, Ziyi; WENNERSTEN, Ronald; SUN, Qie. Life Cycle Assessment of Delivery Packages in China. **Energy Procedia**, v. 105, n. 2003, p. 3711–3719, 2017.

YUAN, Haoran; LI, Chengyu; SHAN, Rui; ZHANG, Jun; WU, Yufeng; CHEN, Yong. Recent developments on the zeolites catalyzed polyolefin plastics pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 238, p. 107531, 2022.

ZAPPITELLI, Joseph; SMITH, Elijah; PADGETT, Kevin; BILEC, Melissa M.; BABBITT, Callie W.; KHANNA, Vikas. Quantifying Energy and Greenhouse Gas Emissions Embodied in Global Primary Plastic Trade Network. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 9, n. 44, p. 14927–14936, 2021.

ZHANG, Fan; ZHAO, Yuting; WANG, Dandan; YAN, Mengqin; ZHANG, Jing; ZHANG, Pengyan; DING, Tonggui; CHEN, Lei; CHEN, Chao. Current technologies for plastic waste treatment: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, p. 124523, 2021.

ZHANG, Ophela; TAKAFFOLI, Mahdi; ERTZ, Myriam; ADDAR, Walid. Environmental Impact Assessment of Plastic Waste Management Scenarios in the Canadian Context. **Environments - MDPI**, v. 10, n. 12, p. 1–12, 2023.

ZHAO, Wei; VAN DER VOET, Ester; HUPPES, Gjalt; ZHANG, Yufeng. Comparative life cycle assessments of incineration and non-incineration treatments for medical waste. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 2, p. 114–121, 2009.

ZHAO, Yumeng; REN, Kai; HUANG, Wenfang. Which Is More Environmentally Friendly? A Comparative Analysis of the Environmental Benefits of Two Waste-to-Energy Technologies for Plastics Based on an LCA Model. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 10, 2023.

## APÊNDICES

As Tabela 9 a Tabela 13 foram calculadas através dos dados disponíveis da Eurostat (2023a, 2023b) e utilizando a Equação (1, como mencionado na metodologia.

