

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

NATÁLIA SERIO FRANCHI

**ECONOMIA CIRCULAR E RECICLAGEM DE
PLÁSTICOS: ANÁLISE DAS BARREIRAS
TECNOLÓGICAS E REGULATÓRIAS DA PIRÓLISE
NO BRASIL**

SÃO CARLOS - SP
2025

NATÁLIA SERIO FRANCHI

ECONOMIA CIRCULAR E RECICLAGEM DE PLÁSTICOS: ANÁLISE DAS BARREIRAS
TECNOLÓGICAS E REGULATÓRIAS DA PIRÓLISE NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção
do título de bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos - SP
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 8 de dezembro de 2025 perante
seguintes membros da banca examinadora:

Orientador: Professor Dr. Fábio Bentes Freire, DEQ/UFSCar

Convidada: Professora. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira, DEQ/UFSCar

Convidada: Iara Ivana Pereira, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Dr. Fábio Bentes Freire, DEQ/UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Cássia Rita e Osvaldo (*in memoriam*), e a minha irmã, Júlia. Com todo meu amor, expresso minha imensa gratidão pela dedicação e pelo apoio que sempre tiveram por mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha família. Em especial, gostaria de agradecer aos meus pais, Cássia e Osvaldo (*in memorian*), pela educação, zelo e amor de uma vida toda; por todas as vezes que me incentivaram a buscar meus sonhos; por terem sido pais incríveis para mim e para minha irmã, Júlia. Carrego esse carinho comigo aonde vou.

Obrigada, Julinha, por ter me apoiado em toda decisão da vida, por ser minha parceira inseparável, confidente e por continuar sendo a melhor irmã que eu poderia ter.

Obrigada, Gabriel, pela paciência, pelo cuidado e amor durante todo esse processo final da minha graduação.

Quero agradecer também as minhas amigas de Araraquara, Jéssica e Tamires, fundamentais para minha formação, que me acompanharam e me apoiaram desde o dia 1. Agradeço ao meu amigo Felipe, um dos meus maiores motivadores e que tanto me auxiliou a entregar um bom texto antes e durante a faculdade. À todos os amigos que fiz em São Carlos: Isadora, Karlla, Lucas, Paulo, Juliana, Eder e toda República *Avocades*, vocês foram e continuam sendo minha segunda família.

Agradeço a todos os profissionais da educação que passaram pela minha vida; a minha jornada desde o primário até minha chegada a UFSCar foi repleta de pessoas especiais que se dedicavam a uma educação pública de qualidade e de direito que eu serei eternamente grata.

Por último, mas não menos importante, gratidão ao meu orientador, Fábio Bentes Freire, pelo seus ensinamentos e direcionamentos. Esses foram muito importantes para um trabalho leve, mas com muita entrega e satisfação de ambos os lados.

Agradeço também a quem lê, espero que este trabalho contribua para seu conhecimento e que ajude outras pessoas em seus estudos no tema.

EPÍGRAFE

Fomos nos alienando desse organismo de que somos parte, a terra, e passamos a pensar que ele é uma coisa e nós, outra: a terra e a humanidade.

Ailton Krenak

RESUMO

O Brasil, com uma população superior a 200 milhões de habitantes, se estabeleceu como o quarto maior gerador mundial de lixo plástico, enfrentando um cenário crítico marcado por uma das mais baixas taxas de reciclagem efetiva do planeta, com apenas 1,28% de aproveitamento em contraste com a média global de 9%, uma ineficiência que é agravada pela limitada cobertura e desempenho da coleta seletiva, a qual engloba meros 5,9% do volume total de resíduos domiciliares. Diante desta problemática ambiental e social, o presente trabalho propõe analisar as barreiras de natureza tecnológica e regulatória que impedem a implementação plena da Economia Circular na gestão dos resíduos plásticos no país, com foco particular nas perspectivas de avanço por meio da reciclagem química, utilizando a pirólise como principal estudo de caso. A metodologia empregada foi de caráter qualitativo e exploratório, fundamentada em uma revisão sistemática da literatura especializada, combinada com uma análise documental aprofundada das políticas públicas brasileiras, notadamente a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em comparação com marcos regulatórios internacionais relevantes, além de uma avaliação econômica, tecnológica e regulatória do processo de pirólise. Os resultados compilaram dados comparativos de análise econômica e delinearam os principais obstáculos impostos pelas barreiras supracitadas, permitindo que o estudo identificasse e propusesse sugestões concretas para gerar um impacto positivo e significativo na gestão dos resíduos plásticos, alinhadas aos princípios da Economia Circular. A pesquisa demonstrou que a pirólise representa uma alternativa superior à reciclagem mecânica para o tratamento de plásticos complexos no contexto brasileiro, sendo capaz de promover a circularidade ao converter esses materiais em óleos, gases e carvão. Contudo, apesar da alta viabilidade econômica do processo, que está intrinsecamente ligada à operação em grandes escalas (acima de 1000 kg/h), a barreira mais proeminente para a consolidação da tecnologia está na lacuna regulatória que impede o reconhecimento do óleo de pirólise como uma matéria-prima reciclada de alto valor. Para desbloquear o potencial desta tecnologia no Brasil, conclui-se que é indispensável uma abordagem dupla, que harmonize o essencial reconhecimento regulatório do óleo de pirólise com a otimização da escala operacional com contribuição dos profissionais de Engenharia Química

Palavras-chave: Economia Circular; Reciclagem de Plásticos; Pirólise; Barreiras Tecnológicas; Barreiras Regulatórias.

ABSTRACT

Brazil, with a population exceeding 200 million inhabitants, has established itself as the world's fourth-largest generator of plastic waste, facing a critical scenario marked by one of the planet's lowest effective recycling rates, with only 1.28% utilization in contrast to the global average of 9%, an inefficiency that is aggravated by the limited coverage and performance of selective waste collection, which encompasses a mere 5.9% of the total volume of residential waste. In light of this environmental and social problem, the present work aimed to analyze the technological and regulatory barriers that impede the full implementation of the Circular Economy in the management of plastic waste in the country, with a particular focus on the prospects for advancement through chemical recycling, using pyrolysis as the main case study. The methodology employed was qualitative and exploratory, based on a systematic review of specialized literature, combined with an in-depth documentary analysis of Brazilian public policies, notably the National Solid Waste Policy (PNRS), in comparison with relevant international regulatory frameworks, in addition to an economic, technological, and regulatory assessment of the pyrolysis process. The results compiled comparative economic analysis data and outlined the main obstacles imposed by the aforementioned barriers, allowing the study to identify and propose concrete suggestions to generate a positive and significant impact on plastic waste management, aligned with the principles of the Circular Economy. The research demonstrated that pyrolysis represents a superior alternative to mechanical recycling for the treatment of complex plastics in the Brazilian context, being capable of promoting circularity by converting these materials into oils, gases, and char. However, despite the high economic viability of the process, which is intrinsically linked to operation at large scales (above 1000 kg/h), the most prominent barrier to the consolidation of the technology lies in the regulatory gap that prevents the recognition of pyrolysis oil as a high-value recycled raw material. To unlock the potential of this technology in Brazil, it is concluded that a dual approach is indispensable, harmonizing the essential regulatory recognition of pyrolysis oil with the optimization of the operational scale through Chemical Engineering.

Keywords: Circular Economy; Plastic Recycling; Pyrolysis; Technological Barriers; Regulatory Barriers.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Porcentagem de plástico reciclado no Brasil e no mundo..... | 15 |
| Figura 2: Cobertura coleta seletiva no Brasil..... | 16 |
| Figura 3: Desempenho da coleta seletiva..... | 17 |
| Figura 4: Códigos de identificação de embalagens de plástico..... | 21 |
| Figura 5: Setores-destino das embalagens recicladas no Brasil..... | 22 |
| Figura 6: Esquema da Economia Circular..... | 25 |
| Figura 7: Fluxo da reciclagem dos materiais plásticos..... | 30 |
| Figura 8: Características dos principais processos de reciclagem química..... | 32 |
| Figura 9: Esquema geral do processamento de pirólise de resíduos plásticos..... | 34 |
| Figura 10: Principais produtos da pirólise de alguns materiais plásticos..... | 34 |
| Figura 11: Linha cronológica da legislação brasileira..... | 36 |
| Figura 12: Linha cronológica da legislação europeia..... | 39 |
| Figura 13: Estudo de capacidade x impacto nos resultados..... | 45 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 — Produção e reciclagem de plástico no mundo em toneladas..... | 15 |
| Quadro 2 — Diferenciação dos índices para a gestão do resíduo plástico..... | 19 |
| Quadro 3 — Comparação de maturidade Legislativa em grandes potências econômicas..... | 40 |
| Quadro 4 — Comparação entre as principais características da Reciclagem Mecânica e Reciclagem Química..... | 44 |

LISTA DE 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 — Avaliação do Ciclo de Vida
- EUA — Estados Unidos
- Eurostat — Gabinete de Estatística da União Europeia
- HCl — Ácido Clorídrico
- IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IEA — INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
- OECD — *Organisation for Economic Co-operation and Development* (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico)
- PE — Poli(eteno)
- PEAD — Polietileno de alta densidade
- PET — Poli(tereftalato de etileno)
- PNRS — Política Nacional de Resíduos Sólidos
- PP — Poli(propeno)
- PS — Poli(1-feniletileno)
- PVC — Poli(cloreto de vinila)
- RSU — Resíduos sólidos urbanos
- SINISA — Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
- TPA — Ácido Tereftálico
- UE — União Europeia
- USP — Universidade de São Paulo
- VPL — Valor Presente Líquido
- WWF — *World Wide Fund for Nature* (Fundo Mundial para a Natureza)

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 2.1. CENÁRIO BRASILEIRO: POPULAÇÃO X GERAÇÃO DE RESÍDUOS..... | 15 |
| 2.2. CICLO DE VIDA DO PLÁSTICO..... | 21 |
| 2.3. UMA NOVA ABORDAGEM PARA A PRODUÇÃO E CONSUMO..... | 25 |
| 2.4. TRATAMENTO DO RESÍDUO PLÁSTICO – RECICLAGEM..... | 27 |
| 2.4.1. RECICLAGEM MECÂNICA..... | 27 |
| 2.4.1.1. Termoplásticos e Termofixos..... | 28 |
| 2.4.1.2. Etapas da Reciclagem Mecânica..... | 28 |
| 2.4.2. RECICLAGEM QUÍMICA..... | 31 |
| 2.5. PIRÓLISE..... | 34 |
| 2.6. LEGISLAÇÃO..... | 36 |
| 2.6.1. Legislação no Brasil..... | 36 |
| 2.6.2. Legislação fora do Brasil..... | 39 |
| 3. METODOLOGIA..... | 41 |
| 3.1. ETAPAS METODOLÓGICAS..... | 42 |
| 3.2. DELIMITAÇÃO DE ESTUDO..... | 43 |
| 3.3. MATERIAIS E FONTES DE DADOS..... | 43 |
| 3.4. LIMITAÇÕES E VALIDAÇÃO..... | 44 |
| 4. DISCUSSÃO E ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA..... | 44 |
| 4.1 VANTAGENS DA PIRÓLISE..... | 44 |
| 4.2. DESAFIOS DA PIRÓLISE..... | 47 |
| 4.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 50 |
| 4.3.1. Emissões evitadas (de CO ₂)..... | 50 |
| 4.3.2. Preço de venda do óleo..... | 51 |
| 4.3.3. Custo de aquisição de matéria-prima..... | 51 |
| 4.3.4. Outros..... | 51 |
| 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 52 |
| REFERÊNCIAS..... | 54 |

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a população mundial ultrapassa 8,2 bilhões de pessoas e deve atingir entre 9,6 e 10,3 bilhões nas próximas décadas, alcançando seu pico estimado por volta da metade do século XXI (UNITED NATIONS, 2024). Esse contínuo crescimento populacional, aliado ao aumento da renda e à urbanização, especialmente em países de média e baixa renda, tem impulsionado o consumo de materiais e, principalmente, de embalagens plásticas. Como consequência, observa-se um expressivo aumento na geração de resíduos plásticos em escala global. De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), a quantidade de resíduos plásticos gerados mais que dobrou entre 2000 e 2019 — de aproximadamente 156 milhões para 353 milhões de toneladas —, evidenciando a forte correlação entre crescimento populacional, padrões de consumo e desafios na gestão de resíduos (OECD, 2022).

Nesse sentido, Barbosa (2020) ressalta que “ao observar-se que a sustentabilidade deve ser encarada de forma sistêmica, na perspectiva planetária não existe o “jogar fora”, tudo permanece nos ecossistemas, seja na terra, nas águas, seja na atmosfera —, é imprescindível retornar à cadeia produtiva tudo o que já não tem mais utilidade, em um ciclo fechado, a fim de que a energia e os recursos naturais já empregados não sejam perdidos. Isso será ainda mais fundamental ao considerar-se o aumento de demanda por recursos que uma sociedade de 9 bilhões de pessoas deve impor até 2050.”

