

## **ECONOMIA CIRCULAR DO PLÁSTICO E SUAS TECNOLOGIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

**LYGIA COSTA CAMPOS**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS - PUCMG

**FERNANDA CARLA WASNER VASCONCELOS**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

### **Introdução**

O uso de plásticos não é circular, gerando resíduos plásticos que são descartados no meio ambiente (OECD, 2022). De acordo com o estudo de Sheldon; Norton (2020) a poluição causada pelo plástico, especialmente nos oceanos, tornou-se um problema de alcance global. Esse cenário é agravado pelo uso massivo de plásticos de uso único, como os utilizados em embalagens, configurando um dos grandes desafios do século XXI. A poluição por plástico impacta a fisiologia das espécies e os processos ecológicos bem como a regulação climática.

### **Problema de Pesquisa e Objetivo**

Por meio desta revisão sistemática de literatura foram selecionados artigos e estudos relevantes sobre a temática da economia circular e suas tecnologias, objetivando responder à pergunta “Como as tecnologias podem auxiliar na economia circular do plástico?”, tendo como objetivo geral identificar tecnologias que podem auxiliar na economia circular do plástico.

### **Fundamentação Teórica**

### **Metodologia**

Segundo Galvão; Ricarte (2019) para entender e organizar um grande conjunto de documentos, especialmente para identificar o que dá certo ou não em um determinado contexto, a revisão sistemática da literatura é um tipo de pesquisa que segue regras bem definidas. Portanto, as buscas foram conduzidas em duas bases de dados: (i) Web Of Science e (ii) Scopus, reconhecidas no campo acadêmico. As bases foram escolhidas pelo número de artigos disponíveis, bem como, o alto grau de confiabilidade dos trabalhos disponíveis nessas plataformas, além da possibilidade de criar filtros precisos e eficazes.

### **Análise e Discussão dos Resultados**

Os trabalhos escolhidos para compor essa revisão sistemática discorrem acerca de diferentes tipos de reciclagem, bem como, de tecnologias para reaproveitamento dos plásticos de embalagens, ou seja, os plásticos de uso único. Os artigos foram selecionados por possuírem pontos relevantes para a economia circular como, por exemplo, abordar o aprimoramento de tecnologias de separação e triagem, com uso de inteligência artificial e sensores para tornar a reciclagem mais precisa e o papel das tecnologias digitais na transformação de resíduos em novos produtos.

### **Considerações Finais**

A economia circular do plástico é um tema atual, que deve ser planejado com base na responsabilidade compartilhada entre governos, empresas e sociedade, considerando a sustentabilidade e a inovação tecnológica. O debate deve se concentrar em melhorias tangíveis para o meio ambiente, redução de resíduos e emissões, e também para as pessoas, através da criação de empregos, aumento da renda e melhoria da qualidade de vida. A presente revisão sistemática possibilitou a identificação de tecnologias de reciclagem que tornam esse modelo viável.

### **Referências**

AVISO, K. B. et al. Optimizing plastics recycling networks. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 14, 2023. BISHOP, G.; STYLES, D.; LENS, P. N. L. Environmental performance of bioplastic packaging on fresh food produce: A consequential life cycle assessment. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, v. 317, 2021. BYARD, D. J. et al. Green fab lab applications of large-area waste polymer-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 27, p. 515-525, 2019. CIRCLE ECONOMY. *Circle Economy's Impact: 2021*. Amsterdam: Circle Economy Foundation, 2021.

### **Palavras Chave**

Circularidade, Resíduos Sólidos, Reciclagem

### **Agradecimento a órgão de fomento**

# ECONOMIA CIRCULAR DO PLÁSTICO E SUAS TECNOLOGIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de plásticos não é circular, gerando resíduos plásticos que são descartados no meio ambiente (OECD, 2022). De acordo com o estudo de Sheldon; Norton (2020) a poluição causada pelo plástico, especialmente nos oceanos, tornou-se um problema de alcance global. Esse cenário é agravado pelo uso massivo de plásticos de uso único, como os utilizados em embalagens, configurando um dos grandes desafios do século XXI. A poluição por plástico impacta a fisiologia das espécies e os processos ecológicos bem como a regulação climática. Além disso, o microplástico ingerido pelo plâncton marinho ajuda a reduzir a eficiência do sequestro de carbono, contribuindo para a desregulação do clima na Terra (Oceana Brasil, 2024). Oyinlola et al. (2023) dizem que os plásticos apresentam uma ameaça significativa à saúde humana, pois contém aditivos tóxicos e produtos químicos que podem ser absorvidos pelo corpo por meio dos alimentos, do ar e da água, podendo causar sérios problemas de saúde.

