CRAQUEAMENTO DO POLIETILENO: CONVERSÃO TERMOQUÍMICA E ECONOMIA CIRCULAR

Autores: Matheus Augusto Domingos Santos, Giovanna Pereira Lima, Thayná Aleixo de Carvalho, Kemer Zuri Neves, Matheus Luiz Moreira do Amaral

Colégio UNIVAP - Unidade Centro, Rua Paraibuna, 75, Jardim São Dimas - 12245-020 - São José dos Campos-SP, Brasil, santosmatheusad@gmail.com, giovanna.lima2009@yahoo.com, aleixo0@yahoo.com, kemerzuri@gmail.com, matheusluizmoreiraa@gmail.com

Resumo

A crescente utilização de materiais plásticos tem contribuído para o aumento da geração de resíduos e dos impactos relacionados à sua disposição no ambiente. Este estudo teve como objetivo analisar o potencial do craqueamento do polietileno (PE) como alternativa para a valorização de resíduos plásticos, considerando sua aplicação na reciclagem química e sua relação com a Química Verde e a economia circular. A metodologia consistiu em uma revisão bibliográfica sobre as características estruturais e o comportamento termoquímico do polietileno, bem como sobre os processos de pirólise e craqueamento e os principais parâmetros que influenciam a conversão do polímero. Foram considerados fatores como temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e utilização de catalisadores, que podem interferir na distribuição e nas características dos produtos obtidos. Os resultados da análise bibliográfica indicam que o craqueamento do polietileno apresenta potencial para sua conversão em diferentes frações de hidrocarbonetos de interesse energético e industrial, sendo sua eficiência influenciada pelas condições operacionais e pelo uso de catalisadores. Conclui-se que o processo pode contribuir para o reaproveitamento de resíduos plásticos e sua reinserção em cadeias produtivas, favorecendo a valorização de materiais, a redução do uso de matérias-primas virgens e o desenvolvimento de estratégias alinhadas à Química Verde e à economia circular.

Palavras-chave: Polietileno. Craqueamento. Reciclagem química. Química Verde. Economia circular.

Área do Conhecimento: Técnico em Química.

Introdução

Os materiais plásticos são constituídos principalmente por polímeros de elevada massa molecular e apresentam propriedades como leveza, resistência química, durabilidade e facilidade de processamento, características que contribuíram para sua ampla utilização em diferentes setores industriais. Entre os principais polímeros empregados atualmente destacam-se o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o policloreto de vinila (PVC), o poliestireno (PS) e o polietileno tereftalato (PET) (BERWANGER, 2021; RAMIREZ; OLIVEIRA, 2022; PAULA et al., 2025). A expansão da utilização desses materiais está relacionada ao desenvolvimento da indústria petroquímica e ao aprimoramento dos processos de polimerização, que possibilitaram sua produção em larga escala (COSTA, M., 2025). Apesar da importância dos materiais plásticos para a sociedade e para a indústria, o aumento da produção e do consumo também contribuiu para a geração de grandes volumes de resíduos. A elevada resistência desses materiais à degradação favorece seu acúmulo em aterros e sua permanência no ambiente, tornando o gerenciamento dos resíduos plásticos um importante desafio ambiental. Além disso, a baixa eficiência das taxas de reciclagem evidencia a necessidade de ampliar as estratégias de reaproveitamento e valorização desses materiais (PRUDÊNCIO, 2021; RAMIREZ; OLIVEIRA, 2022), visto que, conforme ilustrado na Figura 1, apenas 7% do polietileno é reciclado, enquanto os 93% restantes correspondem ao montante que não passa por reciclagem e acaba descartado no ambiente. Nesse contexto, a reciclagem mecânica constitui uma das principais alternativas para o reaproveitamento dos resíduos plásticos. Entretanto, essa rota apresenta limitações relacionadas principalmente à presença de contaminantes, aditivos e diferentes tipos de polímeros nas correntes de resíduos. Esses componentes podem comprometer as propriedades mecânicas do material reciclado e restringir suas aplicações, especialmente em resíduos pós-consumo de polietileno de alta densidade (PEAD) (PRUDÊNCIO, 2021). Dessa forma, a necessidade de tratar resíduos heterogêneos e degradados impulsiona o desenvolvimento de tecnologias alternativas de valorização.