Diante desse cenário de crescimento populacional e aumento expressivo da geração de resíduos plásticos, torna-se evidente a necessidade de repensar os atuais modelos de produção e consumo. A concepção de sustentabilidade planetária exige mudanças nos comportamentos dos setores públicos, produtivos e de consumo quanto à gestão dos resíduos. Além de coletar e tratar, busca-se a disposição adequada de subprodutos e a redução dos resíduos na fonte, promovendo transformações nas práticas gerenciais e a transição de um modelo mecanicista para um sistema holístico e ecológico, capaz de equilibrar o uso de recursos naturais e minimizar a degradação ambiental (ZANIN e MANCINI, 2015).

A Engenharia Química desempenha papel essencial na busca por soluções sustentáveis, ao desenvolver processos e tecnologias que reduzam a geração de resíduos e otimizem o uso de recursos. A aplicação dos princípios de engenharia verde e da Economia Circular tem permitido projetar sistemas produtivos mais limpos e eficientes, alinhados à mitigação de impactos ambientais e ao uso racional de matérias-primas (CENTI; PERATHONER, 2019; ICHEME, 2022). Assim, a pessoa engenheira química atua como agente fundamental na transição para modelos industriais mais equilibrados e compatíveis com os objetivos globais de sustentabilidade.

Para propor novos modelos industriais alinhados à Economia Circular, é necessário compreender o ciclo de vida do plástico — da produção ao descarte —, assegurando que cada etapa da gestão do resíduo seja orientada por práticas sustentáveis e pela valorização integral do material. Esse entendimento permite identificar oportunidades de melhoria nos processos produtivos e fortalecer a integração entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental.

A legislação, por sua vez, exerce papel decisivo ao definir diretrizes para o manejo adequado e a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, consumidores e poder público. Um exemplo recente é o Decreto nº 12.688/2025 – que regulamenta dispositivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010) – institui o sistema nacional de logística reversa de embalagens plásticas, estipulando metas como a coleta e reciclagem de 50% das embalagens até 2040 e a reutilização de 40% dos produtos até esse mesmo ano (BRASIL, 2025).

Ainda assim, o plástico continua entre os materiais mais frequentemente descartados de forma indevida, o que reforça a urgência em adotar alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis. No Brasil, essa necessidade é acentuada pelo volume de resíduos gerados — cerca de 11,3 milhões de toneladas de lixo plástico por ano (WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF), 2019).

Diante de todo o exposto, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo analisar as barreiras tecnológicas e regulatórias que limitam a implementação efetiva da Economia Circular na gestão de resíduos plásticos no Brasil, com foco nas possibilidades de avanço por meio da reciclagem química —

especialmente a pirólise. Busca-se compreender de que forma a integração entre inovação tecnológica, legislação ambiental e práticas industriais pode contribuir para a construção de um modelo produtivo mais sustentável e eficiente. Além disso, o trabalho irá buscar o resultado por meio de análises de viabilidade econômica, técnica, ambiental e regulatória, abrangendo o processo de pirólise de plásticos a partir de estudos já existentes, bem como sugerir fatores adicionais que devem ser considerados na avaliação da possibilidade de investimento em uma planta desse processo. Ao longo do estudo, pretende-se evidenciar o papel estratégico da Engenharia Química nesse contexto, destacando seu potencial para transformar desafios ambientais em oportunidades de desenvolvimento sustentável e de fortalecimento da economia verde no país.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CENÁRIO BRASILEIRO: POPULAÇÃO X GERAÇÃO DE RESÍDUOS

O Brasil, com 212 milhões de habitantes (IBGE, 2024), acompanha a crise mundial da poluição por plásticos. Segundo o estudo de 2019 da WWF, somos o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia. Desse total, 91% são coletados, aproximadamente 10,3 milhões de toneladas. Por outro lado, assim como mostra o Quadro 1, apenas 1,28% de todo o plástico produzido e importado no país é devidamente reciclado, ou seja, reprocessado como produto secundário para substituir a matéria-prima virgem. Esse valor é muito abaixo do índice mundial, que é de 9% (Figura 1).

Quadro 1 — Produção e reciclagem de plástico no mundo em toneladas

| País | Total de lixo plástico gerado* | Total incinerado | Total reciclado | Relação produção e reciclagem |
|----------------|--------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| Estados Unidos | 70.782.577 | 9.060.170 | 24.490.772 | 34,60% |
| China | 54.740.659 | 11.988.226 | 12.000.331 | 21,92% |
| Índia | 19.311.663 | 14.544 | 1.105.677 | 5,73% |
| Brasil | 11.355.220 | 0 | 145.043 | 1,28% |
| Indonésia | 9.885.081 | 0 | 362.070 | 3,66% |
| Rússia | 8.948.132 | 0 | 320.088 | 3,58% |
| Alemanha | 8.286.827 | 4.876.027 | 3.143.700 | 37,94% |
| Reino Unido | 7.994.284 | 2.620.394 | 2.513.856 | 31,45% |
| Japão | 7.146.514 | 6.642.428 | 405.834 | 5,68% |
| Canadá | 6.696.763 | 207.354 | 1.423.139 | 21,25% |

Fonte: WWF / Banco Mundial (What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050)

Figura 1: Porcentagem de plástico reciclado no Brasil e no mundo

JORNAL DA USP PORTAL DA USP | FALE CONOSCO | ENVIE UMA PAUTA | PODCASTS | RÁDIO

ATUALIDADES ▾ CIÊNCIAS ▾ CULTURA ▾ DIVERSIDADE ▾ EDUCAÇÃO INSTITUCIONAL ▾ RÁDIO USP ▾ TECNOL

Início > Atualidades > Apenas 9% do plástico global é reciclado; no Brasil, a porcentagem é ainda menor

Apenas 9% do plástico global é reciclado; no Brasil, a porcentagem é ainda menor

Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho comenta estudos de uma ONG americana e explica quais são as dificuldades de reciclar um material tão presente em nosso cotidiano

Atualidades / Jornal da USP no Ar / Jornal da USP no Ar 1ª edição / Rádio USP - <https://jornal.usp.br/?p=730589>

06/03/2024 - Publicado há 2 anos

[Facebook](#) [Twitter](#) [WhatsApp](#) [LinkedIn](#) [Telegram](#) [Email](#) [RSS](#) [Print](#)



Fonte: Jornal da USP

O Brasil, em um contexto local, adiciona mais um desafio, que é a coleta dos resíduos de forma seletiva, que possibilita a reinserção deste resíduo no ciclo produtivo.

Para aprofundar a análise sobre a coleta seletiva no Brasil, o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), em seu relatório de 2024 (com dados referentes a 2023), oferece um panorama detalhado sobre os métodos e a cobertura dos serviços de coleta de resíduos. O estudo destaca a diferença da prática predominante no país — a coleta indiferenciada — da modalidade mais alinhada às diretrizes de sustentabilidade, a coleta seletiva.

A coleta indiferenciada, também chamada de coleta convencional, consiste no recolhimento de resíduos sem qualquer separação prévia por tipo de material. Trata-se do modelo mais disseminado e pode ocorrer de duas formas: direta (porta a porta), quando o resíduo é coletado em cada unidade geradora, ou indireta (ponto a ponto), na qual os resíduos são depositados pelos usuários em pontos estacionários de uso coletivo.

Em contraste, a coleta seletiva, ou coleta diferenciada, envolve o manejo específico dos resíduos recicláveis, exigindo sua segregação prévia pelos próprios geradores. Segundo o SINISA, para que um sistema seja considerado seletivo, ele deve assegurar, no mínimo, a separação e coleta de resíduos recicláveis secos, ampliando progressivamente sua abrangência para incluir também os resíduos recicláveis orgânicos.

É a partir da mensuração do alcance desse serviço essencial que o SINISA apresenta os seguintes dados na Figura 2 e na Figura 3.

Figura 2: Cobertura coleta seletiva no Brasil

Cobertura com serviço de coleta seletiva

37,1%

da população total é coberta com coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares
cobertura da população total com coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares (IRS0005)

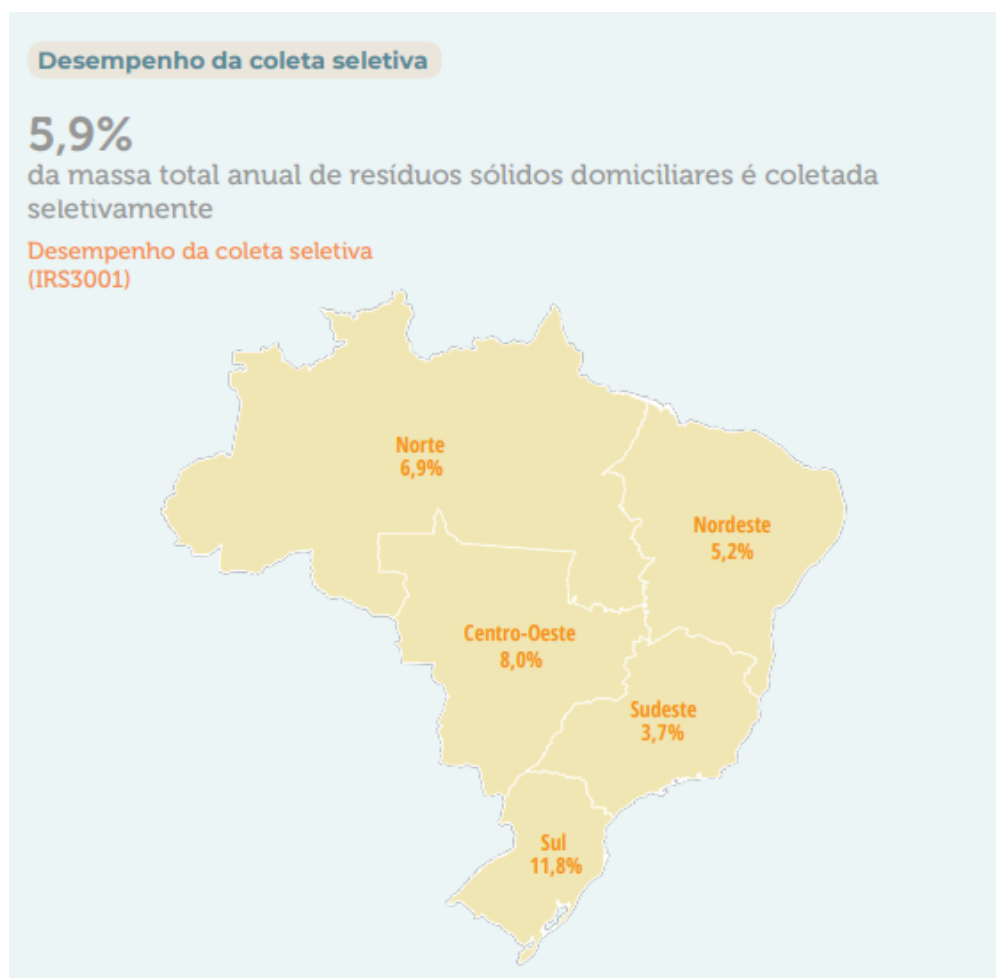
36,7%

da população urbana é coberta com coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares
cobertura da população urbana com coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares (IRS0006)

É fato que há um desafio significativo frente a coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU), visto que a taxa de – ou desempenho – da coleta seletiva é muito baixa segundo os dados da SINISA (2024), com o total de 5,9% de massa total coletada anualmente. Sendo possível observar diferenças regionais, com as regiões Nordeste e Sudeste apresentando o menor desempenho.

Em relação ao resíduo plástico, o estudo observa a composição gravimétrica do RSU nacional indica que, do total coletado, aproximadamente 15,3% é composto por plásticos (SINISA, 2024), o que reforça o desafio de desviar a maior parte desse material de alternativas menos desejáveis de destinação, como o aterro sanitário ou, sobretudo, o descarte irregular ou inadequado no ambiente.

Figura 3: Desempenho da coleta seletiva



Fonte: SINISA, 2024

Essa diferença significativa entre coleta e reciclagem — que coloca o Brasil em uma posição crítica no manejo de seus resíduos sólidos — significa que cerca de 10 milhões de toneladas de plástico coletado no país anualmente não retornam à cadeia produtiva como matéria-prima secundária, sendo a maioria destinada a aterros sanitários.

Em um olhar mais aprofundado sobre o setor, a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) reportou que o índice de reciclagem mecânica dos plásticos pós-consumo no Brasil atingiu 20,6% em 2023. Essa métrica foca especificamente na quantidade de resíduos sólidos gerados após o consumo que são recuperados e reprocessados, sendo um indicador da eficiência da gestão dos resíduos urbanos, não da substituição de matéria-prima virgem na indústria. Juntamente com o índice de recuperação de 24,5%, sinaliza o esforço da indústria em realizar a gestão do resíduo plástico no Brasil.

