

Embalagens inteligentes e circulares: Objeto do futuro que une IA, sustentabilidade e inovação logística

Gabriel Fernandes Silva

gabriel.adm@live.com

Programa de Pós-Graduação em Administração - PPGAd / Universidade Federal Fluminense - UFF

Manoel Augusto Sales

manoelsales@id.uff.br

Programa de Pós-Graduação em Administração - PPGAd / Universidade Federal Fluminense - UFF

Resumo: Este estudo explora o potencial das embalagens inteligentes e circulares como solução inovadora para os desafios ambientais contemporâneos, alinhado aos princípios da economia circular, sustentabilidade e tecnologias digitais emergentes, notadamente a inteligência artificial (IA). Com o objetivo de analisar o desenvolvimento e aplicação dessas embalagens como objetos do futuro, por meio da integração entre tecnologia digital, economia circular e IA, a pesquisa qualitativa foi desenvolvida por meio de uma abordagem bibliográfica e documental. Os procedimentos metodológicos envolveram a revisão e articulação de conceitos, marcos regulatórios e estudos nacionais e internacionais sobre o tema. Os resultados, obtidos pela análise documental, indicam que a adoção de embalagens inteligentes, associadas a sistemas de rastreabilidade, logística reversa e *digital twin*, pode ampliar a vida útil dos materiais, reduzir a poluição e gerar valor econômico e ambiental. Experiências como as plataformas Loop e Algramo demonstram a viabilidade técnica e operacional de modelos circulares que unem inovação tecnológica e engajamento do consumidor. Conclui-se que a implementação de soluções integradas, apoiadas por políticas públicas, incentivos econômicos e colaboração multissetorial, é fundamental para consolidar um ecossistema sustentável no setor de embalagens, contribuindo para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-Chave: Embalagens inteligentes; Logística reversa; Inovação tecnológica; Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

1. Introdução

O aumento exponencial no consumo global, somado à popularização do comércio eletrônico e ao hábito social do descarte demorado e inconsciente, comumente conhecido como cultura do descarte, agravou consideravelmente os problemas relacionados às embalagens de uso único. Dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2021) apontam que mais de 300 milhões de toneladas de plástico são produzidas anualmente, sendo grande parte utilizada para embalagens que são descartadas após poucos minutos de uso. Em contrapartida, a economia circular propõe um redesenho sistêmico da produção e do consumo, buscando manter os recursos com uma utilização mais prolongada.

De acordo com o relatório apresentado pelo Banco Mundial, o mundo gera cerca de dois bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, Kaza, *et al.* (2018). Se as tendências atuais se mantiverem, estima-se que a produção global de resíduos será de aproximadamente 27 bilhões de toneladas por ano em 2050 (Silva e Capanema, 2019). O crescimento na geração de resíduos impõe desafios que vão além do volume, abrangendo também a complexidade da gestão de seus impactos ambientais.

A gestão ambiental mantém uma relação intrínseca com a responsabilidade social. Embora frequentemente abordados como conceitos distintos, ambos são indissociáveis, uma vez que as questões ambientais não podem ser plenamente compreendidas ou enfrentadas sem considerar suas implicações sociais. Nesse sentido, é fundamental que as organizações estejam atentas aos impactos que suas atividades podem gerar no entorno, assumindo a corresponsabilidade pelo bem-estar das comunidades afetadas (Barbieri, 2007). A estratégia da empresa deve estar alinhada tanto aos aspectos ligados ao meio ambiente quanto aos ligados às condições sociais e às relações com seus consumidores, colaboradores, fornecedores, parceiros e demais interessados (Assunção *et al.*, 2023).

As embalagens inteligentes são uma combinação de tecnologias avançadas que melhoram a segurança do produto, prolongam sua vida útil e fornecem informações úteis aos consumidores, além de ajudarem na sustentabilidade dos processos de embalagem (D'Almeida e Albuquerque, 2024).

No que se refere à abrangência, o presente trabalho aborda o tema das embalagens inteligentes em diferentes dimensões. Em nível internacional, busca-se compreender os principais avanços na área, especialmente considerando que, nas últimas duas décadas, a sustentabilidade e a inovação em embalagens ganharam destaque no cenário global. Conforme Azevedo (2015), esse debate intensificou-se a partir de 2012, com a publicação do relatório *Towards the Circular Economy* (Rumo à Economia Circular) pela Ellen MacArthur Foundation, marco fundamental para a difusão da economia circular. Já no contexto nacional, a análise das práticas internacionais permite identificar oportunidades de adaptação às particularidades brasileiras, tendo como referência normativa a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, que estabelece diretrizes para a gestão e o gerenciamento dos resíduos no país.

O modelo econômico linear, ainda amplamente adotado na atualidade, baseia-se em “processos de extração, transformação e descarte”, sustentando-se na utilização intensiva de materiais de baixo custo e fácil acesso, bem como de grandes volumes de energia. Conforme destacam Sehnem e Pereira (2019), esse paradigma foi central para o avanço da industrialização e propiciou um nível de crescimento sem precedentes. No entanto, o atual modelo produtivo é marcado pela obsolescência programada, por meio da qual os produtos são deliberadamente projetados para ter uma vida útil limitada, encerrando-se quase no exato momento em que o consumidor tende a substituí-los (Grubba e Locatelli, 2023).

