

## **Indústria 4.0 e a gestão de resíduos na produção de veículos elétricos**

Maria Luísa Rodrigues da Silva<sup>1</sup>; 0009-0008-6559-6622

Maria Elisa Rodrigues da Silva<sup>1</sup>; 0009-0006-0073-3580

Felipe de Almeida Gomes<sup>1</sup>; 0009-0000-1208-0552

Francisco Sabbadini<sup>1,2</sup>; 0000-0001-5303-9409

1 – UFF -Universidade Federal Fluminense , Volta Redonda, RJ. [ma\\_luisa@id.uff.br](mailto:ma_luisa@id.uff.br)

2 – UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. [franciscosabbadini@fat.uerj.br](mailto:franciscosabbadini@fat.uerj.br)

**Resumo:** A pesquisa investigou o papel das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 na gestão de resíduos e sustentabilidade na produção de veículos elétricos, com foco na aplicação de automação, IoT, Big Data, Inteligência Artificial e sistemas ciberfísicos para otimizar processos, reduzir desperdícios e apoiar modelos de economia circular. Por meio de uma abordagem exploratória com análise bibliométrica, foram identificadas tendências e tópicos emergentes relacionados à integração entre Indústria 4.0, veículos elétricos e Economia Circular. Os resultados mostraram que a convergência dessas tecnologias com princípios circulares possibilita o monitoramento em tempo real, remanufatura, reutilização e reciclagem de motores e baterias, prolongando o ciclo de vida dos componentes, reduzindo impactos ambientais e promovendo modelos de negócios mais resilientes. Apesar dos avanços, lacunas persistem, como a limitada integração tecnológica, otimização insuficiente de processos de reciclagem, barreiras econômicas e infraestrutura inadequada, indicando a necessidade de pesquisas futuras para desenvolver frameworks integrados, rastreabilidade de materiais, automação na remanufatura e escalabilidade das soluções, consolidando a produção de veículos elétricos como modelo sustentável, eficiente e alinhado à economia circular e à redução de impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Veículos elétricos. Economia circular. Sustentabilidade. Gestão de resíduos.

## INTRODUÇÃO

Na presente pesquisa foi investigado o papel das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 na gestão de resíduos e na sustentabilidade na produção de veículos elétricos (VEs), destacando como automação, Internet of Things (IoT), Big Data, Inteligência Artificial e sistemas ciberfísicos podem minimizar desperdícios, otimizar processos e apoiar a implementação de modelos de economia circular (Lu, 2017; Xu, Xu e Li, 2018; Lasi e Kemper, 2014; Frank, Dalenogare e Ayala, 2019; Zhong et al., 2017; Oztemel et al., 2020). O conceito de Indústria 4.0, introduzido na Alemanha em 2011, destaca a digitalização, automação, customização da produção, interação homem-máquina e integração de serviços de valor agregado, permitindo a realização de processos inteligentes e flexíveis. Conceitos como *Smart Factory*, Sistemas Ciberfísicos e IoT possibilitam uma produção versátil e moldável, enquanto a Inteligência Artificial cria um ambiente favorável ao aprendizado e otimização contínua, resultando em redução de desperdícios e buscando o aumento da competitividade industrial (Liao et al., 2017).

No setor automotivo, os VEs aparecem como alternativa de destaque a fim de que se alcance a redução das emissões de gases de efeito estufa, resultando em uma mobilidade limpa, considerando que o transporte responde por aproximadamente 26% do consumo mundial de energia primária (Helmers e Marx, 2014; Wilberforce et al., 2017; Papoutsoglou et al., 2022). Com motores elétricos mais simples e apresentando maior eficiência energética que os motores de combustão, os VEs exigem atenção no que diz respeito ao gerenciamento térmico e à durabilidade dos componentes. A estimativa da demanda é de que 35% das vendas de carros em 2040 serão de VEs, evidenciando a oportunidade para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e gases de efeito estufa, bem como buscar o avanço no tema sustentabilidade (Wang et al., 2022; Alsharif et al., 2021).

