

REVISÃO DE LITERATURA IDENTIFICADO
INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA ECONOMIA CIRCULAR: O GÊMEO
DIGITAL COMO HABILITADOR EM EMBALAGENS INTELIGENTES
INNOVATION AND SUSTAINABILITY IN THE CIRCULAR ECONOMY: DIGITAL
TWINS AS ENABLERS OF SMART PACKAGING

Manoel Augusto Sales¹, Maria Leonor de Carvalho Gaspar Sales², Fernanda Larrúbia Marques², Gabriel Fernandes Silva^{1*}.

1. Pós-graduandos do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal Fluminense (PPGAd/UFF).
2. Doutorandas do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade do Grande Rio (Afya Unigranrio).

E-mail do autor correspondente: gabriel.adm@live.com.

Eixo Temático: Eixo 02 – Inovação, Tecnologia, Sustentabilidade e Transformação Global

RESUMO

Introdução: O descarte de embalagens de uso único intensifica a geração de resíduos e evidencia os limites do modelo linear de produção e consumo. A economia circular requer rastreabilidade, integração de dados e coordenação entre os agentes responsáveis pelo ciclo de vida das embalagens. **Objetivo:** Analisar como o Gêmeo Digital pode contribuir para a gestão de dados necessária à implementação de sistemas de embalagens inteligentes, sustentáveis e circulares. **Método:** Realizou-se revisão bibliográfica narrativa, qualitativa e exploratório-descritiva, complementada por pesquisa documental. O corpus reuniu livros, artigos científicos, relatórios institucionais e legislação relacionados a sustentabilidade, economia circular, embalagens inteligentes, inteligência artificial, Gêmeo Digital e logística reversa. As evidências foram selecionadas por aderência ao objetivo e organizadas mediante síntese temática. **Resultados:** O Gêmeo Digital pode atribuir identidade digital às embalagens, integrar dados de sensores e apoiar o monitoramento de localização, condição e histórico de uso. Essas funções favorecem logística reversa, reuso, manutenção da qualidade, prestação de informações e comprovação de ciclos, mas dependem de infraestrutura, interoperabilidade, governança de dados e articulação entre empresas, governo e consumidores. **Conclusão:** A tecnologia constitui um habilitador potencial da circularidade, e não uma solução autônoma. Sua contribuição ambiental depende de desenho sistêmico, viabilidade econômica, proteção de dados e avaliação dos impactos energéticos da infraestrutura digital.

Palavras-chave: Embalagens inteligentes. Gêmeo Digital. Economia circular. Sustentabilidade. Logística reversa.

ABSTRACT

Introduction: The disposal of single-use packaging intensifies waste generation and reveals the limitations of linear production and consumption. The circular economy requires traceability, data integration, and coordination among the agents responsible for packaging life cycles. **Objective:** To analyze how Digital Twins can support the data management required to implement smart, sustainable, and circular packaging systems. **Method:** A qualitative, exploratory-descriptive narrative literature review was conducted and complemented by documentary research. The corpus included books, scientific articles, institutional reports, and legislation on sustainability, circular economy, smart packaging, artificial intelligence, Digital Twins, and reverse logistics. Evidence was selected according to its relevance to the objective and organized through thematic synthesis. **Results:** Digital Twins can provide packaging with a digital identity, integrate sensor data, and support the monitoring of location, condition,

and use history. These functions favor reverse logistics, reuse, quality maintenance, information disclosure, and cycle verification, but depend on infrastructure, interoperability, data governance, and coordination among companies, governments, and consumers. Conclusion: The technology is a potential enabler of circularity rather than an autonomous solution. Its environmental contribution depends on systemic design, economic feasibility, data protection, and assessment of the energy impacts of digital infrastructure.

Keywords: Smart packaging. Digital Twin. Circular economy. Sustainability. Reverse logistics.

INTRODUÇÃO

O crescimento do consumo e a expansão das embalagens de uso único intensificaram a geração de resíduos e a pressão sobre os sistemas de coleta, tratamento e disposição final. Estimativas globais apontam a produção anual de centenas de milhões de toneladas de plástico e aproximadamente dois bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, cenário que tende a se agravar sem mudanças nos padrões de produção e consumo.^{1,2} Além do impacto ambiental, o problema envolve responsabilidade social e organizacional, pois empresas, consumidores e governos compartilham efeitos e decisões ao longo do ciclo de vida dos materiais.³

A economia circular propõe substituir o fluxo linear de extração, produção, consumo e descarte por estratégias de redução, reuso, reparo, retorno e reciclagem. Nas embalagens, essa transição exige mais do que a substituição de materiais: requer desenho de sistemas capazes de identificar unidades, acompanhar seu percurso e coordenar a logística reversa. Embalagens inteligentes, associadas a sensores, identificadores e sistemas digitais, podem ampliar segurança, fornecer informações e apoiar decisões sobre conservação, retorno e reaproveitamento.⁴