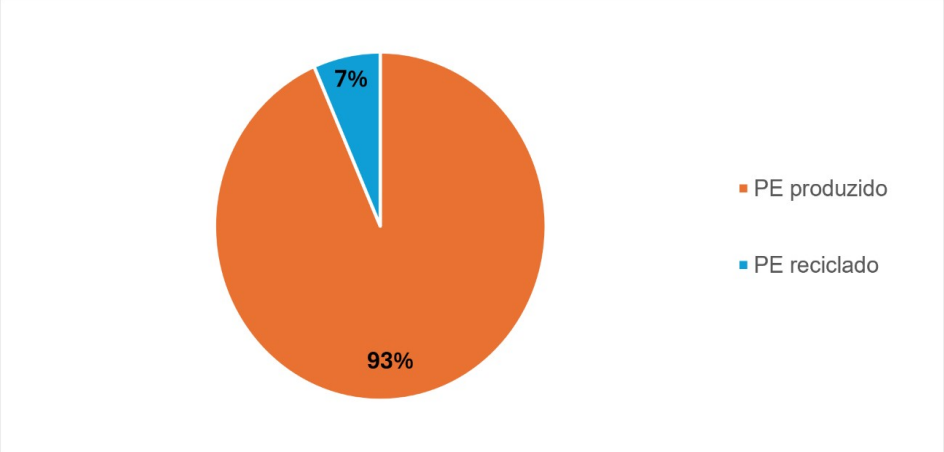
Entre essas alternativas destaca-se a reciclagem química, que possibilita a conversão das cadeias poliméricas em produtos de maior valor agregado. Processos como a gaseificação e a pirólise promovem a transformação dos resíduos por meio de reações termoquímicas, permitindo a obtenção de combustíveis e outros insumos químicos. A pirólise, em particular, apresenta potencial para o tratamento de poliolefinas, sendo sua eficiência influenciada por fatores como temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e tipo de reator (RAMIREZ; OLIVEIRA, 2022).

Nesse cenário, os princípios da Química Verde podem contribuir para a busca por processos de transformação química que priorizem a redução de impactos ambientais, o aproveitamento eficiente dos recursos e a diminuição da geração de resíduos. Quando associados à perspectiva da economia circular, esses princípios favorecem o desenvolvimento de alternativas capazes de prolongar o aproveitamento dos materiais e reduzir a necessidade de utilização de matérias-primas virgens. Assim, a valorização termoquímica de resíduos plásticos pode ser analisada não apenas quanto à capacidade de conversão do material, mas também em relação à eficiência energética e aos impactos associados ao processo.

O polietileno apresenta especial interesse nesse contexto devido à sua estrutura molecular e ao seu potencial de conversão por processos de craqueamento térmico e catalítico. Durante a pirólise, a degradação das cadeias poliméricas pode resultar na formação de diferentes frações de hidrocarbonetos, cuja distribuição depende das condições operacionais e da utilização ou não de catalisadores. Estudos indicam que o emprego de sistemas catalíticos pode aumentar a seletividade dos produtos e favorecer a obtenção de olefinas e frações líquidas de interesse energético e industrial (BERWANGER, 2021; CARMO; ARAÚJO; KHAN, 2025).

Diante desse cenário, o estudo do craqueamento do polietileno apresenta relevância para o desenvolvimento de alternativas de valorização de resíduos plásticos e para a transição de um modelo linear de produção e descarte para uma abordagem baseada na economia circular. A conversão termoquímica do PE pode contribuir para o aproveitamento de resíduos que apresentam limitações para a reciclagem mecânica, possibilitando sua transformação em produtos com potencial de utilização como combustíveis ou insumos para a cadeia petroquímica (CARMO; ARAÚJO; KHAN, 2025; COSTA, G., 2025). Dessa forma, a investigação do processo sob a perspectiva da Química Verde e da economia circular pode contribuir para a avaliação de alternativas mais eficientes e ambientalmente adequadas para o reaproveitamento de resíduos de polietileno.

