



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GERSON DE PONTES COSTA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ROTAS TERMOQUÍMICAS
DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS NO CENÁRIO BRASILEIRO

FORTALEZA

2025

GERSON DE PONTES COSTA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ROTAS TERMOQUÍMICAS
DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS NO CENÁRIO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C872a Costa, Gerson de Pontes.
Avaliação comparativa de rotas termoquímicas da reciclagem de plásticos no cenário brasileiro /
Gerson de Pontes Costa. – 2025.
62 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.
1. Reciclagem de plásticos;. 2. Rotas termoquímicas; . 3. Análise técnico-econômica.. I. Título.
CDD 660
-

GERSON DE PONTES COSTA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ROTAS TERMOQUÍMICAS
DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS NO CENÁRIO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Química do
Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para a obtenção do Grau de Bacharel
em Engenharia Química

Aprovada em: 22/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra Rílvia Saraiva de Santiago Aguiar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Francisco Mauro Teixeira Pereira Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal do Ceará (UFC), pela estrutura acadêmica e pelo ambiente de formação crítica e técnica proporcionados ao longo da graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João José Hiluy Filho, pelo suporte, disponibilidade e orientação durante todas as etapas deste trabalho.

Aos colegas de curso e aos professores que, direta ou indiretamente, contribuíram com a minha formação.

E, sobretudo, aos meus pais e aos amigos mais próximos, por estarem presentes em todos os momentos oferecendo apoio, compreensão e força.

RESUMO

Atualmente, o acúmulo crescente de resíduos plásticos representa um dos principais desafios ambientais e econômicos para a sociedade. Nesse cenário, as rotas termoquímicas de reciclagem têm ganhado destaque como rotas alternativas aos meios tradicionais (como a reciclagem mecânica) por sua capacidade de converter resíduos plásticos em produtos de maior valor agregado, como óleos e gases de síntese que podem ser convertidos em combustíveis. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre as principais rotas de reciclagem termoquímica dos plásticos: a pirólise, a gaseificação e a liquefação hidrotérmica, a partir de uma revisão bibliográfica crítica e integrativa acerca desses processos seguida da construção de matrizes de decisão que avaliaram seus fatores técnico-econômicos e socioambientais. Os resultados obtidos permitiram concluir que a pirólise química se estabelece como a rota termoquímica de maior viabilidade técnico-econômica e socioambiental no Brasil, apresentando menores custos de implantação e operação, além de maturidade tecnológica comprovada, o que favorece sua adoção em larga escala. Constatou-se também que a gaseificação, embora flexível para processar resíduos mistos e contaminados, enfrenta restrições significativas em razão do tratamento de impurezas e do elevado consumo energético, demandando melhorias em pré-tratamento e otimização de processos. A liquefação hidrotérmica, por sua vez, mostrou potencial para gerar frações líquidas de alto valor, mas foi prejudicada pelo alto consumo hídrico, complexidade operacional e custos expressivos. Assim, conclui-se que, além de consolidar a pirólise, é imperativo fomentar pesquisas experimentais adicionais em gaseificação e liquefação hidrotérmica para validar seu desempenho em escala real e ampliar a gama de soluções integradas para o tratamento de resíduos plásticos no país.

Palavras-chave: *Reciclagem de Plásticos; Rotas Termoquímicas; Análise Técnico-econômica.*

ABSTRACT

Currently, the growing accumulation of plastic waste represents one of the main environmental and economic challenges facing society. In this context, thermochemical recycling routes have gained prominence as alternatives to traditional methods (such as mechanical recycling) due to their ability to convert plastic waste into higher-value products, such as oils and synthesis gases that can be turned into fuels. Accordingly, this work aims to carry out a comparative analysis of the main thermochemical recycling routes for plastics—pyrolysis, gasification, and hydrothermal liquefaction based on a critical, integrative literature review of these processes followed by the construction of decision matrices evaluating their techno-economic and socio-environmental factors. The results obtained allow us to conclude that chemical pyrolysis establishes itself as the thermochemical route with the greatest techno-economic and socio-environmental viability in Brazil, exhibiting lower implementation and operating costs as well as proven technological maturity, which favors its adoption on a large scale. It was also found that gasification, although flexible in processing mixed and contaminated waste, faces significant constraints due to impurity treatment and high energy consumption, requiring improvements in pretreatment and process optimization. Hydrothermal liquefaction, in turn, showed potential to produce high-value liquid fractions but was hindered by high water consumption, operational complexity, and substantial costs. Thus, it is concluded that, beyond consolidating pyrolysis, it is imperative to promote additional experimental research in gasification and hydrothermal liquefaction to validate their performance at real scale and broaden the range of integrated solutions for plastic waste treatment in the country.

Keywords: *Plastic Recycling; Plastic Waste; Thermochemical Routes; Techno-economic Analysis.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma geral do processo de reciclagem mecânica de polímeros	19
Figura 2	Esquema geral do processo de pirólise	23
Figura 3	Esquema geral do processo de gaseificação de resíduos sólidos urbanos	26
Figura 4	Fluxograma do processo de gaseificação de resíduos plásticos	27
Figura 5	Representação de um gaseificador	29
Figura 6	Representação do processo de liquefação hidrotérmica de resíduos plásticos	30
Figura 7	Parâmetros utilizados em pesquisas no Google Acadêmico	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Crescimento da produção mundial de plástico	16
Gráfico 2	– Estimativa da destinação dos resíduos plásticos no Brasil.....	21
Gráfico 3	– Desempenho das rotas na análise socioambiental	43
Gráfico 4	– Custos operacionais no processo de liquefação hidrotérmica	46
Gráfico 5	– Desempenho das rotas na análise técnico-econômica	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Descrição dos principais tipos de plástico	15
Tabela 2	– Impactos ambientais do descarte incorreto de resíduos plásticos	17
Tabela 3	– Frações de produtos da pirólise para diferentes temperaturas	24
Tabela 4	– Influência do tipo de catalisador no processo de pirólise	25
Tabela 5	– Comparação entre os tipos de reator no processo de pirólise	26
Tabela 6	– Dados de consumo energético das tecnologias analisadas	37
Tabela 7	– Análise dos principais resíduos gerados nas rotas analisadas	37
Tabela 8	– Consumo anual de água no processo de liquefação hidrotérmica	41
Tabela 9	– Visão geral do consumo de água entre as rotas estudadas	41
Tabela 10	– Resultados comparativos da análise socioambiental	42
Tabela 11	– Fontes de custo na implantação de uma planta de pirólise	44
Tabela 12	– Custos estimados de capital por capacidade de planta de pirólise	44
Tabela 13	– Fontes de custo na implantação de uma planta de gaseificação	45
Tabela 14	– Comparação entre os produtos principais das rotas estudadas	50
Tabela 15	– Resultados comparativos da análise técnico-econômica	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ARENA	Australian Renewable Energy Agency
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CETEA	Centro de Tecnologia de Embalagens
FCC	Fluid Catalytic Cracking
HZSM-5	Zeólita tipo ZSM-5 (material catalítico)
LHT	Liquefação Hidrotérmica
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis (Análise de Decisão Multicritério)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PICPlast	Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E A RECICLAGEM	15
2.2	RECICLAGEM MECÂNICA: PROCESSO, LIMITAÇÕES E DESAFIOS	19
2.3	RECICLAGEM TERMOQUÍMICA	21
2.3.1	Pirólise	22
2.3.2	Gaseificação	26
2.3.3	Liquefação Hidrotérmica	29
3	METODOLOGIA	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL	35
4.1.1	Emissões Atmosféricas	35
4.1.2	Consumo Energético do processo	36
4.1.3	Geração e Tratamento de Resíduos Secundários	37
4.1.4	Aproveitamento de Resíduos Plásticos Mistos	39
4.1.5	Geração e Tratamento de Resíduos Secundários	40
4.1.6	Resultados Comparativos da Análise Socioambiental	42
4.2	ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA	43
4.2.1	Complexidade Tecnológica e Custos de Implantação	44
4.2.2	Complexidade e Custos de Operação	46
4.2.3	Escalabilidade Industrial	47
4.2.4	Rendimento e Valor Agregado dos Produtos	48
4.2.5	Integração com Infraestrutura Industrial Existente no Brasil	50
4.2.6	Resultados Comparativos da Análise Técnico-econômica	52
5	CONCLUSÃO	54
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
7	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da produção em larga escala na década de 1950, o plástico tornou-se um dos materiais mais amplamente utilizados no mundo. Sua versatilidade, durabilidade e baixo custo de produção permitiram sua aplicação em diversos setores, como embalagens, construção civil, indústria automotiva e saúde. Nas últimas décadas, a taxa de produção mundial de plásticos cresceu de maneira praticamente exponencial, ultrapassando a marca de 400 milhões de toneladas em 2015 (GEYER et al., 2017) e 450 milhões em 2019 (OECD, 2025).

Tal nível de produção exacerbada, aliada ao baixo nível de reciclagem após o consumo, sobretudo no cenário brasileiro, pode ocasionar sérias consequências ambientais.

De acordo com estudo publicado pela Oceana (2020), as projeções mais otimistas apontam apenas 25% de taxa de reciclagem dos resíduos plásticos gerados em território nacional, e dentre os resíduos não reciclados, cerca de 325 mil toneladas de plástico são despejadas nos oceanos anualmente. Um dos grandes impactos desse descarte irregular está na vida marinha, metade das espécies marinhas necropsiadas nas regiões Sul e Sudeste do país ingeriram algum tipo de plástico.

Nesse cenário, a reciclagem de plásticos torna-se fundamental para manter a sustentabilidade no ciclo de produção e consumo desse material, de modo a permitir que ao término de sua vida útil o material polimérico retorne à cadeia produtiva, reduzindo a necessidade de novos aterros sanitários e contribuindo para a conservação de recursos naturais e energia (ABIPLAST, 2016).

A reciclagem de plásticos pode se dar em três principais eixos: reciclagem mecânica, química e energética. A reciclagem mecânica atualmente é o meio mais difundido para o tratamento desses materiais, entretanto, não consegue processar todos os tipos de resíduos plásticos, tratando-se de uma técnica que apresenta limitações apesar da sua eficiência alta relativa aos materiais que consegue processar (MONTEIRO, 2018).

Frente a esses desafios, o trabalho terá seu foco predominantemente nas principais rotas termoquímicas de reciclagem dos resíduos plásticos, sendo elas a pirólise, gaseificação e liquefação hidrotérmica. Tais processos destacam-se pela capacidade de gerar produtos de maior valor agregado a partir desses materiais, por meio da adição de calor sob diferentes condições operacionais e reacionais (ZANONI; SCHAITZA, 2017).

Portanto, o objetivo geral do presente trabalho é o de realizar uma comparação entre as rotas mencionadas baseada em uma revisão bibliográfica crítica, de modo a abordar a

reciclagem termoquímica do plástico sobre os vieses econômico, técnico e socioambiental a fim de destacar seus pontos promissores e limitações e com o intuito de destacar o método melhor aplicável ao cenário nacional.

Para isso, o estudo se propõe a:

- Descrever os princípios operacionais e fundamentos técnicos das rotas termoquímicas de pirólise, gaseificação e liquefação hidrotérmica.
- Analisar, sob o viés técnico-econômico, custos, rendimento, complexidade operacional, escalabilidade, e grau de integração com a infraestrutura industrial brasileira de cada rota.
- Avaliar os impactos socioambientais das rotas termoquímicas, considerando aspectos como emissões atmosféricas, consumo energético, geração de resíduos secundários, aproveitamento de resíduos plásticos mistos, segurança operacional e uso/contaminação de água.
- Elaborar uma matriz de decisão qualitativa para comparar os desempenhos das rotas com base nos critérios definidos, apontando a alternativa mais adequada ao cenário nacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Problemática dos Resíduos Plásticos e a Reciclagem

O plástico é um material sintético formado por macromoléculas chamadas polímeros, que por sua vez são constituídas por unidades menores denominadas monômeros. Esses polímeros, geralmente derivados de fontes fósseis como o petróleo e o gás natural, podem apresentar uma gama de variedades com propriedades diversas a depender do seu tipo de processamento (MEDEIROS; SCABIN, 2025).

De acordo com o Portal eCycle (2025), as subdivisões do plástico se dão sobretudo em razão da composição da sua cadeia polimérica, no Brasil as categorias de plástico definidas pela NBR (13.230:2008) são:

- PET (Tereftalato de polietileno)
- PEAD (Polietileno de alta densidade)
- PVC (Policloreto de Vinila ou cloreto de vinila)
- PEBD (Polietileno de baixa densidade)
- PP (Polipropileno)
- PS (Poliestireno)
- Outros plásticos (categoria que pode apresentar diversos tipos de menor expressão, como o baquelite e o poliuretano)

Diante dessa alta variedade apresentada pelo material, a tabela 1 visa apresentar os principais tipos de plástico, como também suas principais propriedades e aplicações:

Tabela 1 - Descrição dos principais tipos de plástico

Material Polimérico	Propriedades	Principais Aplicações
PET (Tereftalato de polietileno)	Transparente, inquebrável, impermeável e leve;	Frascos e garrafas, fibras têxteis;
PEAD (Polietileno de alta densidade)	Resistente a baixas temperaturas, impermeável, rígido e com alta resistência química;	Embalagens para detergentes e óleos automotivos, sacolas de supermercado, potes;
PVC (Policloreto de Vinila ou cloreto de vinila)	Rígido, impermeável, resistente à altas temperaturas e inquebrável;	Tubulações de água e esgoto, brinquedos, material hospitalar;

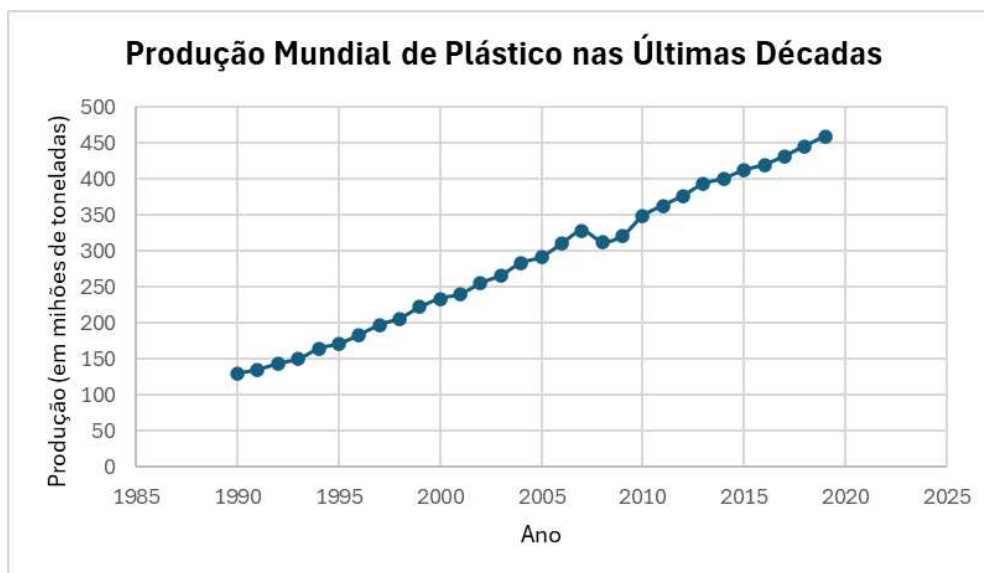
PEBD (Polietileno de baixa densidade)	Flexível, leve, transparente e impermeável;	Sacolas, sacos de lixo, filmes para fraldas descartáveis;
PP (Polipropileno)	Conservação de aroma, transparente, brilhante e rígido;	Embalagens industriais, fios e cabos, seringas descartáveis;
PS (Poliestireno)	Leveza, isolamento térmico, baixo custo;	Pratos, tampas, copos descartáveis, potes para iogurtes, sorvetes, entre outros;

Fonte: Adaptado pelo autor de eCycle (2025).