Tabela 9: Total de resíduo plástico tratado na UE em toneladas

Países	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
<b>UE</b>	34.381.877	33.126.822	32.453.189	46.105.390	43.421.912	43.682.244	41.969.410	42.999.416	39.682.509
<b>Bélgica</b>	914.751	600.296	756.063	1.490.997	1.475.114	1.323.931	1.350.931	1.503.965	1.455.977
<b>Bulgária</b>	557.422	645.583	569.476	535.492	580.611	583.200	636.129	396.660	617.652
<b>Tcheca</b>	605.668	666.744	684.012	954.621	873.045	966.094	1.053.925	1.388.004	1.187.207
<b>Dinamarca</b>	770.646	808.000	762.807	889.606	910.942	699.955	652.357	595.807	628.547
<b>Alemanha</b>	3.950.709	3.647.357	4.109.793	8.042.728	7.595.893	7.880.953	8.094.493	8.133.024	8.044.970
<b>Estônia</b>	66.531	70.903	62.485	59.283	32.673	61.796	111.399	117.911	108.631
<b>Irlanda</b>	305.434	353.045	343.873	310.967	303.368	216.375	254.737	316.426	247.536
<b>Grécia</b>	747.488	808.546	715.432	1.040.236	890.093	1.105.768	750.390	735.123	662.193
<b>Espanha</b>	5.922.958	4.579.107	5.188.077	4.969.767	3.889.173	3.776.976	2.410.374	2.653.867	2.683.450
<b>França</b>	7.824.940	7.578.423	6.617.430	8.618.065	7.954.923	7.200.136	7.114.963	6.670.698	5.988.805
<b>Croácia</b>	312.450	177.474	237.356	316.492	272.294	295.974	272.107	284.305	262.338
<b>Itália</b>	4.711.852	4.854.103	4.548.715	7.763.530	6.370.808	6.835.527	6.155.575	6.238.358	5.459.790
<b>Chipre</b>	38.675	85.802	62.625	151.252	96.087	91.213	92.495	90.210	77.285
<b>Letônia</b>	95.889	104.323	117.932	146.847	232.928	137.743	319.250	128.201	247.957
<b>Lituânia</b>	190.216	219.760	234.148	227.369	176.663	138.907	92.463	77.479	134.432
<b>Luxemburgo</b>	34.799	64.648	58.871	64.087	46.513	54.463	36.629	45.044	43.726
<b>Hungria</b>	545.702	702.319	657.737	647.145	729.937	703.179	536.502	633.626	851.779
<b>Malta</b>	35.075	38.409	42.430	34.845	25.455	27.110	24.041	27.119	40.478
<b>Holanda</b>	1.170.299	1.233.423	1.221.605	1.662.390	1.893.516	1.745.505	1.762.147	1.839.097	1.850.561
<b>Áustria</b>	619.284	398.585	280.146	468.122	623.873	498.004	599.215	508.366	477.075
<b>Polônia</b>	1.804.710	1.552.300	1.421.485	2.417.466	3.272.661	4.617.979	4.768.606	4.776.569	3.510.963
<b>Portugal</b>	814.555	1.170.649	1.119.182	964.010	912.584	899.816	770.605	1.852.697	985.225
<b>Romênia</b>	1.015.331	949.913	835.380	1.250.725	1.104.177	1.061.083	1.001.673	971.452	916.743
<b>Eslovênia</b>	113.102	142.983	193.270	161.623	114.797	104.002	81.197	126.881	91.493
<b>Eslováquia</b>	87.708	287.807	319.842	373.270	340.957	337.824	364.218	377.835	387.639
<b>Finlândia</b>	310.460	292.386	263.119	1.198.046	865.791	620.140	661.697	644.335	695.613
<b>Suécia</b>	815.226	1.093.936	1.029.898	1.346.409	1.837.036	1.698.590	2.001.292	1.866.358	2.024.444

Fonte: Autoria Própria

Tabela 10: Resíduos plásticos aterrados na UE em toneladas

Países	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
<b>UE</b>	20.182.952	18.369.508	17.263.975	18.051.053	14.148.359	11.773.901	9.980.801	10.405.606	7.836.658
<b>Bélgica</b>	237.809	125.555	123.149	189.028	64.224	96.577	97.050	228.321	44.603
<b>Bulgária</b>	548.516	614.334	539.880	493.193	508.655	363.830	268.933	238.715	262.297
<b>Tcheca</b>	471.036	510.125	510.855	597.253	507.108	457.668	464.660	558.179	571.690
<b>Dinamarca</b>	225.984	277.559	201.883	50.429	51.143	22.831	19.879	13.702	11.981
<b>Alemanha</b>	1.359.797	67.389	86.512	236.322	202.511	203.348	203.817	202.452	182.527
<b>Estônia</b>	61.865	60.336	54.124	45.771	23.863	8.412	12.531	25.400	21.075
<b>Irlanda</b>	295.802	328.406	315.338	224.934	185.517	75.827	141.138	93.891	126.896
<b>Grécia</b>	743.223	762.250	683.785	914.796	757.129	747.684	673.504	660.232	537.474
<b>Espanha</b>	2.994.070	2.763.211	3.155.385	3.244.446	2.302.893	2.270.277	1.317.355	1.456.731	1.237.315
<b>França</b>	5.052.320	5.112.069	4.387.302	4.529.742	4.159.355	3.216.901	2.682.989	2.080.158	1.447.655
<b>Croácia</b>	305.921	169.319	227.422	284.500	232.765	224.777	222.273	207.595	169.217
<b>Itália</b>	3.167.633	2.945.063	2.706.410	2.735.657	1.283.832	660.713	376.864	359.165	280.162
<b>Chipre</b>	28.170	81.646	55.358	135.264	93.412	91.169	91.623	89.128	71.657
<b>Letônia</b>	95.807	96.369	105.166	94.204	103.880	82.892	24.334	23.688	29.507
<b>Lituânia</b>	181.768	183.848	198.052	182.888	138.049	95.785	29.268	17.483	16.954
<b>Luxemburgo</b>	9.914	10.366	4.149	4.839	3.602	4.546	63	213	451
<b>Hungria</b>	495.714	589.069	534.843	465.050	439.030	346.582	256.373	307.828	310.993
<b>Malta</b>	35.075	38.409	42.352	34.552	24.854	26.218	20.664	22.457	34.431
<b>Holanda</b>	105.293	159.712	61.795	80.021	88.226	53.464	57.981	90.055	99.404
<b>Áustria</b>	63.961	57.750	26.183	3.003	3.371	3.868	3.925	7.880	3.145
<b>Polônia</b>	1.506.781	1.084.561	945.118	1.324.857	1.243.338	1.223.114	1.652.447	1.590.644	940.776
<b>Portugal</b>	552.010	806.666	811.993	551.266	464.779	404.434	380.059	1.095.245	482.043
<b>Romênia</b>	998.744	690.588	745.902	828.034	586.305	620.507	570.435	649.804	587.242
<b>Eslovênia</b>	99.969	117.508	166.002	101.601	57.162	36.240	12.997	19.433	19.918
<b>Eslováquia</b>	56.303	216.111	239.731	259.447	231.136	225.197	227.972	238.434	216.456
<b>Finlândia</b>	267.106	264.542	222.664	325.672	261.780	155.844	77.941	20.985	26.707
<b>Suécia</b>	222.363	236.744	112.623	114.284	130.438	55.195	93.723	107.789	104.080