Segundo o estudo de Nicholson et al. (2021), os esforços para criar uma economia circular para plásticos devem ser coletivos, pois estão relacionados à (i) reduzir o consumo de carbono de origem fóssil, (ii) conter o descarte de plásticos que são difíceis de degradação no ambiente e nos aterros sanitários, e (iii) diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à produção de materiais virgens. De acordo com o Relatório de Lacuna de Circularidade (CGR 2025), por meio da economia circular é possível repensar e otimizar o uso de recursos para promover o bem-estar, permitindo o uso consciente de materiais, evitando o colapso climático, fortalecendo a biodiversidade e aumentando a resiliência ambiental e socioeconômica, através da eliminação do desperdício e da poluição, da circulação de produtos e materiais e permitindo a regeneração da natureza (FUNDAÇÃO ELLEN MacARTHUR, 2023).

No trabalho de Lubongo; Alexandridis (2022), os diversos tipos de plásticos podem ser classificados como: (1) poli (tereftalato de etileno) (PET), (2) polietileno de alta densidade (PEAD), (3) poli(cloreto de vinila) (PVC), (4) polietileno de baixa densidade (PEBD), (5) polipropileno (PP), (6) poliestireno (PS) e (7) outros. Segundo a Organização de Impacto Global Circle Economy (2021), desafios são encontrados na sociedade, organizações e instituições que impedem a adoção das práticas circulares, por exemplo, não são todos os tipos de plástico que são recicláveis, e cada um exige um tratamento específico, com processos diferenciados para que a reciclagem seja realmente eficaz.

Em uma economia circular para os materiais plásticos, três métodos comuns são usados nos processos de reciclagem: (i) térmica, (ii) química e (iii) mecânica (Langwieser et al., 2022) e as tecnologias atualmente utilizadas para a separação de resíduos plásticos incluem sensores de infravermelho próximo, fluorescência por raios X e análise de cores por meio de câmeras ou espectrofotômetros (LUBONGO; ALEXANDRIDIS, 2022).

Alguns elementos facilitadores como, por exemplo o uso de diferentes tecnologias (digitais, inteligência artificial, internet das coisas, entre outras), além da colaboração em rede e o fortalecimento do conhecimento e da inovação podem ajudar na adoção de práticas circulares para os plásticos (Organização de Impacto Global Circle Economy, 2021). A criação de produtos concebidos com foco em todo o seu ciclo de vida garante maior eficácia em sua reutilização, reaproveitamento ou reciclagem (KOLADE et al., 2024). Aspectos-chave como

os requisitos de inovação, as tecnologias de reciclagem e o engajamento global, incluindo a responsabilidade das partes interessadas, políticas públicas e regulamentações são fundamentais, pois sua integração representa um caminho promissor e sustentável para a construção de um sistema de gerenciamento de resíduos plásticos mais limpo e responsável (PUČNIK et al., 2024).

As políticas públicas e regulamentações surgem para dar um direcionamento em relação ao uso circular do plástico por meio de diretrizes específicas; no entanto, ainda carecem de foco em aspectos como incentivos econômicos e campanhas educativas (AVISO et al., 2023).

Por meio desta revisão sistemática de literatura foram selecionados artigos e estudos relevantes sobre a temática da economia circular e suas tecnologias, objetivando responder à pergunta “Como as tecnologias podem auxiliar na economia circular do plástico?”, tendo como objetivo geral identificar tecnologias que podem auxiliar na economia circular do plástico

O artigo encontra-se dividido nas seguintes seções: esta introdução, seguida, pela metodologia, análise e discussão dos resultados e, finalmente, a conclusão, seguida das referências bibliográficas.

