



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Indústria 4.0, Economia Circular e Veículos Elétricos: Integração temática

Maria Luísa Rodrigues da Silva

Universidade Federal Fluminense (ma_luisa@id.uff.br)

Francisco Santos Sabbadini

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (franciscosabbadini@fat.uerj.br)

Resumo

A presente pesquisa teve por objetivo avaliar a evolução dos estudos relacionados à Indústria 4.0, Economia Circular e Veículos Elétricos, em especial os relacionados com a convergência temática desses campos do conhecimento. A abordagem metodológica exploratória utilizada foi a análise bibliométrica. Os resultados indicaram que a convergência de estudos na interseção das três áreas objeto deste estudo está embrionário, apresentando potencial de crescimento à medida que forem estabelecidos mais estudos e interações.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Veículos elétricos, Economia circular, Sustentabilidade.

Abstract

The present research aimed to assess the evolution of studies related to Industry 4.0, Circular Economy, and Electric Vehicles, particularly those addressing the thematic convergence of these fields of knowledge. The exploratory methodological approach used was bibliometric analysis. The results indicated that the convergence of studies at the intersection of the three areas examined in this research is still in its early stages, showing potential for growth as more studies and interactions are established.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Keywords: Industry 4.0, Electric vehicles, Circular economy, Sustainability.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la evolución de los estudios relacionados con la Industria 4.0, la Economía Circular y los Vehículos Eléctricos, en especial aquellos vinculados con la convergencia temática de estos campos del conocimiento. El enfoque metodológico exploratorio utilizado fue el análisis bibliométrico. Los resultados indicaron que la convergencia de estudios en la intersección de las tres áreas objeto de este estudio se encuentra en una etapa embrionaria, mostrando potencial de crecimiento a medida que se establezcan más estudios e interacciones.

Palabras clave: Industria 4.0, Vehículos eléctricos, Economía circular, Sostenibilidad.

1. INTRODUÇÃO

A transformação digital impulsionada pela Indústria 4.0 tem redefinido os processos produtivos, trazendo consigo tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial e sistemas ciberfísicos. Essas inovações não apenas aumentam a eficiência operacional, mas também abrem espaço para práticas sustentáveis, especialmente em setores estratégicos como o automotivo. A produção de veículos elétricos, considerada uma alternativa para reduzir emissões e dependência de combustíveis fósseis, enfrenta desafios relacionados à gestão de resíduos e ao ciclo de vida de componentes, como baterias e motores.

Apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem lacunas significativas na integração entre automação e processos de remanufatura e reciclagem, o que limita a adoção plena de modelos de economia circular. Nesse contexto, compreender como as tecnologias da



Indústria 4.0 podem contribuir para otimizar essas etapas é essencial para consolidar práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

A presente pesquisa teve por objetivo avaliar a evolução dos estudos relacionados à Indústria 4.0, Economia Circular e Veículos Elétricos, em especial os relacionados com a convergência temáticas desses campos do conhecimento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Indústria 4.0

O termo Indústria 4.0 foi estabelecido diante de uma planejada 4ª Revolução Industrial. Um fator decisivo para a sua rápida propagação foi a recomendação de sua implementação pelo governo alemão e foi adotada de forma imediata pelo Ministério Federal da Educação e Pesquisa e se tornou um pilar para futuros projetos no contexto das estratégias tecnológicas do futuro. Foi um programa que apresentou como missão o desenvolvimento de sistemas avançados de produção com o objetivo de aumentar a produtividade e a eficiência da indústria nacional (Lasi e Kemper, 2014; Frank, Dalenogare e Ayala, 2019).

Este conceito representa uma nova etapa industrial dos sistemas de produção ao integrar um conjunto de tecnologias emergentes e convergentes que agregam valor a todo o ciclo de vida do produto. As abordagens e ideias que estão dentro do contexto da Indústria 4.0 estão situados em disciplinas como engenharia elétrica, administração de empresas, ciência da computação, sistemas de informação, engenharia mecânica, dentre outros segmentos importantes para a sociedade (Lasi e Kemper, 2014; Frank, Dalenogare e Ayala, 2019).

Lu (2017) e Xu, Xu e Li (2018) acrescentam que o termo foi proposto inicialmente na Alemanha em 2011 na Feira de Hannover e apresenta como principais objetivos o alcance de uma maior eficiência operacional, além de um maior nível de automatização e produtividade, de forma que as cinco principais características da Indústria 4.0 incluem a digitalização, otimização e customização da produção; automação e adaptação; interação



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

homem-máquina; serviços de valor agregado a empresas e troca e comunicação automática de dados.

