



## AVALIAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE PIRÓLISE CATALÍTICA DO POLIPROPILENO E POLIETILENO

Danilo L.S. Lima<sup>1\*</sup>; Roger M. O. Gomes<sup>1</sup>; Luiz A. M. Pontes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, R. Prof. Aristίδes Novis 2, Salvador, BA 40210-630, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Brasileiro de Tecnologia e Regulação, R. Dr. José Peroba 349, Salvador, BA 41770-235, Brasil.

\* E-mail: danilolins97@gmail.com

**Palavras-Chave:** Resíduos plásticos, reciclagem química, sustentabilidade.

### Introdução

O avanço industrial da sociedade moderna trouxe consigo o aumento significativo da produção e utilização de plásticos. Trata-se de um material extremamente versátil, permitindo que seja utilizado para as mais diversas finalidades, como na indústria automobilística, eletrônica e, especialmente, em embalagens (Chen; Yan, 2020). Em 2022, cerca de 400 milhões de toneladas de plástico foram produzidas, e estima-se que o número pode ultrapassar 1321 milhões de toneladas em 2060 (OECD, 2022; Plastics Europe, 2023).

Entretanto, a vasta produção de plásticos tem gerado grandes volumes de resíduos, contribuindo para a poluição ainda sem controle do meio ambiente em nível terrestre e marítimo (Pilapitiya; Ratnayake, 2024). Em 2022, apenas 9% dos resíduos plásticos no mundo foram reciclados, enquanto 50% foram dispostos em aterros sanitários e 22% descartados de forma indevida (OECD, 2023). Sua crescente produção em grandes quantidades, e o mau gerenciamento de seus resíduos, torna o plástico um dos grandes desafios ambientais da sociedade (Kwon et al., 2023). Este cenário evidencia a urgência de desenvolver soluções tecnológicas mais eficientes para o manejo sustentável dos resíduos plásticos.

Nesse contexto, a reciclagem química é uma alternativa promissora, aplicada aos resíduos mistos e contaminados. A reciclagem mecânica, mais comumente utilizada, é menos eficiente em determinadas condições (Zhang et al., 2023). Entre as tecnologias de reciclagem química, a pirólise se destaca, pois permite a decomposição térmica de plásticos em um ambiente sem oxigênio, gerando produtos como combustíveis e químicos de maior valor agregado (Tan et al., 2023). O processo de pirólise térmica é flexível, uma vez que seus resultados podem ser ajustados de acordo com parâmetros operacionais como tipo de reator, temperatura, pressão e o uso de catalisadores (Solis; Silveira, 2020).

O uso de catalisadores, em particular, desempenha um papel crucial no processo de pirólise, pois influencia diretamente a composição dos produtos obtidos. A escolha do catalisador adequado pode otimizar o rendimento de produtos específicos, como gases, líquidos ou sólidos (Xayachak et al., 2022). A pirólise catalítica é, portanto, uma tecnologia com grande potencial para melhorar o tratamento de resíduos plásticos, especialmente em relação a plásticos amplamente usados como o PP e o PE (Qureshi et al., 2020).

Este trabalho visa realizar uma análise crítica das tecnologias de pirólise catalítica aplicadas ao PP e PE, com foco no uso de catalisadores e nos rendimentos dos produtos obtidos. Através de uma prospecção tecnológica de artigos científicos, busca-se avaliar as tecnologias mais apropriadas e identificar as melhores práticas e resultados experimentais.

