

# INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO CATALISADORA DA INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: INTERSECÇÕES COM A ECONOMIA CIRCULAR

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos desafios ambientais e econômicos tem impulsionado a busca por modelos alternativos capazes de promover eficiência no uso de recursos e redução de impactos. Nesse cenário, a Economia Circular (EC) emerge como estratégia central para a transição sustentável, fundamentada em princípios de reutilização, regeneração e valorização de materiais (Kirchherr et al., 2017, Geissdoerfer et al., 2017, Stahel, 2016). Paralelamente, os avanços da Inteligência Artificial (IA) e de técnicas de machine learning vêm sendo considerados catalisadores de inovação, permitindo otimização de processos, previsões mais robustas e integração de dados complexos (Bonakdari et al., 2025, Jan et al., 2025, Balogun et al., 2025).

O presente artigo tem como objetivo revisar a literatura acerca das intersecções entre IA e EC, buscando compreender como a primeira tem sido aplicada como suporte à inovação sustentável em modelos circulares. Para tanto, realizou-se uma revisão sistemática da literatura em bases internacionais, identificando 63 artigos publicados até setembro de 2025.

Os resultados apontam predominância da IA em modelagem preditiva e avaliação de desempenho, bem como aplicações em gestão de resíduos, agroindústria e cidades inteligentes. Identificam-se, ainda, lacunas em contextos de PMEs e países com mercados emergentes, indicando a necessidade de abordagens mais integrativas e empíricas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ECONOMIA CIRCULAR

Nos últimos anos, a Economia Circular (EC) tem sido destacada como abordagem promissora ao desenvolvimento sustentável (Bakker et al., 2021), contrapondo-se ao modelo linear. A EC busca reduzir e otimizar a produção e o consumo, equilibrando economia, meio ambiente e sociedade (Kristensen; Mosgaard, 2020). Trata-se de um sistema industrial reparador e regenerativo, com potencial de inovação, geração de empregos e crescimento (Sehnm; Pereira, 2019). A EC oferece benefícios como redução de custos, aumento da competitividade, recuperação ambiental e geração de empregos (Zemanová, 2023). Envolve redes produtivas e estimula práticas éticas e sustentáveis (Murray et al., 2017), incluindo o prolongamento da vida útil dos produtos (Vanegas et al., 2017). Contudo, enfrenta barreiras tecnológicas (Jabbour et al., 2020, Kumar et al., 2019). Tecnologias, como inteligência artificial, podem apoiar sua implementação (Bag et al., 2020), embora as interações entre Indústria 4.0 e EC ainda careçam de clareza, pois ambos são temas emergentes (Mardani et al., 2022).

### 2.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Nos últimos anos, a Inteligência Artificial (IA) expandiu-se rapidamente, presente em diversas situações, muitas vezes de forma imperceptível (Faceli, 2021). Esse crescimento deve-se ao avanço das tecnologias de extração, armazenamento e processamento de dados (Carvalho, 2021). Considerada uma revolução tecnológica capaz de transformar o mundo (Brock; von Wangenheim, 2019), a IA é definida como sistemas que imitam funções cognitivas humanas, como aprendizado e resolução de problemas (Russell; Norvig, 2016). Para Kaplan e Haenlein (2019), trata-se da capacidade de interpretar dados externos e adaptar-se a objetivos específicos.

Os benefícios incluem otimização do tempo e melhor desempenho em atividades computacionais (Alsetoohy; Ayoun, 2018). Na Economia Circular (EC), a IA promove previsões sobre resíduos e demandas (Ranta et al., 2021), reduz impactos ambientais (Bianchi et al., 2019), desenvolve produtos alinhados às necessidades dos clientes e melhora a gestão de estoques (Rejeb et al., 2022), sendo central na Indústria 4.0 (Xu et al., 2018, Hallioui et al., 2022).