Foi anunciada oficialmente em 2013 como uma estratégia alemã para assumir um papel pioneiro em indústrias que estão atualmente revolucionando o setor de transformação, representando a tendência global de tecnologias de automação na indústria de manufatura, incluindo principalmente os Sistemas Ciber-Físicos (CPS), computação em nuvem e Internet das Coisas (IoT) (Xu, Xu e Li, 2018).

O termo Indústria 4.0 se refere basicamente a uma ampla gama de conceitos atuais e fundamentais, sendo eles: Smart Factory (Fábrica do Futuro), que consiste na evolução dos processos produtivos, a partir da utilização de tecnologias avançadas provenientes da Indústria 4.0; Sistemas Ciberfísicos, em que os níveis físico e digital se fundem; novos sistemas de produção e compra; novos sistemas no desenvolvimento de produtos e serviços; adaptação a necessidades humanas, por meio de novos sistemas de fabricação de produtos e sustentabilidade social corporativa, com foco na eficiência da utilização de recursos (Lasi e Kemper, 2014).

Outros conceitos de Indústria 4.0 (I4.0) incluem ainda definições como sendo a integração de máquinas e dispositivos físicos complexos com sensores e software, utilizados para prever, controlar e planejar melhores resultados para a sociedade e para os negócios, se configurando em um novo nível de organização e gestão da cadeia de valor ao longo do ciclo de vida dos produtos (Lu, 2017).

No contexto da I4.0, os sistemas de produção são atualizados para um nível inteligente, em que a fabricação inteligente aproveita tecnologias avançadas de informação e produção a fim de alcançar processos de fabricação que sejam flexíveis, inteligentes e reconfiguráveis com o objetivo de enfrentar um mercado dinâmico e global, permitindo que todos os processos físicos e fluxos de informação estejam disponíveis quando e onde sejam necessários em cadeias de suprimento, em diversos setores, em pequenas, médias e grandes empresas, sendo que algumas tecnologias possuem Inteligência Artificial (IA),

permitindo que os sistemas de produção aprendam com as experiências (Zhong et al., 2017).

A I4.0 conhecida como manufatura inteligente, redefine o conceito de "fábrica inteligente", em que o uso de tecnologias digitais avançadas permite uma otimização em tempo real dos processos, reduzindo desperdícios e proporcionando produtos com alto nível de personalização e precisão (Liao et al., 2017).

Nesse sentido, a transição da manufatura tradicional para o modelo digital representa uma transformação significativa na forma como os processos produtivos são planejados e executados, promovendo a integração de tecnologias avançadas que elevam a eficiência e a capacidade adaptativa das fábricas. Nesse contexto, tecnologias como a automação inteligente, a Internet das Coisas (IoT) e os Sistemas Ciber-Físicos (CPS) desempenham uma função fundamental (Oztemel et al., 2020).

Em relação à I4.0 no contexto da economia global e nas operações comerciais relativas a ela, evidencia-se a necessidade de que a Indústria 4.0 aumente consideravelmente o nível global de industrialização, informatização e digitalização da produção para alcançar um maior nível de eficiência e competitividade (Xu, Xu e Li, 2018).

Com a crescente pressão relacionada às questões climáticas e de sustentabilidade, a Indústria 4.0 tem proporcionado soluções inovadoras para repensar o uso de recursos, especialmente no setor automotivo. Essa transformação, impulsionada pela I4.0, exige cada vez mais que as empresas se adaptem a um ambiente digital em evolução, onde tecnologias como mobilidade como serviço e veículos elétricos desempenham papéis fundamentais (Llopis-albert, Rubio e Valero, 2021).

Assim sendo cabe considerar que a I4.0 tem impulsionado os veículos elétricos (EVs) como uma alternativa promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover um transporte mais limpo, eficiente e sustentável. Nesse sentido, os veículos elétricos se tornam uma alternativa fundamental para minimizar o impacto dos gases poluentes e as mudanças climáticas, desempenhando um papel importante na

sustentabilidade do transporte em comparação aos veículos a combustão interna (Papoutsoglou et al., 2022).

2.2 Veículos elétricos

A energia e seu consumo é um componente fundamental que deve ser considerado na produção de veículos elétricos. Em uma escala mundial, 26% da energia primária é consumida para fins de transporte, além do fato de que o tráfego de rua representa 74% de todo o setor de transportes em todo o mundo.

