

Circularidades potencializadas: Inteligência Artificial como apoio ao Design Circular

Enhanced Circularities: Artificial Intelligence as Support for Circular Design

Circularidades potenciadas: Inteligencia Artificial como apoyo al Diseño Circular

Guilherme Parolin¹

Resumo

Este artigo explora potencialidades de contribuição da Inteligência Artificial (IA) à otimização de processos de Análise do Ciclo de Vida (ACV) de produtos e serviços a partir de abordagens de Design Circular (DC). Por meio de pesquisa bibliográfica, são levantadas potenciais afinidades de sistemas de IA a processos de ACV orientados por DC, as quais apontam que sistemas de IA possuem aplicações potenciais diversas nesses contextos e que perpassam todas as fases do ciclo de vida. O estudo contribui para preencher a lacuna de conhecimento sobre aplicações de IA nas fases iniciais de processos de design e, especialmente, oferece insumos para a otimização de processos de ACV orientados por DC.

Palavras-chave: Design circular; análise do ciclo de vida; inteligência artificial.

Abstract

This article explores the potential contributions of Artificial Intelligence (AI) to the optimization of Life Cycle Assessment (LCA) processes for products and services based on Circular Design (CD) approaches. Through bibliographic research, potential affinities between AI systems and CD-oriented LCA processes are identified, which indicate that AI systems have diverse potential applications in these contexts and span all phases of the life cycle. The study contributes to filling the knowledge gap regarding AI applications in the early stages of design processes and, especially, provides inputs for optimizing CD-oriented LCA processes.

Keywords: Circular design; life cycle assessment; artificial intelligence.

Resumen

Este artículo explora las potencialidades de contribución de la Inteligencia Artificial (IA) a la optimización de procesos de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de productos y servicios a partir de enfoques de Diseño circular (DC). Por medio de investigación bibliográfica, se identifican potenciales afinidades de sistemas de IA con procesos de ACV orientados por DC, las cuales señalan que los sistemas de IA poseen diversas aplicaciones potenciales en estos contextos y que atraviesan todas las fases del ciclo de vida. El estudio contribuye a llenar la laguna de conocimiento sobre aplicaciones de IA en las fases iniciales de procesos de diseño y, especialmente, ofrece insumos para la optimización de procesos de ACV orientados por DC.

Palabras clave: Diseño circular; análisis del ciclo de vida; inteligencia artificial.

¹ Professor assistente do curso de Design da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), é graduado em Design - habilitação design de produto (UFRGS), Mestre e Doutor em Design (UFRGS). Sua pesquisa explora especialmente o potencial do design como ferramenta de inteligência para potencializar processos criativos e de transição à sustentabilidade. E-mail: guilherme.parolin@ufpel.edu.br. ORCID 0000-0002-9300-9797.

Introdução

Há crescente interesse na Economia Circular (EC) (Wilson et al., 2022), abordagem que busca "desvincular a riqueza do uso de recursos" (Berg & Bakker, 2015), extraindo máximo valor das matérias-primas ao reutilizá-las repetidamente (Noman et al., 2022) e mantendo insumos – produtos, materiais ou recursos – pelo maior tempo possível (Wilson et al., 2022).

A EC baseia-se na gestão eficiente de recursos, mantendo-os no sistema técnico ou facilitando sua reintegração à natureza (Akinode & Oloruntoba, 2020). Isso ocorre desde o nível de projeto (otimização do design sob perspectiva do ciclo de vida), passando pelo operacional (viabilização de modelos de negócio inovadores) até a infraestrutura (digitalização de ativos, permitindo previsibilidade e otimização de recursos) (Ellen MacArthur Foundation, 2019 citado em Akinode & Oloruntoba, 2020). O Design Circular (DC) é ferramenta fundamental da EC. Designers têm papel essencial no projeto de produtos circulares (Ghoreishi & Happonen, 2020), com 80 a 90% dos ganhos de desmontagem determinados na fase de projeto (Desai & Mital, 2003 citado em Berg & Bakker, 2015).

Paralelamente, técnicas como Inteligência Artificial (IA), Aprendizado de Máquina (AM) e Mineração de Dados (MD) são crescentemente utilizadas para fluxos circulares (Noman et al., 2022). A abundância de dados e disponibilidade de hardware/software favorecem o uso de IA. Como tecnologia da Indústria 4.0, a IA permite superar barreiras à adoção da EC, com aplicações em automação, obtenção de insights, engajamento e projeto de produtos e serviços (Tutore et al., 2024). Entretanto, pouca atenção tem sido dada a como ferramentas de IA podem apoiar designers orientados pelo DC. Embora estudos explorem afinidades entre IA e DC, a maioria concentra-se em estágios que não envolvem diretamente o design conceitual (Tutore et al., 2024).