Nesse contexto, o Gêmeo Digital corresponde a uma representação virtual dinâmica de um objeto ou processo físico, atualizada por dados provenientes de sensores, registros e sistemas de informação.⁵ Aplicado às embalagens, pode reunir dados de origem, composição, localização, condição e histórico de uso. Todavia, a literatura ainda demanda uma articulação crítica entre o potencial tecnológico e as condições econômicas, institucionais e ambientais necessárias para que a digitalização produza circularidade efetiva. Assim, pergunta-se: como o Gêmeo Digital, enquanto inovação de sistema, pode potencializar a sustentabilidade das embalagens e apoiar a transição do modelo linear para a economia circular? O objetivo é analisar como essa tecnologia contribui para a gestão de dados necessária à implementação de sistemas de embalagens inteligentes, sustentáveis e circulares.

MÉTODO

Trata-se de revisão bibliográfica narrativa, de abordagem qualitativa e caráter exploratório-descritivo, complementada por pesquisa documental. A modalidade foi escolhida

por permitir a integração de literatura conceitual e aplicada sobre sustentabilidade, economia circular, embalagens inteligentes, inteligência artificial, Gêmeo Digital e logística reversa, além de legislação e relatórios institucionais relacionados ao ciclo de vida das embalagens. A revisão foi orientada pela seguinte pergunta: como o Gêmeo Digital pode potencializar a sustentabilidade das embalagens e apoiar a transição para a economia circular?

O corpus foi constituído por livros, artigos científicos nacionais e internacionais, documentos de organismos multilaterais, relatórios de organizações especializadas e normas brasileiras presentes no levantamento original. Foram incluídos materiais com aderência direta ao objetivo e excluídas publicações que apenas mencionavam as tecnologias ou a sustentabilidade sem contribuir para a compreensão de suas relações. A seleção ocorreu mediante leitura dos títulos e do conteúdo pertinente, seguida da interpretação crítica das evidências. Os achados foram agrupados em três categorias: embalagem como ativo de dados; rastreabilidade e logística reversa; e condições para implementação do ecossistema circular. Por seu caráter narrativo, o estudo não adotou protocolo de revisão sistemática, como PRISMA ou JBI, nem pretendeu exaurir a literatura.

RESULTADOS

Embalagem como ativo de dados. A literatura indica que sensores, identificadores e sistemas digitais podem ampliar as funções tradicionais das embalagens, tornando-as fontes de informação sobre integridade, frescor, localização e condições de transporte.^{4,6} O Gêmeo Digital acrescenta uma representação virtual continuamente relacionada ao objeto físico, permitindo consolidar dados dispersos em uma identidade digital. Em vez de considerar a embalagem apenas como proteção e custo, essa abordagem permite tratá-la como componente informacional do produto e da cadeia logística.⁵

A identidade digital pode registrar composição, origem, número de utilizações e eventos ocorridos ao longo do ciclo de vida. Essas informações favorecem decisões sobre reuso, retorno, reparo, higienização e reciclagem. O benefício, porém, depende da qualidade e continuidade dos dados: uma representação virtual incompleta ou desatualizada não assegura rastreabilidade. Também é inadequado atribuir autonomia à embalagem de forma generalizada, pois a capacidade de análise resulta da integração entre sensores, conectividade, bancos de dados, algoritmos e processos organizacionais.

Rastreabilidade e logística reversa. A economia circular demanda a manutenção de produtos e materiais em circulação pelo maior tempo possível. A literatura mostra que a principal contribuição potencial do Gêmeo Digital está em reduzir a incerteza informacional que dificulta

o retorno das embalagens. Ao indicar localização, condição e histórico de uso, o sistema pode apoiar planejamento de coleta, triagem, definição de rotas e decisão sobre o destino mais adequado. Essa capacidade é especialmente relevante para modelos de embalagens reutilizáveis, nos quais o valor ambiental e econômico depende do número de ciclos efetivamente realizados.⁷

A rastreabilidade também pode fortalecer transparência, prestação de contas e demonstração do atendimento a metas ambientais. No Brasil, o Decreto nº 12.688/2025 instituiu o sistema de logística reversa de embalagens plásticas e estabeleceu responsabilidades e modelos operacionais para fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes.⁸ Dados confiáveis podem contribuir para acompanhar os fluxos exigidos pela regulação. Entretanto, a tecnologia não substitui infraestrutura de coleta, incentivos para devolução, definição de responsabilidades ou participação do consumidor.