## Material e Métodos

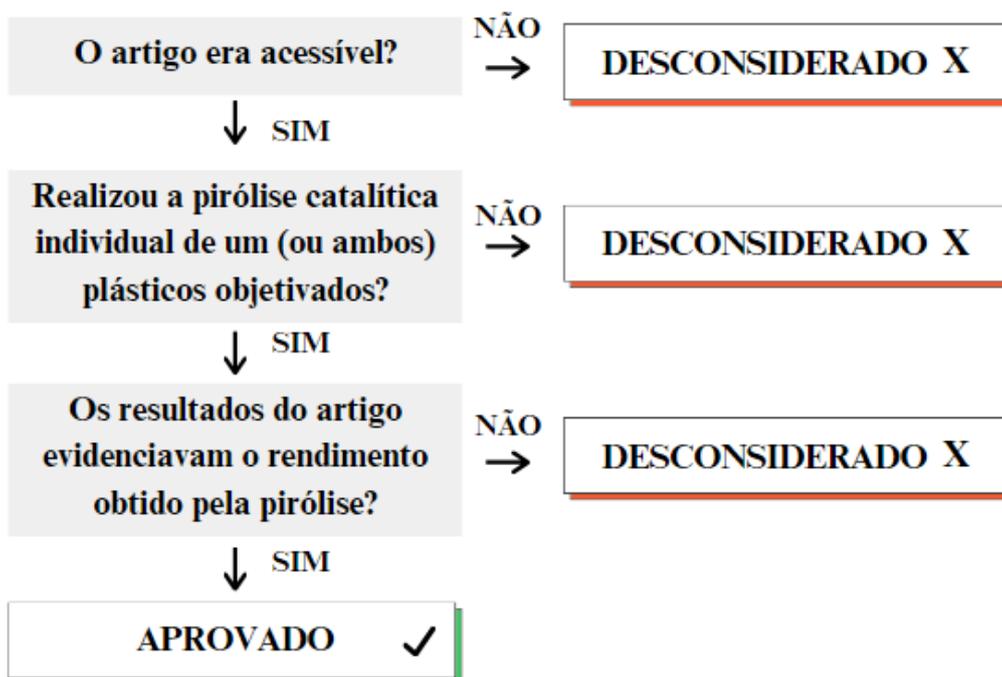
Os procedimentos adotados para a elaboração deste estudo foram conduzidos em quatro etapas principais: prospecção tecnológica e avaliação dos artigos selecionados; organização dos dados obtidos; seleção dos melhores rendimentos e análise crítica dos resultados. Cada uma dessas etapas foi estruturada para garantir uma abordagem criteriosa e eficiente da literatura disponível.

A prospecção tecnológica foi realizada utilizando a plataforma Scopus, um banco de dados de resumos e citações. A busca foi configurada para abranger artigos publicados entre os anos de 2019 e 2024, utilizando as seguintes palavras-chave nos títulos, resumos e nas palavras-chave dos artigos: "plastic waste" AND "pyrolysis" AND "catalysis" AND "polypropylene" OR "PP" OR "polyethylene" OR "PE". A escolha desse intervalo de tempo visou captar o avanço das tecnologias mais recentes, permitindo uma análise atualizada e focada no desenvolvimento mais inovador.

Os artigos de revisão foram desconsiderados para garantir a relevância e adequação dos dados à temática deste estudo, priorizando aqueles com dados experimentais originais. A escolha por estudos experimentais reflete o objetivo central de avaliar os resultados práticos obtidos por meio da pirólise catalítica dos plásticos PP e PE, permitindo a comparação de rendimentos e uso de catalisadores.

Após a fase de prospecção, os artigos foram lidos e analisados com base na sequência lógica desenvolvida, avaliando se atendiam aos objetivos da pesquisa. Artigos que não se enquadraram nos critérios estabelecidos foram excluídos, conforme detalhado na Figura 1, que apresenta o fluxo metodológico utilizado para a triagem dos estudos.

Figura 1: Esquematização da metodologia para seleção dos artigos.



A organização dos dados extraídos dos artigos selecionados foi feita em uma planilha eletrônica, utilizando o software Excel, de forma a facilitar a categorização dos estudos. As variáveis de interesse analisadas incluíram: tipo de plástico estudado (PP ou PE), tipo de

catalisador empregado, produto obtido a partir da pirólise e o rendimento dos processos reportados.

Por fim, os melhores resultados em termos de rendimento e eficiência para cada combinação de plástico e catalisador foram identificados. Estes resultados serviram de base para a análise crítica e discussão ao longo deste estudo, permitindo a identificação das tecnologias mais promissoras no contexto da pirólise catalítica de termoplásticos.