## 2.3 INTERFACES ENTRE ECONOMIA CIRCULAR E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A EC surge como estratégia para equilibrar desenvolvimento econômico, ambiental e social (Kristensen; Mosgaard, 2020, Bakker et al., 2021). Sua implementação, porém, enfrenta barreiras tecnológicas (Jabbour et al., 2020, Kumar et al., 2019). Nesse contexto, a IA, definida como sistemas capazes de aprender e adaptar-se (Russell; Norvig, 2016, Kaplan; Haenlein, 2019), apresenta-se como aliada. A IA pode otimizar processos industriais, reduzir impactos ambientais e apoiar decisões estratégicas (Ranta et al., 2021, Bianchi et al., 2019, Rejeb et al., 2022), sendo essencial para integrar a Indústria 4.0 à transição para a EC (Xu et al., 2018, Hallioui et al., 2022).

## 3 MÉTODO

Com o objetivo de compreender como a IA tem sido aplicada como catalisadora da inovação sustentável em modelos de EC, realizou-se uma revisão sistemática da literatura. A estratégia adotada seguiu as diretrizes de Lages Junior e Godinho Filho (2010), posteriormente aplicadas por Jabbour (2013) e Teixeira et al. (2025).

A busca foi conduzida em setembro de 2025, na base Scopus, utilizando as palavras-chave “circular economy” AND “artificial intelligence”, bem como variações como “machine learning” e “deep learning”. Não foram estabelecidos recortes temporais, abrangendo títulos, resumos e palavras-chave.

Foram identificados 71 artigos. Após exclusão de duplicados, publicações sem acesso integral e trabalhos fora do escopo, restaram 63 artigos para análise. O processo seguiu o protocolo PRISMA (Moher et al., 2009), garantindo rigor e rastreabilidade.

Os artigos foram sistematizados em planilhas e analisados por estatística descritiva, com apoio do MS Excel, além de bibliometria via VOSviewer e Bibliometrix. Por fim, adotou-se sistema de classificação e codificação (Lages Junior; Godinho Filho, 2010), considerando foco, métodos, setores, teorias e técnicas de IA associadas à EC.

## 4 RESULTADOS

A análise dos 63 artigos evidencia que a Inteligência Artificial (IA) tem sido considerada uma das principais alavancas para a inovação sustentável em modelos de Economia Circular (EC). A IA é vista como instrumento capaz de otimizar processos, prever cenários, apoiar a tomada de decisão e ampliar a eficiência em cadeias de valor. Essa associação reflete uma tendência interdisciplinar, em que tecnologias digitais e princípios circulares convergem para enfrentar desafios ambientais, econômicos e sociais.

A literatura mostra que a IA atua como suporte à tomada de decisão em contextos complexos, identificando padrões ocultos em grandes volumes de dados e permitindo a previsão de fluxos materiais e energéticos. Técnicas como machine learning, deep learning e algoritmos explicáveis (XAI), sobretudo Random Forest e SHAP, têm sido aplicadas à análise de resíduos, ao planejamento logístico, à avaliação de riscos ambientais e à mensuração de indicadores como pegada de carbono e de água. Esse conjunto de aplicações reforça a ideia da IA como

catalisadora de inovação, ampliando a precisão e a robustez das estratégias circulares em setores como construção civil, agroindústria, energia e gestão de resíduos.

Do ponto de vista teórico, a EC consolidou-se como referencial transversal. Obras como Kirchherr et al. (2017), Geissdoerfer et al. (2017), Stahel (2016), Su et al. (2013) e relatórios da Ellen MacArthur Foundation são constantemente citados para fundamentar as práticas circulares. Esses referenciais ancoram a literatura em pilares conceituais sólidos, que conectam sustentabilidade, inovação e modelos de negócio circulares. Paralelamente, surgem teorias complementares, como capacidades dinâmicas, aprendizagem organizacional, inovação sustentável e governança institucional, ampliando a densidade explicativa dos estudos e destacando fatores organizacionais e institucionais que condicionam a adoção da circularidade mediada por IA.

Do ponto de vista metodológico, observa-se uma evolução clara. Os trabalhos iniciais priorizavam revisões conceituais e estudos qualitativos, voltados à definição e legitimação do campo. Progressivamente, os estudos passaram a incorporar modelagem quantitativa avançada, com destaque para algoritmos de IA aplicados a grandes bases de dados. Há também expansão das abordagens mistas, que combinam surveys, análises estatísticas e estudos de caso. A integração entre métricas ambientais (como ACV e indicadores de desempenho) e técnicas preditivas revela uma tendência de hibridização, na qual a tecnologia é utilizada para dar robustez às análises ambientais e econômicas.