Em termos de definição, o índice de recuperação é a quantidade coletada, mas não necessariamente reciclada, porém tem uma destinação final ambientalmente adequada, enquanto que o índice de reciclagem é o que foi efetivamente coletada e processada e transformada em novos produtos. A diferenciação entre estes índices é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 — Diferenciação dos índices para a gestão do resíduo plástico

| Indicador | Descrição | Valor percentual |
|--|--|-------------------------|
| Índice de Reciclagem de Plástico no Brasil (Banco Mundial) | Porcentagem de todo o plástico produzido e importado no país que é devidamente reciclado, ou seja, reprocessado para substituir a matéria-prima virgem. É a métrica mais usada para comparar com o índice mundial. | 1,28% |
| Índice de Reciclagem Mecânica de Plásticos Pós-Consumo (ABIPLAST) | Foca especificamente na quantidade de resíduos sólidos gerados após o consumo que são recuperados, processados e transformados em novos produtos. É um indicador da eficiência da gestão dos resíduos urbanos, não da substituição da matéria-prima virgem na indústria. | 20,6% |
| Índice de Recuperação de Resíduo Plástico (ABIPLAST) | Quantidade de resíduo plástico coletada que tem uma destinação final ambientalmente adequada, mas que não foi necessariamente reciclada (pode incluir destinação para coprocessamento ou aterros sanitários, por exemplo). | 24,5% |

Fonte: Autoria própria.

A comparação entre os indicadores evidencia que o Brasil ainda enfrenta um grande descompasso entre a coleta, o processamento e a reciclagem efetiva dos resíduos plásticos. Embora o país apresente um índice de 20,6% de reciclagem mecânica pós-consumo, apenas 1,28% do plástico produzido retorna à cadeia produtiva como matéria-prima secundária, mostrando que boa parte do material coletado não completa o ciclo da circularidade.

Essa diferença ocorre porque o Índice de Reciclagem Mecânica, — 20,6% — mede apenas a conversão em resina reciclada, enquanto o Índice de Processamento para Produto Secundário — 1,28% — inclui qualquer tipo de transformação útil, mesmo que não resulte na substituição de matéria-prima virgem. Assim, o índice de processamento reflete o desvio de resíduos dos aterros, mas não necessariamente um ganho real de circularidade.

Diante de uma coleta seletiva que alcança apenas 5,9% da massa coletada, reforça-se que o principal obstáculo do país não é apenas reciclar pouco, mas reciclar pouco do que é processado e processar pouco do que é coletado. O avanço da circularidade no Brasil depende, portanto, da ampliação da coleta seletiva, da melhoria na qualidade dos materiais recuperados e da integração entre tecnologias de reciclagem e políticas públicas.

Nesse contexto, a redução do consumo de plásticos, especialmente dos itens de uso único, torna-se a estratégia mais eficaz para mitigar a pressão sobre o sistema de manejo de resíduos (ONU Meio Ambiente, 2018). Medidas como redesign de embalagens, adoção de modelos reutilizáveis e aplicação de instrumentos econômicos alinhados à Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) permitem diminuir a geração na fonte e aumentar a eficiência da cadeia de recuperação (ABRELPE, 2023). Tais ações, associadas à ampliação e qualificação da coleta seletiva, favorecem a transição para modelos de produção e consumo mais circulares, reduzindo a dependência de matéria-prima virgem.

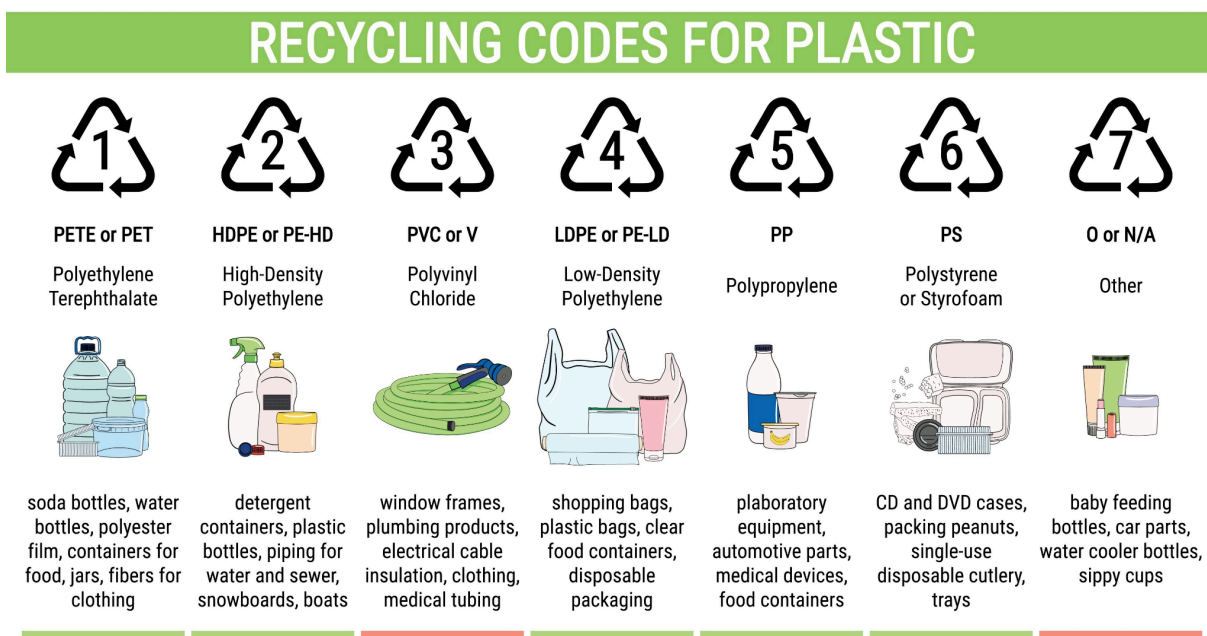
Além disso, o manejo inadequado dos resíduos plásticos intensifica impactos ambientais, como a acumulação de microplásticos em solos, corpos hídricos e biota, comprometendo serviços ecossistêmicos e representando potenciais riscos à saúde humana (Rochman et al., 2019). Para enfrentar esses efeitos, recomenda-se a integração entre tecnologias de reciclagem mecânica e química, investimentos em infraestrutura de triagem e políticas públicas consistentes, incluindo educação ambiental e expansão da logística reversa (WWF, 2019; Banco Mundial, 2018). Assim, a mitigação efetiva depende de uma abordagem sistêmica que articule redução, reutilização, reciclagem e prevenção da poluição.

2.2. CICLO DE VIDA DO PLÁSTICO

Segundo a WWF (2019), os plásticos englobam uma ampla variedade de materiais derivados principalmente do petróleo e do gás natural, obtidos por processos como polimerização e policondensação, com aditivos que conferem propriedades específicas. A combinação de baixo custo, versatilidade e durabilidade impulsionou sua expansão global, embora apenas alguns polímeros — como PET (Politereftalato de etileno), PEAD (Polietileno de alta densidade), PVC (Policloreto de vinila), PEBD (Polietileno de baixa densidade), PP (Polipropeno), PE (Polieteno) e

PS (Poliestireno) — tenham concentrado mais de 80% da produção mundial entre 1950 e 2015 (WWF, 2019).

Figura 4: Códigos de identificação de embalagens de plástico

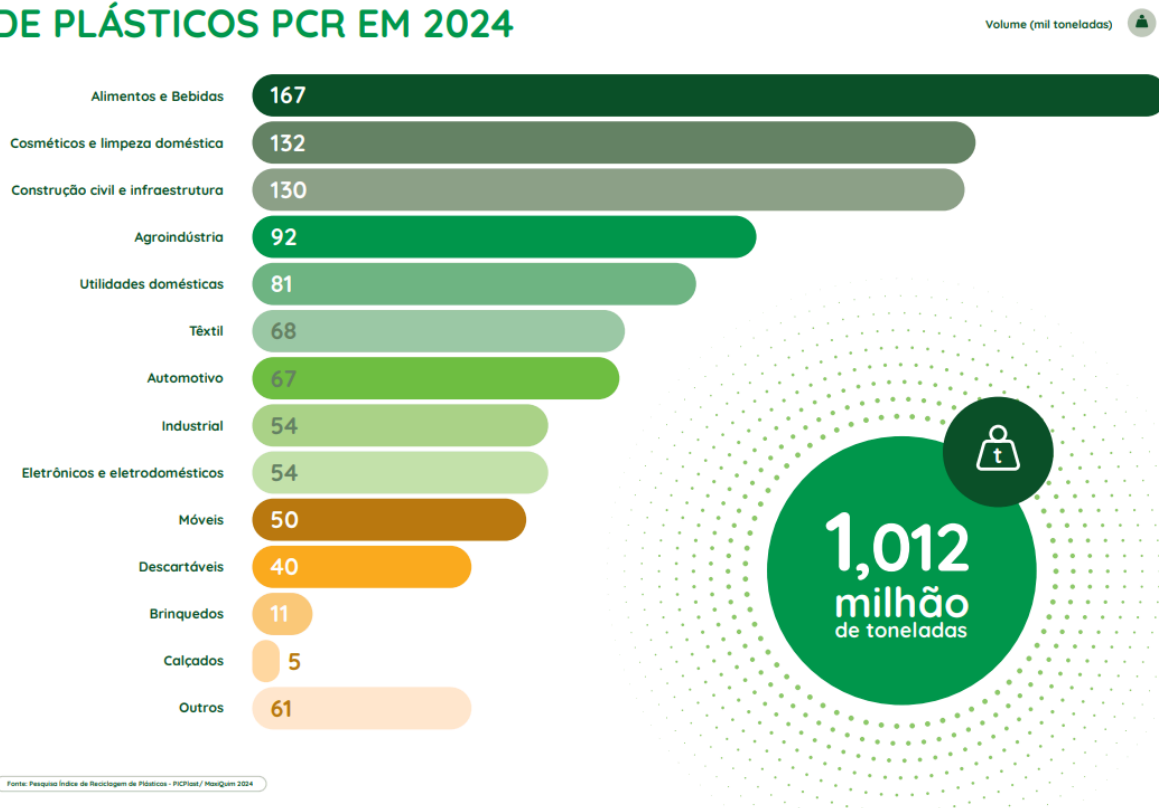


Fonte: THE ECO HUB.

O ciclo de vida do plástico consiste em etapas que vão da extração de combustíveis fósseis à síntese dos polímeros, transformação em produtos, uso e destinação final. As embalagens representam cerca de um terço do consumo global e, por sua curta vida útil, contribuem significativamente para o aumento dos resíduos e das emissões associadas ao setor (Global Plastics Outlook, 2022). A produção mundial cresceu de 2 milhões de toneladas em 1950 para mais de 450 milhões atualmente, refletindo o amplo uso do material em setores como alimentos, construção e bens de consumo (Our World in Data, 2023). Neste contexto global, a adoção e uso dos polímeros PCR (Pós-Consumo Reciclados) no Brasil são ilustrados na Figura 5.

Figura 5: Setores-destino das embalagens recicladas no Brasil

SEGMENTOS DE DESTINO DAS VENDAS DE PLÁSTICOS PCR EM 2024



Fonte: ABIPLAST (2025)

Apesar da ampla utilização, a maior parte do plástico produzido permanece em circulação por pouco tempo e rapidamente se converte em resíduo, assim como foi trazido no item 2.1. As baixas taxas de reciclagem devem-se a desafios como heterogeneidade dos materiais, contaminação e limitações tecnológicas, o que reforça a necessidade de uma nova abordagem, com estratégias de mitigação baseadas em redução do consumo, redesign de produtos e melhoria nos sistemas de recuperação de materiais.

Além da opção de reciclagem, os últimos anos de estudo voltados à sustentabilidade trouxeram a inovação do plástico verde. O polietileno, plástico mais utilizado globalmente em diversos setores, é tradicionalmente produzido a partir de combustíveis fósseis, o que contraria princípios de sustentabilidade. Nesse contexto, surge o Polietileno Verde, obtido do etanol de cana-de-açúcar, uma fonte renovável que mantém as mesmas propriedades e aplicações do polietileno convencional. Lançado ao mercado em 2007 e certificado por instituições internacionais, o material

se destaca por apresentar balanço ambiental positivo, removendo até 2,5 toneladas de CO₂ da atmosfera por tonelada produzida. Apesar dos benefícios, seu desenvolvimento pode gerar competição por matéria-prima com os setores de alimentos e energia, além de não ser biodegradável. (ZAMBANINI et al, 2014 e BRASKEM, 2012).

Dando sequência, é importante considerar o papel das embalagens no ciclo de vida dos produtos, já que elas não apenas protegem e identificam o conteúdo, mas também exercem forte apelo mercadológico ao influenciar a percepção e a decisão de compra do consumidor. Por isso, o planejamento cuidadoso de seu design e de sua estética torna-se estratégico. Conforme Miguel Anjos (2014), as embalagens apresentam diferentes níveis de complexidade: a primária, que entra em contato direto com o produto; a secundária, que protege a embalagem primária; a terciária, que agrupa várias unidades para transporte; a quaternária, projetada para facilitar a movimentação e o armazenamento; e a quinquenária, usada em operações de longa distância, como sistemas containerizados. Esses níveis evidenciam a importância da escolha adequada dos materiais — incluindo alternativas como o polietileno verde — para atender às demandas funcionais, logísticas e ambientais ao longo da cadeia produtiva (REIS, 2014).