Assim, verifica-se a presença do plástico como elemento central nas mais diversas áreas da sociedade.

Dado esse cenário, a escala de produção global de plásticos cresceu exponencialmente nas últimas décadas. Segundo dados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2022) no período entre 1990 e 2019 houve um crescimento de quase quatro vezes na quantidade de resíduos plásticos produzidos anualmente. Tal crescimento pode ser acompanhado pelo gráfico 1:

Gráfico 1 - Crescimento da produção mundial de plástico



Fonte: Adaptado pelo autor de OECD (2022)..

No cenário brasileiro, o panorama também é preocupante. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos foram gerados no Brasil em 2022, e os plásticos representam uma fração de 15,9% desse total, o que equivale a cerca de 13 milhões de toneladas geradas apenas no ano em questão.

De acordo com Alabi et al. (2019), o descarte massivo de resíduos plásticos acarreta graves problemas ambientais e sociais em diversas escalas, contaminando solos, ecossistemas marinhos e a qualidade do ar, e impondo riscos à fauna e à saúde humana. Tal gama elevada de impactos pode ser sintetizada por meio da tabela 2:

Tabela 2 - Impactos ambientais do descarte incorreto de resíduos plásticos.

Meio	Efeitos Ambientais	Riscos à Saúde Humana
Solo	Contaminação do solo e dos lençóis freáticos por aditivos tóxicos, emissão de metano na degradação microbiana; persistência de microplásticos e fibras sintéticas;	Exposição indireta a contaminantes via água e alimentos, aumentando os riscos de doenças relacionadas a poluentes químicos;
Água	Poluição de rios, lagos e oceanos por liberação de substâncias tóxicas, bioacumulação de contaminantes persistentes, na cadeia alimentar; ameaça à biodiversidade aquática;	Ingestão de peixes e frutos do mar contaminados por meio do processo de bioacumulação, aumentando o risco de doenças endócrinas, imunológicas e neurológicas;
Ar	Liberação de dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄) durante a decomposição e a queima a céu aberto; emissão de poluentes tóxicos como metais pesados, dioxinas e furanos, intensificando a poluição atmosférica.	Exposição a poluentes atmosféricos, associada a problemas respiratórios, disfunções endócrinas e aumento do risco de câncer, afetando especialmente comunidades vulneráveis.

Fonte: Adaptado pelo autor de Alabi et al. (2019)..

Portanto, verifica-se que o caminho para tentar reverter o cenário apresentado é perpassado pelo aumento da prática da reciclagem. Segundo Coelho (2009),

"A reciclagem é o termo genericamente utilizado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para um novo produto. As vantagens são a minimização da utilização de fontes naturais, e a minimização da quantidade de resíduos que necessita de tratamento, como aterramento, ou incineração."

Conforme estudo realizado pelo Centro de Tecnologia de Embalagens (CETEA) em parceria com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), a reciclagem de embalagens plásticas pode evitar a emissão de mais de 60% do carbono que seria liberado na produção de material virgem, além de reduzir substancialmente o consumo de energia e água no ciclo produtivo (RECICLA SAMPA, 2019). Esses números evidenciam que a reciclagem de plásticos é uma estratégia essencial para a mitigação das mudanças climáticas e para a consolidação de um modelo de economia circular no país.

A reciclagem de polímeros é subdividida em quatro categorias, as quais são, de acordo com Ribeiro et al. (2012):

- **Reciclagem Primária:** O resíduo provém de fonte confiável e limpa e retorna à cadeia produtiva preservando as propriedades e características do material original.
- **Reciclagem Secundária:** O resíduo provém de resíduos sólidos urbanos e geralmente apresenta propriedades e características inferiores às do material original.
- **Reciclagem Terciária:** O resíduo passa por processamento químico a fim de “quebrar” a cadeia polimérica, dando origem à monômeros que poderão ser polimerizados novamente ou a combustíveis.
- **Reciclagem Quaternária:** O resíduo possui seu poder calorífico recuperado por meio de incineração controlada.

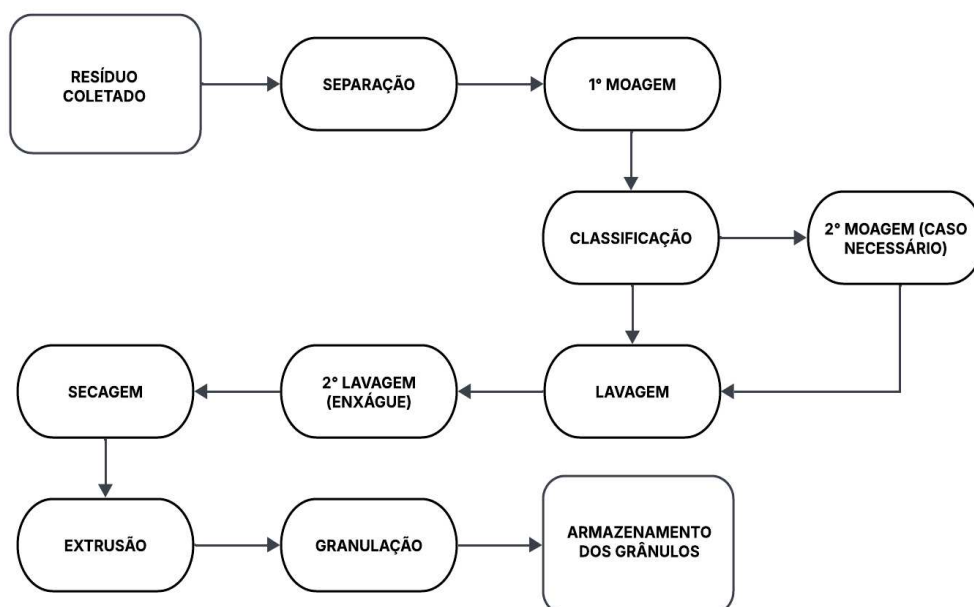
As duas primeiras categorias — primária e secundária — são frequentemente agrupadas sob o termo reciclagem mecânica, já a reciclagem terciária corresponde à reciclagem química e a quaternária à reciclagem energética.

2.2 Reciclagem Mecânica: Processo, Limitações e Desafios

A reciclagem mecânica de plásticos é um processo físico que permite a reutilização de resíduos poliméricos sem alterar sua estrutura química. Segundo Spinacé e De Paoli (2005), essa técnica envolve etapas como separação, trituração, lavagem, secagem e extrusão, transformando os resíduos em novos produtos. É amplamente utilizada para termoplásticos, como polietileno, polipropileno e PET, devido à sua eficiência e menor impacto ambiental.

O processo de reciclagem mecânica de resíduos poliméricos, esquematizado na Figura 1, consiste em seis principais etapas: separação, moagem, lavagem, secagem, extrusão e granulação.

Figura 1 – Fluxograma geral do processo de reciclagem mecânica de polímeros



Fonte: Adaptado pelo autor de Zanin et al. (2009)

Primeiramente, o material plástico é coletado e, na maior parte das vezes, separado por tipo, cor e presença de contaminantes, esta separação inicial, que pode ser feita por métodos como a flotação ou até mesmo com o uso de sensores especializados. Na moagem, os materiais selecionados são triturados em fragmentos de tamanho controlado, facilitando o manuseio e o processamento posterior, podem haver mais de uma vez a depender da dificuldade em fragmentar o material. Em seguida, a lavagem remove impurezas orgânicas e inorgânicas, como resíduos de alimentos, rótulos e adesivos.

A etapa de secagem busca eliminar a umidade remanescente das lavagens, garantindo que o material seja processado em condições ideais de temperatura e viscosidade. Durante a extrusão, o plástico seco é fundido e é forçado através de um orifício calibrado, formando um filamento contínuo. Por fim, na etapa de granulação, esse filamento é resfriado e cortado em pellets, gerando grânulos que se tornam a matéria-prima para a fabricação de novos produtos plásticos (ZANIN et al., 2009).

Atualmente, a reciclagem mecânica destaca-se como o principal método de reaproveitamento de resíduos plásticos no Brasil e sua predominância deve-se à sua simplicidade operacional, menor custo de implementação e capacidade de reinserção rápida do material reciclado na cadeia produtiva (ABIPLAST, 2016). Embora esse processo seja amplamente utilizado e bem estabelecido, apresenta algumas limitações significativas. Conforme apontado por Silva et al. (2024), destacam-se entraves como a insuficiência de recursos financeiros e humanos, a falta de integração entre políticas públicas e a baixa adesão à coleta seletiva, dificultada pela segregação inadequada dos materiais na fonte e pela carência de infraestrutura.

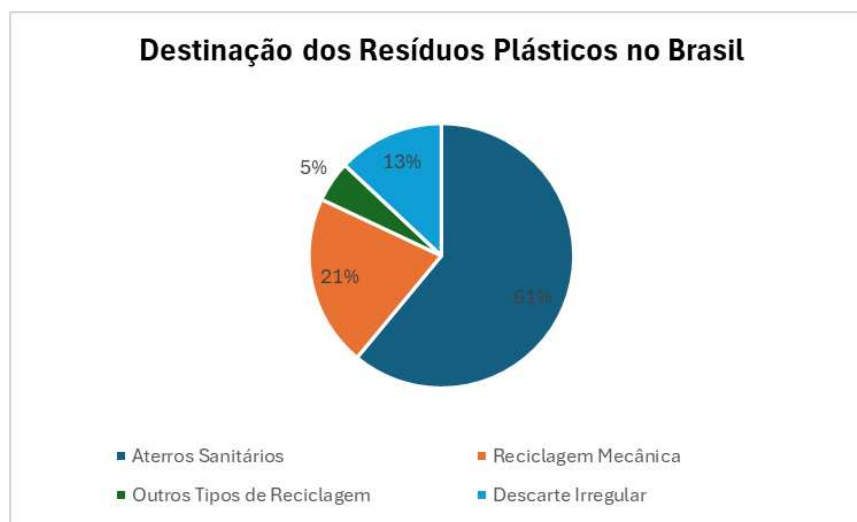
Tais limitações apontadas podem ser observadas numericamente, apenas cerca de 17% dos municípios brasileiros oferecem esse serviço à população, e mesmo nessas localidades, a cobertura tende a ser parcial e ineficiente (CEMPRE, 2020). Em muitos casos, a triagem dos materiais recicláveis ainda depende quase exclusivamente do trabalho de cooperativas de catadores, que operam com recursos escassos e pouco apoio institucional.

Ademais, conforme destacado por Santos et al. (2013), a qualidade do material reciclado pode ser comprometida devido à degradação das propriedades mecânicas após múltiplos ciclos de reprocessamento e à sensibilidade à contaminação por outros tipos de polímeros ou aditivos. Essas restrições impõem barreiras à aplicação de reciclados em produtos de maior valor agregado e, muitas vezes, inviabilizam economicamente o processo. Isso faz com que grande parte desses resíduos acabe sendo destinada a aterros sanitários, mesmo com potencial reciclável.

Corroborando com a informação apresentada anteriormente, de acordo com dados divulgados pela PICPlast (2023), apenas 20,6% dos resíduos plásticos pós consumo foram reciclados mecanicamente no Brasil em 2023, o que evidencia baixo nível de reciclagem atual e a baixa capacidade da reciclagem mecânica em resolver completamente a problemática sem

a adoção de rotas alternativas. O gráfico 2 traz a proporção de cada meio de destinação dos resíduos plásticos:

Gráfico 2 - Estimativa da destinação dos resíduos plásticos no Brasil



Fonte: Adaptado pelo autor de ABIPLAST (2023), ABREMA (2023) e PicPlast (2023).

Nesse cenário, as rotas de reciclagem química, como a pirólise e a gaseificação, destacam-se ao permitir a quebra dos plásticos em seus componentes químicos básicos, facilitando a produção de novos materiais com alta qualidade e menor impacto ambiental. Essas tecnologias, embora ainda em fase de desenvolvimento em muitos países, oferecem um enorme potencial para ampliar as possibilidades de reciclagem, especialmente no Brasil, onde os desafios da gestão de resíduos plásticos são ainda significativos.

2.3 Reciclagem Termoquímica

A reciclagem química, ou reciclagem terciária, é o conjunto de processos que convertem resíduos poliméricos em monômeros, combustíveis ou produtos químicos de alto valor por meio de reações de depolimerização térmica e catalítica. Esses métodos possibilitam quebrar a cadeia polimérica até seus blocos básicos, permitindo a reconstituição de resinas com qualidade equivalente à de materiais virgens, o que amplia o potencial de reaproveitamento e reduz a extração de insumos fósseis (RAHIMI; GARCÍA, 2017).

Neste trabalho serão destacados os principais métodos de reciclagem química por meio de ação térmica:

2.3.1 Pirólise

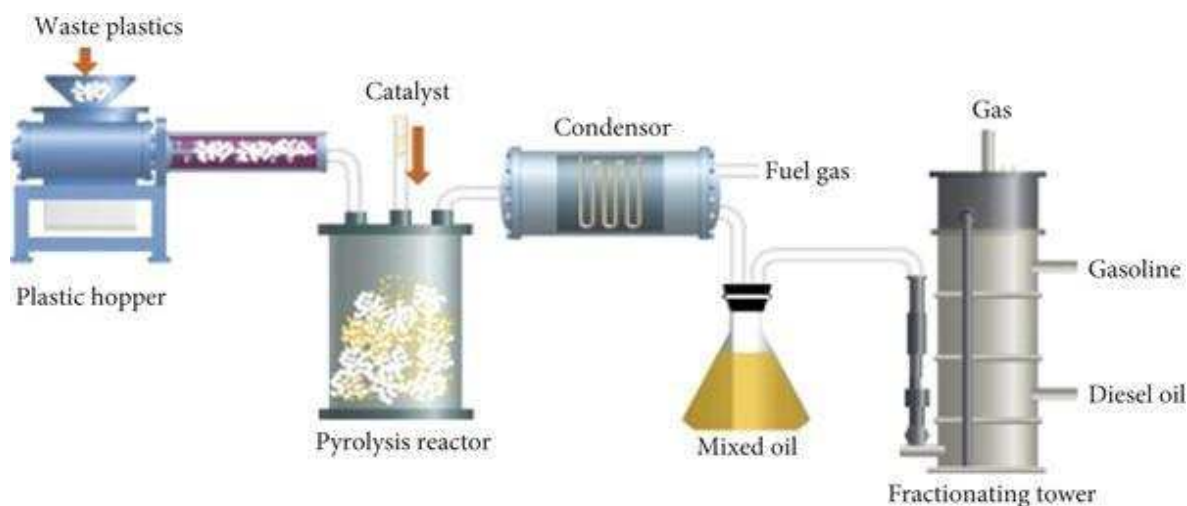
De acordo com Monteiro (2018): “Pirólise, também conhecida como termólise (do grego piro = fogo, termo = calor e lise = quebra) é um processo de decomposição química e térmica, geralmente levando a moléculas menores”

O processo de decomposição desses polímeros, geralmente na ausência de oxigênio a fim de minimizar a emissão de gases como o CO₂, gera frações gasosas, líquidas e resíduos sólidos (como alcatrão, cinzas e pigmentos) em proporções que podem variar amplamente. Os líquidos obtidos — frequentemente denominados “óleos de pirólise” — podem ser usados como combustíveis, insumos para a indústria petroquímica ou até mesmo como monômeros na produção de novos materiais plásticos. A composição e o rendimento desses produtos dependem tanto da natureza do polímero (ou da mistura de polímeros) quanto das condições de operação (temperatura, tempo de residência, atmosfera, etc.), de modo que cada processo requer o ajuste de parâmetros específicos para alcançar o perfil de produto desejado (MONTEIRO, 2018).