Fonte: Autoria Própria

Tabela 11: Resíduos plásticos incinerados na UE em toneladas

Países	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
<b>UE</b>	4.421.911	5.037.003	4.818.133	4.221.731	3.365.310	2.559.051	1.471.247	886.746	718.426
<b>Bélgica</b>	355.454	344.570	528.052	179.818	324.266	156.848	99.609	107.489	50.731
<b>Bulgária</b>	700	6.941	58	43	99	2.445	196	421	959
<b>Tcheca</b>	2.648	4.319	6.357	5.687	8.098	8.556	9.289	9.997	10.253
<b>Dinamarca</b>	490.665	0	0	0	210	28	94	49	180
<b>Alemanha</b>	1.843.318	1.833.797	1.566.717	1.561.562	1.305.162	863.262	348.205	35.908	78.497
<b>Estônia</b>	5	0	0	0	0	0	2	0	0
<b>Irlanda</b>	0	0	0	3	0	0	0	0	0
<b>Grécia</b>	7	4.005	1.327	1.132	951	882	1.313	1.066	962
<b>Espanha</b>	7.310	11.101	76.351	33.176	1.144	2.238	1.912	13.061	20.336
<b>França</b>	126.260	1.034.346	1.046.562	1.105.917	1.008.792	811.378	641.704	503.178	453.966
<b>Croácia</b>	1.534	583	815	1.847	28	15	17	0	0
<b>Itália</b>	566.049	752.227	484.283	655.469	564.658	544.410	279.982	121.968	36.253
<b>Chipre</b>	14	73	106	15	0	0	0	0	0
<b>Letônia</b>	34	63	4	4	6	3	6	35	6
<b>Lituânia</b>	51	14	206	217	16	20	109	130	331
<b>Luxemburgo</b>	19.837	19.590	20.058	18.706	19.601	0	0	0	15
<b>Hungria</b>	3.081	2.222	2.087	5.950	4.749	3.596	4.248	4.322	4.664
<b>Malta</b>	0	0	78	103	95	105	121	123	181
<b>Holanda</b>	756.581	751.474	811.237	366.676	53.848	17.109	18.469	16.207	16.045
<b>Áustria</b>	206.442	176.511	187.187	198.885	3.073	3.073	3.073	3.073	3.073
<b>Polônia</b>	17.230	19.042	22.573	27.319	21.648	77.019	42.483	48.531	23.933
<b>Portugal</b>	5.714	22.532	44.968	1.573	831	506	1.307	3.295	4.457
<b>Romênia</b>	1	27	3.787	5.755	2.930	4.066	7.926	6.675	8.677
<b>Eslovênia</b>	15	7	19	1.230	1.864	187	122	69	72
<b>Eslováquia</b>	6.977	42.488	14.001	11.424	5.251	5.093	4.722	6.373	1.265
<b>Finlândia</b>	11.034	8.876	1.115	36.005	36.045	55.558	2.841	2.445	3.029
<b>Suécia</b>	949	2.196	187	3.218	1.946	2.657	3.496	2.332	541