Considerando esses fatores, Montesanti e Carelli (2021) ressaltam que grande parte das embalagens plásticas ainda não recebe uma destinação ambientalmente adequada. Entre as formas de descarte disponíveis — aterros sanitários, incineração e reciclagem — o envio para aterros permanece como a principal rota global, representando cerca de 28% de todo o plástico descartado (WWF, 2019). Contudo, devido à baixa degradabilidade dos polímeros e ao crescimento contínuo do consumo, a capacidade desses aterros tem se tornado insuficiente, agravando a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos. Como consequência, observa-se a expansão de lixões a céu aberto, que em 2019 foram responsáveis por receber aproximadamente 14% de todo o plástico gerado, evidenciando um desafio significativo para a gestão sustentável desses materiais (WWF, 2019).

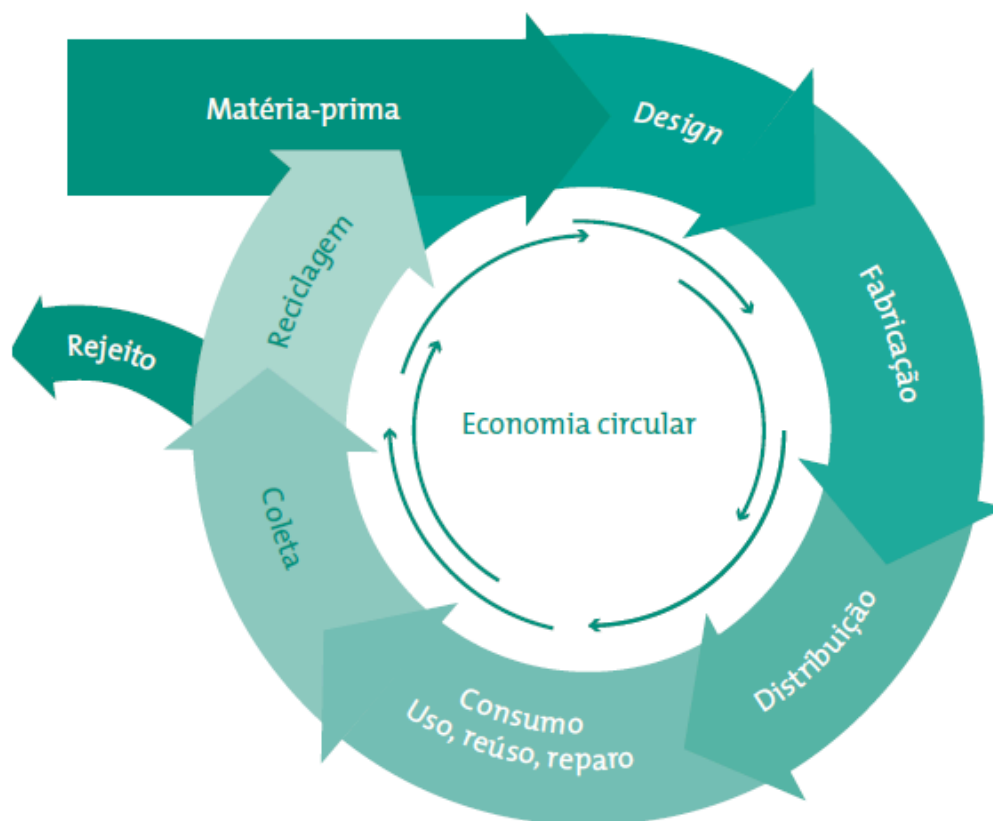
Nesse contexto, torna-se essencial considerar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta para compreender os impactos ambientais associados às

embalagens plásticas e aos materiais alternativos, como o polietileno verde. A ACV analisa todas as etapas do ciclo de vida de um produto — da extração de matérias-primas ao descarte final — permitindo identificar pontos críticos de consumo energético, emissões e geração de resíduos. Segundo a Plastic Brasil (2023), essa abordagem evita conclusões simplistas e fornece bases técnicas para escolhas mais sustentáveis, como o redesign de embalagens, a seleção de matérias-primas de menor impacto e o aprimoramento dos sistemas de reciclagem e logística reversa. Ainda assim, desafios como a disponibilidade limitada de dados nacionais e a complexidade metodológica tornam necessária a realização de estudos completos e bem fundamentados, de modo a orientar decisões ambientais alinhadas à realidade brasileira.

2.3. UMA NOVA ABORDAGEM PARA A PRODUÇÃO E CONSUMO

Reconhecendo a importância de repensar os padrões de produção e consumo dos resíduos plásticos, é fundamental que as novas práticas estejam alinhadas aos princípios da Economia Circular. Nesse contexto, compreender o ciclo de vida do plástico — desde a sua fabricação até o descarte — torna-se essencial, pois evidencia a necessidade de cuidado em cada etapa, com a adoção de estratégias sustentáveis e economicamente viáveis.

Dito isso, na busca por uma gestão mais sustentável, a Economia Circular desempenha um papel fundamental. Esse conceito propõe um novo modelo econômico baseado na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais, visando minimizar o desperdício e promover a utilização sustentável dos recursos. Na gestão de resíduos sólidos, a Economia Circular é uma abordagem essencial para o alcance da sustentabilidade (MARCHI, 2019).

Figura 6: Esquema da Economia Circular

Fonte: SILVA E CAPANEMA, 2019.

A Economia Circular surge como um modelo produtivo e de consumo sobretudo distinto do tradicional modelo linear, buscando a otimização e o uso prolongado de recursos, materiais e produtos em ciclos fechados. Este conceito, ilustrado pelas etapas de Matéria-prima, Design, Fabricação, Distribuição, Consumo, Coleta e Reciclagem, é conduzido pelo princípio de manter os recursos em uso pelo maior tempo possível, recuperando e regenerando-os ao final de cada ciclo, minimizando drasticamente a geração de rejeitos.

O ciclo inicia-se com a seleção de matérias-primas, em que a prioridade recai sobre recursos renováveis, reciclados ou de baixo impacto ambiental. Segue-se a etapa de Design, considerada o ponto nodal do modelo, pois o produto deve ser concebido para ser durável, reparável, reutilizável e, por fim, facilmente desmontável e reciclável.

Na Fabricação, busca-se a eficiência no uso de energia e água, com a consequente redução de resíduos. A Distribuição assume um papel estratégico, sendo complementada pela logística reversa, essencial para o retorno dos produtos ao sistema. Durante o Consumo, o foco é a extensão da vida útil através do reuso, do reparo e da manutenção. Uma vez que o produto atinja o fim de sua função original, a Coleta eficiente garante que os materiais sejam reintroduzidos no sistema através da Reciclagem.

A Reciclagem transforma os resíduos em novas matérias-primas, realimentando o início do ciclo produtivo e fechando o *loop* de materiais. O objetivo final é reduzir ao mínimo o volume de Rejeito destinado a aterros, caminhando em direção a um sistema de desperdício zero.

Referência central para a consolidação deste conceito é a *Ellen MacArthur Foundation*, que dissemina vasta literatura e estudos de caso sobre a transição para este modelo. A relevância política e econômica da Economia Circular é sublinhada por iniciativas como os Planos de Ação da Comissão Europeia, que a estabelecem como um pilar da sustentabilidade e da competitividade no século XXI. Em essência, a Economia Circular não é apenas uma estratégia de gestão de resíduos, mas um paradigma sistêmico que visa dissociar o crescimento econômico do consumo de recursos finitos.

2.4. TRATAMENTO DO RESÍDUO PLÁSTICO – RECICLAGEM

A reciclagem de materiais poliméricos constitui uma das principais estratégias para redução do impacto ambiental associado ao consumo crescente de plásticos. Entre as rotas existentes, destacam-se a reciclagem mecânica e a reciclagem química, que apresentam princípios, aplicações e limitações distintas. A escolha pela tecnologia mais adequada depende da natureza do polímero, do nível de contaminação e das propriedades esperadas no produto final.

2.4.1. RECICLAGEM MECÂNICA

A reciclagem mecânica é um processo que envolve uma série de transformações físicas para converter resíduos plásticos em um material com

formato adequado para uma nova manufatura, seja no mesmo produto ou em um diferente (ZANIN e MANCINI, 2015).

É crucial notar que a reciclagem mecânica é aplicável exclusivamente aos polímeros termoplásticos. Polímeros termofixos, por sua vez, são destinados a outros métodos, como a reciclagem química. A diferença entre essas duas categorias de polímeros será apresentada na próxima seção. As etapas detalhadas do processo de reciclagem mecânica serão abordadas na Seção 2.4.1.2.

2.4.1.1. Termoplásticos e Termofixos

A viabilidade da reciclagem mecânica dá-se pela estrutura do polímero. Os polímeros termoplásticos possuem cadeias lineares ou ramificadas mantidas por forças intermoleculares fracas, o que lhes confere reversibilidade térmica: podem ser fundidos, moldados e resfriados repetidas vezes, permitindo sua reciclagem mecânica (CANEVAROLO, 2006). Exemplos Comuns: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Polietileno Tereftalato (PET), Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Poliestireno (PS).

Em contraste, os polímeros termofixos apresentam extensivas ligações cruzadas (*crosslinking*), formando redes tridimensionais rígidas. Uma vez curados, não podem ser fundidos novamente, impossibilitando sua reciclagem por vias mecânicas tradicionais (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). São exemplos as resinas epóxi, fenólicas e poliuretanas rígidas.

2.4.1.2. Etapas da Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica industrial segue, de forma geral, as etapas descritas abaixo, segundo ZANIN e MANCINI (2015):

I. Separação:

A separação por tipo de plástico é crucial (vide Figura 4). Os agentes de separação são o próprio consumidor – através do descarte seletivo – e os profissionais, catadores e funcionários dos centros de triagem. Alguns critérios são impostos, como cor, para se obter um reciclado mais homogêneo. As indústrias normalmente compram o resíduo plástico pós-consumo de sucateiros e/ou

cooperativas. O plástico é adquirido em fardos prensados (exemplo: 250 litros com aproximadamente 50kg) devido à sua baixa densidade. Esses fardos são levados ao início do processo de reciclagem, onde normalmente há uma esteira mecânica com funcionários posicionados para a catação.

II. Moagem:

Na Moagem, acontece a redução de tamanho, em que os resíduos plásticos selecionados são transformados em flocos de tamanho uniforme (mais ou menos 1 cm) para eliminar dobras e impurezas. O equipamento utilizado mais comumente é o moinho de facas, com facas fixas e móveis, além de uma tela metálica que funciona como peneira. A moagem é essencial para o processo, porém representa um alto custo energético e operacional devido à paradas constantes para troca e afiação das facas.

III. Limpeza:

A limpeza – ou lavagem – é responsável por remover areia, terra, papéis e matéria orgânica dos flocos. Em resíduos urbanos, são usadas a agitação e agentes químicos (como a soda cáustica) em grandes tanques.

O processo funciona também como separador por densidade na água: plástico mais denso (ex: PET) afunda, enquanto o menos denso (ex: tampas/rótulos) flutua (flotantes), permitindo a coleta separada.

O uso de agentes químicos melhora a limpeza, mas exige cuidado com a corrosão e com o tratamento dos efluentes líquidos gerados. Soluções com diferentes densidades podem ser usadas para separações mais finas entre tipos de plástico.

IV. Secagem

A secagem é fundamental para remover a água da superfície e, principalmente, a umidade absorvida internamente por polímeros higroscópicos como PET, nylon e policarbonato.

No caso do PET, são utilizados secadores ou estufas com ar quente e seco ou vácuo em temperatura de 100°C a 150°C por longos períodos, portanto com um alto custo energético.

Para a maioria dos outros plásticos (PE, PP, PS, PVC), a secagem não é tão crítica, mas é necessária para prevenir corrosão dos equipamentos e bolhas no produto final, usando-se temperaturas mais baixas, como na centrifugação seguida da estufagem com temperaturas entre 40°C e 45°C.

O transporte do material seco ocorre em corrente de ar seco para evitar a rápida absorção de umidade do ar ambiente, que anularia a eficiência da etapa.

V. Extrusão:

A extrusão é a técnica principal na reciclagem, operando como um sistema contínuo onde os flocos plásticos são alimentados em um cilindro aquecido com uma rosca giratória. A fusão do material ocorre majoritariamente pelo intenso atrito (cisalhamento) gerado pela rosca. Este processo tem duas funções essenciais: a primeira é a granulação, onde o plástico fundido é forçado através de uma matriz, resfriado em fios e cortado em *pellets*. Esta padronização (grânulos) é crucial, pois aumenta a produtividade no reprocessamento e facilita a mistura com resinas virgens. A segunda função é a fabricação direta de produtos como tubos, perfis, chapas e fibras. Extrusoras avançadas incluem zonas de degasagem, para remover gases voláteis, garantindo a qualidade e integridade das propriedades do produto final reciclado.