Entre os benefícios atribuídos à IA em estratégias circulares, destacam-se:

- Eficiência operacional, com otimização de processos produtivos, redução de perdas e melhor aproveitamento de recursos.
- Aprimoramento da mensuração, pela integração entre métricas tradicionais e técnicas de IA, aumentando a comparabilidade entre cenários.
- Suporte à inovação em modelos de negócio, incluindo o product-as-a-service, ecodesign e modularidade de produtos.
- Escalabilidade das práticas circulares, possibilitando replicar soluções em diferentes setores e contextos.

A Tabela 1 sintetiza a incidência dos principais temas identificados, indicando sua representatividade na amostra e exemplos de referências associadas.

Tabela 1: Incidência temática e referências

<b>Tema</b>	<b>N artigos</b>	<b>% do total</b>	<b>Referências</b>
<b>IA e modelagem preditiva na Economia Circular</b>	61	98.4	Bonakdari et al. (2025), Jan et al. (2025), Balogun et al. (2025), Selvam et al. (2025), Andika et al. (2025)
<b>Pequenas e Médias Empresas (PMEs) e contextos emergentes</b>	36	58.1	Andika et al. (2025), Da Luz et al. (2025), Chen; Hu (2025)
<b>Gestão de resíduos sólidos e reciclagem</b>	33	53.2	Jan et al. (2025), Balogun et al. (2025), Selvam et al. (2025), Subedi et al. (2025), Da Luz et al. (2025)
<b>Barreiras, habilitadores e capacidades organizacionais</b>	31	50.0	Bonakdari et al. (2025), Jan et al. (2025), Mihai et al. (2025), Waqas et al. (2025)
<b>Cidades inteligentes, IoT e cadeias digitais</b>	30	48.4	Subedi et al. (2025), Mihai et al. (2025), Waqas et al. (2025)

Fonte: autores.

A Tabela 2 resume as principais contribuições teóricas e metodológicas dos artigos analisados, destacando os referenciais adotados, os métodos mais recorrentes e exemplos de estudos representativos.

Tabela 2: contribuições teóricas e metodológicas

<b>Tema Teórico</b>	<b>Métodos mais usados</b>	<b>Exemplos de artigos</b>
<b>Economia Circular como arcabouço central</b>	Revisões de literatura; Análises conceituais; Estudos de caso ilustrativos	Andika et al. (2025); Jan et al. (2025)
<b>Teoria Institucional e Governança</b>	Estudos comparativos; Análise documental de políticas; Estudos de caso em países (UE, China, Brasil)	Chen; Hu (2025); Bonakdari et al. (2025)
<b>Capacidades Dinâmicas e Aprendizagem Organizacional</b>	Entrevistas qualitativas; Surveys; Abordagens mistas	Balogun et al. (2025); Selvam et al. (2025)
<b>Sustentabilidade e Inovação</b>	Análises de ciclo de vida (LCA); Modelos de simulação; Estudos de inovação tecnológica	Andika et al. (2025); Selvam et al. (2025)
<b>Digitalização e Indústria 4.0</b>	Aplicações de IA/ML (Random Forest, SHAP, redes neurais); Modelagem preditiva; IoT/Blockchain	Da Luz et al. (2025); Balogun et al. (2025)

Fonte: autores.

Apesar desses avanços, a literatura também aponta limitações importantes. Muitos estudos ressaltam a dependência de dados de qualidade, frequentemente indisponíveis em PMEs e países emergentes. Além disso, o alto custo de implementação limita a difusão das soluções digitais, especialmente em organizações de pequeno porte. Outro ponto crítico é a interpretação dos resultados, que ainda gera desconfiança em gestores e formuladores de políticas, apesar dos progressos em IA explicável. A análise também revela a fragmentação teórica, pois não há ainda um quadro integrador que una de maneira sistemática a EC à IA.