Este artigo investiga, exploratoriamente, o alinhamento de sistemas de IA com estratégias de DC sob perspectiva do ciclo de vida. A questão central é: "como a Inteligência Artificial pode contribuir para projetos orientados pelo Design Circular, na otimização do ciclo de vida de produtos e serviços?".

Métodos

Este artigo emprega uma abordagem metodológica exploratória para investigar as contribuições potenciais das tecnologias de IA para projetos orientados pelos princípios do DC, com foco particular no conceito de otimização do ciclo de vida de produtos-sistemas. Para esta análise abrangente, utilizamos o modelo de Ciclo de Vida desenvolvido por Manzini e Vezzoli (2002) como nosso referencial conceitual, que fornece uma compreensão estruturada dos diferentes estágios onde as intervenções de IA podem ser mais benéficas.

A metodologia de pesquisa se desdobra em três fases sequenciais. Inicialmente, por meio de pesquisa bibliográfica, examinamos e apresentamos minuciosamente os temas fundamentais do DC e da gestão do ciclo de vida de produtos-sistemas, estabelecendo a base teórica para nossa investigação. Subsequentemente, identificamos e analisamos as aplicações potenciais da IA como mecanismos de apoio para as práticas de DC, a partir da literatura acadêmica relevante. As potencialidades e capacidades de IA identificadas são então categorizadas de acordo com sua afinidade percebida aos estágios específicos do modelo de Ciclo de Vida delimitado. Finalmente, por meio de síntese, articulamos aplicações potenciais gerais das tecnologias de IA para cada estágio distinto do ciclo de vida.

Design circular do ciclo de vida

Manzini e Vezzoli (2002) definem o ciclo de vida como as atividades desde a extração de recursos até o descarte de um produto. Os autores esquematizam 5 fases: i. pré-produção; ii. produção; iii. distribuição; iv. uso; v. descarte. Outros modelos existem. Berg e Bakker (2015) propõem 6 estágios, e The Great Recovery Report (2013) identifica 5.

O ciclo de vida pode ser visto como um sistema de entradas (material e energia) e saídas (resíduos e emissões) (Manzini & Vezzoli, 2002). Na economia convencional, o ciclo é linear. No design circular, fluxos de energia e materiais são estabelecidos entre estágios, criando circularidades.

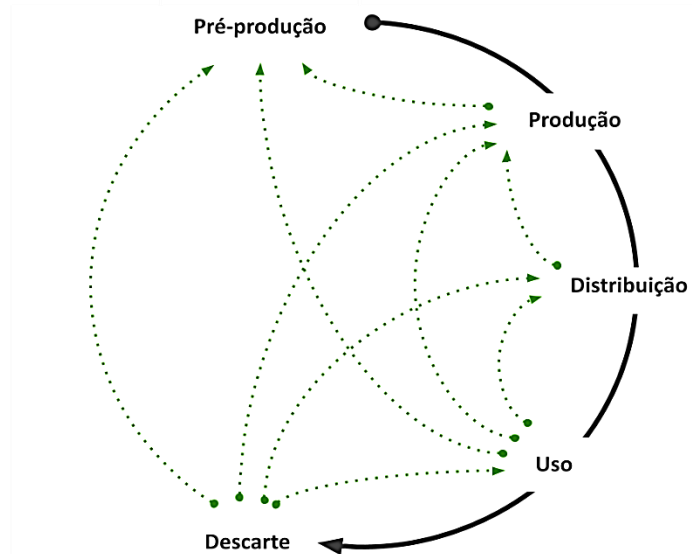


Figura 1. Circularidades no ciclo de vida.
Fonte: adaptado de Manzini and Vezzoli (2002).

As circularidades permitem que saídas de certos estágios sejam usadas como entradas para estágios anteriores, promovendo a reutilização (Berg & Bakker, 2015). Podem conectar o fim do uso a estágios anteriores ou o consumidor a outras partes do ciclo (Ratum et al. 2019).

As estratégias de design circular variam de diretrizes amplas a modelos genéricos (Walker, 2005). O Design Circular opera principalmente sob duas abordagens: restaurativa (manter recursos no ciclo tecnológico) ou regenerativa (reintegrar recursos no ciclo biológico) (Wilson et al., 2022). Ellen MacArthur Foundation lista cinco princípios: i) eliminar resíduos; ii) construir resiliência; iii) usar energia renovável; iv) pensar em sistemas; e v) pensar em cascatas.