Fonte: Autoria Própria

Tabela 12: Recuperação energética dos resíduos plásticos na UE em toneladas

Países	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
<b>UE</b>	3.698.851	3.615.180	4.061.411	8.700.896	10.203.155	11.414.302	13.093.207	13.900.239	13.299.076
<b>Bélgica</b>	8.281	253	5.861	474.731	756.886	698.837	629.894	658.344	484.843
<b>Bulgária</b>	34	230	7.161	4.577	7.026	2.824	22.691	6.945	16.162
<b>Tcheca</b>	65.955	63.518	58.605	121.369	128.779	148.139	160.053	198.954	209.715
<b>Dinamarca</b>	0	476.661	488.232	497.232	521.205	493.376	455.027	430.957	424.135
<b>Alemanha</b>	229.436	626.960	1.069.234	2.114.710	2.491.620	3.137.924	3.653.152	3.929.021	3.544.456
<b>Estônia</b>	1.034	177	902	1.242	90	36.068	41.029	37.508	36.049
<b>Irlanda</b>	0	0	0	40	33.553	25.212	25.299	112.032	97.441
<b>Grécia</b>	258	124	65	856	1.136	2.450	7.293	7.652	9.565
<b>Espanha</b>	275.405	354.700	247.099	253.420	322.508	342.767	295.166	313.212	356.809
<b>França</b>	2.266.360	997.008	1.000.518	2.047.758	2.014.510	2.309.090	2.791.354	2.926.215	3.177.966
<b>Croácia</b>	1.837	25	855	4.498	21	30	11	5.113	9.448
<b>Itália</b>	19.480	1.249	612	343.570	338.829	457.418	704.759	821.993	829.603
<b>Chipre</b>	363	1	0	3	0	1	765	830	3.415
<b>Letônia</b>	49	34	2	21.940	784	513	2.901	9.649	4.690
<b>Lituânia</b>	64	3	0	105	1.253	4.001	2.892	4.735	11.712
<b>Luxemburgo</b>	0	0	0	22.225	6.000	23.679	22.035	30.900	28.838
<b>Hungria</b>	23.655	62.060	63.302	77.866	153.641	182.813	117.136	127.413	135.105
<b>Malta</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Holanda</b>	24.146	12.907	6.439	634.785	1.060.380	1.021.976	1.029.496	891.863	816.824
<b>Áustria</b>	21	0	0	146.013	260.725	260.725	260.725	260.725	260.725
<b>Polónia</b>	2.076	2.436	1.847	39.070	50.652	240.219	428.363	513.807	235.222
<b>Portugal</b>	158.954	163.898	184.791	188.148	156.715	165.490	160.550	420.000	184.916
<b>Romênia</b>	5.077	1.290	441	30.563	42.792	33.158	43.846	40.776	37.318
<b>Eslovênia</b>	925	3.194	1.158	5.200	3.279	2.062	7.051	10.684	3.884
<b>Eslováquia</b>	117	180	25.235	31.270	28.132	32.884	31.232	27.145	33.649
<b>Finlândia</b>	30.935	13.951	33.054	609.628	359.695	286.889	433.483	468.514	521.517
<b>Suécia</b>	584.391	834.323	865.998	1.030.073	1.462.944	1.505.757	1.767.003	1.645.254	1.825.070

