

Brasília, DF / Outubro, 2024

Reciclagem química de plásticos

Silvio Vaz Júnior

Pesquisador, Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Introdução

Os materiais plásticos se tornaram uma das principais fontes poluidoras oriundas das cadeias de produção e consumo da sociedade moderna (National Geographic Brasil, 2024), demandando estratégias de reciclagem inteligentes que privilegiem o reuso e a reinserção nas cadeias produtivas. Assim, a renovabilidade é uma condição extremamente desejável nas tecnologias de reciclagem, pela qual um determinado material ou molécula, ou seja, precursor ou matéria-prima, pode ser utilizado de forma circular (Kühlborn et al., 2020), sem seu esgotamento.

A economia circular, uma estratégia econômica para alcançar a renovabilidade, é devida pelo Parlamento Europeu (European Parliament, 2024) como um modelo de produção e consumo, que envolve partilhar, alugar, reutilizar, reparar, reformar e reciclar materiais e produtos existentes durante o maior tempo possível. Dessa forma, o ciclo de vida dos produtos é prolongado. Na prática, significa reduzir ao mínimo o desperdício. Assim, quando um produto chega ao fim de sua vida útil, seus materiais são mantidos na economia sempre que possível. Eles podem ser usados repetidamente de forma produtiva, criando assim mais valor, de modo a envolver a criação de novas cadeias de valor baseadas na utilização de resíduos (Vaz Júnior, 2022).

A partir das afirmações acima, a estratégia de carbono renovável baseada na reutilização das fontes de carbono – como materiais plásticos – pode ser uma contribuição valiosa para repensar o modelo econômico estabelecido, a fim de promover a economia circular e a bioeconomia, porque considera como fontes industriais de matéria-prima carbonácea a biomassa, o dióxido de carbono e materiais recicláveis (Vaz Júnior, 2022).

Esta Circular Técnica trata de tecnologias para reciclagem química de materiais plásticos, como principais fontes de materiais carbonáceos renováveis, de modo a propiciar um reuso sustentável desses resíduos petroquímicos. Além disso, inclui estudo de caso para ilustrar as aplicações.

Materiais recicláveis

A fonte mais comum de carbono renovável é aquele material já utilizado em uma determinada cadeia de valor, como plásticos e pneus.

Considerando os materiais plásticos, principal fonte de materiais carbonáceos recicláveis, todos os anos são produzidas mais de 380 milhões de toneladas deles em todo o mundo. Apenas 16% dos resíduos plásticos são reciclados para produzir novos plásticos, enquanto 40% são enviados para aterros; 25%, para incineração e 19% são descartados de modo irregular (Latham, 2024).

Em relação ao polietileno tereftalato (PET) (Figura 1), suas características estão relacionadas à transparência e à resistência ao desgaste e à corrosão. Possui alta resistência e acabamento liso, o que explica sua ampla utilização em garrafas de água mineral, refrigerantes, sucos, óleos comestíveis, produtos farmacêuticos, etc. Esse material também possui baixa absorção de água e boa resistência a forças de tração – sua resistência é semelhante ao do filme de alumínio.



Figura 1. PET reciclável de uso doméstico.
Fonte: Aykut Erdogdu, www.shutterstock.com

Com a utilização em larga escala de garrafas PET, principalmente a partir da década de 1990, surgiu um grave problema ambiental: muitas dessas garrafas foram descartadas de forma incorreta e foram parar em terras, rios, esgotos, mares e florestas. Mas esse material pode levar até 800 anos para se decompor, daí a importância da sua coleta e reciclagem. Algumas pessoas, para se livrarem do

grosso das garrafas, podem pensar em queimar o material. Quando o PET é queimado, ele apresenta uma chama amarelada e pode explodir durante a queima. Mas, além de ser muito inflamável, o material libera na atmosfera compostos tóxicos (dioxinas e furanos) e gases como monóxido e dióxido de carbono, acetaldeído, benzoato de vinila e ácido benzoico, contribuindo para a poluição atmosférica (Sovová et al., 2008).