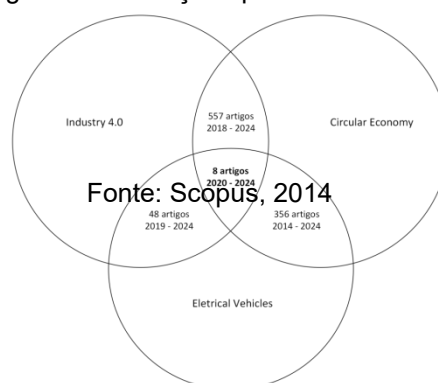
Neste contexto, a Economia Circular (EC) apresenta-se como modelo econômico relevante, a fim de que componentes críticos, como baterias e motores, sejam reutilizados, remanufaturados ou reciclados, buscando o estabelecimento de ciclos contínuos de reaproveitamento de recursos e materiais (Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016; Kirchhen, Reike e Hekkert, 2017). Baseada nas estratégias de redução, reutilização e reciclagem (3R), a EC busca potencializar o valor dos bens, além de minimizar desperdícios, reduzir impactos ao meio ambiente e buscar a promoção do crescimento econômico sustentável (Lieder e Rashid, 2016; Jabbour et al., 2018). O interesse acadêmico e político é

progressivo, porém, a implementação prática ainda apresenta limitações, de modo que a China apresenta-se como destaque em estratégias de economia circular (Kirchher et al., 2018; Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016). Para os VEs, a integração de tecnologias da Indústria 4.0 com a Economia Circular é de suma importância, a fim de buscar a otimização do ciclo de vida dos componentes, reduzir impactos ambientais e buscar o alinhamento da produção às políticas climáticas, maximizando o reaproveitamento de materiais essenciais (Richter, 2022; Montemayor e Chanda, 2023; Remme e Jackson, 2023; Deng et al., 2022; Kintscher et al., 2020; Tiwari et al., 2021).

## MÉTODOS

No presente estudo foi adotada uma abordagem de pesquisa exploratória e metodológica de caráter bibliométrico, visando examinar a evolução e o panorama atual das publicações sobre “Indústria 4.0”, “Veículos Elétricos” e “Economia Circular” (Lasi e Kemper, 2014; Frank, Dalenogare e Ayala, 2019; Helmers e Marx, 2014). A coleta de dados foi realizada na base Scopus, reconhecida por sua ampla cobertura e indexação de publicações de alta qualidade (Xu, Xu e Li, 2018), considerando o período de 2014 a 2024 e apenas artigos em inglês publicados em journals, garantindo comparabilidade e confiabilidade da pesquisa (Lu, 2017; Zhong et al., 2017). A busca utilizou combinações das palavras-chave “Industry 4.0” AND “Electric Vehicles” AND “Circular Economy”, além de pares parciais, capturando estudos individuais e interseções entre os três tópicos (Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016; Kirchhen, Reike e Hekkert, 2017). Após a coleta inicial, os dados foram organizados no EndNote, software próprio para essa finalidade, e as duplicadas removidas, resultando em 945 artigos a partir de 969 registros, garantindo consistência e robustez da análise (Montemayor e Chanda, 2023).

Figura 1: Interseções palavras-chaves



Essa abordagem possibilitou caracterizar quantitativamente as publicações, visualizar redes de co-ocorrência de palavras-chave e identificar tendências emergentes, evidenciando a relevância das tecnologias avançadas e das estratégias de produção sustentável na literatura recente (Lieder e Rashid, 2016; Jabbour et al., 2018; Lu, 2017; Zhong et al., 2017; Oztemel et al., 2020).