Figura 1 - Quantidade de PE produzido.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

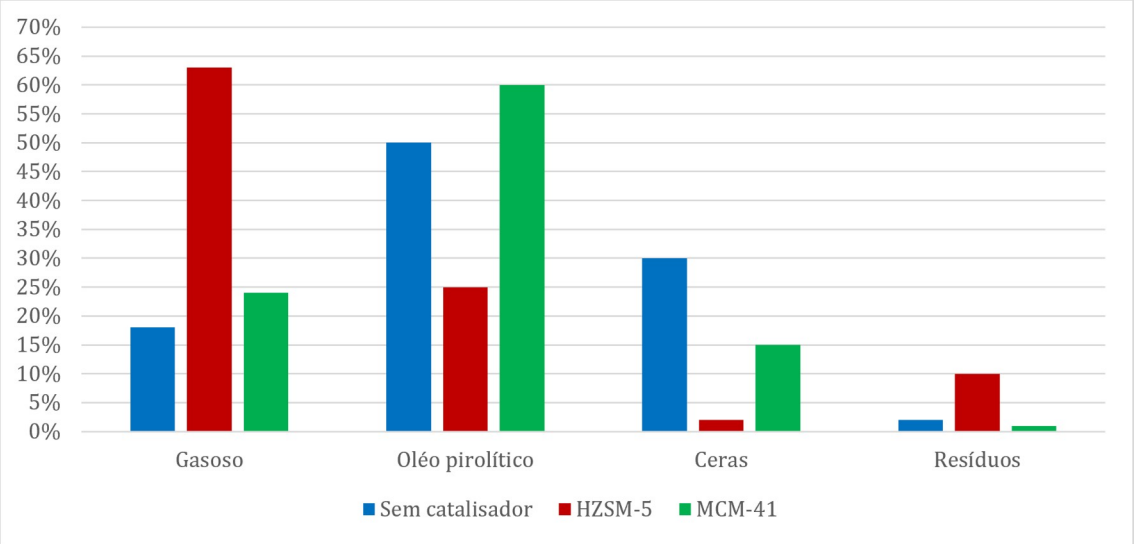
Metodologia

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa descritiva e exploratória, estruturada sob a forma de revisão bibliográfica sendo utilizados os artigos e trabalhos dos anos de 2021-2025. Para garantir a replicabilidade do estudo e a seleção rigorosa das informações, o levantamento de dados foi conduzido em bases acadêmicas utilizando cruzamentos de descritores específicos, tais como: "craqueamento do polietileno", "pirólise catalítica", "reciclagem química de plásticos" e "valorização energética". O critério de inclusão abrangeu artigos, dissertações e trabalhos de conclusão de curso recentes que detalhassem parâmetros operacionais e análises termoquímicas aplicadas às poliolefinas (PEAD e PEBD). Trabalhos restritos exclusivamente à reciclagem mecânica, sem correlação com rotas de conversão energética, foram excluídos da etapa de extração de dados experimentais.
A análise do material selecionado foi estruturada para avaliar o "experimento" de conversão térmica a partir de três eixos principais. O primeiro eixo consistiu no mapeamento das condições operacionais dos processos de pirólise e gaseificação, extraindo dados sobre faixas de temperatura (com foco entre 300 °C e 850 °C), taxas de aquecimento e tempo de residência. O segundo eixo analisou a influência tecnológica da infraestrutura, comparando o desempenho de reatores de leito fluidizado, rosca sem-fim e reatores autossustentáveis, além de avaliar a inserção de catalisadores zeolíticos (como a HZSM-5) ou estruturas mesoporosas (como o MCM-41) na alteração da cinética de degradação e na seletividade dos subprodutos.
Por fim, o terceiro eixo dedicou-se a compilar as técnicas de caracterização físico-química utilizadas para atestar a qualidade do processo. Foram sistematizados os resultados obtidos via análise termogravimétrica (TGA) para avaliar a estabilidade e as faixas de perda de massa do polímero, além das análises elementar, imediata (teor de voláteis e cinzas) e a determinação do poder calorífico inferior (PCI). Essa estruturação metodológica permitiu correlacionar diretamente as variáveis de operação na entrada do reator com o rendimento e a densidade energética das frações líquidas e gasosas obtidas no final do processo, embasando a discussão técnica.