O plástico, em geral, é o poluente mais comumente encontrado nos oceanos – às vezes como microplásticos, um poluente emergente de preocupação ambiental (Vaz, 2018). Em alguns sistemas de correntes marinhas rotativas, a quantidade de plástico encontrada é tão grande que já se tornou parte do oceano. Além disso, os microplásticos – com partículas de tamanho inferior a 5 mm – podem ser observados no solo e nas águas superficiais e subterrâneas (Wu et al., 2019).

Processos termoquímicos

A termoquímica industrial aplicada a matérias-primas carbonáceas compreende um conjunto de tecnologias e processos baseados em diferentes faixas de temperatura e condições operacionais. Pode ser muito útil para tratar resíduos plásticos, de modo a reduzir os impactos ambientais deles e a desenvolver novos produtos.

A Tabela 1 descreve as principais características e diferenças dos processos termoquímicos para o processamento de materiais carbonáceos, como os resíduos plásticos petroquímicos.

Tabela 1. Principais características das condições operacionais dos processos termoquímicos para materiais carbonáceos, especialmente para plásticos petroquímicos.

Processo termoquímico	Faixa de temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Pressão	Tempo de residência	Produtos primários
Combustão	> 300	Lenta–rápida	Atmosférica–elevada	Segundos–minutos	Calor
Pirólise lenta	350–800	Lenta ($< 10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$)	Atmosférica	Horas–dias	Carvão
Pirólise rápida	400–600	Muito rápida ($\sim 1.000 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$)	Vácuo–atmosférica	Segundos	Óleo
Pirólise instantânea	450–600	Rápida ($10^3 \text{ a } 10^4 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$)	Elevada	Segundos	Fenóis
Gaseificação	700–1500	Moderada–muito rápida	Atmosférica–elevada	Segundos–minutos	Syngas (CO e H ₂)

Fonte: adaptado de Vaz (2022).

A partir da Tabela 1, pode-se observar que os custos com energia devem ser considerados com atenção para uma análise de investimento em *operational expenditures* (OPEX; em português, despesas operacionais). OPEX para processos termoquímicos de reciclagem podem variar significativamente dependendo da tecnologia aplicada e da escala de operação, devendo-se considerar:

- O consumo de energia substancial para manter altas temperaturas e pressões necessárias.
- A preparação da matéria-prima, envolvendo coleta, transporte e pré-tratamento do material plástico.
- A manutenção regular de reatores e de outros equipamentos.
- A mão de obra necessária.
- Os consumíveis, como água, eletricidade, etc.
- A disposição e o controle de subprodutos e resíduos gerados durante o processamento (Mastellone, 2019; Karlsruhe Institute of Technology, 2024).

Por outro lado, como os processos termoquímicos são exotérmicos, com liberação de valores consideráveis de energia, eles podem ser termicamente integrados, promovendo a sustentabilidade energética das plantas de tratamento.

A química sustentável, que é a química desenvolvida e executada de acordo com os componentes de sustentabilidade (impactos ambientais, econômicos e sociais positivos), pode ser promovida, entre outras estratégias tecnológicas, por meio do uso da conversão termoquímica para obtenção de produtos químicos, materiais e energia, considerando a pegada de carbono.⁽¹⁾

Reciclagem química

A reciclagem química é uma reciclagem terciária (American Society for Testing and Materials, 2000), que envolve tecnologias de pirólise, solvólise e gaseificação, conforme descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo das diferentes abordagens de reciclagem química. PET: tereftalato de poli(etileno). PLA: ácido polilático. PC: policarbonato.