Os automóveis desempenham um papel de destaque por três motivos, sendo eles: i. os carros dominam o tráfego rodoviário na maioria dos países; ii. as vendas de automóveis representam as maiores taxas de crescimento do mundo; e iii. existem tecnologias alternativas para os sistemas de transmissão disponíveis, ao contrário de caminhões por exemplo. Além desses motivos, no futuro espera-se que o tráfego cresça de forma significativa, principalmente em países em desenvolvimento localizados na Ásia, de modo que o número de veículos no mundo pode chegar a 1 bilhão em 2030 (Helmerts e Marx, 2012).

Um aspecto que deve ser considerado em relação aos automóveis movidos a combustível fóssil, é que além das crescentes emissões de CO₂, o motor de combustão interna dos veículos apresenta emissões tóxicas perigosas para a saúde. Associado a isso, acrescenta-se o fato de que a poluição do ar é um grande risco ambiental para a saúde e estima-se que esteja relacionada a aproximadamente 2 milhões de mortes prematuras por ano no mundo (Helmerts e Marx, 2012).

Em decorrências das questões ligadas às emissões de CO₂ e as relativas aos impactos na saúde humano, os esforços são mais intensivamente direcionados na busca por fontes de energia limpa para viabilizar a mobilidade e o abastecimento de milhões de veículos nas estradas todos os dias, de modo a reduzir as emissões e a liberação de substâncias tóxicas para a atmosfera pelos seus motores de combustão interna (Wilberforce et al., 2017).

Em uma transição para uma sociedade mais sustentável, faz-se necessário utilizar-se de tecnologias particularmente eficientes no quesito mobilidade e os veículos elétricos foram identificados como tal tecnologia (Helmert e Marx, 2012). Nesse sentido, os veículos elétricos são considerados ambientalmente amigáveis, de forma que podem contribuir no processo de redução de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera. A maioria das fontes de energia elétrica são provenientes de baterias, ultracapacitores ou células de combustível. Outra vantagem de destaque no que se refere ao custo operacional é a sua redução em comparação a veículos movidos a combustíveis fósseis. De forma geral, Os veículos elétricos são classificados em três categorias, sendo elas a de veículos elétricos movidos a bateria, veículos elétricos de célula combustível e veículos elétricos híbridos (Wilberforce et al., 2017).

Os principais componentes de veículos elétricos movidos a bateria são a bateria elétrica, motor elétrico e controlador de motor. A estrutura de um veículo elétrico a bateria é mais simples em comparação a veículos com motor de combustão interna (a operação por trás deste tipo de veículo é de converter energia química em calor e depois em energia cinética por meio da câmara de combustão), pois não possui sistema de partida, exaustão ou lubrificação, além de não apresentar caixa de câmbio e em alguns casos não apresenta também sistema de resfriamento. A bateria é carregada com eletricidade quando conectada à rede elétrica por meio de um dispositivo de carregamento. O carregador é um componente de suma importância, já que a sua eficiência pode variar entre 60 e 97%, ou seja, pode desperdiçar entre 3 e 40% da energia em forma de calor (Helmert e Marx, 2012).

O motor elétrico é o núcleo e o componente mais importante de um veículo elétrico, de forma que o gerenciamento térmico para motores elétricos vem atraindo cada vez mais atenção do segmento acadêmico e também da indústria, pois os motores elétricos necessitam ser mais potentes e competitivos, com maior torque, maior velocidade e maior potência. Destaca-se que o gerenciamento térmico tornou-se essencial a fim de manter a eficiência, durabilidade e segurança dos motores (Wang et al., 2022).

Ainda a respeito dos motores utilizados em carros elétricos são motores de indução de corrente alternada e motores síncronos de ímã permanente e apresentam potência típica entre 100 e 200 kW e apresentam diferentes perfis e características operacionais (Wang et al., 2022).

O caminho para o desenvolvimento de carros elétricos demorou mais de 60 anos e seis gerações de motores a gasolina para que fosse desenvolvido um carro elétrico que pudesse acelerar a 98 km/h em 4 segundos. O caminho para o desenvolvimento de carros elétricos enfrentou um caminho árduo desde a sua ideia, fabricação e chegada ao mercado, pois o fraco desempenho dos carros elétricos anteriores levou a uma baixa aderência por parte dos usuários (Wilberforce et al., 2017).