A pirólise no processo de reciclagem de resíduos poliméricos pode ser classificada como térmica ou química. Na pirólise térmica pura, o plástico é decomposto apenas por calor em atmosfera inerte, exigindo temperaturas elevadas e longos tempos de residência, o que gera óleos de baixa qualidade e maior formação de resíduos sólidos. Já na pirólise catalítica, a adição de um catalisador permite reduzir a temperatura de reação e o tempo de processo, além de direcionar as reações para a formação de frações leves com propriedades semelhantes às do diesel convencional (PAPUGA et al, 2022). Neste trabalho o foco será dado no processo de pirólise catalítica e ela será tratada como pirólise.

A figura 2 representa, de maneira geral, as principais etapas presentes no processo de pirólise:

Figura 2 - Esquema geral do processo de pirólise.



Fonte: Xia et al. (2023).

Os resíduos plásticos (waste plastics) são inseridos em um triturador (plastic hopper) e conduzidos ao reator de pirólise (pyrolysis reactor), onde ocorrem as reações térmicas, com ou sem uso de catalisadores (catalyst). Os vapores gerados são condensados (condensor), originando o óleo de pirólise (mixed oil) e gás combustível (fuel gas), o óleo resultante pode ser fracionado em uma torre (fractionating tower) para obtenção de produtos como gasolina e diesel (gasoline e diesel oil).

Os resíduos plásticos são inicialmente triados, limpos e reduzidos a fragmentos ou por meio de equipamentos de trituração e lavagem, para remover contaminantes (metais, areia, umidade) e uniformizar o tamanho de partícula, o que melhora a transferência de calor no reator (Biakhmetov et al., 2022).

O material pré-tratado é conduzido, geralmente por um alimentador de rosca (screw feeder), a um circuito de vácuo ou atmosfera inerte (nitrogênio ou argônio), evitando a presença de oxigênio que levaria à oxidação em vez da pirólise (Biakhmetov et al., 2022).

No interior do reator (tipo leito fixo, leito fluidizado ou forno rotativo), o plástico é

aquecido a temperaturas típicas entre 400 °C e 700 °C. Nesse intervalo, as ligações C–C e C–H das cadeias poliméricas quebram-se termicamente, gerando vapores ricos em hidrocarbonetos. Os vapores formados contêm uma mistura complexa de gases (H₂, CH₄, C₂–C₄), vapores líquidos e pequenas partículas sólidas. O tempo de residência (tipicamente 10–60 min) e o tipo de reator influenciam o perfil dessas frações (Xia et al., 2023).

A saída de vapores atravessa um sistema de resfriamento (condensadores e chillers), onde parte do vapor se condensa em “óleo pirolítico” (bio-óleo), enquanto frações mais leves escapam como gases não condensáveis. Opcionalmente, o óleo pirolítico pode passar por uma torre de fracionamento para separar frações de gasolina (C₅–C₁₂) e frações de diesel (C₁₃–C₂₄), conforme a aplicação desejada (Xia et al., 2023).

Ao observar o processo em questão, destacam-se quatro condições operacionais que impactam diretamente a pirólise: temperatura, tempo de residência, tipo de catalisador utilizado e tipo de reator:

- Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros mais relevantes na pirólise catalítica de resíduos plásticos, pois afeta diretamente a conversão do material e a natureza dos produtos gerados. De acordo com Saiote (2012), é possível notar uma clara mudança na matriz dos produtos com o aumento da temperatura. Temperaturas mais elevadas favoreceram a formação de compostos mais leves e a predominância da fase líquida sobre a sólida. A tabela 3 pode apresentar a variação nos produtos com o aumento da temperatura de processo:

Tabela 3: Frações de produtos da pirólise para diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Fração de Líquidos (wt%)	Fração de Gases (wt%)	Fração de Sólidos (wt%)
460	72,0	26,9	0,1
500	65,2	34,0	0,8
600	42,9	56,2	0,9

Fonte: Monteiro, 2018.

- Tempo de Residência

De acordo com Monteiro (2018), tempos de residência mais curtos favorecem a formação de produtos primários, como hidrocarbonetos alifáticos e olefinas, enquanto tempos prolongados possibilitam a ocorrência de reações secundárias, como a aromatização e a formação de gases leves (como H_2 e CH_4), além de compostos mais estáveis e de maior massa molar.

- Catalisador

Xia et al. (2023) destacam que catalisadores como HZSM-5, zeólita Y e FCC permitem uma pirólise mais eficiente ao reduzir a temperatura de operação, aumentar a conversão do plástico e direcionar a formação de frações leves, especialmente hidrocarbonetos aromáticos de interesse comercial. Os autores apontam que a utilização de catalisadores pode elevar o rendimento de frações líquidas leves em até 20% e diminuir a formação de resíduos sólidos. A influência dos diferentes tipos de catalisador pode ser observado na Tabela 4:

Tabela 4: Influência do tipo de catalisador no processo de pirólise

Catalisador	Temperatura Típica de Operação (°C)	Produtos Predominantes	Rendimento de Óleo (%)
Sem Catalisador	500-550	Parafinas, α -olefinas	~45–60
HZSM-5	450-500	Aromáticos, olefinas leves	~60–70
Zeólita Y	450-500	Olefinas, hidrocarbonetos leves	~55–65
FCC	450-500	Gasolina e semelhantes	~65–75
MCM - 41	500-550	Parafinas e olefinas	~55

Fonte: Adaptado de Xia et al, 2023.

- Tipo de Reator

O tipo de reator utilizado na pirólise influencia diretamente parâmetros críticos como transferência de calor, mistura entre fases, tempo de residência e remoção de produtos voláteis. Segundo Monteiro (2018), esses fatores impactam a eficiência da conversão térmica dos resíduos plásticos e a qualidade dos produtos obtidos. A baixa condutividade térmica e a alta viscosidade dos polímeros fundidos tornam desafiador o projeto de reatores adequados para esse tipo de processo.

Entre os reatores mais utilizados destacam-se os de leito fixo, leito fluidizado, parafuso e reatores de tanque agitado. Cada configuração apresenta vantagens e limitações: por exemplo, o leito fluidizado proporciona melhor homogeneidade térmica e remoção contínua de coque, enquanto o leito fixo, embora simples, pode sofrer entupimentos e apresentar menor controle sobre a reação. Reatores do tipo parafuso e extrusoras aquecidas têm se mostrado eficazes para lidar com a alta viscosidade do material plástico fundido, favorecendo a operação contínua (Monteiro, 2018). A tabela 5 produz uma comparação entre os principais tipos de reator que podem ser adotados no processo:

Tabela 5: Comparação entre os tipos de reator no processo de pirólise

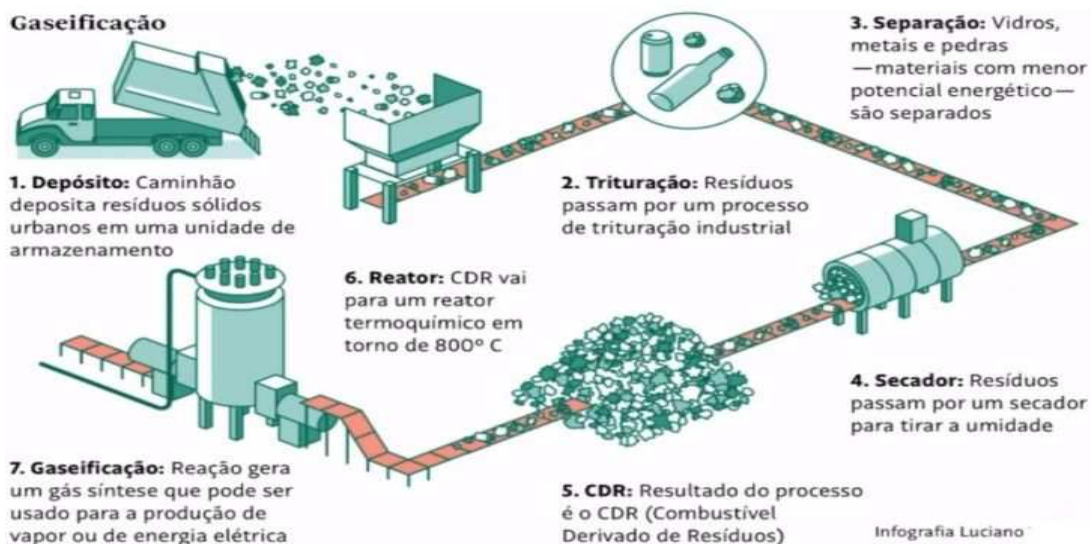
Reator	Vantagens	Desvantagens
Leito fixo	Simplicidade construtiva; baixo custo de operação	Baixa transferência de calor; risco de entupimentos; operação descontínua
Leito fluidizado	Boa homogeneização térmica; alta transferência de calor; remoção contínua de coque	Requer controle cuidadoso do fluxo de gás e das partículas; desgaste de equipamentos
Tanque agitado	Mistura eficiente; controle razoável da temperatura	Mais adequado para pequena escala; dificuldades em operação contínua
Parafuso/extrusora aquecida	Boa manipulação de materiais viscosos; viabiliza operação contínua	Projeto mais complexo; sensível a variações de alimentação

Fonte: Adaptado de Monteiro, 2018.

2.3.2 Gaseificação

A gaseificação de resíduos plásticos é um processo termoquímico que converte materiais poliméricos em um gás de síntese (syngas), rico em hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), por meio de reações de desvolatilização, oxidação parcial e redução em altas temperaturas (800–1 200 °C) em atmosfera controlada (FANG; CHEN; YANG, 2019). A Figura 3 representa de forma geral a gaseificação de resíduos sólidos urbanos:

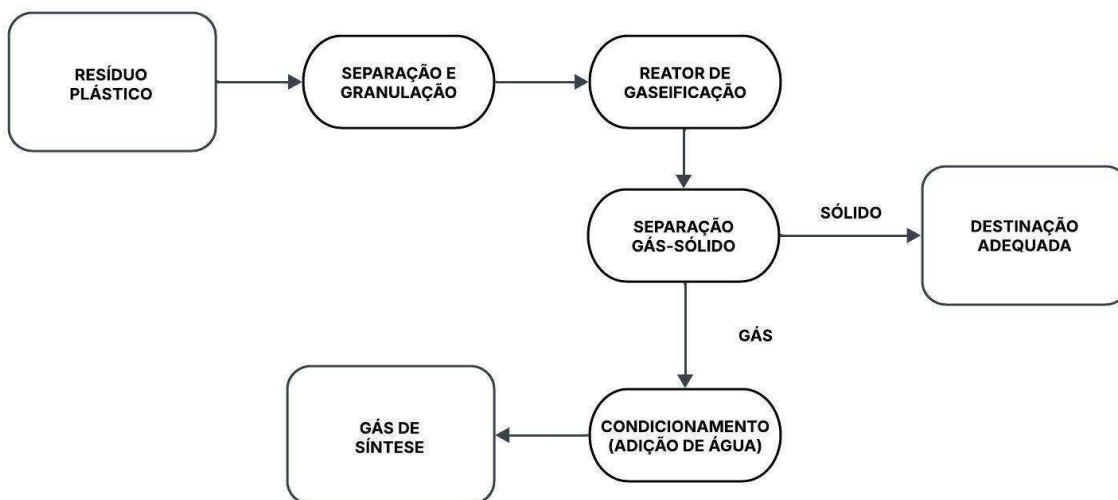
Figura 3: Esquema geral do processo de gaseificação de resíduos sólidos urbanos



Fonte: Folha de São Paulo, 2024.

O processo de gaseificação, especificamente para resíduos plásticos, pode ser descrita pelas seguintes etapas ilustradas na figura 4, de acordo com Monteiro (2018):

Figura 4: Fluxograma do processo de gaseificação de resíduos plásticos

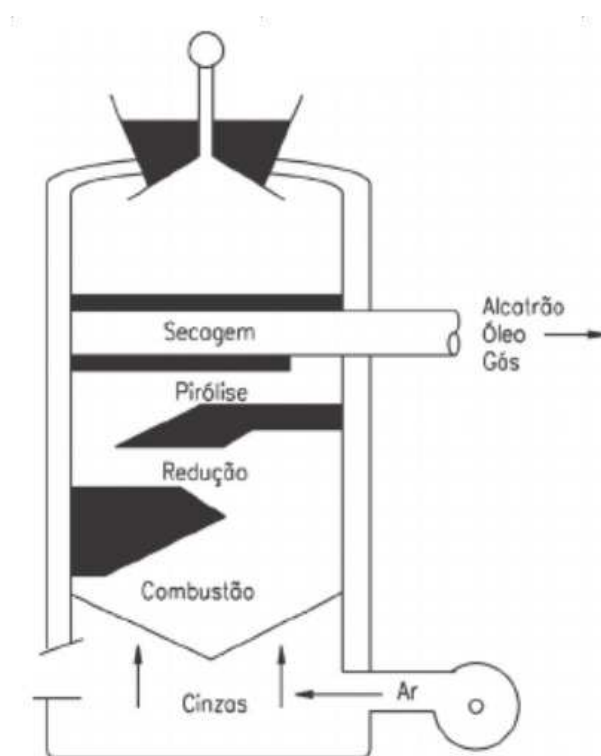


Fonte: Adaptado pelo autor de Brems et al (2013) e Monteiro (2018).