A embalagem inteligente posicionar-se-á como um objeto do futuro ou “objeto do amanhã” (que se trata de algo descoberto no campo da tecnologia, ciência e negócios e que é atribuído de significados, passando a ter um potencial testemunhal plural), convergindo tecnologia, comportamento e cultura para antecipar possíveis futuros (Aerolito, 2025).

A Inteligência Artificial (IA) representa um dos marcos mais avançados do desenvolvimento tecnológico global, cujas origens remontam à década de 1950, com os primeiros avanços na computação. No contexto contemporâneo, caracterizado por expressivo crescimento populacional, acelerada urbanização e volumosas quantidades de dados processados diariamente por indivíduos, governos e instituições, a IA ressurgiu com vigor, impulsionada pela maturidade das inovações tecnológicas, pela capacidade ampliada de computação e pelos avanços no processamento em nuvem. Esse cenário tem levado o mundo

a delegar à IA tarefas cada vez mais complexas, não repetitivas e antes restritas à cognição humana. Empresas, governos e investidores vêm ampliando significativamente os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implementação de serviços, ferramentas e sistemas baseados em IA (Lanier, 2023). Nesse contexto, o uso estratégico da IA aliado aos objetivos do desenvolvimento sustentável tem ganhado centralidade, visando mitigar riscos como a perda de empregos e a desinformação, além de promover decisões mais rápidas e eficazes em larga escala. Esse direcionamento tem sido enfatizado pelo Grupo das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, conforme destacado pelo Secretário-Geral Adjunto da ONU (Nações Unidas, 2024).

Diante disso, esta pesquisa visa responder a seguinte pergunta: Como a aplicação de inteligência artificial pode contribuir para o desenvolvimento e viabilização de embalagens inteligentes e circulares?

Portanto, o objetivo geral deste estudo é: Analisar o potencial de desenvolvimento e aplicação de embalagens inteligentes circulares como objetos do futuro, por meio da integração entre tecnologia digital, economia circular e inteligência artificial. Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos: i) compreender a relevância economia circular e da inteligência artificial no ciclo de vida das embalagens, ii) propor um modelo conceitual de embalagem inteligente com base em práticas sustentáveis e tecnologias emergentes, iii) discutir as oportunidades e desafios para sua implementação em escala.

Conforme o Dicionário Oxford (2025), emergência climática é: "uma situação em que é necessária uma ação urgente para reduzir ou interromper a mudança climática e evitar danos ambientais potencialmente irreversíveis", tamanha é a sua importância que esse termo foi eleito a "palavra do ano" pelo dicionário supracitado em 2019 (CEBDS, 2025).

Justifica-se o tema pela emergência climática e a escassez de recursos naturais as quais exigem transformações profundas nos modelos de produção e consumo. As embalagens, por representarem um dos principais vetores de resíduos sólidos urbanos, são um ponto crítico dentro dessa problemática. O modelo linear "extrair-produzir-descartar" já não se sustenta. A embalagem inteligente circular representa uma solução concreta e multidisciplinar, que alia avanços da IA, design regenerativo e logística reversa digitalizada. A relevância de estudar a aplicação da inteligência artificial na circularidade das embalagens reside na urgência de

mitigar os impactos ambientais causados pelo modelo linear de produção e descarte. As embalagens representam uma das maiores fontes de resíduos sólidos urbanos, com alto impacto ambiental, especialmente quando descartadas de forma inadequada. A integração da IA embarcada nesse contexto oferece soluções inovadoras para o rastreamento, reutilização e logística reversa desses materiais, promovendo a transição para um modelo mais sustentável de economia circular.

Além disso, a IA permite transformar as embalagens em dispositivos inteligentes, capazes de gerar dados em tempo real sobre seu uso, origem e condições ambientais, o que fortalece práticas de gestão eficiente, rastreabilidade e conformidade com critérios ESG (Ambiental, Social e Governança). Ao estudar esse tema, contribui-se ainda para o desenvolvimento de “tecnologias regenerativas”, ou seja, métodos, abordagens e sistemas tecnológicos que visam não só minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente, mas também restaurar, revitalizar e aprimorar os ecossistemas e os recursos naturais alinhados com os (ODS) e com as demandas crescentes de consumidores, indústrias e formuladores de políticas públicas (Muzy, 2025).

2. Fundamentação teórica

2.1 – Economia Circular aplicada às embalagens

Como apresentado no tópico anterior, o descarte inadequado dos resíduos sólidos tem provocado emergências climáticas que se não resolvidas comprometerão a qualidade de vida da população e das futuras gerações. A logística tradicional, que não se preocupava com o descarte, é definida por Bowersox e Closs (2001), como o processo de organização, execução e supervisão eficiente e eficaz do fluxo e armazenamento de produtos, serviços e informações correlatas, desde o ponto de partida até o ponto de consumo, visando atender às demandas dos clientes.

A economia circular, conforme definida por Sehnem e Pereira (2019), propõe a substituição do modelo linear por ciclos fechados de uso, onde os produtos, materiais e recursos são mantidos em circulação pelo maior tempo possível. No caso das

embalagens, isso significa projetá-las para reutilização, retorno, reaproveitamento e transformação, priorizando materiais renováveis ou recicláveis, mas, sobretudo, modelos de negócios baseados em reuso. Exemplos como as embalagens retornáveis da Loop ou os dispensadores inteligentes da Algramo demonstram que soluções já estão em andamento, mas ainda carecem de automação e escala.