Apesar de amplamente difundida, a reciclagem mecânica apresenta limitações relacionadas à degradação térmica e mecânica após cada ciclo e ao restrito grupo de polímeros aptos para suportar essa reprocessabilidade (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009).

Figura 7: Fluxo da reciclagem dos materiais plásticos



Fonte: ABIPLAST, 2022 – Adaptado de LIMA, Danilo de (2024).

2.4.2. RECICLAGEM QUÍMICA

A reciclagem química, também chamada de reciclagem avançada ou molecular, promove a quebra das cadeias poliméricas em monômeros ou frações químicas menores por processos térmicos, catalíticos ou solvolíticos. Essa rota permite a produção de materiais com propriedades semelhantes ou até idênticas às de polímeros virgens, além de emitir menos gases de efeito estufa do que a recuperação energética (IEA, 2020).

Ao transformar os resíduos em moléculas básicas, a reciclagem química supera limitações típicas da rota mecânica, como contaminação, mistura de materiais e degradação de propriedades.

Conforme discutido por Duailibe (2021), diferentes tecnologias podem ser aplicadas dependendo da composição da carga polimérica e do objetivo do processo:

- Pirólise: degradação térmica na ausência de oxigênio, produzindo óleos, gases e resíduos carbonosos.
- Gaseificação: conversão em gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$) sob altas temperaturas e atmosfera controlada.
- Hidrocraqueamento: quebra de cadeias na presença de hidrogênio e catalisadores, gerando hidrocarbonetos de maior pureza.
- Solvólise (glicólise, hidrólise, metanólise): processos específicos para polímeros condensados, como PET, resultando em monômeros de alto grau de pureza.

Cada método possui condições operacionais e produtos específicos, além de variações em eficiência energética e impacto ambiental. Um quadro comparativo é apresentado na Figura 8, em que são apresentadas as condições de operação para cada tecnologia.

Tendo sido apresentadas as principais rotas de reciclagem química, a seção seguinte aprofunda a discussão sobre a pirólise, que constitui o objeto específico deste estudo.

Figura 8: Características dos principais processos de reciclagem química

| | | Pirólise térmica | Pirólise catalítica | Gaseificação | Hidrocrackeamento | Solvólise | Polimerização in situ |
|------------------------------|---------------------|--|---|--|---|---|---|
| Objetivo do processo | | Maximizar a decomposição térmica de resíduos sólidos em gases e condensados. | Maximizar a decomposição por adição de catalisador fornecendo produtos de melhor qualidade | Maximizar a conversão de resíduos a gases combustíveis de elevado poder calorífico, principalmente H ₂ , CO e CH ₄ . | Maximizar a decomposição por adição de hidrogênio fornecendo produtos livres de heteroátomos | Recuperação do solvente por adição do monômero | Incorporação do polímero na reação de polimerização com o intuito de reciclar este material, mantendo as propriedades próximas àquelas de um polímero virgem, e assim, agregar valor ao material reciclado. |
| Condições de Operação | Gás reagente | Nenhum | Catalisador | Ar, oxigênio puro, água supercrítica, CO ₂ ou vapor. | H ₂ (pode usar catalisador) | Nenhum (solventes utilizados: metanol supercrítico, etileno glicol) | Mesmo da reação de polimerização utilizada |
| | Temperatura | 400 a 800 °C | 350 a 470°C | Entre 550 e 900 °C (utilizando ar) e 1000 e 1600 °C | 400 a 450°C | 200 – 350 °C (pode ocorrer a 450°C: glicólise supercrítica) | Mesma da reação de polimerização original |
| | Pressão | Levemente pressurizada | Geralmente atmosférica | Geralmente atmosférica ou levemente pressurizada | ~100 bar ou maiores (300-400 bar) | 30 a 150 bar | Mesma da reação de polimerização original |
| Produtos | Gás | CO, H ₂ , CH ₂ e outros hidrocarbonetos ¹ | CO, H ₂ , CH ₂ e outros hidrocarbonetos ¹ | Gás de síntese (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CH ₄) | Gás leve fora de especificação | Nenhum | Depende da carga incorporada no polímero |
| | Líquidos | Olefinas pesadas, graxas | Olefinas leves (C3-C5) ou destilados intermediários (gasóleo e gasolina), dependendo da força ácida do catalisador* | Nenhum | Óleo cru sintético livre de cloro, contendo nafta, gasóleo e destilados pesados | BHET, terephthalate disodic, dimetil terephthalate and ethylene glycol | Depende da carga incorporada no polímero |
| | Poluentes | H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, alcatrão, particulados. | H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, alcatrão, particulados. | H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, COS, alcatrão, alcalinos, particulados | HCl | A depender do processo de solvólise utilizado | Depende da carga incorporada no polímero (ex: pó inorgânico) |
| | Sólidos | Às vezes possui quantidade desprezível de carvão. As cinzas são tratadas e dispostas como resíduo industrial especial. | Coque e cinzas, que são tratadas e dispostas como resíduo industrial especial | As cinzas de fundo são geralmente produzidas pela escória vitrificada, que pode ser utilizada como material para construção de rodovias. | Resíduo sólido hidrogenado contendo cinzas, metais e sais inertes. Pode ser misturado com carvão para produção de coque | A caracterização dos resíduos sólidos vai depender do tipo d processo de solvólise aplicado | Depende da carga incorporada no polímero |
| Limpeza do gás | | Pode-se limpar o gás produzido para atender a padrões de processos químicos. | Pode-se limpar o gás produzido para atender a padrões de processos químicos. | Pode-se limpar o gás de síntese produzido para atender a padrões de processos químicos. | Gás fora de especificação é enviado à limpeza para remoção de H ₂ S e amônia | NI | NI |
| Ativo | | 272 libras/ton ** (processo BP) | 160 euro/ton (planta BASF de capacidade de 300.000 ton/ano) | 90 a 135 euro/ton ** (processo Texaco) | 250 euro/ton ** (processo da Veba Ól, excluindo coleta e pré-tratamento do resíduo) | 225 dólares/ton ** (processo Fuji) | NI |

¹ a degradação catalítica fornece maiores quantidades de gás (cerca de 50%) e de gasolina (cerca de 15%), menores quantidades de gasóleo e de coque (cerca de 10%) do que a degradação térmica, que leva à maior produção de líquidos pesados e menor produção de produtos gasosos e de coque.

NI: Não informado

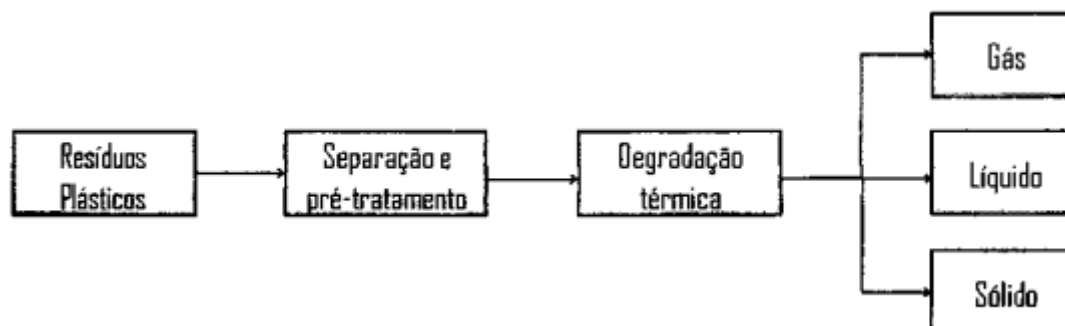
2.5. PIRÓLISE

2.5.1. Escolha do processo

A pirólise é defendida por vários especialistas, e Qureshi et al (2020), no *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* destacam que esta é uma tecnologia crucial para enfrentar o crescente desperdício de plástico, oferecendo uma solução para as baixas taxas de reciclagem atuais. O principal argumento a seu favor é a capacidade de aumentar significativamente o índice de reciclagem, pois, diferente da reciclagem mecânica, a pirólise consegue utilizar misturas de resíduos plásticos. Além disso, ela se mostra eficaz no tratamento de materiais complexos ou novos, como os compósitos, em um estágio inicial de mercado onde a coleta e separação tradicionais não seriam eficientemente custosas. Ou seja, a pirólise representa uma alternativa ambientalmente correta à incineração e ao aterro sanitário, contribuindo para uma gestão de resíduos mais sustentável.

2.6.2 Esquema do processo

A pirólise apresenta uma reação endotérmica, com decomposição térmica na ausência de oxigênio e, no caso dos polímeros, obtém-se como produto principalmente óleos e gases (SPINACÉ, 2004). Assim como comentado anteriormente, o calor degrada o plástico, transformando-o em um produto predominantemente líquido, que compete com a nafta pela possibilidade de grandes quantidades de etileno, propileno e butileno poderem ser obtidas (ZANIN e MANCINI, 2015). O processo, tipicamente realizado em atmosfera inerte ou a vácuo, com temperaturas elevadas (400°C a 800°C), promovendo a degradação térmica do polímero, tem como resultado produtos predominantemente líquidos — comparável à nafta — de alto valor comercial (ZANIN e MANCINI, 2015). O fluxograma simplificado do processo é apresentado na Figura 9.

Figura 9: Esquema geral do processamento de pirólise de resíduos plásticos

Fonte: DUAILIBE, 2018

Embora exija manejo cuidadoso do PET, que pode gerar Ácido Tereftálico (TPA) (Figura 9) e obstruir sistemas de limpeza de cloro, o processo, incluindo variantes como a extrusão degradativa, se consolida como uma via promissora para fechar o ciclo do plástico (ZANIN e MANCINI, 2015). Os produtos comumente obtidos do processo de pirólise de polímeros são apresentados na Figura 10.

Figura 10: Principais produtos da pirólise de alguns materiais plásticos

| Polímero | Produtos a baixas temperaturas (< 600 °C) | Produtos a altas temperaturas (> 600 °C) |
|-------------------------------------|--|---|
| PE (polietileno) | Graxas, parafinas e α -olefinas | Gases e óleos leves |
| PP (polipropileno) | Vaselina e olefinas | Gases e óleos leves |
| PVC (poli(cloroeto de vinila)) | HCl (<300°C), benzeno | Tolueno (>300°C) |
| PS (poliestireno) | Estireno e seus oligômeros | Estireno e seus oligômeros |
| PMMA (Poli(metracrilato de metila)) | MMA (metacrilato de metila) | Menores quantidade de MMA e mais produtos secundários |
| PTFE (poli(tetrafluoretileno)) | TFE (tetrafluoretileno) | TFE (tetrafluoretileno) |
| PET (poli(tereftalato de etileno)) | Ácido benzoico, ácido tereftálico e etileno glicol | Ácido benzoico, ácido tereftálico e etileno glicol |

Fonte: DUAILIBE (2018). Adaptado de Buekens, 2006.

Além disso, os plásticos têm altas frações mássicas de matéria volátil e pequena quantidade de cinzas, favorecendo a produção de uma grande variedade de óleos (FIORELLI, 2020 e SHARUDDIN et al., 2016). Esses itens têm o potencial de servir a vários setores da indústria química, transformando completamente a percepção sobre o resíduo plástico. Em vez de vê-lo meramente como um

subproduto a ser descartado, a indústria passaria a considerá-lo uma valiosa matéria-prima.

Segundo Fiorelli (2020), as pesquisas indicam que o resíduo sólido gerado na pirólise tem aplicações potenciais significativas em diversas áreas. Sharuddin et al. (2016) destacam que, primeiramente, o material pode ser empregado como combustível em misturas com carvão, uma vez que apresenta um notável poder calorífico de 18,84 MJ/kg e um desejável baixo teor de enxofre. Além de sua aplicação energética, o resíduo sólido também pode ser aproveitado em processos de tratamento de água, atuando como adsorvente de metais pesados devido à sua característica de porosidade. Por fim, sua composição o torna uma matéria-prima viável para a produção de carvão ativado.