1. **Pré-tratamento:** Antes de entrar no gaseificador, o resíduo sólido é separado de materiais indesejados, triturado e pré-secado. Esse preparo (remoção de impurezas e redução de tamanho) melhora a homogeneidade da alimentação. Em geral é feito a condições ambientes, produzindo um combustível sólido limpo e pré-seco como insumo à etapa seguinte.
2. **Aquecimento e secagem:** O combustível pré-tratado é então aquecido gradualmente até cerca de 160 °C. Nesse estágio endotérmico, a água livre é evaporada – ocorre migração de líquido e vapor através da matriz sólida porosa. Como resultado obtém-se o combustível seco (resíduo sólido sem umidade) e vapor d'água. Essa etapa consome calor, mas não gera combustível gasoso de interesse (apenas vapor residual).
3. **Desvolatilização (pirólise):** Em seguida eleva-se a temperatura para ~300–700 °C. Nessa faixa, o combustível sofre craqueamento térmico (“pirólise”), quebrando cadeias poliméricas e liberando gases e vapores. Surgem gases permanentes leves – tipicamente H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O (vapor) e NH₃ – além de vapores de hidrocarbonetos condensáveis (alcatrão) e um carvão residual sólido. Em essência: Biomassa + calor → coque (carvão) + gás + alcatrão.
4. **Reações químicas de gaseificação:** Na fase final ocorre a oxidação parcial do carvão residual e a reforma dos voláteis, geralmente em torno de 800–1000 °C. Introduce-se ar (ou O₂/vapor) como agente gaseificante. O ar é o agente mais comum devido ao baixo custo, mas sua presença dilui o produto com N₂ (reduzindo o poder calorífico). Pode-se injetar vapor d'água para limitar o N₂ e aumentar a produção de H₂, ou usar O₂ puro/ar enriquecido para gás de maior poder calorífico inferior (PCI). Nesse estágio exotérmico, o carvão remanescente reage parcialmente com o oxidante para gerar CO e CO₂ (por exemplo $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$, $C + O_2 \rightarrow CO_2$), liberando calor que sustenta o processo. Simultaneamente ocorrem reações adicionais (como deslocamento água-gás e metanação) que produzem H₂ e outros componentes. Ao final desta etapa obtém-se o gás de síntese (mistura de H₂, CO, CH₄ e outros hidrocarbonetos leves) e as cinzas/carvão não queimado residual.

A figura 5 apresenta a representação de um gaseificador e dos processos que ocorrem em seu interior:

Figura 5: Representação de um gaseificador

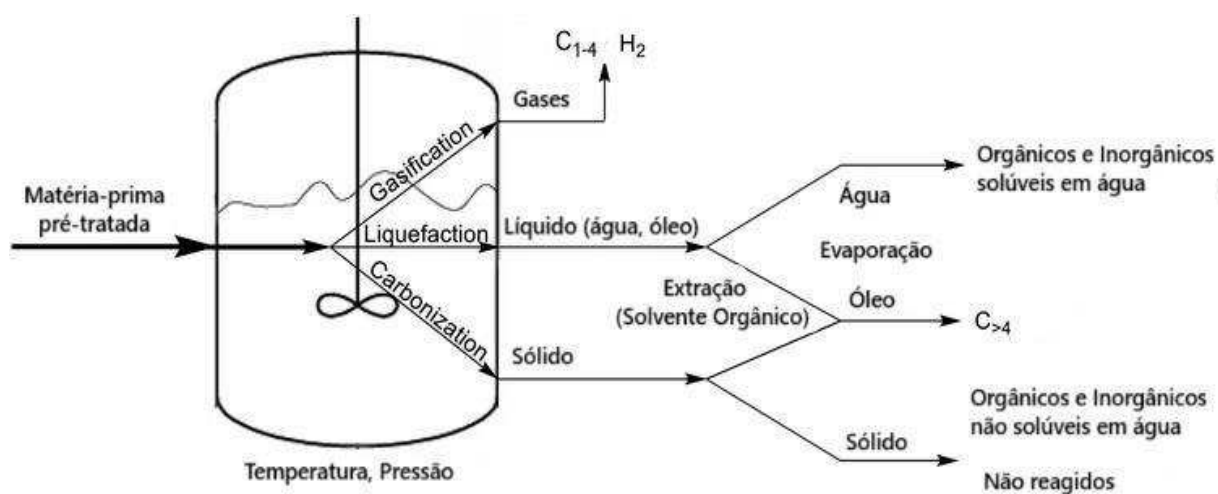


Fonte: Lora et al, 2012.

2.3.3 Liquefação Hidrotérmica

A liquefação hidrotérmica (LHT) de plásticos é um processo termoquímico que converte resíduos poliméricos em uma fração líquida similar a óleo, por meio da quebra de cadeias em água sub ou supercrítica (250–450 °C de temperatura e 5–25 MPa de pressão) sem necessidade de solventes orgânicos, utilizando a própria água como meio de reação (Boel et al., 2024). Esse óleo gerado pode ser refinado em combustíveis ou produtos químicos de alto valor, enquanto sólidos inorgânicos e gases leves são subprodutos (Lü et al., 2023). O processo de LHT pode ser descrito por meio da Figura 6:

Figura 6: Representação do processo de liquefação hidrotérmica de resíduos plásticos



Fonte: Adaptado pelo autor de Boel et al, 2024.

Inicialmente ocorre uma etapa de pré-tratamento, cuja função é remover contaminantes inorgânicos (como metais e areia) e reduzir o tamanho das partículas do resíduo. Essa preparação visa garantir uma alimentação mais homogênea e eficiente ao reator. Em geral, a triagem é feita de forma manual ou automatizada (ótica), seguida de moagem até granulometrias inferiores a 5 mm e secagem ao ar, com umidade reduzida para menos de 5% (FEUERBACH et al., 2024).

Na etapa seguinte realiza-se a alimentação e pressurização, onde os plásticos triturados são misturados com água, numa proporção de massa/massa entre 1:1 e 1:5. Essa mistura é então bombeada para dentro de um reator fechado, operando sob pressão constante. A pressão é mantida entre 5 e 25 MPa por meio de bombas de alta pressão, de forma a impedir que a água evapore durante o aquecimento, permitindo que o meio permaneça líquido mesmo em temperaturas elevadas (CHE et al., 2024).

A fase de aquecimento e reação ocorre sob temperaturas típicas entre 280 °C e 450 °C, com pressões de 10 a 25 MPa e tempos de residência que variam de 20 a 60 minutos (PASSOS et al., 2021). Em condições subcríticas, a água atua como solvente para compostos polares e favorece reações de hidrólise; já em regime supercrítico (acima de 373 °C e 22 MPa), ela assume caráter não polar, sendo capaz de solubilizar polímeros e promover reações de desidrogenação e craqueamento térmico profundo (BOEL et al., 2024). Como resultado, obtêm-se bio-óleo (30 a 70% da massa inicial), gases leves como CO₂, H₂ e CH₄, além de resíduos sólidos/carvão (LÜ et al., 2023).

Por fim, a etapa de resfriamento e separação envolve o resfriamento rápido do efluente, fundamental para interromper reações secundárias indesejadas (ZAMAN et al., 2025). Após o resfriamento, as fases são separadas: a líquida se divide entre fração oleosa (bio-óleo) e aquosa (que pode conter compostos orgânicos solúveis), enquanto a fase sólida, composta por carvão e materiais inorgânicos não reagidos, é filtrada e removida. Os gases não condensáveis podem ser utilizados como combustível para suprir parte da energia do próprio processo.

3 METODOLOGIA

Os métodos adotados para a realização deste trabalho estruturam-se em duas etapas principais: inicialmente o levantamento e sistematização da literatura científica sobre rotas termoquímicas de reciclagem de plásticos, e posteriormente a construção de matrizes de decisão qualitativas para comparar, com base nos dados obtidos, o desempenho das tecnologias de reciclagem termoquímica do plástico seguindo eixos pré-definidos - técnico, econômico e socioambiental.

Na primeira etapa, foi realizado um levantamento bibliográfico no Google Scholar (*Google Acadêmico*), ferramenta de busca científica amplamente utilizada no meio acadêmico por sua acessibilidade, diversidade de fontes, abrangência interdisciplinar e capacidade de redirecionar para outras plataformas de conteúdo acadêmico. Para orientar a pesquisa, formulou-se a seguinte pergunta: “Qual rota termoquímica para reciclagem de plásticos — pirólise, gaseificação ou liquefação hidrotérmica — apresenta melhor desempenho ambiental, técnico e econômico?”. A partir dessa questão, foram testadas diversas combinações de palavras-chave, utilizando operadores booleanos, como: “pyrolysis”, “gasification”, “hydrothermal liquefaction” e “plastic recycling”. Para a seleção dos trabalhos, adotaram-se os seguintes critérios:

- Artigos publicados a partir do ano de 2010;
- Publicações nos idiomas português e inglês;
- Textos com acesso ao conteúdo completo.

Os artigos considerados relevantes foram organizados manualmente e sistematizados em uma planilha de controle, com o objetivo de garantir rastreabilidade e facilitar a extração de dados. A figura 7 traz uma captura de tela apresentando os filtros utilizados na plataforma de acordo com os parâmetros definidos para a seleção dos trabalhos:

Figura 7: Parâmetros utilizados em pesquisas no Google Acadêmico



The image shows a screenshot of the Google Scholar search interface. At the top, there is a blue graduation cap icon followed by the word 'Artigos'. Below this, there are several filter sections separated by horizontal lines. The first section is for 'Período específico...', with options 'A qualquer momento', 'Desde 2025', 'Desde 2024', and 'Desde 2021'. Below these is a date range selector with '2010' and '2025' in input boxes, separated by a minus sign, and a 'Pesquisar' button. The second section is for 'Ordenar por relevância', with options 'Ordenar por relevância' and 'Ordenar por data'. The third section is for 'Em qualquer idioma', with options 'Pesquisar páginas em Português'. The fourth section is for 'Qualquer tipo', with the option 'Artigos de revisão'.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após a aplicação dos filtros descritos, obteve-se um total de 73 artigos científicos ou trabalhos acadêmicos em uma triagem inicial. A partir da leitura dos resumos, conclusões e seções metodológicas, procedeu-se a uma avaliação qualitativa para verificar a relevância e aderência ao tema central do trabalho. Como resultado, 27 artigos foram selecionados para compor a base final da análise, sendo divididos conforme o foco principal em aspectos socioambientais, técnico-econômicos ou ambos, a depender do conteúdo abordado em cada estudo.

Na fase de extração e organização dos dados, cada estudo selecionado foi tabulado em uma planilha contendo as seguintes informações: autores, ano de publicação, rota tecnológica analisada e área de enfoque da pesquisa. Com base nesse material, foram definidos dois critérios principais para a análise comparativa:

1. Socioambiental, dividido em emissões atmosféricas, consumo energético, resíduos secundários, aproveitamento de resíduos mistos e consumo de água;
2. Técnico-econômico, dividido em complexidades e custos de implantação e operacionais, escalabilidade industrial, rendimento e valor agregado dos produtos principais e integração com a infraestrutura brasileira.

Na segunda etapa da metodologia, foi elaborada, para cada critério mencionado, uma matriz de decisão qualitativa, também conhecida como grade de seleção ou *Pugh matrix*.

Essa ferramenta, de acordo com Pugh (1991), permite comparar alternativas com base em múltiplos critérios, mesmo quando os dados disponíveis não são uniformemente quantitativos. Belton e Stewart (2002) situam essa matriz no contexto da Análise de Decisão Multicritério (*Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA*), destacando sua capacidade de integrar avaliações diversas em processos decisórios estruturados. No presente trabalho, as três tecnologias foram dispostas nas colunas da matriz, e os critérios, nas linhas. Em cada célula, foi atribuída uma classificação qualitativa — “alto”, “médio” ou “baixo” desempenho ou “N/I (informações insuficientes)” — fundamentada na consistência e recorrência das evidências encontradas na literatura. A matriz resultante serviu como base para a construção de um quadro-síntese, a partir do qual se discutiram os pontos fortes, limitações e lacunas associadas a cada rota tecnológica.

Essa metodologia visa assegurar clareza, coerência e reprodutibilidade à análise desenvolvida, permitindo que os resultados reflitam não apenas o estado atual do conhecimento científico sobre reciclagem termoquímica de plásticos, mas também uma avaliação crítica das opções disponíveis à partir de múltiplos critérios relevantes para a aplicação dessas rotas no contexto brasileiro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apresentado no capítulo anterior, optou-se por seccionar a análise da bibliografia levantada em duas áreas principais:

4.1. Análise Socioambiental

Nesta etapa, buscou-se comparar as rotas analisadas de acordo com parâmetros importantes relacionados aos seus impactos diretos sobre o meio ambiente, suas implicações sociais, e de viabilidade sustentável no longo prazo como meio alternativo de reciclagem. Assim, foram estudados tópicos como emissões atmosféricas de gases de efeito estufa ou outros poluentes, consumo de energia e balanço energético dos processos, geração de efluentes e/ou resíduos sólidos secundários, capacidade de aproveitamento de resíduos plásticos mistos e contaminados, e uso, contaminação e tratamento de água.

4.1.1. Emissões Atmosféricas

Com relação às emissões atmosféricas, a pirólise apresenta bom desempenho ambiental em comparação com outras rotas termoquímicas, especialmente quando operada em reatores fechados e sob atmosfera inerte, o que limita significativamente a liberação de gases poluentes. Li (2024) aponta que, em sistemas de pirólise lenta com purga adequada de nitrogênio, as emissões de NO_x e SO_x podem ser reduzidas em mais de 70 % em relação à incineração, e que a formação de dioxinas e furanos é mantida em níveis mínimos quando se adotam projetos de leito fixo com filtros de partículas integrados.

No entanto, há sempre alguma formação de CO_2 e hidrocarbonetos leves (metano, etano) durante o cracking térmico, cujo montante varia conforme a composição do resíduo e o tipo de reator. Conforme discutido por Antelava et al. (2021), a pirólise tende a gerar maiores frações de hidrocarbonetos líquidos e cerosos, enquanto a gaseificação favorece a produção de gases permanentes, como CO e CO_2 .

Além disso, a gaseificação também produz CO_2 em proporções elevadas, sobretudo em sistemas que utilizam ar como agente oxidante parcial, podendo ocorrer liberação de traços de alcatrão, HCl e compostos organo-halogenados caso não haja tratamento rigoroso dos gases (FANG; CHEN; YANG, 2019).

A liquefação hidrotérmica, por sua vez, apresenta vantagens ambientais no confinamento de poluentes, pois funciona em meio aquoso sob altas pressões, o que dificulta a emissão direta de voláteis. Ainda assim, gera gases secundários significativos que devem ser capturados e tratados posteriormente. Haarlemmer et al. (2024) reportam valores médios de 0,6 kg de gás (composto por dióxido de carbono e metano) por kg de resíduo processado. Assim, baseado no material analisado, o nível de emissão de gases de efeito estufa será classificado como médio para a pirólise, alto para a gaseificação e baixo para a liquefação hidrotérmica.

4.1.2 Consumo Energético do Processo

O consumo energético é um dos principais indicadores de sustentabilidade ambiental em tecnologias de reciclagem, pois impacta diretamente nas emissões indiretas de gases de efeito estufa e na viabilidade operacional.