Figura 1 – Embalagens reutilizáveis Loop
Fonte: Recicla Sampa (2019).



Figura 2 – A história da Algramo
Fonte: Fondazione Carta Etica del Packaging (2023).

Segundo Cosenza, Andrade e Assunção (2020), o acordo setorial, assinado no final de 2015, para a implementação do sistema de logística reversa de embalagens em geral, começou a monitorar a partir de 2016. Seu objetivo é garantir o destino final ambientalmente adequado das embalagens em todo o país. Pelo acordo estabelecido, a primeira fase de aplicação teve duração de 24 meses e, no final, garantiria a recuperação de pouco mais de 3.800 toneladas de contêineres por dia (Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2018).

As embalagens produzidas a partir de materiais como plástico, alumínio, papel e vidro assumem papel relevante na dinâmica econômica atual, ao mesmo tempo em que configuram um dos principais desafios ambientais da contemporaneidade. Nesse contexto, a economia circular apresenta-se como uma abordagem estratégica frente ao modelo linear tradicional de produção e descarte, ao propor a reconfiguração dos ciclos de vida dos materiais com base nos princípios da redução, reutilização, reciclagem e recuperação. As embalagens plásticas, notadamente associadas a elevados níveis de poluição ambiental, podem ser reintegradas ao sistema produtivo por meio de tecnologias avançadas de reciclagem mecânica e química, contribuindo para a extensão de sua vida útil e mitigação dos impactos ambientais negativos (Ellen MacArthur Foundation, 2016).

Para a Associação Brasileira do Alumínio (2022), o alumínio, por sua vez, destaca-se como um dos materiais mais compatíveis com os princípios da economia circular, devido à sua capacidade de ser reciclado indefinidamente sem perda significativa de qualidade. A reciclagem de latas de alumínio consome apenas 5% da energia necessária para a produção do material primário, gerando economia energética e financeira substancial. Além disso, a cadeia de reaproveitamento do alumínio é altamente consolidada no Brasil, o que demonstra o potencial de sistemas circulares bem implementados, tanto para reduzir resíduos quanto para fomentar cadeias de valor mais sustentáveis.

Segundo Streit (2022), para a efetiva inclusão de embalagens na economia circular, é necessário um esforço coordenado entre indústrias, governos e consumidores. Isso inclui desde o design para reciclagem, a implementação de políticas públicas de logística reversa e incentivos à indústria da reciclagem, até campanhas de educação ambiental para o consumo consciente. Para eles, o desenvolvimento de embalagens inteligentes e sustentáveis, capazes de serem monitoradas, rastreadas e reaproveitadas, representa um avanço promissor para tornar os sistemas de produção e consumo mais circulares e ambientalmente responsáveis.

2.2 - O marco regulatório brasileiro

A gestão dos resíduos sólidos no Brasil passou a ser orientada, de forma mais estruturada, a partir da promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS),

instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Essa legislação estabelece os fundamentos da sustentabilidade na área de resíduos, com destaque para os princípios da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e da logística reversa — elementos essenciais para a reintegração de resíduos ao ciclo produtivo e à promoção de uma economia circular (BRASIL, 2010a).

Com base na PNRS, a política de gerenciamento de resíduos sólidos no país prioriza a minimização da geração de resíduos e o combate à poluição, articulando-se com outras normativas nacionais voltadas à sustentabilidade. Entre elas, destacam-se a Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA), de 1999; a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), de 1997; a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), de 2009; e o Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB), regulamentado pela Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Este último define, em seu artigo 7º, que o tratamento dos resíduos sólidos urbanos e a limpeza de vias e espaços públicos integram os serviços públicos de saneamento básico (BRASIL, 2007).

Adicionalmente, o artigo 33 da PNRS estabelece a obrigatoriedade de implementação de sistemas de logística reversa por parte de determinados setores, independentemente da atuação dos serviços públicos de limpeza urbana. Tais obrigações recaem sobre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os quais devem assegurar o retorno e o correto tratamento de produtos e resíduos como embalagens de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes usados e seus resíduos, bem como equipamentos eletroeletrônicos e seus componentes (BRASIL, 2010a). Essa medida visa à ampliação da reciclagem e à redução da destinação inadequada de resíduos em aterros sanitários.

2.3 - O papel da inteligência artificial na circularidade

A inteligência artificial (IA) tem se consolidado como uma tecnologia estratégica para viabilizar e acelerar a transição para a economia circular. No contexto da gestão de embalagens, a IA embarcada permite o monitoramento em tempo real das condições ambientais, do uso e da localização dos produtos, o que facilita a rastreabilidade e a logística reversa. Além disso, algoritmos de aprendizado de máquina são capazes de identificar padrões

de descarte, prever o tempo ideal para reuso ou reciclagem, e até sugerir redesenhos de embalagens com base em seu desempenho no ciclo de vida. Esses recursos não apenas reduzem perdas e impactos ambientais, como também tornam os fluxos produtivos mais eficientes e inteligentes (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Ao atuar de forma integrada a sensores e dispositivos físicos, a IA embarcada transforma as embalagens em objetos autônomos, com capacidade de gerar dados, tomar decisões localizadas e interagir com consumidores ou sistemas logísticos (Geissen *et al.*, 2020). Essa conexão direta entre o mundo físico e o digital, conhecida como “gêmeo digital” (*digital twin*), amplia significativamente o potencial de circularidade, pois permite que cada embalagem tenha um histórico próprio e adaptável de uso, manutenção e retorno. A IA aplicada à economia circular proporciona um modelo mais dinâmico e responsivo, onde a inteligência distribuída nas coisas permite a reconfiguração contínua dos processos de produção e consumo com base em dados em tempo real (José *et al.*, 2020).