Fonte: Autoria Própria

Tabela 13: Reciclagem dos resíduos plásticos na UE em toneladas

Países	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
<b>UE</b>	6.078.164	6.105.131	6.309.670	15.131.710	15.705.089	17.934.989	17.424.155	17.806.824	17.828.349
<b>Bélgica</b>	313.206	129.919	99.001	647.420	329.738	371.669	524.377	509.811	875.800
<b>Bulgária</b>	8.173	24.077	22.377	37.679	64.832	214.102	344.308	150.580	338.234
<b>Tcheca</b>	66.029	88.782	108.196	230.311	229.059	351.731	419.923	620.875	395.549
<b>Dinamarca</b>	53.997	53.780	72.692	341.945	338.384	183.719	177.357	151.100	192.251
<b>Alemanha</b>	518.157	1.119.211	1.387.330	4.130.133	3.596.600	3.676.419	3.889.319	3.965.642	4.239.490
<b>Estônia</b>	3.627	10.390	7.459	12.270	8.720	17.316	57.837	55.003	51.507
<b>Irlanda</b>	9.632	24.639	28.535	85.991	84.298	115.336	88.299	110.503	23.199
<b>Grécia</b>	4.000	42.167	30.255	123.452	130.877	354.752	68.279	66.173	114.192
<b>Espanha</b>	2.646.173	1.450.095	1.709.243	1.438.725	1.262.629	1.161.695	795.940	870.863	1.068.991
<b>França</b>	380.000	435.000	183.048	934.648	772.266	862.767	998.916	1.161.147	909.217
<b>Croácia</b>	3.158	7.546	8.264	25.647	39.481	71.152	49.807	71.597	83.672
<b>Itália</b>	958.690	1.155.564	1.357.410	4.028.834	4.183.488	5.172.986	4.793.971	4.935.232	4.313.772
<b>Chipre</b>	10.128	4.082	7.161	15.971	2.675	42	107	253	2.213
<b>Letônia</b>	0	7.856	12.761	30.700	128.258	54.335	292.009	94.828	213.754
<b>Lituânia</b>	8.333	35.895	35.890	44.160	37.345	39.100	60.193	55.132	105.435
<b>Luxemburgo</b>	5.049	34.692	34.664	18.317	17.310	26.239	14.531	13.931	14.422
<b>Hungria</b>	23.252	48.969	57.505	98.279	132.518	170.188	158.744	194.063	401.017
<b>Malta</b>	0	0	0	190	506	787	3.256	4.539	5.866
<b>Holanda</b>	284.279	309.330	342.134	580.908	691.062	652.956	656.201	840.972	918.289
<b>Áustria</b>	348.860	164.324	66.777	120.220	356.703	230.338	331.492	236.687	210.132
<b>Polónia</b>	278.623	446.261	451.947	1.026.219	1.957.023	3.077.627	2.645.312	2.623.587	2.311.032
<b>Portugal</b>	97.877	177.553	77.430	223.022	290.260	329.388	228.689	334.156	313.809
<b>Romênia</b>	11.509	258.008	85.249	386.373	472.149	403.351	379.466	274.197	283.506
<b>Eslovênia</b>	12.193	22.274	26.090	53.592	52.491	65.512	61.026	96.695	67.619
<b>Eslováquia</b>	24.310	29.028	40.876	71.129	76.438	74.649	100.292	105.883	136.269
<b>Finlândia</b>	1.386	5.017	6.286	226.741	208.272	121.849	147.433	152.392	144.359
<b>Suécia</b>	7.523	20.672	51.090	198.834	241.708	134.981	137.070	110.983	94.753

Fonte: Autoria Própria

## ANEXOS

Figura 30: Quantidade de resíduos plásticos por categorias de resíduos na UE

EWC-Stat category		Estimated share of plastic components weight-%
W05	Health care and biological wastes	30%
W074	Plastic wastes	100%
W08A	Discarded equipment	27%
W081	Discarded vehicles	11%
W0841	Batteries, accumulators wastes	10%
W101	Household and similar wastes	13%
W102a	Mixed, undifferentiated materials / packaging	58%
W102b	Mixed, undifferentiated materials / rejects	10%
W121	Mineral C&D wastes	2%
P-38.32.33	Plastic by-products	100%

Fonte: Orsini; Femia (2022)