2.6. LEGISLAÇÃO

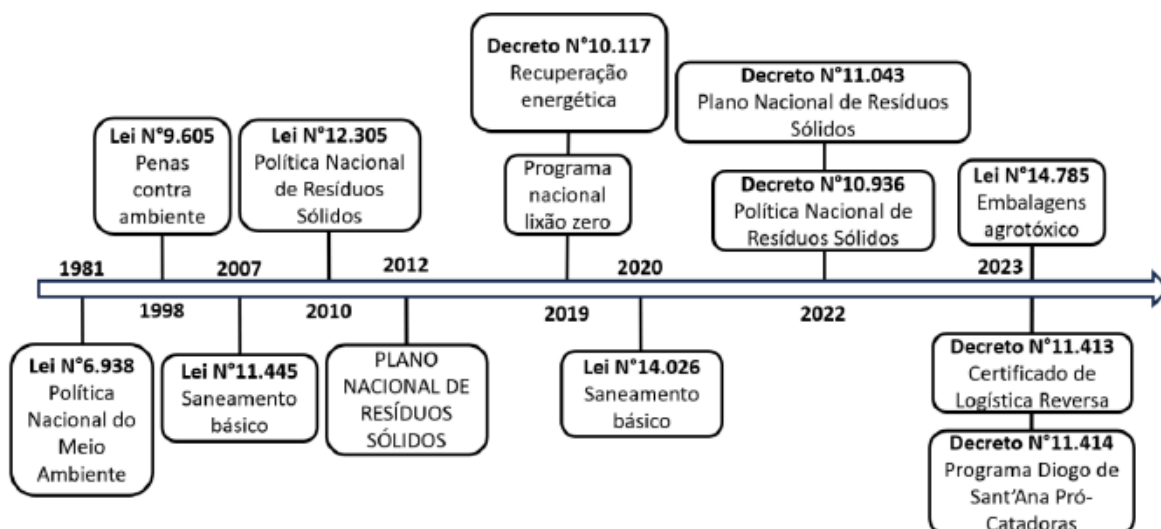
2.6.1. Legislação no Brasil

Segundo o Art. 225. de 1988: Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Desde a década de 1990, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) já vinha estabelecendo diretrizes para a destinação adequada de resíduos e implementando resoluções sobre logística reversa, como nas cadeias de pneus, pilhas e baterias (BRASIL, 2010).

Dando continuidade à discussão sobre o conjunto de normas que orientam a gestão dos resíduos no Brasil, destaca-se também a Resolução Conama nº 404/2008, que regulamenta o licenciamento ambiental de aterros sanitários. Conforme aponta Ogeda (2023), essa resolução define critérios técnicos e ambientais para a implantação, operação e monitoramento desses locais, com o objetivo de reduzir os impactos negativos ao meio ambiente e garantir a disposição final adequada dos resíduos sólidos. A Figura 11 apresenta os principais marcos na legislação brasileira.

Figura 11: Linha cronológica da legislação brasileira



Fonte: LIMA, Danilo de (2024)

No dia 2 de agosto de 2010, foi criada a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta trouxe ao país uma série de inovações para a gestão e o gerenciamento desse tipo de resíduo; a lei foi resultado de um longo processo de debates no Congresso Nacional, que se estendeu por mais de 20 anos. Arantes e Pereira (2021) apontam que dentre os princípios da PNRS, é importante destacar o reconhecimento do resíduo sólido passível de reutilização e reciclagem, configurando-se como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. Além disso, este reconhecimento está alinhado com o objetivo e instrumento de incentivo ao desenvolvimento da indústria da reciclagem e cooperativas de resíduos reutilizáveis e recicláveis.

Ainda segundo Arantes e Pereira (2021), quanto ao objetivo, a Hierarquia de Resíduos Sólidos orienta-se na seguinte ordem para a gestão dos resíduos sólidos:

- I) não geração;
- II) redução;
- III) reutilização;
- IV) reciclagem;
- V) tratamento dos resíduos sólidos; e
- VI) disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Ou seja, o presente objetivo visa contemplar a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, redução da geração de resíduos sólidos, incentivo à indústria da reciclagem e a disposição final ambiental correta de resíduos sólidos.

Porém, no Brasil, essa ainda é uma questão marcada por grandes desigualdades em comparação aos países considerados desenvolvidos. Nesses locais, a coleta de materiais recicláveis é amplamente consolidada e eficiente, enquanto, no contexto brasileiro, a coleta seletiva ainda é inexistente ou limitada em muitas cidades.

Segundo dados de 2019, em relação à disposição final dos resíduos coletados e seu tratamento, foram dispostos 59,1% do que foi coletado em aterros sanitários. O restante (40,9%) teve destinação inadequada. Isso corresponde a mais de 29 milhões de toneladas de resíduos depositadas em lixões ou aterros controlados em 3.352 dos 5.570 municípios do país, o que representa risco à saúde da população e ao meio ambiente (SILVA E CAPANEMA, 2019).

Uma dificuldade para implantação da PNRS é o alto custo do processo de operação, que envolve a coleta, o tratamento e a disposição dos resíduos, aliado à falta de receita destinada ao setor. A maioria dos municípios no país não pratica cobrança de taxa ou tarifa para custear os serviços. Dessa forma, o problema começa com a falta de viabilidade financeira para gestão de resíduos sólidos, o que, por consequência, reflete-se na proliferação de lixões pelo país. Ressalte-se que a legislação já prevê essa cobrança, mas as prefeituras, muitas vezes, preferem não implantá-la por questões políticas (THATY, 2017b).

Segundo dados da Abrema (2023), 74% dos municípios brasileiros possuem o processo de coleta seletiva, mas 1.425 cidades (uma em cada quatro) ainda não a possuem. No entanto, Padin (2022) ressalta que, a maioria desses municípios com o serviço presente tem o processo limitado e incipiente, não abrangendo a totalidade do território. Além do mais, a coleta seletiva porta a porta atinge, em média por município, apenas 14,7% dos habitantes da população urbana, o que contribui para que o índice de reciclagem de resíduos sólidos urbanos – incluindo outros materiais além do plástico – no Brasil seja extremamente baixo, estimado entre 3% e 4%. Esse cenário de baixa oferta do serviço e falhas estruturais revela que o país ainda

está em fase inicial de implementação da coleta seletiva porta a porta e distante da universalização do manejo adequado de resíduos.

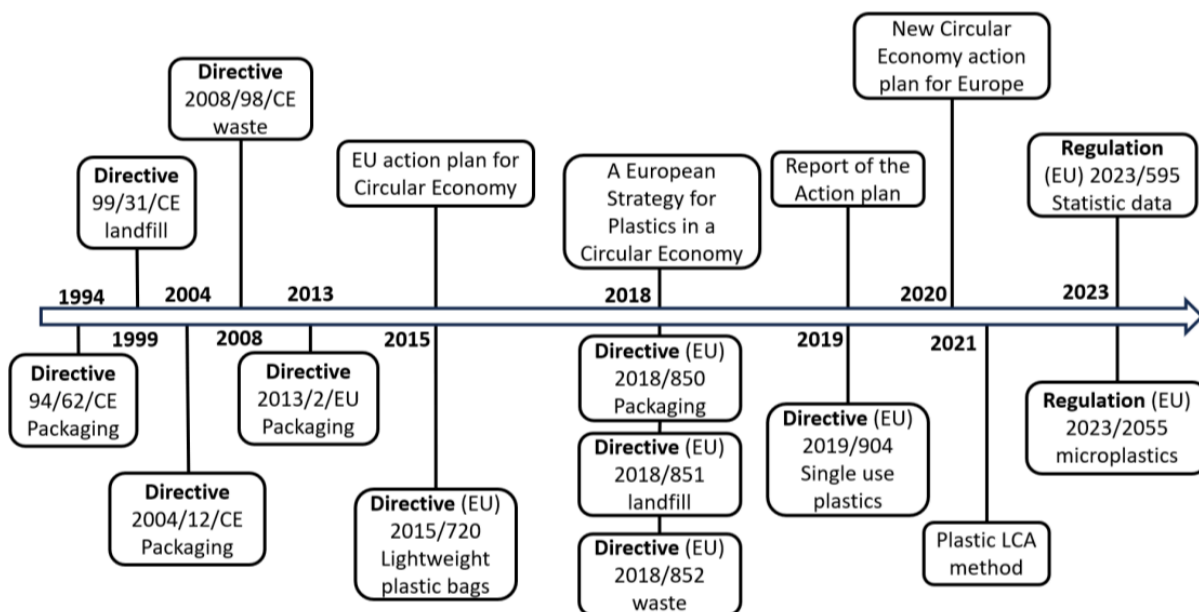
2.6.2. Legislação fora do Brasil

É fundamental comparar a legislação brasileira com a de outros países para compreender melhor o manejo de embalagens plásticas e as práticas de reciclagem. Conhecer diferentes modelos e soluções adotadas internacionalmente permite identificar oportunidades, gerar subsídios relevantes e aprimorar as políticas públicas e as estratégias de gestão de embalagens no Brasil.

Conforme destaca Ogeda (2023), citando Assis e Santos (2020), a União Europeia (UE) tem sido referência mundial em políticas de gestão de resíduos de embalagens e reciclagem. A sua Diretiva de Embalagens e Resíduos de Embalagens estabelece metas ambiciosas de reciclagem para os Estados-membros, além de medidas destinadas à redução da geração de resíduos e ao incentivo à reutilização. A UE também avançou ao proibir determinados plásticos de uso único, como talheres descartáveis, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais associados a esses materiais.

O Parlamento Europeu demonstrou uma visão precursora ao redefinir, já na década de 1990, o conceito de resíduo como um material com potencial de reaproveitamento econômico (LIMA, 2024). Essa abordagem a coloca em uma posição de vanguarda global, notavelmente quando se compara a cronologia de suas políticas (Figura 11) com a do Brasil, que começou com a PNRS nos anos 2010.

Figura 12: Linha cronológica da legislação europeia



Fonte: LIMA, Danilo de (2024).

Atualmente, novas metas e regras reforçam esse compromisso. De acordo com o Parlamento Europeu (2025), até 2030 os países da UE devem reduzir em 5% a quantidade de resíduos de embalagens per capita (tendo 2018 como base); essa redução deve alcançar 10% até 2035 e 15% até 2040. A partir de 1º de janeiro de 2030, determinados tipos de embalagens plásticas descartáveis serão proibidos. Além disso, até 2029, 90% dos recipientes descartáveis para bebidas, de plástico ou metal, com até 3 litros, deverão ser coletados separadamente. Em fevereiro de 2024, também foram aprovados critérios mais rigorosos para o envio de resíduos ao exterior, proibindo a exportação de resíduos plásticos para países que não integram a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

Lima (2024) traz que, embora os EUA tenham iniciado suas primeiras leis sobre resíduos sólidos nas décadas de 1960 e 1970, o foco nacional ainda tem sido a gestão geral de resíduos. Como consequência, o aterro (landfill) consolidou-se como principal destinação final, representando 79% do descarte de resíduos sólidos em 2020. E, ainda, o país tem se mostrado atrasado na aprovação de políticas nacionais se comparado a UE. Em resposta a esse cenário, a EPA estabeleceu a meta ambiciosa de elevar a taxa de reciclagem nacional para 50% até 2030 (LIMA, 2024).

O estudo de Lima (2024) oferece uma análise aprofundada no tema, mas o objetivo neste presente trabalho é compreender o panorama das Legislações do Brasil e o que seriam as principais referências de potências econômicas. Chega-se a seguinte conclusão sobre maturidade legislativa no Quadro 3:

Quadro 3 — Comparação de maturidade Legislativa em grandes potências econômicas

| Região | Maturidade Legislativa | Principal destinação (2020/2022) | Foco estratégico |
|-----------------------|---|---|---|
| União Europeia | Vanguarda (iniciada nos anos 90) | Reciclagem e recuperação energética | Economia Circular, proibições, ACV, fiscalização rigorosa |
| EUA | Em consolidação (leis desde os anos 60, foco recente) | Aterro (Landfill) | Metas 2030 (50% reciclagem/energia), inovação em reciclagem química |
| Brasil | Incipiente (Leis desde 2010) | Lixões inadequados ou aterros controlados | Erradicação de lixões (falhou), logística reversa, inclusão dos catadores |

Fonte: Autoria própria. Adaptado de LIMA, Danilo de (2024)

3. METODOLOGIA

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) adota uma abordagem de pesquisa qualitativa e exploratória, visando analisar criticamente os obstáculos tecnológicos e regulatórios que limitam a adoção de tecnologias emergentes de reciclagem, com foco na reciclagem química (pirólise) no Brasil. A metodologia empregada combina a revisão sistemática da literatura científica e técnica com a análise documental de políticas públicas e normas ambientais brasileiras.

O objetivo central é avaliar a viabilidade técnico-econômica, o desempenho ambiental e a compatibilidade da reciclagem química com a infraestrutura atual de gestão de resíduos no país. O estudo é baseado na análise de estudos já existentes sobre o processo de pirólise de plásticos.

3.1. ETAPAS METODOLÓGICAS

O desenvolvimento desta pesquisa está estruturado em três etapas principais, conforme delineado a seguir:

I. Revisão Sistemática da Literatura:

- Focada na identificação e análise de estudos científicos, artigos técnicos e relatórios de organizações internacionais e nacionais (como AMA, WWF, SINISA e OECD) que abordam a Economia Circular, a gestão de resíduos plásticos, e as tecnologias de reciclagem química, com enfoque no processo de Pirólise.
- Essa etapa buscou consolidar o conhecimento sobre as características dos principais processos de reciclagem química, especialmente a pirólise térmica e catalítica (temperatura entre 350 °C e 800 °C), suas vantagens (como a alta flexibilidade para processar misturas e contaminados, e a alta contribuição para a Economia Circular) e seus desafios (como a formação de coque e a desativação do catalisador).

II. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica:

- Nesta fase, foi realizada uma análise crítica de estudos de caso e dados consolidados por autores como Frias (2023) e Qureshi et al (2020). Essa análise visa avaliar a viabilidade econômica da pirólise, notadamente em diferentes escalas de capacidade operacional (como 100 kg/h, 1.000 kg/h, 10.000 kg/h e 100.000 kg/h), considerando custos operacionais, investimento de capital, Valor Presente Líquido (VPL) e custo de produção.
- Os fatores críticos de viabilidade técnica, como a necessidade de pré-tratamento avançado da matéria-prima (classificação rigorosa e secagem) e os impactos de contaminantes (como halogênios) na corrosividade e qualidade do óleo final, também foram examinados.

III. Análise Documental de Barreiras Regulatórias:

- Envolve a investigação da legislação brasileira pertinente, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei nº 12.305/2010) e o Decreto nº 12.688/2025 (sobre logística reversa de embalagens plásticas), além de normas ambientais e políticas públicas.

- O foco desta análise é identificar as lacunas regulatórias que desfavorecem a expansão de tecnologias emergentes, em especial a incerteza regulatória e a barreira mais crítica, que é a necessidade de classificar o óleo de pirólise como produto (matéria-prima secundária) e não como resíduo.

3.2. DELIMITAÇÃO DE ESTUDO

O escopo geográfico da pesquisa é o Brasil, contextualizado por seu cenário de geração de resíduos plásticos (11,3 milhões de toneladas por ano) e sua baixa taxa de reciclagem efetiva (1,28% do plástico produzido, muito abaixo da média mundial de 9%). Ao mesmo tempo, são trazidos dados globais para comparação e senso de hierarquia de maturidade legislativa.

O estudo se concentra na reciclagem química, comparando-a com as limitações da reciclagem mecânica, e dando ênfase particular à pirólise como a tecnologia emergente mais relevante para a transformação de resíduos plásticos pós-consumo. A delimitação temporal abrange as discussões e dados mais recentes disponíveis na literatura e na legislação até o ano de 2025.

3.3. MATERIAIS E FONTES DE DADOS

Os dados utilizados neste estudo são de natureza secundária e provêm das seguintes fontes:

- Bases de Dados Científicas e Técnicas: Artigos, teses e relatórios técnicos que abordam a Engenharia Química, a pirólise de polímeros (PE, PP, PS, PET, PEAD), a viabilidade de plantas de reciclagem química, e as oportunidades e desafios do processo.

- Fontes Governamentais e Normativas: Legislação brasileira (PNRS e decretos regulamentadores), dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA), com foco na cobertura e desempenho da coleta seletiva, e informações da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) sobre os índices de reciclagem mecânica pós-consumo e recuperação.

- Organizações Internacionais: Relatórios do World Wide Fund for Nature (WWF), Banco Mundial, OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento

Econômico) e agências da ONU, para contextualizar o problema do plástico globalmente.

3.4. LIMITAÇÕES E VALIDAÇÃO

Uma limitação neste estudo está na dependência de dados e estudos de viabilidade econômica e técnica existentes (análise de literatura), uma vez que a implementação da reciclagem química em larga escala no Brasil ainda é incipiente. A validação dos resultados se dá através da análise crítica e comparativa dos cenários econômicos (VPL e Payback), bem como da articulação entre as barreiras tecnológicas e as lacunas regulatórias.

Espera-se que, ao identificar as oportunidades e propor recomendações regulatórias e estratégicas, o trabalho contribua para a transição do país para um modelo de Economia Circular mais eficiente.

4. DISCUSSÃO E ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA

Segundo Frias (2023), a pirólise apresenta tanto vantagens quanto limitações. Diante disso, reuniram-se aqui as principais informações que destacam seus benefícios em comparação à reciclagem mecânica, bem como os desafios ainda existentes para a consolidação desse processo.

4.1 VANTAGENS DA PIRÓLISE

Diferentemente da reciclagem mecânica, que envolve apenas processos físicos como moagem e extrusão, a pirólise é um processo químico endotérmico, realizado sem oxigênio e dependente de fornecimento externo de calor. Como já discutido anteriormente, enquanto a mecânica segue etapas simples de triagem, lavagem e reprocessamento, a pirólise ocorre em quatro fases — iniciação, transferência, decomposição e finalização — responsáveis pela quebra das cadeias poliméricas. Além disso, opera em temperaturas muito mais elevadas, variando de menos de 400 °C a mais de 600 °C, ao contrário da reciclagem mecânica, que utiliza apenas o calor necessário para fundir o polímero durante a extrusão.

Quadro 4 — Comparação entre as principais características da Reciclagem Mecânica e Reciclagem Química

| Critério | Reciclagem Mecânica | Reciclagem Química (Pirólise) |
|--|--|--|
| Definição | Processo físico que reaproveita o plástico preservando as cadeias poliméricas. | Processo químico que decompõe o plástico em ausência de oxigênio, quebrando as cadeias poliméricas e formando hidrocarbonetos menores. |
| Tratamento de resíduos contaminados | Possui limitações para resíduos pós-consumo e contaminados. | Consegue tratar resíduos contaminados, recuperando monômeros ou outros petroquímicos. |
| Flexibilidade quanto ao tipo de plástico | Limitada; exige materiais mais puros e separados. | Alta flexibilidade: pode processar misturas de PP, PEAD, PEBD, PS, etc. |
| Produtos obtidos | Grânulos de plástico reciclado para remanufatura. | Monômeros, óleos, gases e carvão; possibilita sintetizar novos plásticos ou combustíveis. |
| Capacidade de contribuir para Economia Circular | Contribui, mas com limitações ligadas à qualidade do resíduo. | Alta contribuição: permite retornar à matéria-prima original (monômeros) |
| Redução do volume dos resíduos | Não reduz significativamente o volume, pois mantém as cadeias. | Reduz o volume em até 90% do peso do resíduo. |

Fonte: Adaptado de Frias (2023).

Ademais, considerando que a reciclagem química se configura como uma alternativa ambientalmente mais robusta em comparação com a reciclagem mecânica, Frias (2023) apresenta uma análise de viabilidade econômica baseada na consolidação de diversos estudos previamente publicados. De modo geral, as evidências apontam que o processo de pirólise tende a resultar em valores presentes líquidos (VPL) positivos na maior parte dos cenários investigados. Observa-se, contudo, uma exceção para unidades de pequena escala, particularmente aquelas com capacidade aproximada de 100 kg/h, conforme demonstrado na figura.

Figura 13: Estudo de capacidade x impacto nos resultados

| Capacidade da planta (kg/h) | Custos operacionais anuais (MRS) | Investimento de capital Total (MRS) | VPL | PO (anos) | Custo de produção (RS/kg) |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------|-----------|---------------------------|
| 100 | 2,55 | 6,02 | negativo | X | 5,29 |
| 1.000 | 7,30 | 18,63 | positivo | 3,62 | 1,58 |
| 10.000 | 13,39 | 56,94 | positivo | 1,23 | 0,30 |
| 100.000 | 60,29 | 345,72 | positivo | <1 | 0,18 |

Fonte: Adaptado de Fivga e Dimitriou (2018).

Fonte: Frias (2023).

Além do aspecto econômico, vários estudos destacam inúmeras oportunidades na aplicação da Pirólise de plásticos, como o *Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges*, de Qureshi et al (2020). Exemplos de oportunidades:

- I. Aumento das taxas de reciclagem: como já mencionado anteriormente, a pirólise pode aumentar significativamente a taxa de reciclagem de resíduos plásticos, pois se aplica a uma gama de materiais mais ampla do que a reciclagem mecânica, incluindo os plásticos termofixos;
- II. Matéria-prima versátil: pode-se misturar resíduos plásticos e processar fluxos de resíduos desafiadores, como laminados, plásticos multicamadas, compósitos e resíduos contaminados com sujeira ou impurezas orgânicas;

- III. Produtos de valor: o processo converte resíduos plásticos não recicláveis em matéria-prima petroquímica rica em hidrocarbonetos de alto valor (óleo, cera e gás). Esses produtos podem ser usados, por exemplo, em novos combustíveis, produtos químicos ou alimentados diretamente em refinarias.
- IV. Alternativa sustentável: a pirólise oferece uma alternativa ambientalmente superior à incineração e ao aterro sanitário ineficiente de plásticos.
- V. Flexibilidade: o processo permitirá a personalização dos produtos através do uso de catalisadores. A seleção do catalisador pode otimizar a composição do óleo da pirólise para os combustíveis ou produtos químicos desejados.

4.2. DESAFIOS DA PIRÓLISE

Ainda segundo Frias (2023), embora a pirólise apresente diversos aspectos positivos — como a baixa geração de poluentes e a capacidade de produzir insumos que podem substituir combustíveis pesados ou servir como matéria-prima para a indústria petroquímica — o processo enfrenta desafios significativos que limitam sua plena consolidação. Entre os principais entraves destacam-se:

- I. a necessidade de um fornecimento contínuo, estável e adequado de matéria-prima;
- II. a elevada capacidade operacional requerida para garantir eficiência técnica; e
- III. a baixa condutividade térmica dos polímeros, que implica maior demanda energética e compromete a viabilidade industrial e econômica.

Soma-se a esses fatores o cenário regulatório ainda incipiente e heterogêneo, que impõe incertezas quanto à classificação dos produtos gerados, aos requisitos ambientais e à conformidade legal do processo, ampliando as barreiras para sua implementação em larga escala.

Novamente, o trabalho de Qureshi et al (2020) traz muitas contribuições, agora com os desafios da implementação da Pirólise, principalmente no que diz respeito à matéria-prima, na operação do processo e na integração do produto com a cadeia petroquímica.

4.2.1 Qualidade e Logística da Matéria-Prima

Nesse item, Qureshi et al (2020) traz a questão

- da necessidade de pré-tratamento avançado, pois a pirólise, quando tratando de resíduos plásticos provenientes da construção civil, necessita de um alto grau de separação e limpeza. Os resíduos plásticos devem ser rigorosamente classificados por tipo, devem ser secos e livres de qualquer contaminante. Tais exigências implicam a adoção de tecnologias de triagem óptica avançada e processos de lavagem complexos e onerosos, elevando o custo operacional de entrada;
- do impacto dos contaminantes, já que a presença de certos elementos nos resíduos é especialmente problemática, pois prejudica tanto o processo quanto a qualidade do óleo final;
 - halogênios (ex.: cloro do PVC) geram HCl (ácido clorídrico) durante o processo, que é altamente corrosivo para os reatores e equipamentos da planta
 - metais e heteroátomos: elementos como Nitrogênio e Enxofre comprometem a qualidade do óleo, tornando-o incompatível com as especificações de refinaria e exigindo etapas subsequentes caras de hidrotratamento.
- do gargalo logístico e custo: a logística de coleta, transporte e processamento do volume massivo e altamente heterogêneo de resíduos plásticos necessários para alimentar uma planta de pirólise em larga escala é um dos maiores gargalos logísticos, representando um custo operacional considerável que afeta a viabilidade econômica do empreendimento. Sendo esse ponto sobre a Logística já levantado por Frias (2023).

4.2.2 Desafios Tecnológicos e Operacionais do Reator

A engenharia e operação da planta enfrentam desafios críticos que limitam a eficiência e a escalabilidade do processo, que se referem:

- ao controle de qualidade do óleo da Pirólise — sendo o principal produto, é tipicamente de qualidade inferior quando comparado com o

petróleo bruto virgem. Suas características mais problemáticas resumem-se em:

- alto teor de oxigênio, apresentando um menor poder calorífico e reduzindo a estabilidade química;
 - alta acidez: aumenta a corrosividade do óleo;
 - ampla distribuição de peso molecular, dificultando o co-processamento em refinarias, que demandam especificações rigorosas e estáveis.
- a formação de Coque
 - a formação de coque (resíduo carbonáceo sólido) nas paredes do reator e em outras partes do sistema é um problema operacional crítico. Essa deposição leva a entupimentos, reduz a eficiência de transferência de calor e exige paradas frequentes para limpeza, impactando negativamente a escalabilidade e a operação contínua.
 - desativação do Catalisador
 - para melhorar a qualidade do óleo, muitas vezes usam-se catalisadores. No entanto, as impurezas mencionadas na matéria-prima (especialmente metais e heteroátomos) desativam (envenenam) rapidamente os catalisadores, exigindo sua substituição frequente, o que aumenta drasticamente os custos operacionais.

4.2.3 Desafios regulatórios

Os principais pontos sobre barreiras regulatórias da pirólise de resíduos plásticos conforme o estudo de Qureshi et al (2020), concentram-se na falta de clareza legal e na classificação dos produtos gerados.

No contexto dos países desse estudo — europeus — o desafio regulatório principal é a legislação pouco clara e incipiente em torno da gestão de resíduos plásticos, da classificação dos produtos do processo e dos requisitos de conformidade.

Essa incerteza regulatória afeta o planejamento e o investimento em unidades de pirólise em larga escala.

A barreira mais crítica é a necessidade da classificação legal do líquido (óleo) de pirólise como um produto (ou matéria-prima secundária) e não como um resíduo.