Na pirólise, o consumo total de energia (calor + eletricidade) situa-se em torno de 4,5–5,0 MJ/kg de resíduo plástico processado, o que equivale a cerca de 3–4 % do poder calorífico dos produtos obtidos. No entanto, uma fração significativa pode ser recuperada pela queima dos gases voláteis produzidos, tornando o balanço líquido bastante favorável (WU et al, 2023).

A gaseificação, embora em sistemas ideais possa tornar-se autossustentável, geralmente requer suplementação externa de energia para manter as zonas reativas acima de 800 °C. Estudos indicam necessidade entre 1,0 e 1,5 GJ/t de plástico processado, conforme eficiência térmica e configuração do sistema (ARENA, 2012).

Já a liquefação hidrotérmica (LHT) opera em temperaturas mais baixas comparada às outras duas rotas (250–370 °C), porém em altas pressões (10–25 MPa), exigindo energia para bombeamento e compressão do meio aquoso. Mesmo assim, consome apenas 10–15 % da energia contida no resíduo, convertendo o restante em bio-óleo, segundo demonstrações de processos piloto (SCIDAILY, 2013).

A tabela 6 apresenta o consumo energético necessário para processar 1 kg de resíduo plástico nas rotas analisadas, além de trazer a possibilidade de recuperação energética baseada no poder calorífico dos produtos e realizar um balanço energético líquido do processo.

Tabela 6: Dados de consumo energético das tecnologias analisadas

Rota de Reciclagem	Consumo Energético (MJ/kg)	Recuperação Energética (MJ/kg)	Balanco Líquido (MJ/ kg)
Pirólise	4,5–5,0	31,5	26,5–27
Gaseificação	1,0–1,5	5,3	3,8–4,3
Liquefação Hidrotérmica	4,1–6,2	34,9	28,7–30,8

Fonte: Adaptado pelo autor de WU et al (2023), ARENA (2012) e SCIDAILY (2013).

Legenda dos indicadores:

- Consumo Energético: ENTRADA de energia no processo
- Recuperação de Energia: SAÍDA recuperável (óleos, gases, bio-óleo)
- Balanco Líquido: Recuperação – Consumo

Assim, optou-se por classificar a pirólise e a liquefação hidrotérmica com desempenho energético médio, enquanto a gaseificação apresentou um menor desempenho pois apesar de possuir menor consumo energético inicial gera produtos que apresentam menor capacidade de recuperação energética no processo.

4.1.3 Geração e Tratamento de Resíduos Secundários

A geração de resíduos secundários é um fator relevante na avaliação ambiental de tecnologias de reciclagem termoquímica, especialmente em relação ao destino final dos subprodutos e à necessidade de tratamento adicional. A tabela 7 representa os principais resíduos secundários obtidos nos processos:

Tabela 7: Análise dos principais resíduos gerados nas rotas analisadas

Rota de Reciclagem	Resíduos Principais	Impactos Potenciais	Tratamento Recomendado
Pirólise	Char (10–20 % wt); traços de metais pesados e aromáticos	Acumulação de metais tóxicos; risco de liberação de PAHs	Caracterização química; uso energético ou como aditivo após estabilização; descarte em aterro industrial, se necessário

Gaseificação	<i>Char</i> (5–15 % wt); cinzas; alcatrão e partículas arrastadas	Emissão de partículas finas; contaminantes orgânicos (fenóis, ácidos); resíduos ácidos	Filtração e cicloneamento de partículas; condensação de tars; tratamento físico-químico e biológico dos efluentes líquidos
Liquefação Hidrotérmica	Fase aquosa (30–50 % wt) rica em compostos solúveis; sólidos < 5 % wt	Alta carga orgânica dissolvida; potencial eutrofização e toxicidade; geração de gases solúveis	Recirculação e reuso da água de processo; tratamento físico-químico (coagulação/floculação) seguido de biodegradação; captura de gases secundários

Fonte: Adaptado pelo autor de BREMS et al (2013), ARENA (2012), FEUERBACH et al (2024).

Na pirólise, o principal resíduo sólido é o *char*, que costuma representar de 10 % a 20 % da massa de plástico processado. Esse resíduo trata-se de um carvão vegetal é rico em carbono e que pode ser reaproveitado energeticamente ou como aditivo em materiais compósitos, mas pode conter traços de metais pesados e compostos aromáticos, exigindo caracterização e, em alguns casos, desintoxicação antes do uso (BREMS et al, 2013) .

Na gaseificação, além do *char* (5–15 % em peso), geram-se cinzas, partículas arrastadas e alcatrões condensáveis que se formam quando vapores tarsígenos esfriam no sistema de limpeza de gás. Os lavadores e precipitadores produzem efluentes líquidos carregados de fenóis, ácidos orgânicos e metalóides, que demandam tratamento físico-químico e biológico antes do descarte (ARENA, 2012) .

A liquefação hidrotérmica, por sua vez, gera uma fase aquosa residual volumosa (30–50 % em peso), rica em compostos solúveis como ácidos carboxílicos, cetonas e aminas — e traços de metais. Embora o resíduo sólido seja mínimo (< 5 %), a alta carga orgânica do efluente aquoso exige sistemas de recuperação e recirculação de água, bem como tratamento adicional para remoção de matéria orgânica dissolvida ((FEUERBACH et al., 2024) .

Dessa forma, embora todas as rotas termoquímicas envolvam algum nível de geração de resíduos secundários, a natureza e o tratamento exigido por esses subprodutos variam significativamente. A pirólise, por não gerar efluentes líquidos e produzir um resíduo sólido potencialmente aproveitável, apresenta menor complexidade ambiental no manejo de resíduos, desde que haja controle sobre a composição da alimentação e caracterização adequada do *char*. Já a gaseificação e a liquefação hidrotérmica se destacam negativamente

nesse aspecto, pois geram correntes líquidas contaminadas e de difícil tratamento, aumentando a carga operacional e os riscos ambientais associados.

Por esse motivo, a pirólise foi classificada neste trabalho como rota de baixa geração de resíduos secundários, ao passo que gaseificação, por apresentar alto volume e certa complexidade no manejo, foi classificada como alta geração de resíduos secundários, e a liquefação hidrotérmica apresentou um baixo volume porém com subprodutos de tratamento mais complexo, sendo considerada uma rota de médio impacto.

4.1.4 Aproveitamento de Resíduos Plásticos Mistos

A pirólise é considerada mais adequada para o processamento de resíduos plásticos hidrocarbonados puros, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliestireno (PS), que apresentam elevado rendimento de óleo pirolítico e menor geração de subprodutos indesejáveis. Em contrapartida, polímeros como o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno tereftalato (PET) são considerados desafiadores nesse contexto. O PVC libera ácido clorídrico (HCl) e compostos organoclorados durante sua degradação térmica, aumentando a corrosividade do sistema e o risco de formação de dioxinas. Já o PET, devido à sua estrutura rica em oxigênio, tende a gerar subprodutos como ácidos carboxílicos e compostos aromáticos oxigenados, o que compromete a qualidade e estabilidade do óleo gerado, além de favorecer a formação de coque e gases, reduzindo a eficiência geral do processo (QURESHI et al., 2020).

A gaseificação, por sua vez, apresenta maior flexibilidade para processar misturas variadas. Porém, a presença do PVC representa um desafio importante. Durante a gaseificação, o PVC libera cloro na forma de ácido clorídrico (HCl), que pode causar corrosão nos equipamentos e gerar gases tóxicos. Além disso, o cloro interfere na qualidade do gás de síntese, dificultando seu uso posterior (CHO; CHOI; KIM, 2015).

A liquefação hidrotérmica é considerada uma das melhores rotas para o tratamento de resíduos plásticos mistos devido à sua capacidade de decompor diferentes tipos de polímeros simultaneamente, mesmo na presença de contaminantes e impurezas. Essa vantagem ocorre porque o meio aquoso em alta pressão e temperatura facilita a quebra química dos plásticos

heterogêneos, superando as limitações da reciclagem mecânica e outras rotas termoquímicas que requerem separação rigorosa dos materiais (LÜ et al., 2023).

No conjunto, a gaseificação e a liquefação hidrotérmica se mostram mais robustas no aproveitamento de resíduos plásticos heterogêneos e contaminados (desempenho alto), enquanto a pirólise requer maior controle sobre a composição do resíduo, especialmente no que diz respeito à presença de cloro e contaminantes halogenados (desempenho médio).

4.1.5 Uso e Contaminação de Água

No que se refere ao consumo de água, a pirólise destaca-se como uma rota com baixa demanda hídrica direta, uma vez que o processo ocorre em meio seco, sem necessidade de água como reagente ou fluido de transferência térmica. O uso de água, quando existente, limita-se geralmente ao resfriamento de equipamentos e à lavagem dos gases condensáveis, podendo ser realizado de forma sustentável em sistemas industriais de recirculação. Estudos demonstram, por exemplo, que condensadores espirais resfriados a água, empregados na recuperação de vapores pirolíticos, permitem a reutilização da água em circuito fechado, minimizando significativamente o consumo hídrico total do processo (GARCÍA-GARCÍA et al., 2024).

A gaseificação, por sua vez, apresenta impacto significativo sobre os recursos hídricos, especialmente devido à necessidade de vapor d'água nas reações e ao uso de água industrial para suporte ao processo. Em estudo realizado por Shan et al (2023), estima-se que essa rota tecnológica consuma cerca de 7m³ de água por tonelada de resíduo plástico processado, sendo 3m³ provenientes de água subterrânea destinada às operações industriais e 4 m³ utilizados na geração de vapor. Além disso, o processo pode gerar efluentes líquidos contendo compostos tóxicos, como ftalatos e bisfenol A (BPA), que são conhecidos por seus efeitos disruptores endócrinos. Essas substâncias podem contaminar corpos d'água se os efluentes não forem adequadamente tratados antes do descarte. Estudos indicam que o tratamento convencional de água e esgoto não é totalmente eficaz na remoção desses poluentes orgânicos, permitindo que eles persistam no ambiente aquático, afetando a fauna e potencialmente a saúde humana (DUEÑAS-MORENO et al, 2025).

A liquefação hidrotérmica, por sua própria natureza, opera em meio líquido sob condições subcríticas ou supercríticas de temperatura e pressão. Consequentemente, trata-se de uma tecnologia de uso intensivo de água, não apenas como solvente de reação, mas também como meio para transporte de calor. O trabalho conduzido por Ozoemena et al. (2024) destaca na tabela 8 os seguintes pontos com relação ao consumo de água no processo:

Tabela 8: Consumo anual de água no processo de liquefação hidrotérmica

Tipo de água	Consumo anual (m³)	Finalidade
Potável	900	chuveiros de segurança, higiene, etc.
Desmineralizada	1400	Uso na caldeira
Industrial (Água de Processo)	8500	Processo de resfriamento (uso intensificado no verão)

Fonte: Adaptado de OZOEMENA, 2024

Após a conversão, forma-se uma fração aquosa residual contendo compostos orgânicos solúveis, como ácidos carboxílicos, cetonas e aminas, que representam alto potencial de contaminação hídrica. Essa fração exige tratamento físico-químico ou biológico antes do reuso ou descarte, elevando a complexidade ambiental da rota (OZOEMENA et al, 2024). A tabela 9 traça uma visão geral acerca do consumo de água em cada uma das rotas:

Tabela 9: Visão geral do consumo de água entre as rotas estudadas

Rota de Reciclagem	Fontes de Consumo	Fontes de Contaminação	Capacidade de tratamento/reuso
Pirólise	- Sistema de resfriamento de condensadores e trocadores de calor	- Águas de lavagem contaminadas com metais pesados, aditivos e resíduos orgânicos	Alta capacidade de reutilização
Gaseificação	- Geração de vapor d'água para reações de reforma - Refrigeração e lavagem de gases	- Efluentes líquidos contaminados por alcatrões, fenóis e compostos nitrogenados oriundos do sistema de limpeza de gás	Moderada, com potencial de reuso após tratamento. Requer sistemas específicos de separação e filtração.

Liquefação Hidrotérmica	- Geração de vapor e reações em meio aquoso - Processo de resfriamento	- Efluente contendo compostos orgânicos, resíduos de solventes, sais dissolvidos	Cerca de 67,4% do total utilizado sai do tratamento, considerando água tratada que pode ser reutilizada
-------------------------	---	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de OZOEMENA et al (2024); SHAN et al (2023); GARCÍA-GARCÍA et al., 2024.

Portanto, enquanto a pirólise apresenta mínimo impacto sobre o recurso hídrico, a gaseificação demanda atenção para o gerenciamento dos efluentes, e a liquefação hidrotérmica se mostra a mais exigente e crítica em termos de uso e contaminação de água, representando um dos seus principais desafios ambientais.

4.1.6 Resultados Comparativos da Análise Socioambiental

Com base nos critérios apresentados anteriormente foi desenvolvida a tabela 10 que agrega a análise de impactos socioambientais relacionados a cada uma das rotas estudadas:

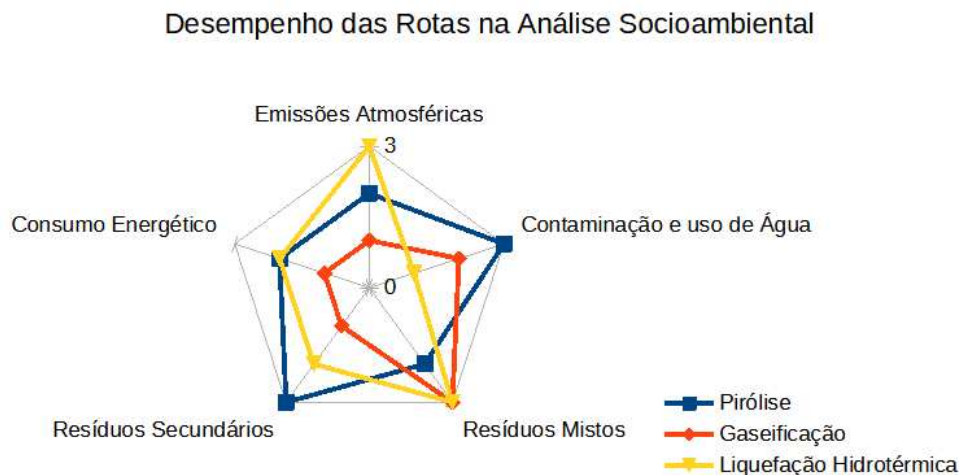
Tabela 10: Resultados comparativos da análise socioambiental

Critério	Pirólise	Gaseificação	Liquefação Hidrotérmica
Emissões Atmosféricas	Médio	Alto	Baixo
Consumo Energético	Médio	Alto	Médio
Geração e Dificuldade no Tratamento de Resíduos Secundários	Baixo	Alto	Médio
Dificuldade no Aproveitamento de Resíduos Plásticos Mistos	Médio	Baixo	Baixo
Uso e Contaminação de Água	Baixo	Médio	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando-se os desempenhos qualitativos atribuídos (baixo = 1, médio = 2 e alto = 3), foi possível representar visualmente os resultados obtidos para cada rota na análise socioambiental, conforme apresentado no gráfico 3:

Gráfico 3 - Desempenho das rotas na análise socioambiental



Fonte: Elaborado pelo Autor

Por meio deles, depreende-se que a pirólise desponta como a rota com os melhores indicadores ambientais, não apresentando desempenho alto em nenhum dos critérios negativos avaliados e com médio desempenho no critério positivo (Capacidade de Aproveitamento de Resíduos Plásticos Mistos), além de possuir uma maior área visual no gráfico. Já o processo de gaseificação apresentou o pior desempenho entre as rotas, de modo que são requeridos maiores cuidados com tratamento de efluentes, resíduos sólidos e emissões atmosféricas ao instalar uma planta de reciclagem que utilize essa rota, sobretudo relacionados aos subprodutos do processo.