Modelos úteis incluem: 4R (Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Renovar); 9R (Potting et al., 2017) e ReSOLVE (Tutore et al., 2024). Bocken & Bakker (2016) apresentam três estratégias: estreitamento de ciclos (otimização do uso de recursos), desaceleração de ciclos (extensão da vida útil dos produtos) e fechamento de ciclos (otimização da reciclabilidade).

Inteligência Artificial como apoio ao Design Circular

A IA integra a Indústria 4.0 junto com IoT, *Big Data* e impressão 3D (Ghoreishi et al., 2020), oferecendo aplicações versáteis: reconhecimento de padrões, predição, otimização e recomendações baseadas em dados (Akinode & Oloruntoba, 2020). Inclui sensores, decisão adaptativa, dispositivos inteligentes e análise de dados (Ghoreishi & Happonen, 2020).

No DC, a IA é uma "coleção de tecnologias" que permite máquinas analisarem, aprenderem e concluírem (Ghoreishi & Happonen, 2020), englobando aprendizado de máquina, redes neurais,

aprendizado profundo e lógica *fuzzy* (Tutore et al., 2024). Técnicas de IA facilitam a EC (Ghoreishi & Happonen, 2020), aplicáveis em diversas fases do ciclo de vida de produtos e serviços.

Tutore et al. (2024) destacam contribuições da IA ao DC no modelo de negócio: redesenho de sistemas, mudança na cadeia de valor, novos modelos focados em reutilização, plataformas digitais para práticas circulares. Citam também *insights* sobre materiais, fabricação, fim de vida e separação automática de resíduos. Ghoreishi e Happonen (2020) identificam contribuições para fechar ciclos via logística reversa, manutenção preditiva e rastreamento. Aplicações incluem: i) gestão da cadeia de suprimentos (logística, estoque, rastreamento); ii) otimização de processos (manutenção preditiva, fabricação inteligente, previsão de demanda); iii) prototipagem (rápida, testes assistidos, modularidade); iv) design (otimização para ciclos fechados, dados sobre consumo). Akinode e Oloruntoba (2020) citam: design iterativo via aprendizado de máquina; triagem, desmontagem, remanufatura e reciclagem; automação de gestão de fornecedores e recursos; automação de contato com clientes, precificação e previsão; triagem inteligente de resíduos. Noman et al. (2022) apontam auxílio na transição de dados para estratégias, fabricação sustentável, otimização energética e gestão de resíduos. Ghoreishi et al. (2020) destacam decisões de design, gestão de ativos, design inteligente (redução de consumo) e prototipagem inteligente (integração CAD/CAM com impressão 3D, CPSs e AR).

A Tabela 1 resume as potencialidades levantadas, conforme se cruzam com os estágios do ciclo de vida, de acordo com o modelo de Manzini e Vezzoli (2002).

Tabela 1.

Resumo das potencialidades da IA e do Design Circular.

Estágio do ciclo de vida		Aplicações de IA para DC
Pré-produção	Suporte para o processo e projeto de design	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Processos de design</i>: Iteração assistida por IA, suporte à tomada de decisão e transição de dados para estratégias; • <i>Design inteligente</i>: Otimização de recursos, modularidade e prototipagem; • <i>Eficiência em testes</i>: Geração de múltiplos protótipos e análise de viabilidade; • <i>Inovação de negócios</i>: Análise de dados para modelos de negócio circulares e decisões complexas.
Produção	Processos de produção inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> • Otimização de processos de produção e fabricação inteligente; • Automação e gestão eficiente de recursos; • Desenvolvimento de produtos responsivos para minimizar resíduos.
Distribuição	Processos logísticos inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoria da logística; • Integração de tecnologias avançadas (IoT, impressão 3D, robótica e RA); • Gestão inteligente de estoque e previsão de demanda.
Uso	Otimização de serviços	<ul style="list-style-type: none"> • Automação de interações com clientes; • Monitoramento de consumo; • Manutenção preditiva; • Gestão de ativos.
Descarte	Suporte para modelos de negócio e gestão de resíduos	<ul style="list-style-type: none"> • Suporte para modelos de negócio circulares (reutilização, segunda mão); • Otimização de processos de triagem, desmontagem e reciclagem; • Gestão inteligente de logística reversa.

Nota: Fonte - autor (2025).