## 2 METODOLOGIA

Segundo Galvão; Ricarte (2019) para entender e organizar um grande conjunto de documentos, especialmente para identificar o que dá certo ou não em um determinado contexto, a revisão sistemática da literatura é um tipo de pesquisa que segue regras bem definidas. Portanto, as buscas foram conduzidas em duas bases de dados: (i) *Web Of Science* e (ii) *Scopus*, reconhecidas no campo acadêmico. As bases foram escolhidas pelo número de artigos disponíveis, bem como, o alto grau de confiabilidade dos trabalhos disponíveis nessas plataformas, além da possibilidade de criar filtros precisos e eficazes.

Dessa forma, as palavras-chave foram colocadas em uma ordem específica, com o objetivo de filtrar bem os artigos para as temáticas propostas. A pesquisa foi feita em inglês, utilizando o operador lógico “AND”, para refinar as buscas. Os mesmos critérios de busca foram utilizados nas duas bases, a fim de criar um padrão, conforme observado no Quadro 1, nos quais os algoritmos de busca utilizados filtraram os artigos por título, resumo e palavras-chave. Escolheu-se o inglês, por ser o padrão internacional de comunicação científica como idioma para realizar essa pesquisa e escolher artigos para leitura.

*Quadro 1 – Algoritmos de Busca*

Bases Indexadoras	Algoritmos de Busca
Web Of Science	TS=("circular economy" AND technologies AND recycling)
Scopus	TITLE-ABS-KEY("circular economy" AND technologies AND recycling)

Fonte: Autores, 2024

## 1.1. Descrição da amostra

Neste estudo, a seleção dos artigos seguiu critérios de exclusão previamente estabelecidos, com o objetivo de assegurar a relevância e a qualidade das publicações analisadas. Os critérios aplicados foram (i) delimitação temporal entre os anos de 2015 e 2025; (ii) inclusão apenas de artigos científicos; (iii) consideração exclusiva de publicações em acesso aberto; (iv) seleção de publicações oriundas dos países, em cada continente, com o maior número de artigos relacionados à temática e (v) eliminação de documentos duplicados.

A definição do ano de 2015 como ponto de partida justifica-se pela aprovação, nesse período, do Plano de Ação para a Economia Circular pela Comissão Europeia, o que resultou em expressivo aumento das publicações sobre o tema. A escolha por artigos em acesso aberto teve como finalidade garantir o acesso integral ao conteúdo das publicações para análise aprofundada. Com base na análise dos títulos, resumos e palavras-chave, foram selecionados os artigos que apresentaram maior aderência à temática proposta neste estudo.

## 3 DISCUSSÃO

Os trabalhos escolhidos para compor essa revisão sistemática discorrem acerca de diferentes tipos de reciclagem, bem como, de tecnologias para reaproveitamento dos plásticos de embalagens, ou seja, os plásticos de uso único.

Os artigos foram selecionados por possuírem pontos relevantes para a economia circular como, por exemplo, abordar o aprimoramento de tecnologias de separação e triagem, com uso de inteligência artificial e sensores para tornar a reciclagem mais precisa; o papel das tecnologias digitais na transformação de resíduos em novos produtos; a aplicação de modelos matemáticos para aprimorar redes e processos de reciclagem e a avaliação ambiental e energética da cadeia de plásticos.

Os estudos de Lubongo; Alexandridis (2022); Pučnik et al. (2024); e Lubongo; Bin Daej; Alexandridis (2024) abordam desafios, inovações e modelos de separação automatizada e inteligente de plásticos recicláveis, enquanto os estudos de Kolade et al. (2024) e Oyinlola et al. (2023) são focados nas aplicações de tecnologias digitais como ferramentas para transformação da sociedade, organizações e instituições rumo a uma economia circular. Aviso et al. (2023) e Uekert et al. (2023) estudaram os modelos computacionais e matemáticos que visam otimizar processos e redes de reciclagem, enquanto Nicholson et al. (2021) e Gracida-Alvarez et al., (2023a e 2023b) estudaram os impactos ambientais, emissões de carbono e ciclos de vida associados à cadeia dos plásticos.

Processos e técnicas podem ser utilizadas para que a economia deixe de ser linear e se torne circular. De acordo com o estudo de Nicholson et al. (2021), o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de substituir os plásticos derivados do petróleo e viabilizar a economia circular depende, essencialmente, da comparação quantitativa entre as inovações e os processos tradicionais da economia linear.