4.2 Análise Técnico-Econômica

Na análise técnico-econômica, buscou-se comparar as rotas termoquímicas de reciclagem analisadas a partir de critérios que contemplam sua viabilidade tecnológica e econômica, com foco na aplicabilidade em escala industrial e na realidade brasileira. A análise foi estruturada com base em seis tópicos principais: a complexidade tecnológica dos processos e os custos associados à sua implantação, a complexidade operacional e os custos de operação, a escalabilidade industrial, o rendimento em produtos úteis e seu valor agregado, além do grau de integração possível com a infraestrutura industrial já existente no país.

4.2.1 Complexidade Tecnológica e Custos de Implantação

A pirólise química do plástico apresenta, entre suas principais fontes de custos, os seguintes fatores descritos pela tabela 11:

Tabela 11: Fontes de custo na implantação de uma planta de pirólise

Fonte de Custos	Principais componentes
Equipamentos críticos	Maior parte do investimento, com reatores, condensadores, plantas de purificação
Obras civis e utilidades	Construção de galpão, infraestrutura para vapor, energia e água;
Automação e instrumentação	Sistemas de controle, sensores, válvulas, painéis elétricos — normalmente entre 5–10% do valor de investimento total
Sistemas de segurança e licenças	Barreiras físicas, sistemas de proteção contra incêndios, licenças e alvarás ambientais
Contingência e engenharia	Consultorias técnicas (cerca de 15% do investimento) e Reservas financeiras (cerca de 8% do investimento)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em LIM & TAN (2023); RIEDEWALD (2021).

Assim, é perceptível que a principal fonte de custos na implantação relaciona-se aos equipamentos principais da planta, sobretudo ao reator. No estudo realizado por Lim & Tan (2023), foi possível obter uma estimativa de custos para implantação de uma planta de pirólise para variadas capacidades de produção que está descrito na tabela 12:

Tabela 12: Custos estimados de capital por capacidade de planta de pirólise

Capacidade (kg/h)	Custo de Capital (RM milhões)	Custo de Capital (R\$ milhões)
20	2,66	3,49
100	4,43	5,81
1000	26,28	34,43
10000	203,97	267,20

Fonte: Adaptado de Lim & Tam (2023). Conversão feita com taxa de câmbio de 1 RM = R\$1,31.

Por sua vez, a gaseificação envolve um grau mais elevado de complexidade, além de operar em temperaturas mais elevadas que a pirólise, exige sistemas de controle sofisticados e infraestrutura adicional para purificação do gás de síntese, o que impacta significativamente

os custos de capital. Além disso, o manuseio dos subprodutos, conforme analisado na seção 4.1.3, requer unidades complementares de tratamento, elevando o investimento necessário, suas principais fontes de custo estão expostas na tabela 13.

Tabela 13: Fontes de custo na implantação de uma planta de gaseificação

Fonte de Custos	Principais componentes
Equipamentos críticos	Reatores (leito fixo/fluidizado), filtros de partículas, precipitadores eletrostáticos, unidades de lavagem e purificação de gás
Obras civis e utilidades	Estrutura física, bunkers de armazenamento, sistema de alimentação, sistema de vapor, água e energia
Automação e instrumentação	Controle de temperatura, pressão, fluxo de ar/vapor, emissões
Sistemas de segurança e licenças	Barreiras de contenção, controle de emissões, planos de emergência, licenciamento ambiental, certificações operacionais
Contingência e engenharia	Projetos executivos, consultorias técnicas, gerenciamento de riscos, engenharia de detalhamento, reservas para imprevistos

Fonte: Adaptado pelo autor de ARENA (2012), EDUFABC (2024)

No Brasil, estima-se que sejam necessárias plantas com capacidade entre 25 e 150 toneladas por dia (aproximadamente 1000 a 5000 kg/h) para viabilização econômica das plantas de gaseificação. Essas escalas são consideradas adequadas para pequenos e médios municípios e são capazes de gerar energia no entorno de 1–3 MW de energia (EDUFABC, 2024). O custo estimado para plantas de gaseificação com capacidade para gerar 3 MW no Brasil varia entre R\$ 80 milhões e R\$ 300 milhões, conforme o grau de automação e os sistemas empregados para purificação de gás. Unidades maiores, com capacidade ≥ 500 t/dia (ou energia ≥ 70 MW), exigem investimentos superiores a R\$ 1 bilhão e demandam prazos significativamente maiores de licenciamento devido à complexidade industrial (PROBEN, 2023).

Com relação à LHT, o impacto principal nos custos de implantação refere-se à necessidade de trabalhar com altas pressões, requerendo reatores especializados e maiores custos em sistemas de pressurização. Embora não tenham sido encontrados estudos para LHT de resíduos plásticos, com base em dados sobre a liquefação hidrotérmica utilizando biomassa como matéria prima, mostram que uma planta de 50000 kg/h teve investimento estimado em

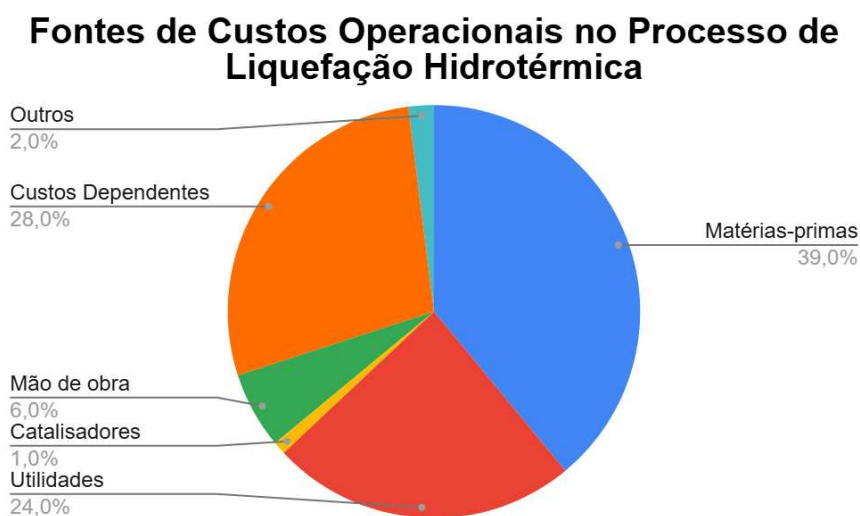
aproximadamente US\$ 122 milhões, totalizando um investimento de cerca de US\$ 2.440 por tonelada anual de capacidade (Khan et al, 2023).

Portanto, os custos e complexidade de implantação para a pirólise serão considerados médios, enquanto para a gaseificação altos, e para a LHT, pela escassez de informações, serão considerados insuficientes.

4.2.2 Complexidade e Custos de Operação

Novamente para a LHT, não foi possível encontrar estudos que trouxessem estimativas com relação aos custos de operação de plantas que realizem esse processo para o tratamento de resíduos plásticos. Para processos envolvendo a utilização de biomassa, conforme estudo realizado por Khan et al (2023), os custos de operação variam entre 400 e 500 milhões de reais anualmente e as principais fontes de custos operacionais são apresentadas no gráfico 4:

Gráfico 4: Custos operacionais no processo de liquefação hidrotérmica



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Khan et al (2023).

Assim, percebe-se que a maioria dos custos se dá na obtenção de matérias-primas, nesse caso a fonte de biomassa e outros combustíveis, além de utilidades industriais sendo compostas principalmente pela água de resfriamento e consumo de eletricidade. Outra grande fonte de custos operacionais trata-se dos custos dependentes da planta, que englobam manutenção de equipamentos e despesas gerais. Contudo, a mudança da matéria-prima pode

ocasionar uma mudança no panorama dos custos operacionais do processo, sendo portanto considerada com informações insuficientes na matriz comparativa.

Para a pirólise e gaseificação, ambas as rotas apresentam as mesmas fontes de custos operacionais, sendo elas matéria-prima, energia térmica para realização do aquecimento e catalisadores do processo. Os custos operacionais, segundo a literatura, apresentam-se em uma faixa que vai de 5% a 15% do valor de investimento. Entretanto, como o custo de investimento de plantas de gaseificação é maior que o da pirólise, conseqüentemente os custos de operação também serão maiores.

4.2.3 Escalabilidade Industrial

A escalabilidade industrial é um fator determinante para o sucesso de uma rota de reciclagem termoquímica, pois está diretamente relacionada à capacidade de transformar tecnologias laboratoriais ou de planta piloto em processos economicamente viáveis em larga escala.

A pirólise se destaca nesse aspecto, tendo em vista estudos recentes mostram que já existem diversas unidades comerciais operando em escala industrial. Segundo Safdar & Abass (2023), há plantas em operação na Alemanha, Japão, Reino Unido e Estados Unidos, capazes de processar entre 20 000 e 120000 toneladas por ano de resíduos plásticos por meio de tecnologias termoquímicas avançadas, como o processo HydroPRS da Mura Technology, que alcança eficiência de conversão acima de 90 % e fornece insumos reaproveitáveis para a produção petroquímica (POLYESTERTIME et al., 2023). A modularidade dos reatores e a flexibilidade na alimentação com diferentes materiais plásticos permitem ajustes na capacidade de processamento conforme a demanda, sustentando uma expansão gradual industrial (SAFDAR; ABASS, 2023).

No Brasil, há registros de plantas-piloto e pequenas unidades comerciais de pirólise. Por exemplo, Hauschild et al. (2021) descrevem uma planta no Rio Grande do Sul que processa cerca de 5 toneladas por dia de resíduos de plástico de serviços municipais, produzindo óleo combustível em cenários variados de escala.

A gaseificação de resíduos plásticos ainda enfrenta desafios relevantes para sua escalabilidade industrial, sendo mais aplicada a biomassa ou carvão. De acordo com Shah

et al. (2023), o processo requer sistemas complexos de limpeza de syngas devido à alta geração de alcatrões, demandando frequentemente o uso de oxigênio ou vapor de alta pureza, o que implica custos elevados de operação e manutenção, esses requisitos tornam inviável sua aplicação em operações descentralizadas ou de pequeno porte. No entanto, em instalações industriais integradas com grande volumetria de resíduos, tipicamente acima de 10.000 toneladas por ano, a gaseificação pode se mostrar competitiva, especialmente quando combinada com a produção de hidrogênio ou gás de síntese em larga escala (CALADO, 2022). No Brasil, não foram encontrados registros de plantas comerciais de gaseificação exclusivamente de resíduos plásticos, sendo a tecnologia limitada a unidades piloto ou projetos de pesquisa.

A liquefação hidrotérmica de resíduos plásticos possui ainda maiores barreiras para expansão em escala industrial. Como evidenciado por Boel et al. (2024), o processo requer condições severas para atingir rendimentos consistentes, especialmente ao lidar com mistura de polímeros como PE, PET e PS. Além disso, o estudo de Hussain & Anastasakis (2025) relatou que, em plantas descentralizadas integradas a estações de tratamento de águas residuais com capacidade de 323 kg/h de sólidos secos, o custo operacional constitui aproximadamente 30% do custo total anual, com destaque em utilitários, manutenção e mão de obra.

No Brasil, ainda não há registros de plantas comerciais de LHT para resíduos plásticos, com projetos concentrados em iniciativas de pesquisa e protótipos em universidades e centros tecnológicos, geralmente com escalas menores (de 100 a 500 kg/h de alimentação), em fase de validação técnica e econômica.

4.2.4 Rendimento e Valor Agregado dos Produtos

O óleo de pirólise possui alto poder calorífico (25–45 MJ/kg) e pode ser utilizado como combustível direto para geração de calor e energia ou como matéria-prima para produção petroquímica, após etapas de purificação (KABEYI; OLANREWAJU, 2023). A sua composição rica em hidrocarbonetos o torna uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, contribuindo tanto para o fechamento do ciclo dos plásticos quanto para o incremento da matriz energética sustentável. No entanto, sua aplicação em motores ou sistemas de grande

escala depende de processos de refino para remover impurezas e estabilizar propriedades termofísicas, conforme levantamento de Lachos-Perez et al (2023).

Kabeyi & Olanrewaju (2023) também relataram que o óleo de pirólise de plástico alcança até 85% do valor do diesel convencional nos preços de mercado, o que aliado a sua diversidade de usos, como combustível industrial, insumo petroquímico e matéria-prima para aditivos torna o produto competitivo. De acordo com Saxena (2025), mercado global de óleo de pirólise foi avaliado em US\$ 345,83 milhões em 2023 e deve alcançar US\$ 461,26 milhões até 2030, o que constata a tendência de aumento no valor econômico e na produção desse óleo.

No que se refere aos rendimentos do processo pirolítico, geralmente são apresentados rendimentos elevados, entre os estudos analisados observaram-se rendimentos com taxas que podem chegar a 65–80% de óleo pirolítico, dependendo da composição do resíduo, temperatura do processo, tempo de residência e tipo de reator. Em reatores contínuos bem projetados, o rendimento de óleo pode ser otimizado (FULGENCIO-MEDRANO et al., 2022).

O gás de síntese (syngas), principal produto obtido no processo de gaseificação, é composto predominantemente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e pequenas frações de hidrocarbonetos leves. O poder calorífico do syngas gerado varia entre 4,2 e 7,3 MJ/Nm³, dependendo das características dos resíduos alimentados e das condições operacionais do processo. Esse gás pode ser utilizado diretamente em turbinas, motores e caldeiras, ou ainda purificado para aplicações na indústria química, como na produção de metanol, amônia ou combustíveis líquidos via processos Fischer–Tropsch. Essa versatilidade operacional permite a valorização energética dos resíduos plásticos em um material de valor agregado intermediário (WEBSTER, 2021).

Estudos demonstram que o rendimento mássico de syngas na gaseificação de plásticos varia entre 70% e 85%, com eficiência influenciada pela temperatura (650°C a 850°C), tipo de plástico (especialmente poliolefinas como PE e PP) e agente gaseificante (oxigênio ou vapor) (RAMIREZ; CRISPIM, 2022).

Os bio-óleos gerados no processo de LHT apresentam potencial para uso como combustível ou como matéria-prima para a indústria química, com composição que inclui hidrocarbonetos, ácidos orgânicos e outros compostos oxigenados, dependendo das condições

operacionais e da composição do resíduo plástico (CHEN, 2022). Esse bio-óleo apresenta maior densidade energética (cerca de 36 MJ/kg) e menor teor de oxigênio (~16%) em comparação com o óleo de pirólise, o que o torna mais estável, menos corrosivo e compatível com processos de refino convencionais. O mercado global de bio-óleo está em expansão, avaliado em US\$ 92,59 milhões em 2023, com aplicações que incluem combustíveis renováveis para transporte rodoviário, combustível de aviação sustentável (SAF), combustíveis marítimos de baixo teor de enxofre e produtos químicos renováveis, substituindo derivados do petróleo (ARBIOS BIOTECH, 2025).