## Resultados e Discussão

A prospecção tecnológica revelou um crescente interesse global na pesquisa sobre pirólise catalítica de plásticos. Ao todo, 121 documentos foram identificados com base nas palavras-chave selecionadas, sendo que 91 artigos foram publicados entre 2019 e 2024, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Prospecção tecnológica no Scopus

Palavras-chave							Nº de artigos entre 2019-2024
"plastic waste"	pyrolysis	catalysis	polypropylene	PP	polyethylene	PE	
x							17.999
x	x						1.851
x		x					447
x	x	x					179
x	x	x	x	x			36
x	x	x			x	x	78
x	x	x	x	x	x	x	91

Verificou-se um aumento significativo no número de publicações ao longo desse período, com um crescimento acelerado a partir de 2019 e um pico em 2024, ano que já contabiliza 21 publicações, mesmo em andamento. Isso demonstra o interesse crescente na reciclagem química como uma solução viável para o problema dos resíduos plásticos. Os países que mais contribuíram com estudos sobre pirólise catalítica incluem a China, com 48 artigos, Estados Unidos (21) e Índia e Reino Unido, ambos com 13 artigos. A predominância da Ásia, como polo de pesquisa reflete os grandes esforços dessas nações para enfrentar o acúmulo de resíduos plásticos e desenvolver soluções tecnológicas para sua reciclagem. O Brasil, por outro lado, com apenas 3 publicações no período analisado, apresenta um desempenho discreto, indicando a necessidade de maior investimento em pesquisa e desenvolvimento nessa área. Embora, empresas como a Braskem, estejam investindo em aumentar sua capacidade de reciclagem de plásticos no Brasil, com a construção de plantas nos próximos anos (Braskem, 2022).

A partir da análise dos 91 artigos selecionados, foi possível identificar importantes tendências tecnológicas e experimentais, além dos melhores rendimentos alcançados nos experimentos de pirólise catalítica. A maioria dos estudos se concentrou na otimização de variáveis experimentais, como o tipo de catalisador, a temperatura de reação e a pressão, buscando maximizar a produção de frações líquidas ou gasosas. Após a aplicação da sequência lógica, 42 artigos foram aceitos para a análise final, permitindo a categorização dos resultados com base no tipo de produto desejado. A análise da pirólise catalítica de resíduos de PE destaca uma ampla variedade de produtos que podem ser obtidos a partir das diferentes frações resultantes do processo como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Principais produtos através de resíduos de PE

Produtos	Artigos	Rendimento	Catalisador
Combustíveis	11	56%	Zeólita HY
Óleo de pirólise	4	80%	WCE
Olefinas	1	48,54%	MCM-41
Aromáticos	7	50%	HY/MCM-41

Na produção de combustíveis líquidos, o PE é quebrado em frações mais leves, como nafta, querosene e diesel, facilitado principalmente pelo uso de catalisadores ácidos, como a zeólita HY. A zeólita possui uma estrutura porosa e acidez que promove a quebra das longas cadeias poliméricas do PE, gerando uma variedade de hidrocarbonetos leves. Em estudos recentes, o rendimento de combustíveis a partir de resíduos de PE atingiu até 56%, com o catalisador HY, demonstrando sua alta eficiência (Ding et al., 2019). A produção de óleo de pirólise, que apresenta rendimentos de até 80% em alguns estudos, utiliza catalisadores como o WCE, que desempenha um papel importante na maximização da fração líquida durante a decomposição térmica do PE (Mohamad Dzol et al., 2022).

Além dos combustíveis líquidos e do óleo de pirólise, a produção de olefinas a partir do PE também é uma área de interesse significativo. O uso de catalisadores como o MCM-41, um material mesoporoso que promove uma alta seletividade na quebra das cadeias de PE, resultou em rendimentos de até 48,54% (Xu et al., 2023). Na produção de hidrocarbonetos aromáticos, como benzeno, tolueno e xileno, a zeólita HY com MCM-41 apresentou melhores resultados. A estrutura microporosa e a acidez característica desse catalisador favorece a ciclização e a aromatização dos fragmentos de PE, resultando em altos rendimentos de compostos aromáticos, com até 50% de eficiência relatada em alguns estudos (Peng et al., 2023). Em contrapartida, a Tabela 3 mostra alguns dos artigos que analisaram a pirólise de PP e seus produtos.