A aplicação de tecnologias digitais na economia circular do plástico se destaca por diversas inovações que fortalecem a eficiência e a sustentabilidade do sistema. Isso inclui o desenvolvimento de aplicativos móveis que mobilizam e conectam uma ampla variedade de partes interessadas, o uso de soluções de finanças digitais para incentivar a coleta de resíduos

plásticos, a adoção de tecnologias do tipo *blockchain* para garantir rastreabilidade e transparência nas cadeias de suprimentos circulares e a utilização da impressão 3D para criar novos produtos, agregando valor ao consumidor e estendendo o ciclo de vida do plástico (KOLADE et al., 2024).

É possível conectar de forma mais eficiente, por meio de plataformas digitais, os principais atores da cadeia, como catadores, fornecedores, consumidores, transportadores e recicladores, promovendo uma colaboração sinérgica que fortalece a economia circular (KOLADE et al., 2024). Algumas tecnologias de fronteira, como a impressão 3D, facilitam a remanufatura com materiais recicláveis enquanto as inovações digitais promovem o engajamento de consumidores e parceiros, ampliando o mercado de produtos circulares e gerando novas oportunidades econômicas para outros atores na cadeia de valor circular. Para as empresas, essas inovações também reduzem custos ao otimizar recursos, processos e logística (KOLADE et al., 2024).

No estudo de Oyinlola et al. (2023), é descrito que a conversão bem-sucedida de resíduos plásticos em filamentos para impressão 3D tem grande relevância para a adoção e o avanço da manufatura aditiva na África Subsaariana, ao possibilitar a transformação desses resíduos em novos produtos com maior valor agregado.

Uma das principais barreiras para aumentar a reciclagem de plásticos pós-consumo é a falta de mercados competitivos para plásticos reciclados como polipropileno, cloreto de polivinila, polietileno de baixa densidade e poliestireno (GRACIDA-ALVAREZ et al., 2023a). Embora esses plásticos possam ser classificados, a maioria deles possui pouco ou nenhum valor de mercado, com exceção do polietileno tereftalato (PET) e do polietileno de alta densidade (PEAD). O plástico residual, após a separação dos materiais mais valiosos, geralmente é destinado aos aterros sanitários (LUBONGO; ALEXANDRIDIS, 2022).

Para garantir a qualidade dos materiais recicláveis, a triagem deve ser realizada com rigor. O estudo de Lubongo; Alexandridis (2022), realizado em instalações de recuperação de materiais nos Estados Unidos, revelou que os recuperadores de plástico rejeitam até 5% dos fardos recebidos devido à triagem inadequada. A baixa qualidade está frequentemente associada à presença de rótulos, filmes multicamadas, polímeros mistos, fios e erros na classificação de tipos específicos de polímeros. Um dos recuperadores relatou que até 35% do plástico colorido é classificado incorretamente, resultando em desperdício. Segundo Aviso et al. (2023), melhorar rótulos, com dicas visuais sobre a reciclagem, pode também educar o consumidor e facilitar a reciclagem.

Instalações que ainda utilizam triagem manual indicaram baixo rendimento na separação de plásticos. A adoção de sistemas automatizados de triagem surge como uma solução promissora para superar as limitações e aumentar a eficiência do processo (LUBONGO; ALEXANDRIDIS, 2022). Devido às diferenças químicas e físicas entre os resíduos plásticos, a reciclagem eficiente torna-se um grande desafio, especialmente quando a etapa de separação não é realizada de forma adequada desde o início do processo, preferencialmente na própria fonte de geração (PUČNIK et al., 2024). Por exemplo, por meio da reciclagem de plástico distribuída, é possível rastrear os resíduos desde a origem até a fabricação de novos produtos pela indústria (BYARD et al., 2019).

A tecnologia auxiliou na criação e no desenvolvimento de novos tipos de polímeros de base biológica biodegradáveis (bioplásticos biodegradáveis), como o ácido polilático (PLA), resultado da fermentação do amido, podendo ser feito de milho ou de mandioca. De acordo com o estudo de Bishop; Styles; Lens (2021), esses plásticos podem reter as características benéficas do material (capacidades de preservação de alimentos) dos plásticos petroquímicos, ao mesmo

tempo em que permitem uma transição para uma economia circular, reduzindo a extração de recursos fósseis e diminuindo os encargos de fim de vida como resultado de sua natureza biodegradável sendo, portanto, peças fundamentais dentro da economia circular dos plásticos.