Quanto aos rendimentos, a LHT apresenta taxas de conversão em produtos líquidos tipicamente entre 40% e 60%, variando conforme parâmetros como temperatura, pressão, tempo de residência e composição do resíduo (MOREIRA, 2023; VIEIRA, 2022).

Tabela 14; Comparação entre os produtos principais das rotas estudadas

Aspecto	Pirólise	Gaseificação	Liquefação Hidrotérmica
Produto principal	Óleo de Pirólise	Syngas	Bio-óleo
Aplicações	Combustível industrial, petroquímica, aditivos, combustíveis líquidos	Geração de energia (turbinas, motores), produção de metanol, amônia, combustíveis	Combustível renovável, produtos químicos sustentáveis, integração com biorrefinarias
Rendimentos médios	65–80% em óleo pirolítico (varia com tipo de plástico e operação)	70–85% em syngas (varia conforme temperatura, tipo de plástico e agente gaseificante)	40–60% em bio-óleo (varia com temperatura, pressão e tipo de resíduo)
Valor agregado	Alto: óleo com valor próximo ao diesel, mercado crescente	Médio: syngas versátil, mas requer purificação e conversão adicional	Médio: bio-óleo com mercado em expansão devido a busca por alternativas sustentáveis

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.5 Integração com Infraestrutura Industrial Existente no Brasil

A capacidade de integração das rotas termoquímicas de reciclagem à infraestrutura industrial já consolidada no Brasil é um fator determinante para sua implementação em larga escala. Isso inclui aspectos como compatibilidade com plantas petroquímicas, disponibilidade

de insumos, redes de distribuição, mão de obra especializada e sinergias com indústrias já operantes.

A pirólise apresenta vantagens significativas nesse aspecto, sobretudo devido à compatibilidade do óleo pirolítico com processos petroquímicos e de refino existentes. No Brasil, polos petroquímicos consolidados, como os de Camaçari (BA) e Capuava (SP), oferecem uma base industrial que pode ser aproveitada para o processamento e refino do óleo gerado pela pirólise, desde que sejam realizadas adequações técnicas específicas. Segundo o relatório de sustentabilidade da Petrobras (2024), A Refinaria Riograndense (RPR) realizou, com sucesso, o teste de coprocessamento de óleo de pirólise ou bio-óleo com carga mineral, convertendo esses insumos em frações utilizáveis para combustíveis renováveis.

A matéria-prima ideal para esses processos são as poliolefinas, como polietileno (PE) e polipropileno (PP), que compõem grande parte dos resíduos plásticos gerados (INDUSTRIASA, 2022). Empresas do setor petroquímico, como a ExxonMobil, têm investido em joint ventures para desenvolver plantas integradas de pirólise, onde o óleo pirolítico pode ser processado em complexos petroquímicos, aproveitando sinergias industriais e reduzindo a necessidade de insumos externos (INDUSTRIASA, 2022). Além disso, pesquisas acadêmicas no país têm demonstrado o potencial da pirólise para converter resíduos industriais de PP em combustíveis líquidos de alto valor agregado, com características compatíveis com padrões da Agência Nacional do Petróleo (CAMILO et al., 2023).

A gaseificação, por sua vez, enfrenta desafios significativos para sua integração à infraestrutura industrial brasileira. O syngas gerado requer purificação e processamento avançados para uso eficiente em processos como a produção de metanol, amônia e geração de energia, o que demanda investimentos em tecnologia e instalações específicas ainda pouco difundidas no país (ARENA, 2012). Além disso, a complexidade operacional e a necessidade de controle rigoroso tornam a gaseificação mais viável em polos industriais consolidados, com alto grau de automação e controle ambiental, limitando sua expansão em escala nacional no curto prazo. Entretanto, o Brasil tem avançado em políticas públicas e acordos setoriais que incentivam a reciclagem e o aproveitamento energético de resíduos, como o Decreto nº 10.936/2022 e o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARes), que promovem a economia circular e a integração de tecnologias para maximizar o reaproveitamento

energético, incluindo biogás, biometano e outros combustíveis derivados de resíduos (ABRELPE, 2023; MME, 2025).

Apesar do seu potencial apresentado nas seções anteriores, a LHT ainda carece de demonstrações práticas em escala comercial no Brasil, principalmente devido à necessidade de equipamentos robustos e controle preciso das condições operacionais, o que implica investimentos significativos em infraestrutura especializada. Além disso, atualmente não existe uma cadeia consolidada para o aproveitamento do bio-óleo gerado, nem uma integração clara com as plantas petroquímicas e refinarias brasileiras, o que limita sua adoção em larga escala (ACÁCIO NETO, 2022). No entanto, a flexibilidade da LHT para processar resíduos com alto teor de umidade e contaminantes, sem necessidade de secagem prévia, e a possibilidade de produzir coprodutos valiosos indicam que avanços tecnológicos e políticas de incentivo podem favorecer sua expansão futura (ARUN et al., 2021).

4.2.6 Resultados Comparativos da Análise Técnico-econômica

A tabela 15 apresenta a matriz de decisões baseada nos critérios supracitados:

Tabela 15: Resultados comparativos da análise técnico-econômica

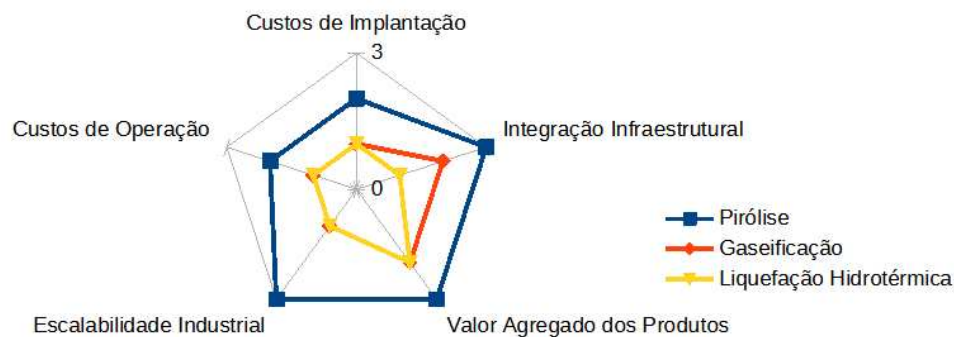
Critério	Pirólise	Gaseificação	Liquefação Hidrotérmica
Complexidade Tecnológica e custos de Implantação	Médio	Alto	N/I
Complexidade e custos de operação	Médio	Alto	N/I
Escalabilidade industrial	Alto	Baixo	Baixo
Rendimento e Valor Agregado dos Produtos	Alto	Médio	Médio
Integração com infraestrutura industrial existente no Brasil	Alto	Médio	Baixo

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como para a análise anterior, consideraram-se os desempenhos qualitativos atribuídos (baixo ou N/I = 1, médio = 2 e alto = 3), sendo possível representar visualmente os resultados obtidos para cada rota na análise socioambiental, conforme apresentado no gráfico 5:

Gráfico 5 - Desempenho das rotas na análise técnico-econômica

Desempenho das Rotas na Análise Técnico-Econômica



Ao decorrer da análise técnico-econômica, é possível observar que novamente a pirólise desponta como a tecnologia mais viável nessa perspectiva, pois além de apresentar custos mais baixos comparativamente com a gaseificação, possui uma alta escalabilidade industrial e integração com a infraestrutura industrial nacional. A liquefação hidrotérmica apresentou os piores indicadores e em dois deles foi desconsiderada pela ausência de informações condizentes encontradas, se mostrando uma tecnologia com elevado potencial porém baixa aplicabilidade prática na realidade atual brasileira.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho retomou o problema dos resíduos plásticos no Brasil, destacou as limitações da reciclagem mecânica e avaliou, de forma comparativa, três rotas termoquímicas de reciclagem: pirólise, gaseificação e liquefação hidrotérmica. O objetivo geral foi identificar qual dessas tecnologias apresenta o melhor balanço entre viabilidade técnico-econômica e impacto socioambiental no contexto brasileiro, sob a ótica de que a rota de maior maturidade tecnológica, econômica e com menores impactos socioambientais seria também a mais adequada para aplicação no país.

Ao decorrer da seção 4, este estudo apresentou a construção de uma matriz de decisão qualitativa fundamentada em uma revisão da literatura, que, ao integrar critérios socioambientais, técnicos e econômicos, ofereceu um instrumento para orientar na escolha das rotas capaz de sintetizar uma ampla gama de fatores de forma objetiva.

Os resultados evidenciam que a pirólise química se destaca pelo rendimento consistente de produtos de valor agregado, pela maturidade tecnológica comprovada e pelos requisitos moderados de investimento e operação, apresentando os melhores desempenhos em 80% dos critérios analisados ao decorrer das análises socioambiental e técnico-econômica.

Em contrapartida, a gaseificação, apesar de sua flexibilidade para processar resíduos mistos e contaminados, enfrenta obstáculos significativos no tratamento de impurezas, no consumo energético adicional exigido para manter reações acima de 800 °C e nos custos de implantação e investimento, de modo a trazer o pior desempenho em 60% dos critérios estudados e o melhor em apenas um deles.

A liquefação hidrotérmica, embora potencialmente capaz de gerar frações líquidas de alto valor e possuir um alto potencial sustentável, com desempenho favorável em 60% dos critérios avaliados na análise socioambiental, revelou-se menos adequada ao cenário brasileiro em razão da complexidade operacional e baixa capacidade de escalabilidade industrial no cenário atual, tal ausência de maturidade tecnológica foi refletida durante a análise técnico-econômica, na qual essa tecnologia obteve o pior desempenho em todos os critérios.

A revisão crítica da literatura também identificou lacunas relevantes de dados, sobretudo aos custos reais de investimento, operação e demais informações de mercado das

tecnologias avaliadas na realidade brasileira. Além disso, houveram entraves em trabalhar com dados quantitativos para convertê-los em qualitativos, o que se deu muitas vezes pela diversidade com que eles estavam dispostos, seja com relação à unidades ou condições específicas às rotas.

Por fim, confirma-se que a pirólise química desponta como a rota mais promissora para a reciclagem termoquímica de resíduos plásticos no Brasil, ressaltando-se a necessidade de estudos experimentais em escala real para validar e consolidar essas conclusões.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Proceder ensaios em planta piloto de cada rota especializada no tratamento de resíduos plásticos, especialmente para o processo de liquefação hidrotérmica e gaseificação;
2. Realizar mais avaliações técnico-econômicas para o processo de liquefação hidrotérmica com enfoque no tratamento de resíduos plásticos;
3. Produzir estudos que possibilitem determinar a correlação das rotas termoquímicas com a infraestrutura industrial brasileira, tendo em vista ser uma temática que envolve diversas outras variáveis além das apresentadas neste trabalho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. A importância da reciclagem de plásticos para a sustentabilidade. Associação Brasileira da Indústria do Plástico, 2016. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/305-a-importancia-da-reciclagem-de-plasticos-para-a-sustentabilidade/>. Acesso em: 19 de abril de 2025.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo, 2023. Acesso em: 19 de abril de 2025.

ACÁCIO NETO, Pedro Nunes. Liquefação hidrotérmica de biomassa lignocelulósica a partir de resíduos agroindustriais. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco.

ALABI, R. A.; OKUNOLA, O. J.; OLOGBONJAYE, F. et al. Public and environmental health effects of plastic wastes disposal: a review. *International Journal of Toxicology and Risk Assessment*, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 1–?, 2019. DOI: 10.23937/2572-4061.1510021.

ANTELAVA, Ana; JABLONSKA, Natalia; CONSTANTINOU, Achilleas; MANOS, George; SALAUDEEN, Shakirudeen A.; DUTTA, Animesh; AL-SALEM, Sultan Majed. Energy potential of plastic waste valorization: a short comparative assessment of pyrolysis versus gasification. *Energy & Fuels*, v. 35, n. 5, p. 3558–3571, 2021. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c04017.

ARBIOS BIOTECH. Nosso produto: bio-óleo renovável e suas aplicações. Disponível em: <https://arbiosbiotech.com/pt-br/reinvencao-de-recursos/nosso-produto/>. Acesso em: 16 de junho de 2025.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification — a review. *Waste Management*, v. 32, p. 625–639, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>. Acesso em: 24 de maio de 2025.

ARUN, Jayaseelan; GOPINATH, Kannappan Panchamoorthy; SIVARAMAKRISHNAN, Ramachandran; SHYAM, Sivaprasad; MAYURI, Namasivayam; MANASA, Sadhasivan; PUGAZHENDHI, Arivalagan. Hydrothermal liquefaction of *Prosopis juliflora* biomass for the production of ferulic acid and bio-oil. *Bioresource Technology*, v. 319, 124116, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124116.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. Reciclagem de plásticos no Brasil: estudo aponta índice de 24,3% para embalagens em 2023. São Paulo, 2024. Disponível em:

<https://www.abiplast.org.br/noticias/reciclagem-de-plasticos-no-brasil-estudo-aponta-indice-de-243-para-as-embalagens-em-2023/>. Acesso em: 24 de junho de 2025.

BELTON, Valerie; STEWART, Theodor J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

BIAKHMETOV, B.; LI, Y.; ZHAO, Q.; OK, Y. S.; DOSTIYAROV, A.; PARK, Y.-K.; FLYNN, D.; YOU, S. Comparing carbon-saving potential of the pyrolysis of non-recycled municipal plastic waste: Influences of system scales and end products. *Journal of Cleaner Production*, v. 469, p. 143140, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143140.

BOEL, M. J.; WANG, H.; AL FARRA, A.; MEGIDO, L.; GONZÁLEZ-LAFUENTE, J. M.; SHIJU, N. R. Hydrothermal liquefaction of plastics: a survey of the effect of reaction conditions on the reaction efficiency. *Reaction Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 5, p. 1014–1031, 2024. DOI: 10.1039/D2RE00510G.

BREMS, A.; DEWIL, R.; BAEYENS, J.; ZHANG, R. Gasification of plastic waste as waste-to-energy or waste-to-syngas recovery route. *Natural Science*, v. 5, n. 6, p. 695–704, 2013. DOI: 10.4236/ns.2013.56086.

CALADO, Luís Filipe do Carmo. *Gaseificação térmica de biomassa lenhocelulósica – Uma abordagem tecno-económica de diferentes tecnologias de gaseificação*. [S.l.], 2022. Trabalho de conclusão de curso (Mestrado) — Instituto Politécnico de Castelo Branco. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/41629/1/BCTFC274.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

CAMILO, T. T.; RODRIGUES, G. de O.; JUNIOR, S. D.; MACHADO, N. T.; CASTRO, D. A. R. de. Estudo do processo de pirólise de resíduo industrial de Polipropileno (PP) em reator de leito fixo para a produção de combustível. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 4415-4438, 2023. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-304>.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. *Reciclagem de embalagens*. São Paulo: CEMPRE, 2020. Disponível em: <https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/7-RECICLAGEM-DE-EMBALAGENS.pdf>. Acesso em: 1 de maio de 2025.