Tabela 3: Principais produtos através de resíduos de PP

Produtos	Artigos	Rendimento	Catalisador
Combustíveis	3	81%	ZnO
Aromáticos	2	27,59%	ZSM-5 (SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

Entre os produtos de maior interesse, os combustíveis apresentam um rendimento notável de 81%, obtidos com o uso do catalisador ZnO. Este catalisador facilita a decomposição térmica dos polímeros e a quebra eficiente das ligações químicas, maximizando a produção de hidrocarbonetos líquidos (Jana et al., 2023). Já o ZSM-5, utilizado com uma proporção adequada de sílica-alumina (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), é altamente eficaz na produção de compostos aromáticos a partir de resíduos de PP. Ele promove reações de desidrogenação e ciclização, gerando um rendimento de 27,59% de compostos aromáticos, sendo uma escolha estratégica para a indústria petroquímica na produção de produtos de alto valor agregado (Zhang et al., 2024). A Tabela 4 a seguir detalha a produção de hidrogênio e nanotubos de carbono a partir de diferentes tipos de plásticos, além dos principais catalisadores utilizados em cada processo.

Tabela 4: Produção de hidrogênio e nanotubos

Plástico	Produtos	Artigos	Principais Catalisadores	
PE	Hidrogênio	9	Ni/SiO <sub>2</sub>	Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Nanotubos de carbono	8	NiO/CeO <sub>2</sub>	Fe/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
PP	Hidrogênio	7	NiCo/MnO	Fe-Co/HY
	Nanotubos de carbono	6	Ni/ZSM-5	NiFe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Os catalisadores de níquel, como Ni/SiO<sub>2</sub> e Ni/ZSM-5, são particularmente eficazes na reforma a vapor, uma reação essencial para a produção de hidrogênio. O níquel promove a desidrogenação e a reforma das moléculas de hidrocarbonetos, maximizando a geração de hidrogênio na fração gasosa (Fu et al., 2024). Já os catalisadores de ferro, como Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe-Co/HY, são usados para a síntese de nanotubos de carbono a partir da fração sólida. Eles facilitam a nucleação e o crescimento dos nanotubos, proporcionando materiais com excelente desempenho mecânico e elétrico (Veksha et al., 2022).

A análise das tecnologias de pirólise catalítica e dos catalisadores associados demonstra um aumento significativo no interesse acadêmico, refletido pelo crescente número de estudos e avanços científicos recentes. Esse progresso acadêmico está fortemente ligado ao crescente interesse econômico e industrial em expandir a aplicação dessas tecnologias em escala comercial. Economicamente, a pirólise catalítica se destaca como uma solução promissora na conversão de resíduos em produtos de alto valor agregado, contribuindo para uma economia circular e criando novas oportunidades de mercado (PENG et al., 2022). Essa tecnologia também ajuda na redução da quantidade de resíduos plásticos dispostos em aterros ou no meio ambiente, facilitando a transição para uma economia de baixo carbono e promovendo uma abordagem mais sustentável e eficiente para a gestão de resíduos plásticos (Dai et al., 2022).

No setor industrial, investimentos na reciclagem química estão aumentando, com um foco crescente na pirólise. Embora o volume global de resíduos plásticos reciclados quimicamente ainda seja pequeno, representando menos de 1 milhão de toneladas na Europa, as perspectivas são otimistas (Plastics Europe, 2023). Projeções indicam que a capacidade de reciclagem triplicará nos próximos cinco anos, apoiada por investimentos superiores a 8 bilhões de euros (Plastics Europe, 2024). Adicionalmente, o mercado de óleo de pirólise, gerado a partir de resíduos plásticos, está em rápida expansão. Em 2024, o mercado atingiu 269 milhões de dólares, e as previsões indicam que pode ultrapassar 1 bilhão de dólares até 2034, com uma CAGR de 14,1% (Fact MR., 2024). Esse crescimento ressalta a importância dos resíduos de PE e PP, predominantes na produção de óleo de pirólise e centrais no desenvolvimento de novas tecnologias.