Para além de toda a discussão acerca das tecnologias que facilitam e melhoram a gestão dos resíduos e a reciclagem, a criação de legislações e de normas regulamentadoras para diminuir a produção de plásticos de uso único terão papel fundamental para que a economia circular de plásticos seja eficiente. O Projeto de Lei nº 2524, de 2022, que está tramitando no Senado Federal do Brasil, objetiva alterar a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, popularmente conhecida como Lei de Crimes Ambientais, a fim de estabelecer regras relativas à economia circular do plástico em território nacional.

#### 4 CONCLUSÃO

A economia circular do plástico é um tema atual, que deve ser planejado com base na responsabilidade compartilhada entre governos, empresas e sociedade, considerando a sustentabilidade e a inovação tecnológica. O debate deve se concentrar em melhorias tangíveis para o meio ambiente, redução de resíduos e emissões, e também para as pessoas, através da criação de empregos, aumento da renda e melhoria da qualidade de vida. A presente revisão sistemática possibilitou a identificação de tecnologias de reciclagem que tornam esse modelo viável. Dessa forma, a economia circular do plástico se apresenta como uma alternativa promissora, porém é necessário o envolvimento coletivo e políticas eficazes para se estabelecer.

#### 5 REFERÊNCIAS

AVISO, K. B. *et al.* Optimizing plastics recycling networks. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 14, 2023.

BISHOP, G.; STYLES, D.; LENS, P. N. L. Environmental performance of bioplastic packaging on fresh food produce: A consequential life cycle assessment. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 317, 2021.

BYARD, D. J. *et al.* Green fab lab applications of large-area waste polymer-based additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 515–525, 2019.

CIRCLE ECONOMY. *Circle Economy's Impact: 2021*. **Amsterdam: Circle Economy Foundation**, 2021.

CIRCLE ECONOMY; DELOITTE. *Circularity Gap Report 2025: a global call to action*. **Amsterdam: Circle Economy; Deloitte**, 2025.

FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR. **Como a economia circular cria valor?** Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/como-a-economia-circular-cria-valor>>. Acesso em: 9 out. 2024.

GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: CONCEITUAÇÃO, PRODUÇÃO E PUBLICAÇÃO. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73, 15 set. 2019.

GRACIDA-ALVAREZ, U. R. *et al.* Life-cycle analysis of recycling of post-use plastic to plastic via pyrolysis. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 425, 2023.

KOLADE, O. *et al.* Digitally enabled business models for a circular plastic economy in Africa. **Environmental Technology and Innovation**, v. 35, 2024.

LANGWIESER, J. *et al.* Determination of the Influence of Multiple Closed Recycling Loops on the Property Profile of Different Polyolefins. **POLYMERS**, v. 14, n. 12, 2022.

LUBONGO, C.; ALEXANDRIDIS, P. Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste. **Recycling**, v. 7, n. 2, 2022.

LUBONGO, C.; BIN DAEJ, M. A. A.; ALEXANDRIDIS, P. Recent Developments in Technology for Sorting Plastic for Recycling: The Emergence of Artificial Intelligence and the Rise of the Robots. **Recycling**, v. 9, n. 4, 2024.

NICHOLSON, S. R. *et al.* Manufacturing energy and greenhouse gas emissions associated with plastics consumption. **Joule**, v. 5, n. 3, p. 673–686, 2021.

OCEANA BRASIL. Fragmentos da Destruição: Impactos do Plástico Na Biodiversidade Marinha Brasileira. [S.d.], 2024.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060**. 2022.

OYINLOLA, M. *et al.* The potential of converting plastic waste to 3D printed products in Sub-Saharan Africa. **RESOURCES CONSERVATION & RECYCLING ADVANCES**, v. 17, 2023.

PUČNIK, R. *et al.* A waste separation system based on sensor technology and deep learning: A simple approach applied to a case study of plastic packaging waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, 2024.

SHELDON, R. A.; NORTON, M. Green chemistry and the plastic pollution challenge: towards a circular economy. **GREEN CHEMISTRY**, v. 22, n. 19, p. 6310–6322, 2020.

UEKERT, T. *et al.* Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 11, n. 3, p. 965–978, 2023.