2.4 - Sustentabilidade e Inteligência Artificial (IA)

O termo sustentabilidade e desenvolvimento sustentável foi estabelecido na Rio-92, na qual foi criado o plano de ação global "Agenda 21" para orientar ações nesse sentido. Embora tenha sido introduzido na década de 80, levou quase uma década para se tornar amplamente conhecido nos círculos políticos. A definição mais popular de sustentabilidade é aquela que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas necessidades, como definido no Relatório *Brundtland* de 1987 (Ranzan, 2016).

Sociedades sustentáveis, desenvolvimento sustentável e sustentabilidade, segundo Ranzan (2016) são expressões que se referem à adoção de práticas e comportamentos que buscam melhorar a qualidade de vida, tanto a nível individual quanto comunitário, ao mesmo tempo em que se respeita e se preserva o meio ambiente. Trata-se de um conjunto de ações que visam garantir um equilíbrio entre as necessidades presentes e as futuras, promovendo o bem-estar das pessoas e a saúde do planeta (Anjos e Singh, 2024).

Ainda segundo Anjos e Singh (2024), a busca pela sustentabilidade nos negócios de uma organização pode ser alcançada através do conceito de *Triple Bottom Line* ou Tripé da Sustentabilidade. Esse conceito consiste em equilibrar as dimensões econômica, ambiental e social, garantindo que a empresa considere não apenas o lucro financeiro, mas também os impactos ambientais e sociais de suas atividades. Essa abordagem integral é essencial para promover a sustentabilidade e garantir um futuro equilibrado para as próximas gerações (Aguirre *et al.*, 2024).



Figura 3- Desenvolvimento sustentável

Fonte: Toda matéria (2025).

Segundo Taghikhah *et al.*, (2022), alcançar a sustentabilidade ambiental — entendida como a capacidade de atender às necessidades de recursos e serviços das gerações presentes e futuras sem comprometer a integridade dos ecossistemas globais — constitui um desafio de elevada complexidade, exigindo soluções igualmente sofisticadas e multidimensionais. Nesse cenário, as tecnologias baseadas em inteligência artificial (IA) têm se destacado como ferramentas promissoras para a formulação de respostas eficazes. A IA, caracterizada pela capacidade de as máquinas aprenderem com a experiência, adaptarem-se a novos dados e executarem tarefas de forma autônoma e semelhante à humana, permite extrair padrões e gerar insights a partir de grandes volumes de dados, inclusive os não estruturados, como imagens, vídeos e textos oriundos de redes sociais.

A inteligência artificial (IA) também possibilita o reconhecimento de padrões em larga escala a partir da análise de vastos conjuntos de dados, o que minimiza vieses cognitivos e

favorece a formulação de políticas públicas e soluções orientadas por evidências científicas (O'neil, 2016).

2.5 - O objeto do futuro: Embalagem Inteligente Circular

A proposta de uma embalagem do futuro fundamentada na economia circular combina design regenerativo, inteligência artificial e interatividade digital. Tal processo, em termos práticos, consiste basicamente em dispositivos implantados dentro da embalagem capazes de enviar dados para o computador que fica na central. O uso de materiais recicláveis ou biodegradáveis com múltiplos ciclos planejados está em consonância com os princípios do design regenerativo, visando minimizar impactos ambientais e estender o tempo de uso dos recursos (Stahel, 2019). A presença de inteligência artificial embarcada permite o monitoramento em tempo real das condições ambientais, uso e rastreabilidade logística, tornando possível uma gestão eficiente e preditiva do ciclo de vida da embalagem (Wilson; Paschen; Pitt, 2022). A aplicação de identidade digital única, conceito conhecido como *Digital Twin*, possibilita que cada embalagem possua um histórico completo de sua origem, uso e transformações, agregando valor à rastreabilidade e ao controle de qualidade (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

O conceito de *digital twin* (gêmeo digital) refere-se à criação de uma representação virtual detalhada de um objeto físico, sistema ou processo, alimentada por dados em tempo real obtidos por meio de sensores, tecnologias de rastreamento e Internet das Coisas (IoT). No contexto das embalagens inteligentes, o *digital twin* possibilita que cada unidade possua uma identidade digital única, contendo informações sobre sua origem, composição, ciclo de vida e condições de uso. Esse recurso viabiliza um monitoramento preciso, facilita a logística reversa e potencializa estratégias de economia circular, permitindo a previsão de necessidades de manutenção, o rastreamento de reutilizações e a otimização de processos logísticos. Assim, a aplicação de *digital twins* em embalagens promove maior eficiência operacional e contribui para a redução de impactos ambientais, alinhando-se a práticas de produção e consumo sustentáveis (Tao *et al.*, 2019).

Além disso, a integração com sistemas de logística reversa automatizados viabiliza o retorno eficiente das embalagens ao ciclo produtivo, reduzindo custos e aumentando a circularidade dos materiais (Ribeiro e Ferrarezi Junior, 2025). A funcionalidade pós-consumo, como a possibilidade de transformação da embalagem em objeto doméstico ou organizador, contribui para o aumento do tempo de vida útil e incentiva o reaproveitamento criativo (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Por fim, a interface digital com o usuário, por meio de aplicativos móveis, oferece instruções de devolução, informações sobre reutilização e até recompensas, estimulando o engajamento do consumidor e fortalecendo modelos de economia de desempenho (Sehnm e Pereira, 2019).