A interseção dos temas resultou na identificação de 8 artigos nos quais o estudo se concentrou, utilizando elementos de análise bibliométrica, avaliação de recorrências e conexões conceituais (Lasi e Kemper, 2014; Frank, Dalenogare e Ayala, 2019; Helmers e Marx, 2014; Xu, Xu e Li, 2018).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise relativa à evolução do número de artigos publicados por ano, Quadro 1, revelou um interesse crescente em pesquisas nas áreas de EC, EVs e I4.0, com um crescimento de 278% nos últimos 5 anos, tendo como base o ano de 2020. Além disso, se pode verificar um crescimento muito rápido de 2020 para 2021 (344,12%), com a variação do crescimento percentual se reduzindo nos anos seguintes, mas mantendo a tendência de crescimento no número absoluto de publicação. O total de artigos publicados no período de 2014 a 2024 foi de 899, o que sugere o potencial interesse em pesquisa nos temas, com potencial de crescimento considerando o cenário de evolução na transformação digital e no desenvolvimento de tecnologias da indústria 4.0, dos assuntos relacionados à EVs e a emergência da EC.

Quadro 1 – Publicações por ano

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	0	2	6	16	37	34	151	192	234	242

Fonte: SCOPUS, 2014

A interseção dos temas resultou mostrou 8 artigos nos quais o estudo se concentrou para avaliar a recorrência de termos e conexões conceituais, que via de regra possibilitaram um entendimento contextual do tema.

A integração das tecnologias da Indústria 4.0 com os princípios da Economia Circular é essencial para aumentar a sustentabilidade na produção de veículos elétricos (EVs), permitindo projetar produtos para reciclagem e remanufatura, prolongando a vida útil dos

materiais e otimizando recursos (Kintscher et al., 2020; Sorooshian et al., 2024). A nuvem de palavras, Figura 2, baseada nas palavras-chave identificadas na pesquisa permitiram visualizar e identificar os termos que mais apareceram, conforme mostrado na

Figura 2: Nuvem de palavras



Fonte: Elaborado pelos autores

A remanufatura e a reciclagem aparecem, porém reuso não, o que sugere ser uma estratégia não considerada na interseção dos temas objeto desta pesquisa. Cabe considerar que as 3 estratégias (3Rs) são fundamentais para reduzir a dependência de matérias-primas virgens e minimizar resíduos, em direção a uma economia circular no setor automotivo (Ojha & Agarwal, 2024; Tiwari et al., 2021; Kannan et al., 2024).

Em relação aos motores, a análise dos artigos selecionados permitiu identificar que IoT, automação e IA permitem monitoramento, remanufatura e inspeção preditiva, enquanto manufatura aditiva e reciclagem avançada viabilizam produção sob demanda e recuperação de materiais críticos, como ímãs de terras raras (Tiwari, 2021). Para baterias, sensores, análise de dados e integração de processos garantem rastreabilidade, manutenção preventiva, personalização e novos modelos de negócios circulares, promovendo eficiência e sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida (Sorooshian et al., 2024). Apesar dos benefícios da mobilidade elétrica, os desafios permanecem na gestão do ciclo de vida das baterias e na reciclagem de materiais complexos.

## CONCLUSÕES

A pesquisa possibilitou a constatação do interesse cada vez maior nas tecnologias provenientes da Indústria 4.0 e com os princípios da Economia Circular busca-se a elevação da eficiência, sustentabilidade e gestão de resíduos na produção de veículos elétricos. Da mesma maneira, possibilitam a compreensão da importância da integração das tecnologias da Indústria 4.0 e seus desafios no que diz respeito à EC e aos VEs. Destaca-se que estratégias circulares como reutilização, remanufatura e reciclagem associadas às tecnologias da indústria 4.0 estão presentes nas cadeias de valor e produção de VEs. Outro aspecto relevante envolveu a verificação da necessidade de mais estudos que foquem na otimização da reciclagem de baterias e componentes críticos, assim como barreiras que envolvem custo, complexidade operacional e infraestrutura. Ressalta-se a importância e as oportunidades para que sejam realizadas pesquisas que centralizam-se no desenvolvimento de frameworks de integração da Indústria 4.0 e práticas circulares, aplicação blockchain para rastreamento do ciclo de vida das baterias, avaliação da automação, robótica na remanufatura e análise da escalabilidade das soluções em diferentes fábricas, contribuindo para a consolidação da produção de veículos elétricos como um padrão sustentável, eficiente e alinhado à redução de impactos ao meio ambiente e ao desenvolvimento econômico do setor automotivo.