Condições para o ecossistema circular. Os achados mostram que a implementação depende de coordenação entre indústrias, fornecedores de tecnologia, operadores logísticos, governos, recicladores e consumidores. A interoperabilidade é requisito central: códigos, sensores e plataformas precisam trocar informações por padrões compreensíveis ao longo da cadeia. Sem essa integração, há risco de soluções isoladas que aumentam custos, mas não fecham ciclos. A governança deve definir propriedade, acesso, qualidade, armazenamento e uso dos dados, especialmente quando registros puderem revelar hábitos de consumo ou informações comerciais sensíveis.

A viabilidade econômica também condiciona a adoção. Sensores, conectividade, plataformas e manutenção acrescentam custos que precisam ser compensados por redução de perdas, eficiência logística, novos serviços ou recuperação de materiais. Além disso, a sustentabilidade da solução exige avaliar a energia consumida, a vida útil dos componentes eletrônicos e o risco de gerar resíduos adicionais. Desse modo, o Gêmeo Digital não deve ser tratado como solução autônoma, mas como habilitador inserido em um sistema de inovação e governança. A inovação tecnológica produz benefício ambiental quando orientada por desenho circular, métricas de desempenho e análise do ciclo de vida.^{7,9}

Em síntese, o modelo conceitual derivado da revisão articula três movimentos: a identificação digital transforma a embalagem em fonte de dados; a integração das informações apoia rastreabilidade e decisões preditivas; e a coordenação institucional converte informação em retorno, reuso ou recuperação de materiais. A ausência de qualquer desses elementos reduz a capacidade de produzir circularidade. Os resultados dialogam com os Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 9, relacionado à inovação e infraestrutura, e o ODS 12, voltado à produção e ao consumo responsáveis.¹⁰

CONCLUSÃO

A revisão evidencia que o Gêmeo Digital pode habilitar embalagens inteligentes e apoiar a economia circular ao integrar dados sobre origem, composição, localização, condição e histórico de uso. Essa base informacional favorece rastreabilidade, logística reversa, planejamento de ciclos de reuso e demonstração do cumprimento de responsabilidades ambientais. A principal contribuição do estudo está em mostrar que a tecnologia transforma a embalagem em ativo de dados, mas seu valor sustentável somente se concretiza quando as informações orientam ações físicas de retorno, conservação e reaproveitamento.

Como implicação prática, organizações devem iniciar projetos com objetivos circulares definidos, padrões de interoperabilidade, governança de dados e métricas ambientais e econômicas. Políticas públicas devem estimular rastreabilidade sem impor soluções tecnológicas únicas e considerar a proteção de dados, os custos e os impactos energéticos. O caráter narrativo e conceitual limita a generalização dos achados. Estudos futuros podem testar projetos-piloto, comparar custos e benefícios, mensurar o número de ciclos de reuso e investigar a aceitação de consumidores e empresas. Conclui-se que o Gêmeo Digital é um habilitador promissor, mas sua contribuição depende de um ecossistema colaborativo e de avaliação integral do ciclo de vida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Global waste management outlook [Internet]. Nairobi: UNEP; 2021 [citado 2025 out 23]. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
2. Kaza S, Yao L, Bhada-Tata P, Van Woerden F. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington: World Bank; 2018.
3. Barbieri JC. Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. São Paulo: Saraiva; 2007.
4. D'Almeida AP, Albuquerque TL. Innovations in food packaging: from bio-based materials to smart packaging systems. Processes. 2024;12(10):2085. doi:10.3390/pr12102085.
5. Tao F, Zhang H, Liu A, Nee AYC. Digital twin in industry: state-of-the-art. IEEE Trans Ind Inform. 2019;15(4):2405-15.

6. Li X, Liu D, Peng Y. Recent advance of intelligent packaging aided by artificial intelligence for monitoring food freshness. *Foods*. 2023;12(15):2976. doi:10.3390/foods12152976.
7. Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ. The circular economy: a new sustainability paradigm? *J Clean Prod*. 2017;143:757-68.
8. Brasil. Decreto nº 12.688, de 21 de outubro de 2025. Institui o sistema de logística reversa de embalagens de plástico em geral [Internet]. Brasília: Presidência da República; 2025 [citado 2025 out 23]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/D12688.htm
9. Ellen MacArthur Foundation. Completing the picture: how the circular economy tackles climate change. Cowes: Ellen MacArthur Foundation; 2021.
10. Nações Unidas. Harnessing artificial intelligence for Sustainable Development Goals [Internet]. Nova York: UN Sustainable Development Group; 2024 [citado 2025 out 23]. Disponível em: <https://unsdg.un.org/latest/announcements/harnessing-artificial-intelligence-sustainable-development-goals-sdgs>