3. Método de pesquisa

A metodologia adotada neste estudo possui natureza qualitativa, visando à interpretação e compreensão do objeto de pesquisa. A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica, a partir de livros e artigos, e pesquisa documental, baseada na análise de legislações e relatórios pertinentes. Tal abordagem metodológica está alinhada com os preceitos de Creswell (2014). O estudo parte da análise sobre a integração entre tecnologia digital, economia circular e inteligência artificial no contexto da sustentabilidade ambiental. A investigação busca compreender como a inteligência artificial pode contribuir para o desenvolvimento de embalagens inteligentes e circulares, alinhadas aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O procedimento metodológico adotado baseou-se na análise de literatura nacional e internacional relacionada à temática, abrangendo documentos oficiais, artigos científicos, relatórios institucionais e estudos sobre o objeto. Os principais eixos temáticos incluíram: economia circular aplicada a embalagens, o marco regulatório brasileiro (com destaque para a Política Nacional de Resíduos Sólidos), e o papel da inteligência artificial na rastreabilidade, logística reversa e redesign de produtos. A articulação desses campos permitiu a proposição de um modelo conceitual de embalagem do futuro, fundamentado em princípios regenerativos e potencializado por tecnologias digitais emergentes (Gil, 2008).

Assim, a construção do objeto teórico deste estudo não se baseia em experimentações empíricas diretas, mas em uma análise crítica e fundamentada da produção científica existente e de casos práticos documentados, como os sistemas da Loop e da Algramo. Dessa forma, os procedimentos metodológicos adotados são compatíveis com os objetivos de identificar tendências, mapear desafios e oportunidades, e elaborar uma proposta inovadora para a reconfiguração de embalagens no escopo da sustentabilidade ambiental e da economia circular digital.

4. Resultados e discussões

As embalagens inteligentes circulares demonstram que as alternativas sustentáveis envolvem métodos e inovações que têm potencial de atender às demandas contemporâneas, assegurando a disponibilidade de recursos para as gerações futuras. Essas opções se sobressaem por incentivarem a menor utilização de elementos brutos não renováveis, a queda da liberação de substâncias nocivas, a aplicação de componentes que podem ser reciclados ou se decompõem naturalmente e o uso inteligente de energia em todo o seu ciclo de vida (Varžinskas et al., 2022).

Por sua vez, as abordagens regenerativas vão além da simples redução de danos, buscando reverter os ecossistemas e proporcionar ganhos ambientais. No âmbito do design regenerativo e da economia circular, essas abordagens incentivam ciclos de materiais fechados e a recuperação do meio ambiente, transformando resíduos em recursos valiosos, como embalagens que se decompõem e nutrem o solo ou materiais oriundos de seres vivos com características ativas, unindo inovação tecnológica à restauração dos sistemas naturais (Caner; Yüceer; Harte, 2024).

A discussão sobre as oportunidades e desafios na implementação de embalagens inteligentes e circulares revela visões complementares entre diferentes autores. Geissdoerfer *et al.* (2017), defendem que a economia circular vai muito além da reciclagem, sendo necessária uma mudança sistêmica na forma como produtos são projetados, utilizados e reinseridos no ciclo produtivo. Essa perspectiva abre espaço para oportunidades como a redução da geração de resíduos, a extensão do ciclo de vida dos materiais e a criação de valor

econômico aliado à responsabilidade ambiental. Contudo, segundo Streit (2022), essa transição demanda um esforço coordenado entre indústrias, governos e consumidores, o que se configura como um desafio considerável, principalmente em países onde as cadeias de reciclagem e logística reversa ainda não estão plenamente consolidadas.

A inteligência artificial embarcada em embalagens inteligentes tem potencial para revolucionar a logística reversa. Por meio do monitoramento em tempo real das condições ambientais, uso e rastreabilidade logística, a IA permite uma gestão eficiente e preditiva do ciclo de vida da embalagem, tornando os processos de coleta, triagem e reuso mais eficazes e com base em dados concretos (Wilson; Paschen; Pitt, 2022). Essa capacidade tecnológica oferece oportunidades concretas para elevar a circularidade dos materiais e fortalecer práticas alinhadas a critérios ESG. No entanto, a adoção dessas soluções enfrenta desafios como a necessidade de investimentos elevados, infraestrutura tecnológica adequada e integração de sistemas, além de barreiras culturais relacionadas à aceitação por parte dos consumidores e à adaptação de processos industriais.

De acordo com um trabalho promovido pela McKinsey Sustainability, ambas, IA e economia circular, são duas megatendências que vão alavancar o desenvolvimento sustentável (McKinsey Sustainability, 2019). De acordo com esse estudo, na eliminação de resíduos em uma economia circular, a IA alavancará US\$127 bilhões ao ano em 2030.

Note-se que a IA está presente em todo o processo de produção, desde os estágios de plantio, colheita e processamento até o momento logístico e de consumo. Aplicações como reconhecimento de imagem são ferramentas eficientes que auxiliam não apenas no momento certo da colheita, mas também no processo de oferta e demanda até o escoamento final da produção (McKinsey Sustainability, 2019).