Resultados

A revisão bibliográfica identificou que a utilização de catalisadores modifica a distribuição das frações obtidas no craqueamento do polietileno (PE). No processo sem catalisador, foram obtidos 18% de produtos gasosos, 50% de óleo pirolítico, 30% de ceras e 2% de resíduos. Com HZSM-5, as frações corresponderam a 63%, 25%, 2% e 10%, respectivamente. Para o MCM-41, foram obtidos 24% de produtos gasosos, 60% de óleo pirolítico, 15% de ceras e 1% de resíduos. Esses resultados evidenciam diferenças na distribuição dos produtos conforme o sistema catalítico empregado.
A HZSM-5 apresentou o maior percentual da fração gasosa e a menor formação de ceras, enquanto o MCM-41 apresentou o maior percentual de óleo pirolítico e o menor teor de resíduos. No processo sem catalisador, observou-se a maior proporção de ceras entre as condições analisadas.
Conforme os resultados apresentados na Figura 2, a revisão também identificou que temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e tipo de reator são variáveis relevantes para a conversão do PE e para a distribuição dos produtos. O craqueamento térmico de poliolefinas ocorre, de acordo com a literatura analisada, principalmente na faixa de 300 a 500 °C, podendo resultar na formação de hidrocarbonetos de diferentes massas moleculares, desde gases leves até ceras e frações líquidas de interesse (RAMIREZ; OLIVEIRA, 2022; BERWANGER, 2021).
A revisão também identificou que sistemas catalíticos baseados em zeólitas e argilas ativadas podem alterar a seletividade do processo, favorecendo a formação de olefinas leves e hidrocarbonetos na faixa de C5 a C20, associados a aplicações energéticas e petroquímicas (BERWANGER, 2021; CARMO; ARAÚJO; KHAN, 2025).

Figura 2 – Frações de hidrocarbonetos.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Discussão

Os resultados indicam que a utilização de catalisadores altera a distribuição dos produtos do craqueamento do PE, tornando a seletividade um fator importante para a escolha da rota de conversão. A HZSM-5 apresentou maior direcionamento para a fração gasosa, enquanto o MCM-41 favoreceu a formação de óleo pirolítico. Esse comportamento demonstra que o catalisador deve ser selecionado de acordo com o produto que se pretende obter, e não apenas pela conversão do polímero. A literatura também aponta que zeólitas podem modificar a distribuição dos hidrocarbonetos e favorecer a formação de olefinas leves (BERWANGER, 2021; CARMO; ARAÚJO; KHAN, 2025).

A formação de diferentes frações amplia as possibilidades de aproveitamento dos produtos. Hidrocarbonetos na faixa de C_5 a C_{20} são apontados na literatura como de interesse energético e petroquímico, embora sua utilização dependa da composição e das propriedades do produto obtido. Assim, o maior rendimento de determinada fração não é suficiente para definir sua aplicação, sendo necessária a caracterização dos produtos após o craqueamento.

As condições operacionais também são determinantes para o desempenho do processo. Temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e tipo de reator podem modificar a conversão e a distribuição dos hidrocarbonetos. Portanto, a otimização do craqueamento deve buscar equilibrar conversão, seletividade e rendimento da fração de interesse, em vez de considerar apenas a maior conversão do PE (RAMIREZ; OLIVEIRA, 2022; BERWANGER, 2021).