## Conclusões

Os resíduos plásticos constituem um problema ambiental de grande relevância para a sociedade, tornando relevante o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficazes para seu tratamento. A pirólise catalítica vem sendo apresentada como uma alternativa promissora para reciclagem química, com crescente interesse acadêmico, e embora ainda esteja no início de sua maturidade tecnológica, tem resultados relevantes do ponto de vista econômico, com potencial de crescimento futuro. Verificou-se que os resíduos de PE são utilizados para produção de combustíveis, compostos aromáticos, hidrogênio e nanotubos de carbono, refletindo a versatilidade das frações líquida, gasosa e sólida geradas pela pirólise desse polímero. Já no caso do PP, a pesquisa se concentra na produção de hidrogênio e nanotubos, com foco na criação de materiais leves e fontes de energia limpa de alto valor agregado. A importância dos catalisadores no processo de pirólise é evidente, com zeólitas e catalisadores

metálicos desempenhando papéis fundamentais na otimização da produção de diferentes produtos. Assim, a pirólise catalítica se destaca como uma tecnologia chave para converter resíduos plásticos em produtos valiosos, fomentando uma economia circular e sustentável. O crescente interesse industrial e econômico por essa tecnologia, impulsionado pela demanda por soluções ambientalmente sustentáveis, está gerando investimentos que prometem expandir sua viabilidade comercial. Contudo, ainda há um grande potencial a ser explorado, especialmente em países como o Brasil, que precisam intensificar suas contribuições tanto na pesquisa acadêmica quanto na aplicação industrial dessas soluções.

### Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições CAPES e CNPq pelo financiamento à pesquisa.

### Referências

- BRASKEM. Com aporte de R\$ 130 mi, Braskem fecha o ciclo da economia circular. 2022. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/com-aporte-de-r-130-mi-braskem-fecha-o-ciclo-da-economia-circular>. Acesso em 10 de Setembro de 2024
- CHEN, X.; YAN, N. A brief overview of renewable plastics. *Materials Today Sustainability*, v. 7–8, p. 100031, 2020.
- DAI, L. ZHOU, N. LV, Y.; CHENG, Y.; WANG, Y.; LIU, Y.; COBB, K.; CHEN, P.; LEI, H.; RUAN, R. Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 93, n. September 2021, p. 101021, 2022.
- DING, K.; LIU, S.; HUANG, Y.; LIU, S.; ZHOU, N.; PENG, P.; WANG, Y.; CHEN, P.; RUAN, R. Catalytic microwave-assisted pyrolysis of plastic waste over NiO and HY for gasoline-range hydrocarbons production. *Energy Conversion and Management*, v. 196, n. April, p. 1316–1325, 2019.
- FACT MR. Plastic Waste Pyrolysis Oil Market. 2024. Disponível em: <https://www.factmr.com/report/plastic-waste-pyrolysis-oil-market>. Acesso em 10 de Setembro de 2024
- FU, W.; CHENG, Y. W.; XU, D.; ZHANG, Y.; WANG, C. H. Reaction synergy of bimetallic catalysts on ZSM-5 support in tailoring plastic pyrolysis for hydrogen and value-added product production. *Applied Energy*, v. 372, n. July, p. 123853, 2024.
- JANA, S. K. PATTANAYAK, S.; BHAUSAHEB, M. S.; RUIDAS, B. C.; PAL, D. B. Pyrolysis of Waste Plastic To Fuel Conversion for Utilization in Internal Combustion Engine. *Chemistry and Chemical Technology*, v. 17, n. 2, p. 438–449, 2023.
- KWON, G.; CHO, D. W.; PARK, J.; BHATNAGAR, A.; SONG, H. A review of plastic pollution and their treatment technology: A circular economy platform by thermochemical pathway. *Chemical Engineering Journal*, v. 464, p. 142771, 2023.
- MOHAMAD DZOL, M. A. A.; BALASUNDRAM, V.; SHAMELI, K.; IBRAHIM, N.; MANAN, Z. A.; ISHA, R. Catalytic pyrolysis of high-density polyethylene over nickel-waste chicken eggshell/HZSM-5. *Journal of Environmental Management*, v. 324, n. October, p. 116392, 2022..
- OECD. *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. Paris, 2022.
- OECD. *Towards Eliminating Plastic Pollution by 2040 A Policy Scenario Analysis*. November, 2023. Disponível em: <http://www.oecd.org/termsandconditions>. Acesso em 10 de Setembro de 2024
- PENG, Y.; WANG, Y.; KE, L.; DAI, L.; WU, Q.; COBB, K.; ZENG, Y.; ZOU, R.; LIU, Y.; RUAN, R. A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products. *Energy Conversion and Management*, v. 254, n. December 2021, p. 115243, 2022.