CHE, C. A.; HEYNDERICKX, P. Hydrothermal carbonization of plastic waste: A review of its potential in alternative energy applications. *Fuel Communications*, v. 18, art. 100103, 2024. DOI: 10.1016/j.jfueco.2023.100103.

CHEN, Rongjie; LI, Hang; LI, Kaile; ZHANG, Shiyu; LI, Qinghai; ZHOU, Hui; ZHANG, Yanguo. Hydrothermal liquefaction of scrap tires: optimization of reaction conditions and recovery of high value-added products. *Frontiers in Energy Research*, v. 10, 14 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.841752>.

CHO, M.-H.; CHOI, Y.-K.; KIM, J.-S. Air gasification of PVC-containing plastic waste using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for clean syngas production. *Energy*, v. 87, p. 586–593, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.026.

COELHO, Maria Cristina de Oliveira Cardoso. Sustentabilidade: reaproveitamento de materiais recicláveis. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2009. Projeto de Extensão. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/2690>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

DUEÑAS-MORENO, Jaime; MORA, Abrahan; CERVANTES-AVILÉS, Pabel; MAHLKNECHT, Jürgen. Groundwater contamination pathways of phthalates and bisphenol A: origin, characteristics, transport, and fate – A review. *Environment International*, v. 170, p. 107550, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107550.

EDUFABC. Energia do lixo: tecnologias para recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. São Bernardo do Campo: Universidade Federal do ABC, 2024. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/814794634/Energia-Do-Lixo-Livro-Completo-241229-192830>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

EYCLE. Tipos de plásticos. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/tipos-de-plasticos/>. Acesso em: 25 de abril de 2025.

ANG, W.; CHEN, Z.; YANG, R. Gasification of plastic waste for synthesis gas production. *Energy Conversion and Management*, v. 195, p. 343–356, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419308441>. Acesso em: 28 de junho de 2025.

FEUERBACH, Silvan; TOOR, Saqib Sohail; COSTA, Paula A.; PARADELA, Filipe; MARQUES, Paula A.A.S.; CASTELLO, Daniele. Hydrothermal Co-Liquefaction of Food and Plastic Waste for Biocrude Production. *Energies*, v. 17, n. 9, art. 2098, 2024. DOI: 10.3390/en17092098.

FULGENCIO-MEDRANO, Laura; GARCÍA-FERNÁNDEZ, Sara; ASUETA, Asier; LOPEZ-URIONABARRENECHEA, Alexander; PEREZ-MARTINEZ, Borja B.; ARANDES, José María. Oil Production by Pyrolysis of Real Plastic Waste. *Polymers (Basel)*, v. 14, n. 3, art. 553, 29 jan. 2022. DOI: 10.3390/polym14030553.

GARCÍA-GARCÍA, G.; MARTÍN-LARA, M. Á.; CALERO, M.; BLÁZQUEZ, G. Environmental impact of different scenarios for the pyrolysis of contaminated mixed plastic waste. *Green Chemistry*, v. 26, n. 7, p. 3853–3862, 2024. DOI: 10.1039/D3GC04396G.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, e1700782, 2017. DOI: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.1700782>.

HAARLEMMER, Geert; MATRICON, Lucie; ROUBAUD, Anne. Comprehensive review of hydrothermal liquefaction data for use in process modeling. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Chichester, v. 18, n. 5, p. 1782–1798, 2024. DOI: 10.1002/bbb.2637.

HAUSCHILD, Tailane et al. Technic-economic analysis of plastic waste pyrolysis to produce fuel oil in a medium-sized municipality. FIRS/Instituto Venturi, 2021. Disponível em: <https://institutoventuri.org/ojs/index.php/FIRS/article/view/158>. Acesso em: 12 de junho de 2025.

HUSSAIN, A.; ANASTASAKIS, K. Technoeconomic evaluation of integrating hydrothermal liquefaction in wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, v. 419, p. 132030, 2025. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.132030.

INDUSTRIASA. Em meio a polêmica, indústria aposta na pirólise de plásticos. 10 out. 2022. Disponível em: <https://industriasa.com.br/em-meio-a-polemica-industria-aposta-na-pirolise-de-plasticos/>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

KABEYI, Moses Jeremiah Barasa; OLANREWaju, Oludolapo Akanni. Review and design overview of plastic waste-to-pyrolysis oil conversion with implications on the energy transition. *Journal of Energy*, [S. l.], v. 2023, p. 1–23, 2023. DOI: 10.1155/2023/1821129.

KHAN, Shoaib R.; MISAILIDIS, Nikiforos; KONTOVAS, Stylianos; PETRIDES, Demetri. Wood hydrothermal liquefaction – process modeling and techno-economic assessment (TEA) using SuperPro Designer. [S.l.], abr. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.29691.80164.

LI, Simeng. Reviewing Air Pollutants Generated during the Pyrolysis of Solid Waste for Biofuel and Biochar Production: Toward Cleaner Production Practices. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 3, art. 1169, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031169>.

LIM, Mooktzeng; TAN, Ee Sann. Techno-economic feasibility study for organic and plastic waste pyrolysis pilot plant in Malaysia. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 19, p. 14280, 2023. DOI: 10.3390/su151914280.

LORA, E. E. S. et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. *Interciência*, Cap. 6, p. 411 – 498, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284163742_Gaseificacao_e_pirolise_para_a_conversao_da_biomassa_em_eletricidade_e_biocombustiveis. Acesso em: 15 de maio de 2025

LÜ, Z.; LAREDO, G. C.; REZA, J.; MENDEZ, E. R. Hydrothermal liquefaction processes for plastics recycling: A review. *Cleaner Chemical Engineering*, v. 5, art. 100094, 2023. DOI: 10.1016/j.clce.2023.100094.

MEDEIROS, Rozélia; SCABIN, Denise. Plástico. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo – SEMIL. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/plastico/>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES. Brasília: MME, 2025. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 28 de maio de 2025.

MONTEIRO, Alessandra da Rocha Duailibe. Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável. 2018. 328 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MOREIRA, Gabriel Dell Orfanello. Análise técnica e econômica dos processos de pirólise e liquefação hidrotérmica dos resíduos da indústria de madeira. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

Uso e produção mundial de plásticos. Disponível em: [https://data-explorer.oecd.org/vis?tenant=archive&df\[ds\]=DisseminateArchiveDMZ&df\[id\]=DF_PLASTIC_USE_10&df\[ag\]=OECD&pd=1990%2C2019&to\[TIME_PERIOD\]=false&vw=tb](https://data-explorer.oecd.org/vis?tenant=archive&df[ds]=DisseminateArchiveDMZ&df[id]=DF_PLASTIC_USE_10&df[ag]=OECD&pd=1990%2C2019&to[TIME_PERIOD]=false&vw=tb). Acesso em: 25 de abril de 2025.

OCEANA Brasil. Combate à poluição marinha por plásticos. São Paulo: Oceana Brasil, 2020. Disponível em: <https://brasil.oceana.org/campanhas/combate-a-poluicao-marinha-por-plasticos/>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

OZOEMENA, Matthew C.; COLES, Stuart R. Hydrothermal treatment of waste plastics: an environmental impact study. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 31, p. 3120–3130, 2023. DOI: 10.1007/s10924-023-02730-8.

PAPUGA, Saša; DJURDJEVIĆ, Milica; CICCIONI, Andrea; VECCHIO CIPRIOTI, Stefano. Catalytic pyrolysis of plastic waste and molecular symmetry effects: a review. *Symmetry*, v. 15, n. 1, p. 38, 2022. DOI: 10.3390/sym15010038.

PETROBRAS. Relatório de Sustentabilidade 2024. São Paulo: Petrobras, 2024. Disponível em: <https://sustentabilidade.petrobras.com.br>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

PICPLAST. Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil – Ano-base 2022. São Paulo: Abiplast; Braskem, 2023. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2024/10/Indices_Reciclagem2023_PICPlast2024-Divulgacao_-2.pdf. Acesso em: 25 de abril de 2025.

POLYESTERTIME. Mura HydroPRS technology 06-03-2023. Polyestertime, 6 mar. 2023. Disponível em: <https://www.polyestertime.com/mura-hydroprs-technology-06-03-2023/>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

PROBEN. Oferta de tecnologias de pirólise e gaseificação para recuperação energética de resíduos ganha força no Brasil. 2023. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/proben/oferta-de-tecnologias-de-pirolise-e-gaseificacao-para-recupera-cao-energetica-de-residuos-ganha-forca-no-brasil-de-olho-na-expansao-do-mercado/>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

PUGH, Stuart. Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Wokingham: Addison-Wesley, 1991.

QURESHI, Muhammad Saad; OASMAA, Anja; PIHKOLA, Hanna; DEVIATKIN, Ivan; TENHUNEN, Anna; MANNILA, Juha; MINKKINEN, Hannu; POHJAKALLIO, Maija; LAINE-YLIJOKI, Jutta. Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [S. l.], v. 152, p. 104804, 2020. ISSN 0165-2370. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104804.

RAHIMI, Alireza; GARCÍA, Jeannette M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, v.1, art. no.0046, 2017. DOI: 10.1038/s41570-017-0046.

RAMIREZ, Camila; CRISPIM, Gabriel. Avaliação comparativa entre as tecnologias químicas de Gaseificação e Pirólise aplicada a resíduos plásticos. Rio de Janeiro, 2022.

RECICLA SAMPA. Você sabia que a coleta seletiva pode salvar o meio ambiente? São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/voce-sabia-que-a-coleta-seletiva-pode-salvar-o-meio-ambiente>. Acesso em: 27 de abril de 2025.

RIBEIRO, Vanda F.; DOMINGUES JR., Nei S.; RIEGEL, Izabel C. Estudo da recuperação das propriedades de poliestireno de alto impacto (HIPS) através da incorporação de borracha termoplástica tipo estireno-butadieno-estireno (SBS). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 186–192, 2012.

RIEDEWALD, F. et al. Economic assessment of a 40,000 t/y mixed plastic waste pyrolysis plant using direct heat treatment with molten metal: A case study of a plant located in

Belgium. *Waste Management*, v. 120, p. 698–707, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.039.

SAFDAR, Muhammad Z.; ABASS, Faheem. A review on plastic pyrolysis. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Muhammad-Safdar-49/publication/369538666_A_REVIEW_ON_PLASTIC_PYROLYSIS/links/6420892492cfd54f842fd78f/A-REVIEW-ON-PLASTIC-PYROLYSIS.pdf. Acesso em: 12 de junho de 2025.

SAIOTE, Ricardo. Estudo da pirólise catalítica de resíduos plásticos. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10451/9062>. Acesso em: 12 de maio de 2025.

SANTOS, Luciene da S.; SILVA, Antonio H. Monteiro da F. T. da; PACHECO, Elen B. A. V.; SILVA, Ana L. N. da. Estudo do efeito da adição de PP reciclado nas propriedades mecânicas e de escoamento de misturas de PP/EPDM. *Polímeros*, v. 23, n. 3, p. 389–394, 2013. DOI: 10.4322/polimeros.2013.083.

SAXENA, Saumitra. Pyrolysis and beyond: Sustainable valorization of plastic waste. *Applications in Energy and Combustion Science*, v. 21, p. 100311, 2025. ISSN 2666-352X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666352X24000669>. Acesso em: 16 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2024.100311>.

SCIDAILY. The most promising path to sustainable bio-oil production. *ScienceDaily*, 6 fev. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedaily.com/releases/2013/02/130206162229.htm>. Acesso em: 24 de maio de 2025.

SHAH, H. H. et al. A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers in Chemistry*, Lausanne, v. 10, art. 960894, fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>.

SHAN, Chaoxia; PANDYASWARGO, Andante Hadi; ONODA, Hiroshi. Environmental impact of plastic recycling in terms of energy consumption: a comparison of Japan's mechanical and chemical recycling technologies. *Energies*, v. 16, n. 5, p. 2199, 2023. DOI: 10.3390/en16052199.

SILVA, Leandro Moura da; PINTO, Francisco Roberto; GERHARD, Felipe; SILVA, Felipe Roberto. Impulsionadores e Restritores à Participação na Coleta Seletiva Residencial de Resíduos Sólidos Urbanos. *Administração Pública e Gestão Social*, v. 16, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/3515/351576210007/html/>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M.-A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química Nova*, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 84–94, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/>. Acesso em: 1 de maio de 2025.

VIEIRA, João Paulo. *Processos hidrotérmicos para conversão de biomassa: liquefação hidrotérmica e hidrólise*. Santa Maria, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria.

WEBSTER, Brandon; GANESH, Priya Ravi; NAIR, Deepti Krishnan. Co-utilization of coal and mixed scrap plastics via syngas production with carbon capture, utilization, and storage (CCUS). Preparado para: United States Department of Energy Office of Fossil Energy and Carbon Management e United States Energy Association. Sub-Agreement: USEA/DOE-2021-633-01. Washington, DC: United States Energy Association, 2021. Disponível em: https://usea.org/sites/default/files/event-/USEA_Battelle%20Plastics_Report_FINAL.pdf. Acesso em: 24 de junho de 2025.

WU, Jiayang; RADHAKRISHNAN, Harish; OI, Collin H.; OLAFASAKIN, Olumide; BROWN, Jessica; NELSON, Kevin; BROWN, Robert; BAI, Xianglan; HERMANS, Ive; WRIGHT, Mark MBA; AGUIRRE-VILLEGAS, Horacio A.; HUBER, George W. Pyrolysis of plastic waste: recycling hard-to-recycle plastics. [S.l.]: CUWP – Chemical Upcycling of Waste Plastics, 2023. Disponível em: https://cuwp.org/wp-content/uploads/2024/01/2_PYROLYSIS_112023.pdf. Acesso em: 27 de maio de 2025.

XIA, A. et al. Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: A Comprehensive Review. *Journal of Chemistry*, Hindawi, 2023. DOI: 10.1155/2023/1821129.

ZAMAN, Muhammad; XU, Han; BI, Zhihao; PATEL, Bilal; SAMEC, Niko; VUJANOVIC, Milan; GUO, Yang. Biofuel production boosted by plastic waste: co-hydrothermal liquefaction of plastic and biomass toward sustainable energy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 64, p. 1-?, 2025. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c03663.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. A reciclagem de plásticos. In: *RESÍDUOS PLÁSTICOS E RECICLAGEM: aspectos gerais e tecnologia*. São Carlos: EdUFSCar, 1. ed., 2009. Cap. 3, p. 84–136. ISBN 978-85-7600-020-4.

ZANONI, P.R.; SCHAITZA, E. G. Processos termoquímicos. *Revista Opiniões*, n. 49, p. 22–23, set./nov. 2017. Disponível em: <https://www.revistaopinioes.com.br/49/>. Acesso em: 24 de junho 2025.