Dessa forma, o craqueamento apresenta potencial para a valorização química de resíduos de PE, especialmente pela possibilidade de direcionar sua conversão para produtos gasosos ou líquidos de interesse. Entretanto, a aplicação da tecnologia depende também da qualidade dos produtos, do consumo energético e das etapas necessárias para seu aproveitamento. Esses fatores devem ser considerados para que a reciclagem química contribua efetivamente para estratégias de economia circular (MALCOLM; PEACOCK; WINTON, 2024).

Conclusão

A presente pesquisa permitiu avaliar a viabilidade técnica e socioeconômica da conversão termoquímica do polietileno (PEAD e PEBD) via pirólise, evidenciando que a rota escolhida desempenha papel determinante na eficiência do processo e na qualidade dos produtos obtidos. A análise comparativa dos dados demonstrou que o craqueamento puramente térmico apresenta limitações operacionais devido à baixa seletividade e ao elevado rendimento de ceras pesadas, comercialmente pouco atrativas. Em contrapartida, o emprego de sistemas catalíticos — com destaque para a zeólita HZSM-5 e estruturas mesoporosas (USY e MCM-41) — provou ser indispensável para direcionar a reação, eliminando frações cerosas e maximizando a obtenção de gases leves (C_1 a C_4) e combustíveis líquidos de alto valor agregado nas faixas de gasolina (C_5 a C_{12}) e diesel (C_{12} a C_{20}).
Sob a perspectiva socioeconômica, conclui-se que o processo é plenamente viável. A obtenção de um óleo pirolítico com Poder Calorífico Inferior (PCI) entre 40 MJ/kg e 46 MJ/kg, equivalente ao desempenho dos combustíveis fósseis comerciais, confere ao produto elevado potencial de comercialização e substituição energética no mercado nacional, mesmo a partir de resíduos pós-consumo com presença de aditivos e contaminantes inorgânicos. Além do ganho econômico derivado da valoração de uma matéria-prima de baixo custo, a tecnologia responde de forma direta aos gargalos socioambientais urbanos, promovendo a logística reversa, o fortalecimento da economia circular, a redução da saturação de aterros sanitários e o alívio das emissões de carbono associadas ao descarte inadequado de plásticos. Portanto, a pirólise catalítica do polietileno consolida-se como uma alternativa estratégica, tecnicamente sustentável e socioeconomicamente atrativa para a transição energética e a gestão sustentável de resíduos sólidos no Brasil.

Referências

BERWANGER, L. Estudo da degradação termoquímica de poliolefinas para obtenção de insumos industriais. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

CARMO, A. H. M; ARAÚJO, M. L. T.; KHAN, A. Craqueamento catalítico e avanço dos processos de pirólise aplicados a poliolefinas. Revista Brasileira de Engenharia Química, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 45-58, 2025.

COSTA, M. R. Evolução e aplicação dos materiais poliméricos na indústria moderna. Revista de Polímeros e Tecnologia, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 45-58, 2025.

COSTA, G. P. Avaliação comparativa de rotas termoquímicas da reciclagem de plásticos no cenário brasileiro. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2025.

MALCOLM, R.; PEACOCK, J.; WINTON, T. Life cycle assessment and legal frameworks for plastic waste management. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 410, p. 1-5, 2024.

LPCM UFRJ. Análise Térmica. Laboratório de Processamentos e Caracterização de Materiais. Disponível em: https://lpcm.coppe.ufri.br/ servicos/caracterizacao-termica Acesso em: 18 ago. 2026.

PAULA, A. B. et al. Processos de polimerização e transformação de plásticos industriais. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2025.

PRUDÊNCIO, D. F. M. Impacto dos contaminantes inorgânicos na reciclagem mecânica e térmica do PEAD pós-consumo. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

RAMIREZ, C. S; OLIVEIRA, G. A. C. Avaliação comparativa entre as tecnologias químicas de gaseificação e pirólise aplicadas a resíduos plásticos. 2022. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.