## REFERÊNCIAS

DENG, S. et al. *Planning a circular economy system for electric vehicles using network simulation*. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 63, p. 95-106, 2022.

FRANK, A.G.; DALENOGARE, L.S.; AYALA, N.F. *Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies*. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15-26, 2019.

GHISELINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

HELMERS, E.; MARX, P. *Electric cars: technical characteristics and environmental impacts*. **Environmental Sciences Europe**, v. 24, n. 14, p. 1-15, 2012.

JABBOUR, A. B. L. de S.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. **Indústria 4.0 e economia circular: uma proposta de agenda de pesquisa e um roteiro original para operações sustentáveis**. *Anais de Pesquisa Operacional*, v. 270, n. 1-2, p. 273-286, 2018.

KANNAN, Devika; AMIRI, Alireza Shamekhi; SHAAAYESTEH, Mayssam Tarighi; NASR, Arash Khalili; MINA, Hassan. *Unveiling barriers to the integration of blockchain-based circular economy and Industry 5.0 in manufacturing industries: A strategic prioritization approach.* **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 1, p. 245-266, 2024. <https://doi.org/10.1002/bse.3078>. Acesso em: 27 nov. 2024.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. *Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions.* **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KIRCHHERR, J. et al. *Barriers to the Circular Economy: evidence from the European Union (EU).* **Ecological Economics**, v. 150, p. 264-272, 2018.

KINTSCHER, L.; LAWRENZ, S.; POSCHMANN, H.; SHARMA, P. Reciclagem 4.0 - digitalização como chave para a economia circular avançada. **Journal of Communications**, 2020.

LASI, H.; KEMPER, H-G. *Industry 4.0.* **Business and Information Systems Engineering**, v. 4, p. 239-242, 2014.

LIAO, Y.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. F. R.; RAMOS, L. F. P. *Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal.* **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.

LIEDER, M.; RASHID, A. *Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry.* **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 36-51, 2016.

LU, Y. *Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues.* **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.

MONTEMAYOR, H. M. V.; CHANDA, R. H. Aplicações de circularidade da indústria automotiva e indústria 4.0. **Environmental Challenges**, v. 12, p. 100725, 2023.

OJHA, Ravindra; AGARWAL, Alpana. *Implications of circular production and consumption of electric vehicle batteries on resource sustainability: A system dynamics perspective.* **Environment, Development and Sustainability**, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-01895-9>. Acesso em: 27 nov. 2024.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 127-182, 2020.

PAPOUTSOGLOU, M.; RIGAS, E. S.; KAPITSAKI, G. M.; ANGELIS, L.; WACHS, J. Análise do mercado de trabalho online para a economia verde: o caso dos veículos elétricos. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 177, p. 121517, abr. 2022.

REMME, D.; JACKSON, J. *Green mission creep: the unintended consequences of circular economy strategies for electric vehicles*. *Journal of Cleaner Production*, v. 394, 2023.

RICHTER, J.L. *A circular economy approach is needed for electric vehicles*. *Nature Electronics*, v. 5, p. 5-7, 2022.

SOROOSHIAN, Shahryar; KHIAMI, Sina Fazel; KARIMI, Farzane; MINA, Hassan. *Link between sustainable circular supply chain and Internet of Things technology in electric vehicle battery manufacturing industry: A business strategy optimization for pickup and delivery*. *Business Strategy and the Environment*, v. 33, n. 5, p. 1760-1778, 2024. <https://doi.org/10.1002/bse.3074>. Acesso em: 27 nov. 2024.

TIWARI, D. et al. *A review of circular economy research for electric motors and the role of industry 4.0 technologies*. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 17, p. 9668, 2021. Acesso em: 27 nov. 2024.

WANG, X. et al. *A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars*. *Applied Thermal Engineering*, v. 201, 2022.

WILBERFORCE, T. et al. *Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars*. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 25695-25734, 2017.

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.

ZHONG, R.Y. et al. *Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review*. *Engineering*, v. 3, p. 616-630, 2017.