Como apontado por Geissdoerfer *et al.* (2017), a economia circular não se limita à reciclagem, mas demanda inovações sistêmicas na forma como os produtos são projetados, utilizados e reintegrados no ciclo produtivo.

A criação de identidades digitais únicas, o chamado digital *twin*, agrega valor ao ciclo de vida das embalagens e pode incentivar a participação ativa do consumidor em programas de devolução e reuso (Ellen MacArthur Foundation, 2021). Tais resultados apontam para a possibilidade de transformar embalagens em ativos circulares de alto valor estratégico.

Taghikhah et al. (2022) acrescentam que a implementação dessas tecnologias exige um ecossistema colaborativo, no qual empresas, setor público e sociedade civil atuem de forma integrada para superar barreiras técnicas e econômicas. Entre as oportunidades, destacam-se a criação de novos modelos de negócio baseados no reuso e na economia de desempenho, além da contribuição para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Entretanto, os autores alertam que, sem políticas públicas robustas e incentivos econômicos consistentes, o risco é de que essas iniciativas permaneçam restritas a projetos piloto, sem atingir escala suficiente para provocar uma mudança estrutural.

6. Conclusões

A presente pesquisa evidenciou que a interação entre inteligência artificial, sustentabilidade e economia circular representa uma oportunidade promissora para transformar o ciclo de vida das embalagens. O modelo proposto de “embalagem inteligente circular” responde aos desafios contemporâneos do consumo e da produção, os quais se concentram no consumo consciente e descarte adequado, ao incorporar tecnologias digitais, rastreabilidade, reutilização e logística reversa. Essa proposta rompe com o paradigma linear de “extrair-produzir-descartar” ao promover um redesenho sistêmico orientado para a regeneração de recursos e redução de impactos ambientais.

A integração entre inteligência artificial (IA), economia circular e design sustentável apresenta alto potencial para reconfigurar a lógica de produção e descarte de embalagens. A proposta de uma embalagem inteligente circular emerge como uma alternativa viável e estratégica para prolongar o ciclo de vida dos materiais, reduzir a geração de resíduos e promover maior rastreabilidade e controle no uso e descarte dos produtos.

O uso da IA embarcada permite transformar embalagens em objetos autônomos e responsivos, capazes de gerar dados em tempo real sobre sua origem, uso e condições ambientais. Isso favorece a implementação de sistemas logísticos mais eficientes, ao mesmo tempo em que reforça a conformidade com critérios ESG (ambientais, sociais e de governança).

Além disso, os modelos práticos analisados, como os sistemas da Loop e da Algramo, mostram que soluções baseadas em logística reversa automatizada, dispensadores inteligentes e rastreamento digital já estão em operação em diferentes contextos e com bons resultados. Essas experiências concretas reforçam a aplicabilidade da proposta conceitual apresentada e revelam o potencial de implementá-la no Brasil, sobretudo diante da maturidade de políticas como a Política Nacional de Resíduos Sólidos e da crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis no setor produtivo. Assim, os resultados da pesquisa não apenas contribuem para o avanço teórico do tema, como também oferecem subsídios relevantes para o desenvolvimento de políticas públicas e modelos de negócio sustentáveis.

As limitações do corrente trabalho foram advindas do caráter qualitativo da pesquisa realizada e do estilo de abordagem utilizado, bibliográfico e documental, estando inseridas na impossibilidade de explorar percepções relacionadas com os stakeholders, como consumidores e indústrias, assim como no que tange a desafios práticos para a implementação da embalagem inteligente circular. Paralelamente, apesar de terem sido citados os casos de sucesso da Algramo e da Loop, não foi possível um aprofundamento nas barreiras operacionais, regulatórias e culturais que essas empresas tiveram que superar.

Os resultados obtidos neste estudo abrem caminho para a prospecção de novas pesquisas, recomendando-se a exploração das seguintes lacunas: iniciativas que versem de modo técnico sobre como uma embalagem do tipo proposto pode ser produzida e disponibilizada no mercado; o impacto financeiro a curto e longo prazo para as empresas e consumidores. Não negligenciando, porém, os aspectos preocupantes relacionados ao uso da IA, como por exemplo: proteção dos dados; quantidade de energia necessária para o funcionamento dos sistemas de Inteligência Artificial; entraves políticos, econômicos e ambientais relacionados aos recursos computacionais necessários para a criação e manutenção dessa tecnologia.

Por fim, conclui-se que o desenvolvimento e aplicação de embalagens inteligentes e circulares no Brasil podem contribuir significativamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que tange à produção e consumo responsáveis (ODS 12), inovação e infraestrutura (ODS 9) e ação contra a mudança global do clima (ODS 13).

Referências

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Reciclagem do Alumínio. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abal.org.br>. Acesso em: 07 ago. 2025.

ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017. [Edição especial 15 anos]. 2018. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>. Acesso em: 07 ago. 2025.

AEROLITO. Relatório 50 objetos do amanhã. 2021. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/178955/1622134807Relatorio_50_Objeto do Amanha_Aerolito.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025.

AGUIRRE RODRÍGUEZ, Elias Carlos; HERNÁNDEZ, Cecilia Toledo; AGUIRRE-RODRÍGUEZ, Elen Yanina; DA SILVA, Aneirson Francisco; MARINS, Fernando Augusto Silva. Reverse Logistics and the Circular Economy: A Study before and after the Implementation of the National Solid Waste Policy in Brazil. *Recycling*, v. 9, n. 4, art. 64, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-4321/9/4/64>. Acesso em: 14 set. 2025.