PENG, Y.; WANG, X.; FAN, L.; ZHANG, Q.; CUI, X.; TIAN, X.; WU, QIUHAO; COBB, K.; RUAN, R. TU, H.; YANG, J.; WANG, Y. Conversion of low-density polyethylene into monocyclic aromatic hydrocarbons through continuous microwave pyrolysis with ex-situ dual-catalyst beds. *Journal of Cleaner Production*, v. 418, n. June, p. 138039, 2023.

PILAPITIYA, P. G. C. N. T. P.; RATNAYAKE, A. S. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, v. 11, n. August 2023, p. 100220, 2024.

PLASTICS EUROPE. *Plastics - the fast facts 2023*. 2023. Acesso em 10 de Setembro de 2024

PLASTICS EUROPE. Chemical recycling. 2024. Disponível em: <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/chemical-recycling/>. Acesso em 10 de Setembro de 2024

QURESHI, M. S.; OASMAA, A.; PIHKOLA, H.; DEVIATKIN, I.; TENHUNEN, A.; MANNILA, J.; MINKKINEN, H.; POHJAKALLIO, M.; LAINE-YLIJOKI, J.. Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 152, n. March, 2020.

SOLIS, M.; SILVEIRA, S. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, v. 105, p. 128–138, 2020.

TAN, K. Q.; AHMAD, M. A.; OH, W. D.; LOW, S. C. Valorization of hazardous plastic wastes into value-added resources by catalytic pyrolysis-gasification: A review of techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 182, n. July 2022, p. 113346, 2023.

VEKSHA, A.; AMRAD, M. Z. B. M.; CHEN, W. Q.; MOHAMED, D. K. B.; TIWARI, S. B.; LIM, T. T.; LISAK, G. Tailoring Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst structure and activity via hydrothermal synthesis for carbon nanotubes and hydrogen production from polyolefin plastics. *Chemosphere*, v. 297, n. February, p. 134148, 2022.

XAYACHAK, T.; HAQUE, N.; PARTHASARATHY, R.; KING, S.; EMAMI, N.; LAU, D.; PRAMANIK, B. K. Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 6, p. 108865, 2022.

XU, J.; TIAN, X.; HUANG, W.; KE, L.; FAN, L.; ZHANG, Q.; CUI, X.; WU, Q.; ZENG, Y.; COBB, K.; LIU, Y.; RUAN, R.; WANG, Y. Production of C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub> olefins by catalytic pyrolysis of low-density polyethylene with MCM-41 in CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>. *Science of the Total Environment*, v. 899, n. July, p. 165597, 2023.

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

ZHANG, Y.; ZHAO, J.; ZHANG, L.; CHEN, Y.; MA, W. Tandem pyrolysis catalytic reforming of plastic waste to high-yield monocyclic aromatics by one-step microwave catalysis. *Energy Conversion and Management*, v. 312, n. February, p. 118571, 2024.