Processo de reciclagem	Descrição	Tipo de plástico a ser tratado	Vantagem	Desvantagem
Pirólise	Degradação de cadeias poliméricas na presença de atmosfera inerte.	Todos os plásticos.	Nenhuma liberação significativa de gases tóxicos; produz eletricidade e calor; promove uma ampla distribuição de produtos sólidos, líquidos e gasosos.	Química complexa; requer grandes volumes para ser economicamente viável; heteroátomos (como oxigênio e nitrogênio) reduzem a qualidade do produto.
Solvólise	O meio solvente é usado para quebrar os resíduos plásticos em produtos de baixa massa molecular.	PET, PLA, PC.	Gerenciável e eficaz; reações extensas; necessário solvente para despolimerização.	Tempo considerável para a despolimerização completa; não é possível lidar com os aditivos presentes; difícil separar impurezas da matéria-prima.
Gaseificação	Processo de oxidação parcial (com ar ou vapor) para conversão de resíduos plásticos em gases.	Todos os plásticos.	A separação de polímeros em diferentes categorias não é necessária; produz eletricidade e calor; fornece calor para a despolimerização.	Liberação de gases tóxicos; falta tecnologia para gaseificação de resíduos plásticos mistos; não pode ser usada na produção de monômeros; formação de alcatrão.

Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2021).

⁽¹⁾<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000217181>

Apesar de a solvólise não ser um processo termoquímico, pode ser pensada como uma estratégia orgânico-inorgânica que depende do solvente aplicado para alcançar os melhores resultados.

Estudo de caso para o uso circular de resíduos plásticos

Este estudo de caso é baseado na pesquisa de Thunman et al. (2019) sobre a reciclagem termoquímica de plásticos segundo o conceito de economia circular. Os experimentos de craqueamento dos resíduos plásticos de polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), dentre outros, via pirólise e gaseificação, foram conduzidos em reatores do tipo leito fluidizado.

A evolução no sentido da utilização de materiais plásticos de forma circular requer uma tecnologia que trate qualquer tipo de resíduo plástico – classificado ou não – e produza plásticos com a mesma qualidade do original. Isso fecharia o ciclo dos materiais, passando dos fluxos direcionados de acordo com a hierarquia dos resíduos para a utilização circular, ou seja, a fração que atualmente acaba na valorização energética ou na eliminação torna-se a matéria-prima para novos plásticos. Isso pode ser conseguido por meio da reciclagem termoquímica, que implica uma reciclagem teoricamente ilimitada de qualquer material plástico (misturado ou classificado), em que o foco está na recuperação dos blocos de construção dos materiais plásticos (ou polímeros). Essa solução pode ser aplicada em qualquer parte do mundo, independentemente da disponibilidade de sistemas de triagem avançados e, mais importante, cria um motor econômico para o reuso do lixo plástico. A reciclagem termoquímica torna-se uma ponte de atualização entre os fluxos de resíduos plásticos e o potencial de novos usos. De fato, a reciclagem termoquímica maximiza o aumento do valor do átomo de carbono no resíduo plástico, comparativamente ao obtido por meio de qualquer outra rota de reciclagem existente, como a reciclagem mecânica, em que é assegurada a nova fase de utilização, ainda que com um produto de qualidade inferior.

Desafios e oportunidades

Os principais desafios relacionados à reciclagem química de plásticos dizem respeito à aplicação de tecnologias termoquímicas, na maioria das vezes, as quais possuem consideráveis custos operacionais. Assim, é desejável a redução de tais

custos, o que deve se dar a partir do escalonamento dos processos e do aumento no número de plantas de tratamento.

Quanto às oportunidades desse tipo de reciclagem, pode-se citar o reaproveitamento sustentável dos plásticos por meio da recuperação dos seus bloco-construtores monoméricos para a geração de novos plásticos de melhor qualidade. Ademais, há, ainda, a geração de energia e calor. Tais produtos podem expandir as possibilidades de reuso dos materiais carbonáceos de origem petroquímica.

A reciclagem química de polímeros é uma possibilidade desde que tenha viabilidade econômica. Outras formas de uso dos diversos tipos de plásticos pós-uso também devem ser consideradas, como a reciclagem térmica, já que a queima de plástico é altamente energética, e gerar energia é, geralmente, uma atividade importante. A reciclagem de pneus, que são elastômeros com heteroátomo de enxofre, é feita de forma segura em reatores de pirólise e se recupera nafta, pó de carvão semelhante ao negro de fumo, aço e gás de alto poder calorífico. Enfim, a sugestão é considerar soluções amplas e atacar o grave problema da contaminação por plásticos.