Enquanto o produto for classificado como resíduo, ele continua sujeito a regulamentações de transporte e manuseio de resíduos, o que impede sua fácil integração nas cadeias de valor da indústria petroquímica e aumenta custos operacionais.

Pesquisas nacionais, a exemplo do estudo de Fiorelli (2023), sugerem uma estratégia promissora para impulsionar a pirólise de resíduos plásticos com o objetivo de gerar combustíveis. A proposta central reside na regulamentação de uma incorporação progressiva do óleo (líquido) de pirólise ao diesel comercial.

Essa medida seguiria um modelo similar ao já estabelecido para o biodiesel (ANP, 2019), iniciando com percentuais modestos e aumentando a taxa de mistura ao longo do tempo.

Apesar do potencial, as observações de Fiorelli (2023) indicam que o combustível derivado da pirólise ainda exibe um desempenho ligeiramente inferior quando comparado ao diesel convencional, além de apresentar um teor de emissões mais elevado.

Com base nisso, o autor faz referência a Gala et al. (2020), destacando a importância de incluir pelo menos uma fase de refino – como a destilação – no processo. Essa etapa é considerada fundamental para elevar a qualidade do combustível produzido e garantir a sua conformidade com as normas regulamentadoras vigentes, um passo crucial para a viabilidade futura dessa prática.

4.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as limitações identificadas na análise técnica, econômica, ambiental e regulatória da pirólise de resíduos plásticos, torna-se pertinente indicar direções que possam aprofundar o entendimento sobre a viabilidade do processo em cenários futuros. Os itens a seguir sintetizam fatores de análise que merecem investigação em estudos posteriores, suas métricas, impactos no projeto e as respectivas barreiras que ainda podem ser validadas.

4.3.1. Emissões evitadas (de CO₂)

Futuros estudos devem quantificar com maior precisão as emissões evitadas pelo processo, por meio de ACV, e avaliar também as emissões inevitáveis associadas ao consumo energético. É necessário investigar se as plantas podem operar de forma suficientemente limpa para atender aos padrões ambientais mais rigorosos, além de considerar tecnologias complementares de controle de poluentes.

4.3.2. Preço de venda do óleo

O preço atual de mercado pode tornar o processo de pirólise economicamente inviável, indicando a necessidade de valorar o óleo de pirólise acima dos combustíveis convencionais. Pesquisas futuras devem explorar mecanismos regulatórios que reconheçam o óleo como material reciclado ou matéria-prima secundária, permitindo agregar valor, reduzir incertezas e viabilizar sua comercialização.

4.3.3. Custo de aquisição de matéria-prima

Os valores de referência observados na reciclagem mecânica para matéria-prima e para material reciclado — muitas vezes vistos na literatura — indicam a importância de estudar o impacto logístico na pirólise. Trabalhos futuros devem avaliar custos de transporte, disponibilidade regional de resíduos e riscos de que a logística anule o benefício do baixo custo do resíduo, além de analisar modelos de suprimento e parcerias.

4.3.4. Outros

É possível também mapear quem seriam os compradores interessados no óleo de pirólise e unir justificativas para incentivos que levem a regulamentação clara, dados que padronizem o produto e o levem a ser classificados e reconhecidos legalmente.

Não foi o objetivo desse trabalho, mas é viável também abordar os tipos de reatores e quais são suas características particulares que levam a barreiras tecnológicas e regulatórias no Brasil e no mundo.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho, é possível reiterar as profundas fragilidades estruturais do cenário brasileiro de gestão de resíduos. O Brasil ocupa a posição de 4º maior produtor mundial de lixo, contrastando drasticamente com um dos menores índices de reciclagem efetiva, especialmente para o plástico. Essa discrepância é ainda mais evidenciada pela baixa eficiência da coleta seletiva, que atinge apenas 5,9% da massa total anual de resíduos sólidos domiciliares, contando com outros materiais além do plástico.

Diante desse panorama crítico, a pesquisa focou na viabilidade da reciclagem química, identificando a pirólise como uma alternativa estratégica e ambientalmente superior aos métodos tradicionais e ineficientes de incineração e aterro sanitário.

A pirólise destaca-se por superar as limitações da reciclagem mecânica, oferecendo alta flexibilidade operacional. Ela é capaz de processar misturas de plásticos e lidar eficientemente com resíduos contaminados, complexos ou multimateriais. O processo converte esses resíduos em produtos de alto valor, como óleos, gases e carvão, que podem ser reintroduzidos na cadeia produtiva como matéria-prima secundária para a síntese de novos plásticos e combustíveis, configurando uma verdadeira Economia Circular para o plástico.

A contribuição da pessoa Engenheira Química é fundamental para a superação dos desafios tecnológicos desse processo. A profissional é a responsável por: otimizar as condições de reação (temperatura, pressão e catalisadores) para maximizar o rendimento e a qualidade dos produtos; desenvolver o projeto e *scale-up* das plantas industriais, garantindo a viabilidade técnica e a segurança operacional para atingir a escala economicamente positiva; além de trabalhar na purificação e caracterização dos óleos pirolíticos, assegurando que atendam às especificações exigidas pela indústria petroquímica como matéria-prima de alta qualidade.

Apesar do potencial, a adoção da pirólise em larga escala no Brasil enfrenta desafios tecnológicos e regulatórios que foram cruciais na análise deste estudo. A análise financeira comprova que a rentabilidade da pirólise está intrinsecamente ligada à escala da operação. Plantas de pequena capacidade (aproximadamente 100 kg/h) tendem a apresentar VPL negativo. No entanto, para capacidades maiores (1000 kg/h ou mais), o investimento se torna positivo e economicamente viável.

As barreiras regulatórias são marcadas pelo cenário incipiente e heterogêneo que impõe incertezas e inibem grandes investimentos. É fundamental a criação de mecanismos regulatórios que reconheçam e valorizem o óleo da pirólise explicitamente como material reciclado ou matéria-prima secundária. Esse reconhecimento é essencial para permitir que seu preço de venda seja superior aos combustíveis fósseis convencionais, garantindo a segurança jurídica e a receita necessária para a sustentabilidade da planta.

A promoção da reciclagem química deve ser tratada sob uma perspectiva dupla: econômica e ambiental. A articulação dos benefícios financeiros (ligados à geração de novos produtos e à valorização do óleo pirolítico) com os benefícios ambientais (agregando valor ao resíduo e com a redução de emissões) tem o maior potencial para convencer o governo e o mercado. Esta abordagem é crucial para impulsionar a valorização e a consolidação da reciclagem química em um país que ainda demonstra imaturidade em suas leis e planos de gestão de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST, *Perfil 2025* - Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico. Relatório técnico, ABIPLAST. 2025

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. São Paulo, 2023.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 17 nov. 2025.

ANJOS, Miguel. *Funções da embalagem*. 2014.

ARANTES, Marcus Vinícius Carvalho; PEREIRA, Raquel da Silva. *Análise crítica dos 10 anos de criação e implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil*. Revista Linceu On-Line, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 48-66, mar. 2021. Disponível em: https://liceu.fecap.br/LICEU_ON-LINE/article/view/1862/1148. Acesso em: 17 nov. 2025.

BANCO MUNDIAL. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank, 2018.

BARBOSA, Frederico Celestino. MEIO AMBIENTE e SANEAMENTO BÁSICO: impactos e desafios no Brasil. 2020. [Relatório eletrônico]. Disponível em: <https://www.cbcm-metalforming.com/publicacoes/2020/Meio%20ambiente%20e%20saneamento%20b%C3%A1sico%20impactos%20e%20desafios%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2025.

BRASIL. Decreto nº 12.688, de 16 de setembro de 2025. Institui o Sistema Nacional de Logística Reversa de Embalagens Plásticas e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 17 set. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/brasil-avanca-na-politica-de-residuos-e-institui-sistema-de-logistica-reversa-de-embalagens-de-plastico>. Acesso em: 20 out. 2025.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais*: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.

CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente, 2006. *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. Artliber Editora, São Paulo, 2ª edição.

CENTI, G.; PERATHONER, S. *The role of chemical engineering in the use of renewable energy and alternative carbon sources in chemical production*. BMC Chemical Engineering, v. 1, n. 5, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://bmcchemeng.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42480-019-0006-8>. Acesso em: 21 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION *Towards the circular economy - Opportunities for the consumers goods sector*. 2013.

FIORELLI, Francisco. *Pirólise de resíduos plásticos: revisão e perspectivas futuras*. 2020. Projeto Final (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

FRIAS, Beatriz Gava. *Avaliação de estudos da viabilidade econômica de pirólise de plásticos*. 2020. Projeto Final (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

IBGE: 60,5% dos municípios têm coleta seletiva. *Agência Brasil*, 28 nov. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-11/ibge-605-dos-municipios-tem-coleta-seletiva>. Acesso em: 12 nov. 2025.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Energy Technology Perspectives 2020: Tackling climate change with clean energy innovation and system transformation*. Paris: IEA, 2020.

INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS (ICHEME). *Chemical Engineering Matters*. 4. ed. Rugby: IChemE, 2022. Disponível em: <https://www.icheme.org/media/19338/chemical-engineering-matters-4th-edition-2022-icheme.pdf>. Acesso em: 21 out. 2025.

JURAS, Ilidia da Ascensão Garrido Martins. *Legislação sobre resíduos sólidos: comparação da Lei nº 12.305/2010 com a legislação de países desenvolvidos*. Brasília: Câmara dos Deputados, 2012. Disponível em: <https://bd.camara.leg.br>. Acesso em: 13 nov. 2025.

LIMA, Danilo Lins Sant'Ana de. *Avaliação das legislações e tecnologias de tratamento de resíduos sólidos e plásticos na União Europeia, EUA e Brasil*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2023.

MONTESANTI, Beatriz Faria; CARELLI, Giulia Côte-Real. *Avaliação do ciclo de vida de embalagens de entrega de comida no Brasil*. Trabalho de Conclusão de curso - Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2021. 57 p.

ONU MEIO AMBIENTE. *Single-use Plastics: A Roadmap for Sustainability*. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2018.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org/environment/global-plastics-outlook-9789264301016-en.htm>. Acesso em: 21 out. 2025.

PADIN, Guilherme. Um em cada quatro municípios brasileiros sofre com falta de coleta seletiva. *R7 Notícias*, 28 jul. 2022. Disponível em: <https://noticias.r7.com/cidades/um-em-cada-quatro-municipios-brasileiros-sofre-com-falta-de-coleta-seletiva-28072022/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

PLASTIC BRASIL. ACV: entenda a importância da Avaliação do Ciclo de Vida. *Mundo do Plástico*, 2023. Disponível em: <https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/gestao/acv-entenda-importancia-da-avaliacao-do-ciclo-de-vida/>. Acesso em: 1 dez. 2025.

QIN, Ying et al. Research progress on pyrolysis and resource utilisation of waste plastics: Methods, mechanisms, influencing factors, and future prospects. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam. 2025.

QURESHIA, Muhammad Saad et al. Pyrolysis of plastic waste: opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam. 2020.

Parlamento Europeu. (2018, 19 dezembro). *Resíduos de plástico e reciclagem na UE: factos e números*. Recuperado em [dia mês ano] de <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20181212STO21610/residuos-de-plastico-e-reciclagem-na-ue-factos-e-numeros>

REIS, Vanderlei Soares dos. A importância da embalagem na vida do consumidor brasileiro. UNINOVE, 2014.

ROCHMAN, C. M. et al. Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environ. Toxicol. Chem.*, v. 38, n. 4, p. 703–711, 2019.

ROSA, A. A. *Dimensionamento e Localização de Centro de Distribuição de Correios numa Cidade de Médio Porte*. Florianópolis, 1996. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química nova*, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

THE ECO HUB. Understanding the 7 types of plastic. 2022. Disponível em: <https://theecohub.com/types-of-plastic/>. Acesso em 25 nov. 2025.

UNITED NATIONS. *Growing or shrinking? What the latest trends tell us about the world's population*. Geneva: UN News, 2024. Disponível em: <https://www.ungeneva.org/en/news-media/news/2024/07/95264/growing-or-shrinking-what-latest-trends-tell-us-about-worlds>. Acesso em: 21 out. 2025.

VALORA RECICLÁVEIS. Um em cada quatro municípios brasileiros sofre com falta de coleta seletiva. *Valora Recicláveis*, [s.l.], 28 jul. 2022. Disponível em: <https://valorareciclaveis.com.br/municipios-sofrem-coleta-seletiva/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE [WWF]. Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. WWF [online], 4 mar. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico> Acesso em: 23 out. 2025.

WWF. *Solving Plastic Pollution Through Accountability*. Gland: World Wide Fund for Nature, 2019.

ZAMBANINI, M. E. et al. Sustentabilidade e inovação: um estudo sobre o plástico verde. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, p. 429-453, maio/ago. 2014. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/2854/2334>
Acesso em: 1 dez. 2025.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. *Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia*. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015. ISBN 978-85-7600-457-8.