Em resumo, na pré-produção, a IA atua no processo de design (facilitando iteração e tomada de decisão) e no projeto (fornecendo insights sobre materiais, modularidade, desmontagem e otimização de protótipos). Nas fases de produção e distribuição, a IA otimiza sistemas ao adicionar inteligência. Na produção, facilita fabricação inteligente e automação de gestão de fornecedores. Na distribuição, otimiza cadeias integrando IoT, impressão 3D e robótica para melhorar gestão de estoque, previsão de demanda e logística reversa. No uso, a IA atua na automação de contato com clientes (perspectiva do usuário) e na captura de dados de consumo para manutenção preditiva e gestão de ativos (perspectiva do negócio). No descarte, a IA apoia modelos de reutilização e segunda mão, e automatiza separação de resíduos para reciclagem.

Conclusões

Embora designers não atuem diretamente nos estágios posteriores do ciclo de vida, conhecer as potencialidades da IA na fabricação e distribuição dos sistemas-produto é essencial para antecipar e integrar essas possibilidades desde a concepção do projeto.

A interseção entre IA e DC revela diversas possibilidades de aplicação em diferentes estágios do ciclo de vida de produtos e serviços. As aplicações de IA mostram-se promissoras quando parametrizadas conforme as fases do ciclo de vida, oferecendo suporte da pré-produção ao descarte. Assim, a integração entre IA e DC pode aprimorar significativamente a transição para modos de vida mais sustentáveis ao facilitar decisões, otimizar recursos, automatizar operações complexas e viabilizar novos modelos de negócio circulares. A versatilidade da IA é notável, operando em níveis operacionais e estratégicos. Algumas aplicações são transversais ao ciclo de vida: desenvolvimento de modelos de negócio, inovação de ecossistema, plataformas digitais conectando empresas em práticas circulares e melhoria em atividades de teste.

No entanto, é crucial reconhecer os desafios dessa integração: qualidade e disponibilidade de dados, custos de implementação, necessidade de colaboração entre atores e limitações técnicas (Tutore et al., 2024). A complexidade dos algoritmos de aprendizado de máquina apresenta desafios de capacidade explicativa que podem comprometer a transparência decisória. Pesquisas futuras podem explorar como implementar efetivamente as potencialidades da IA em nível operacional, especialmente nas fases iniciais do ciclo de vida, onde decisões têm maior impacto e menor custo. Isso diversifica a pesquisa, considerando que a maioria dos estudos sobre DC e IA focam apenas no estágio pós-uso (Tutore et al., 2024).

Referências

- Akinode, J. L., & Oloruntoba, S. A. (2020). Artificial intelligence in the transition to circular economy. *American Journal of Engineering Research*, 9(6), 185-190.
- Van den Berg, M. R., & Bakker, C. A. (2015). A product design framework for a circular economy. *Product lifetimes and the environment*, 365-379.
- Ghoreishi, M., & Happonen, A. (2020). Key enablers for deploying artificial intelligence for circular economy embracing sustainable product design: Three case studies. 050008. <https://doi.org/10.1063/5.0001339>
- Ghoreishi, M., Happonen, A., & Pynnönen, M. (2020). Exploring Industry 4.0 Technologies to Enhance Circularity in Textile Industry: Role of Internet of Things. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3471421>

- Manzini, E., & Vezzoli, C. (2002). O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis. Os Requisitos Ambientais dos Produtos Industriais. EDUSP.
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain.
- Ratum, A. P., Sachari, A., & Wahjudi, D. (2019). A Review on Circular Design Guidelines by Ideo and Ellen Macarthur Foundation. E-Prosiding Pascasarjana ISBI Bandung, 1(1).
- The Great Recovery Report (2013). Retrieved September 12, 2025, from <http://www.greatrecovery.org.uk/resources/the-great-recovery-report/>
- Tutore, I., Parmentola, A., Di Fiore, M. C., & Calza, F. (2024). A conceptual model of artificial intelligence effects on circular economy actions. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 31(5), 4772–4782. <https://doi.org/10.1002/csr.2827>
- Walker, S. (2005). Desmascarando o objeto: reestruturando o design para sustentabilidade. Revista design em Foco, 2(2), 47-62.
- Wilson, M., Paschen, J., & Pitt, L. (2022). The circular economy meets artificial intelligence (AI): Understanding the opportunities of AI for reverse logistics. Management of Environmental Quality: An International Journal, 33(1), 9–25. <https://doi.org/10.1108/MEQ-10-2020-0222>