Agradecimento

Ao Dr. José Dilcio Rocha, pesquisador da Embrapa Territorial, pela revisão do texto e pelas sugestões de melhoria.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for development of STM standards relating to recycling and use of recycled plastics**. ASTM D5033. West Conshohocken: ASTM International, 2000.

EUROPEAN PARLIAMENT. **Circular economy: definition, importance and benefits**. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201S-TO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>. Acesso em: jun. 2024.

JIANG, J., SHI, K., ZHANG, X., YU, K., ZHANG, H., HE, J., JU, Y., LIU, J. From plastic waste to wealth using chemical recycling: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, 106867, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>

LATHAM, K. **The way we normally recycle plastics is a downward spiral of waste and degraded materials, but there is another option: turning plastic back into the oil it was made from**. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20210510-how-to-recycle-any-plastic>. Acesso em: jun. 2024.

MASTELLONE, M. L. A feasibility assessment of an integrated plastic waste system adopting mechanical and thermochemical conversion processes. **Resources, Conservation & Recycling**, v.10, n. 4, 100017, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100017>.

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Por que a poluição plástica se tornou uma crise global?** Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2024/04/por-que-a-poluicao-plastica-se-tornou-uma-crise-global>. Acesso em: jul. 2024.

KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Thermochemical processes for feedstock recycling of waste**. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/11/603-Karlsruhe-Stapf.pdf>. Acesso em: ago. 2024.

KÜHLBORN, J., GROß, J., OPATZ, T. Making natural products from renewable feedstocks: back to the roots? **Natural Products Reports**, v. 37, p. 380-424, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9NP00040B>

SOVOVÁ, K., FERUS, M., MATULKOVÁ, I., SPANEL, P., DRYAHINA, K., DVORAK, O., CIVIS, S. A study of thermal decomposition and combustion products of disposable polyethylene terephthalate (PET) plastic using high resolution fourier transform infrared

spectroscopy, selected ion flow tube mass spectrometry and gas chromatography mass spectrometry. **Molecular Physics**, v. 106, p. 1205-1214, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/00268970802077876>

THUNMAN, H., VILCHES, T. B., SEEMAN, M., MARIC, J., LELA, I. C., PISSOT, S., NGUYEN, H. N. T. Circular use of plastics-transformation of existing petrochemical clusters into thermochemical recycling plants with 100% plastics recovery. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 22, e00124, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00124>

VAZ JÚNIOR, S. **Analytical chemistry applied to emerging pollutants**. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74403-2>

VAZ JÚNIOR, S. **Renewable carbon: science, technology and sustainability**. Amsterdam: Elsevier, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2021-0-02011-3>

WU, P., HUANG, J., ZHENG, Y., YANG, Y., ZHANG, Y., HE, F., CHEN, H., QUAN, G., YAN, J., LI, T., GAO, B. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 184, 109612, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>

Embrapa Agroenergia

Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Juliana Evangelista da Silva Rocha*

Secretária-executiva: *Lorena Costa Garcia Calsing*

Membros: *Alexandre Nunes Cardoso, Diogo Keiji Nakai, João Ricardo Moreira de Almeida, Leonardo Fonseca Valadares, Livia Teixeira Duarte Brandão, Priscila Seixas Sabaini e Sílvia Belém Gonçalves*

Circular Técnica 17

e-ISSN 2177-4420
Outubro, 2024

Edição executiva e revisão de texto: *Antonio Claudio da Silva Barros*

Normalização bibliográfica: *Rosângela Galon Arruda (CRB-1/2123)*

Projeto gráfico: *Leandro Sousa Fazio*

Diagramação: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Publicação digital: PDF



Ministério da
Agricultura e Pecuária

Todos os direitos reservados à Embrapa.