#### 4.1 LACUNAS E RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA

A revisão evidencia lacunas que abrem espaço para investigações futuras:

- R1: exploração em PMEs e países emergentes, onde há escassez de infraestrutura tecnológica e de dados. Estudos devem investigar soluções de baixo custo e adaptadas a esses contextos.
- R2: integração de referenciais teóricos – há necessidade de modelos híbridos que combinem EC, capacidades dinâmicas, inovação sustentável e governança, permitindo análises mais completas.
- R3: aplicação em setores pouco explorados, como bioenergia, resíduos perigosos e cadeias complexas da construção civil.
- R4: avanços em interpretabilidade de algoritmos, com desenvolvimento de frameworks que fortaleçam a confiabilidade da IA em contextos decisórios.
- R5: dimensão social e ética, analisando impactos de inclusão, equidade e justiça na adoção de soluções baseadas em IA.
- R6: estudos de escalabilidade, examinando como ferramentas digitais podem ser replicadas em diferentes setores e realidades institucionais.

## 5 CONCLUSÃO

A revisão da literatura mostrou que a Inteligência Artificial (IA) tem assumido papel estratégico na Economia Circular (EC), contribuindo para otimizar processos, prever cenários, mensurar impactos ambientais e apoiar novos modelos de negócio circulares. No plano teórico,

a EC consolidou-se como referencial central, complementada por abordagens institucionais, de capacidades dinâmicas e inovação sustentável. Metodologicamente, observa-se evolução das revisões conceituais para análises quantitativas sofisticadas, com destaque para algoritmos de aprendizado de máquina e técnicas explicáveis, além da adoção crescente de métodos mistos.

Persistem, contudo, limitações relevantes, como a escassez de dados, os custos de implementação e a concentração de estudos em países desenvolvidos. Recomenda-se que futuras pesquisas explorem contextos emergentes, fortaleçam a integração teórica e avancem em interpretabilidade e implicações sociais. Avançar nesses pontos é essencial para consolidar a IA como catalisadora da transição para práticas econômicas mais sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

**ANDIKA, Alif et al.** Transitioning towards zero waste in the agri-food supply chain: a review of sustainable circular agri-food supply chain. *Sustainable Futures*, p. 100917, 2025.

**ALSETOOHY, Omar; AYOUN, Baker.** Intelligent agent technology: The relationships with hotel food procurement practices and performance. *Journal of Hospitality and Tourism Technology*, v. 9, n. 1, p. 109-124, 2018.

**BAG, S.; YADAV, G.; WOOD, L. C.; DHAMIJA, P.; JOSHI, S.** Industry 4.0 and the circular economy: Resource melioration in logistics. *Resources Policy*, v. 68, p. 101776, 2020.

**BAKKER, C. A. et al.** Understanding and managing product lifetimes in support of a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, 2021.

**BALOGUN, Habeeb et al.** Deconstructability prediction for building using machine learning and ensemble feature selection techniques. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 22152, 2025.

**BIANCHINI, A.; ROSSI, J.; PELLEGRINI, M.** Overcoming the main barriers of circular economy implementation through a new visualization tool for circular business models. *Sustainability*, v. 11, n. 23, p. 6614, 2019.

**BONAKDARI, Hossein et al.** Sustainable Wastewater-to-Hydrogen Systems in Canada: A Scenario-Based Decision Support Analysis. *Renewable Energy*, p. 124308, 2025.

**BROCK, J. K.-U.; VON WANGENHEIM, F.** Demystifying AI: What Digital Transformation Leaders Can Teach You about Realistic Artificial Intelligence. *California Management Review*, v. 61, n. 4, p. 110-134, 2019.

**CARVALHO, André Carlos Ponce de Leon Ferreira de.** Inteligência Artificial: riscos, benefícios e uso responsável. *Estudos Avançados*, v. 35, p. 21-36, 2021.

**CHEN, Quancheng; HU, Xuemei.** Tort liability for the application risk of generative artificial intelligence technology in the circular economy and financial industry: evidence from China. *Humanities and Social Sciences Communications*, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2025.