ALGRAMO. Smart dispensing and packaging system for circular consumption. Santiago: Algramo, 2023. Disponível em: <https://www.algramo.com>. Acesso em: 07 ago. 2025.

ASSUNÇÃO, G. M. de; TAVARES, D. C.; BOLOY, R. A. M. Perspectivas globais sobre resíduos sólidos municipais: descarte e economia circular – uma revisão, dez. 2023. Disponível em: <https://zenodo.org/records/10518005>. Acesso em: 14 set. 2025.

AZEVEDO, J. L. “A Economia Circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa”. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão (2015). Disponível em: https://www.academia.edu/35145546/A_ECONOMIA_CIRCULAR_APLICADA_NO_BRASIL_UMA_ANALISE_A_PARTIR_DOS_INSTRUMENTOS_LEGAIS_EXISTENTES_PARA_A_LOGISTICA_REVERSA. Acesso em: 14 set. 2025.

BARBIERI, J. C. (2007). *Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. Saraiva, São Paulo.

BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J. *Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimentos*. São Paulo: Atlas, 2001.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm. Acesso em: 14 set. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 14 set. 2025.

CANER, Cengiz; YÜCEER, Muhammed; HARTE, Bruce. Trends in Sustainability and Innovative Food Packaging Materials: An Overview. *Akademik Gıda*, 2024, p. 65-77, 23 set. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384243834_Trends_in_Sustainability_and_Innovative_Food_Packaging_Materials_An_Overview. Acesso em 14 set. 2025.

CASTILHO, Rubens. Entendendo o Tripé da Sustentabilidade: conceitos e importância. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/tripe-da-sustentabilidade/>. Acesso em: 13 set. 2025.

CEBDS - Clima, Energia e Finanças Sustentáveis. Emergência Climática é a palavra do ano. Disponível em: <https://cebds.org/noticia/emergencia-climatica-e-a-palavra-do-ano>. Acesso em: 06 set. 2025.

CIRAVEGNA, Erik. A história da Algramo. *Fondazione Carta Etica del Packaging*, 2023. Disponível em: <https://fondazionecartaeticapackaging.org/storie-di-etica/the-story-of-algramo/?lang=en>. Acesso em: 13 set. 2025.

CLIMATE EMERGENCY. In: OXFORD LEARNER'S DICTIONARIES. Oxford: Oxford University Press, 2025. Disponível em: <https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/climate-emergency>. Acesso em: 06 set. 2025.

COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M. de; ASSUNÇÃO, G. M. de. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (GeAS)*, v. 9, n. 1, p. 1–30, e16147, 2020. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/16147/8165>. Acesso em: 14 set. 2025.

CRESWELL, J. W. *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2014.

D'ALMEIDA, A. P.; ALBUQUERQUE, T. L. de. Innovations in Food Packaging: From Bio-Based Materials to Smart Packaging Systems. *Processes*, Basel, v. 12, n. 10, p. 2085, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/10/2085>. Acesso em: 16 set. 2025.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change*. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation; Material Economics, 2021. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>. Acesso em: 02 ago. 2025.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Inteligência artificial e economia circular: a IA como ferramenta para acelerar a transição. 2019. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/artificial-intelligence-and-the-circular-economy-ai-as-a-tool-to-accelerate-the-transition/pt-BR>. Acesso em: 12 set. 2025.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics. Cowes: EMF, 2016. Disponível em: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/1775fbba280fa21/original/The-New-Plastics-Economy-Rethinking-the-future-of-plastics.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

GEISSDOERFER, Martin;SAVAGET, Paulo;BOCKEN, Nancy;HULTINK, Erik Jan. The Circular Economy - A New Sustainability Paradigm? (2017). *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 757-768, 2017. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2930842. Acesso em: 16.09.2025.

GEISSEN, A. et al. The role of AI, blockchain and the Internet of Things in enabling a circular economy. In: *Proceedings of the 5th International Conference on the Internet of Things (IOT)*, 2020. p. 1-8. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363709182_AI_Blockchain_and_IOT. Acesso em: 12 set. 2025.

GIL, Antônio Carlos. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GRUBBA, Leilane Serratine; LOCATELLI, Huryel. Obsolescência programada: impactos no desenvolvimento sustentável e sustentado na sociedade contemporânea. *Revista de Direito, Passo Fundo*, v. 15, n. 01, p. 1-25, 2023. DOI: 10.32361/2023150114617. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/revistadir/article/view/14617>. Acesso em: 16 set. 2025.

JOSÉ, R. et al. Artificial intelligence-driven circular economy as a key enabler for sustainable energy management. *Materiais de Economia Circular*, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344304076_Artificial_Intelligence-Driven_Circular_Economy_as_a_Key_Enabler_for_Sustainable_Energy_Management. Acesso em: 12 set. 2025.

KAZA, S. et al. (2018). “What a Waste 2.0: a global snapshot of solid waste: managementeto2050”. Banco Mundial. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>. Acesso em: 31 jul. 2025.

LANIER, J. There Is No A.I. *The New Yorker*, 20 abr. 2023. Disponível em: <https://www.newyorker.com/science/annals-of-artificial-intelligence/there-is-no-ai>. Acesso em: 31 jul. 2025.