**DA LUZ, Gustavo PCP et al.** Repurposing of TV boxes for a circular economy in smart cities applications. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 22638, 2025.

**DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. et al.** Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, v. 270, n. 1, p. 273-286, 2018.

**EJEB, A.; SUHAIZA, Z.; REJEB, K.; SEURING, S.; TREIBLMAIER, H.** The Internet of Things and the circular economy: A systematic literature review and research agenda. *Journal of Cleaner Production*, v. 350, p. 131439, 2022.

**FACELI, Katti; LORENA, Ana Carolina; GAMA, João; ALMEIDA, Tiago Agostinho de; CARVALHO, André Carlos Ponce de Leon Ferreira de.** Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina. 2021.

**HALLIOUI, A.; HERROU, B.; SANTOS, R. S.; KATINA, P. F.; EGBUE, O.** Systems-based approach to contemporary business management: An enabler of business sustainability

in a context of industry 4.0, circular economy, competitiveness and diverse stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, p. 133819, 2022.

**JABBOUR, Charbel José Chiappetta.** Environmental training in organisations: From a literature review to a framework for future research. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 74, p. 144-155, 2013.

**JAN, Saima et al.** Biodiesel in circular economy: A perspective study on recent trends and environmental challenges in sustainable energy production. *Renewable Energy*, p. 123840, 2025.

**JUNIOR, Muris Lage; GODINHO FILHO, Moacir.** Variations of the kanban system: Literature review and classification. *International Journal of Production Economics*, v. 125, n. 1, p. 13-21, 2010.

**KAPLAN, Andreas; HAENLEIN, Michael.** Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons*, v. 62, n. 1, p. 15-25, 2019.

**KRISTENSEN, H. S.; MOSGAARD, M. A.** A review of micro level indicators for a circular economy—moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, v. 243, p. 118531, 2020.

**KUMAR, V. et al.** Circular economy in the manufacturing sector: Benefits, opportunities and barriers. *Management Decision*, v. 57, n. 4, p. 1067-1086, 2019.

**MARDANI, A.; WEBER, G. W.; KHAN, S. A. R.** Guest editorial: Editorial for special issue on the role of big data on the transition to circular economy and sustainable operations management. *Journal of Enterprise Information Management*, v. 35, n. 4/5, p. 949-954, 2022.

**MIHAI, Laurențiu-Stelian et al.** A Bibliometric Analysis of the Role of Digitalization in Achieving Sustainability-Oriented Innovation. *Sustainability*, v. 17, n. 13, p. 5822, 2025.

**MOHER, David et al.** PRISMA group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses. 2009.

**MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K.** The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, v. 140, p. 369-380, 2017.

**RANTA, V.; AARIKKA-STENROOS, L.; VÄISÄNEN, J. M.** Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy—Multiple case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 164, p. 105155, 2021.

**RUSSEL, S.; NORVIG, P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. Nova Jérsei: Pearson Education Limited, 3. ed., 2016.

**SELVAM, D. Christopher et al.** Advances in waste-derived nano-catalysts for zinc–air batteries: Enhancing OER efficiency and sustainability in energy storage. *Applied Energy*, v. 400, p. 126605, 2025.

**SUBEDI, Ajaya et al.** Leveraging machine learning for sustainable solid waste management: A global perspective. *Sustainable Futures*, v. 10, p. 101098, 2025.

**TEIXEIRA, Talita Borges et al.** 'BETTER SIDE BY SIDE': An Integrative Framework Between Lean Manufacturing and Circular Economy. *Business Strategy & Development*, v. 8, n. 2, p. e70139, 2025.

**VANEGAS, P. et al.** Facilidade de desmontagem de produtos para apoiar estratégias de economia circular. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 135, p. 323-334, 2018.

**WAQAS, U.; UMAIR, S.; MRUGALSKA, B.; BAIT ALI SULAIMAN, M. A.** Twin transformation: The role of digitalization with artificial intelligence, big data and circular supply chain in circular economy performance for sustainability. *Equilibrium Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, v. 20, n. 2, p. 613-645, 2025.

**XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L.** Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.