LOOP. What is Loop? TerraCycle Global Foundation, 2023. Disponível em: <https://explorelloop.com>. Acesso em: 07 ago. 2025.

MCKINSEY SUSTAINABILITY. Inteligência artificial e economia circular: a IA como NAÇÕES UNIDAS – UN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GROUP. Harnessing Artificial Intelligence for Sustainable Development Goals (SDGs). 8 maio 2024. Disponível em: <https://unsdg.un.org/latest/announcements/harnessing-artificial-intelligence-sustainable-development-goals-sdgs>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MUZY, J. Oportunidades da IAG no papel e embalagens. AINEWS, 2 fev. 2025. Disponível em MUZY, J. Oportunidades da IAG no papel e embalagens. AINEWS, 2 fev. 2025. Disponível em: <https://ainews.net.br/oportunidades-iag-papel-embalagens/>. Acesso em: 12 set. 2025. Acesso em: 12 set. 2025

O'NEIL, C. Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy. New York: Crown, 2016.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Global Waste Management Outlook. [S.l.]: UNEP, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em: 12 set. 2025.

RANZAN, E. M. A Gestão da Sustentabilidade em Eventos: As orientações da NBR ISO 20121. Educação, Tecnologia e Cultura-ETC, [S. l.], p. 1–14, 2016. Disponível em: <https://publicacoes.ifba.edu.br/index.php/etc/article/view/3>. Acesso em 16 set. 2025.

RECICLA SAMPA. Grandes marcas se unem em plataforma lixo zero de embalagens reutilizáveis. Recicla Sampa, 2019. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/grandes-marcas-se-unem-em-plataforma-lixo-zero-de-embalagens-reutilizaveis>. Acesso em: 13 set. 2025.

RIBEIRO, Vitória Regina Faustino; FERRAREZI JUNIOR, Edegar. Strategic management of reverse logistics of packaging used in rural properties. Revista Interface Tecnológica, Taquaritinga, SP, v. 21, n. 1, p. 542-553, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/388489260_GESTAO ESTRATEGICA DA LOGISTICA REVERSA DE EMBALAGENS UTILIZADAS EM PROPRIEDADES RURAIS. Acesso em: 14 set. 2025.

SEHNEM, Simone; PEREIRA, Susana Carla Farias. Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. Revista Eletrônica de Ciência Administrativa, [S.l.], v. 18, n. 1, p. 35-62, jan. 2019. ISSN 1677-7387. Disponível em: <https://www.periodicosibepes.org.br/index.php/recadm/article/view/2581>. Acesso em: 15 set. 2025.

SILVA, Maria Fernanda; OLIVEIRA, Ricardo Tavares. Embalagens e economia circular: desafios e perspectivas para a gestão de resíduos no Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 56–72, 2021.

SILVA, V. P. M.; CAPANEMA, L. X. de L. (2019). “Public policies in solid waste management: compared experiences and challenges for Brazil.” In: BNDES Set (2011 a 2019), Rio de Janeiro, Sanitation Edition; v. 25, n. 50, p. 153-200.

STAHEL, W. R. (2019). *The Circular Economy: A User's Guide*. Routledge. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332935101_The_Circular_Economy_-_a_user's_guide. Acesso em: 17 set. 2025.

STREIT, J. A. C.; FARIA, E. O.; CARVALHO, J. M. Que país é esse? Desafios para uma Economia Circular de embalagens no Brasil. In: XLVI Encontro da ANPAD – EnANPAD 2022, On-line, 21-23 set. 2022. Anais... Versão online: páginas 2177-2576. Duque de Caxias: ANPAD, 2022. Disponível em: <https://anpad.com.br/uploads/articles/120/approved/0224cd598e48c5041c7947fd5cb20d53.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025

TAGHIKHAH, F.; ERFANI, E.; BAKHSHAYESHI, I.; TAYARI, S.; KARATOPOUZIS, A.; HANNA, B.. Artificial intelligence and sustainability: solutions to social and environmental challenges. *Sustainable Production and Consumption*, [S.l.], p. 93-108, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032390508400006X?via%3Dihub>. Acesso em: 16 set. 2025.

TAO, Fei; ZHANG, He; LIU, Ang; NIE, Jiafu. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/345078627_Digital_Twin_in_Industry_State-of-the-Art. Acesso em: 16 set. 2025.

VARŽINSKAS, V. et al. Smart Material Choice: The Importance of Circular Design Strategy Applications for Bio-Based Food Packaging Pre-production and End-of-Life Life Cycle Stages. *Sustainability*, v. 14, n. 10, p. 6366, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/6366>. Acesso em: 16 set. 2025.

VERSINO, F.; ORTEGA, F.; MONROY, Y.; RIVERO, S.; LÓPEZ, O.V.; GARCÍA, M.A. Sustainable and Bio-Based Food Packaging: A Review on Past and Current Design Innovations. *Foods* 2023, 12, 1057. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/5/1057>. Acesso em: 07 set. 2025.

WILSON, M.; PASCHEN, J.; PITT, L. The circular economy meets artificial intelligence (AI): Understanding the opportunities of AI for reverse logistics. *Management of Environmental Quality*, v. 33, n. 1, p. 9-25, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363462014_The_circular_economy_meets_artificial

_intelligence_AI_understanding_the_opportunities_of_AI_for_reverse_logistics.
em: 12 set. 2025.

Acesso