O desenvolvimento de carros elétricos tem sido considerada uma solução importante a fim de enfrentar os desafios enfrentados pela humanidade. De forma geral, tecnologias contribuem para uma sociedade neutra em carbono, reduzindo suas emissões e como consequência vem chamando a atenção de todo o mundo, já que alterações climáticas e o aquecimento global surgem como grandes ameaças para o futuro. Com o desenvolvimento de veículos elétricos, as emissões de gases com efeito estufa pode ser reduzidas em 20% e em mais 40% caso a eletricidade seja produzida por meio de energia renovável. Diante disso, o mercado de veículos elétricos vem crescendo de forma destacada, com a previsão de que 35% das vendas de carros serão provenientes dos carros elétricos até 2040 (Wang et al., 2022).

Diante deste contexto, a transição para veículos movidos à combustível fóssil para veículos elétricos traz novas oportunidades e desafios, especialmente em termos de gestão do ciclo de vida de componentes como baterias e a gestão do fim de vida útil dos motores elétricos exigindo estratégias adequadas para o aproveitamento dos materiais valiosos presentes em seus componentes, visando reduzir o impacto ambiental e a dependência de novos recursos naturais (Kintscher et al., 2020; Tiwari et al., 2021). Ao mesmo tempo em que oferece desafios para a circularidade dos materiais.

2.3 Economia Circular



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

À medida que aumentam as pressões para a redução das emissões de gases de efeito estufa, particularmente o CO₂, a economia circular (EC) tem ganho destaque como modelo de desenvolvimento econômico e como uma alternativa ao atual modelo de produção linear dominante baseado em “pegar, fazer e descartar”, que apresenta evidentes efeitos negativos, no que se refere a uma real ameaça à estabilidade de sistemas econômicos e a integridade de ecossistemas naturais, que são essenciais para a sobrevivência da humanidade (Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016).

Existe uma crescente necessidade para uma transição para sistemas socioeconômicos mais sustentáveis. Problemas envolvendo o meio ambiente, como a perda de biodiversidade, poluição da água, do ar e do solo, esgotamento e uso excessivo da terra estão comprometendo cada vez mais a vida no planeta. Somado a isso, as expectativas da sociedade não são atendidas por diversos motivos, dentre eles o desemprego, vulnerabilidade social e crescentes desigualdades em todo o mundo. Os inúmeros desafios econômicos da sociedade levam a instabilidades financeiras e econômicas cada vez mais frequentes para empresas e a economia como um todo. Para todas as questões citadas envolvendo sustentabilidade, o conceito de Economia Circular vem ganhando força nas agendas dos formuladores de políticas, se tornando também um importante campo de pesquisa acadêmica, com aumento significativo no número de artigos publicados que abordem o tema, com mais de 100 artigos publicados sobre o tema em 2016, contra aproximadamente 30 em 2014 (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchhen, Reike e Hekkert, 2017).

Do ponto de vista de sua evolução as ideias centrais do conceito de Economia Circular emergiram nos anos 1960 e foram discutidas na década de 1970 em diante. Muito do entusiasmo no que diz respeito ao conceito de Economia Circular vem da sua contribuição com o desenvolvimento sustentável. Por exemplo, a Economia Circular pode reduzir as emissões de CO₂ em 48%, criar uma rede de benefícios econômicos em €1,8 trilhões e 2 milhões de empregos até o ano de 2030 na União Europeia. Entretanto, mesmo com o apoio político de várias entidades, a sua implementação ainda está nos primeiros estágios, com a exceção da China (Kirchher et al., 2018).

Destaca-se que o conceito de Economia Circular é de interesse para estudiosos e profissionais pelo motivo de ser visto como uma operacionalização para que seja implementado o conceito de desenvolvimento sustentável. Um grande número dos estudos a respeito da implementação da Economia Circular ocorreu na China. O país parece fortemente comprometido e atraído pela Economia Circular, principalmente porque o país apresenta diversos problemas relacionados ao impacto ambiental, problema sociais e de saúde humana, em função de sua evolução muito rápida e um padrão de desenvolvimento econômico contínuo (Kirchhen, Reike e Hekkert, 2017; Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016).

Levando em consideração aspectos econômicos, a Economia Circular também pode ser definida como uma economia baseada em um sistema em espiral, que minimiza a matéria o fluxo de energia e a deterioração ambiental sem restringir o crescimento econômico e o progresso (Lieder e Rashid, 2016).

Em associação com o princípio 3R (redução, reutilização e reciclagem), oriundos da sustentabilidade, pode-se considerar que a Economia Circular tem como componentes centrais do modelo o fluxo circular (fechado) de materiais e o uso de matérias-primas e energia por meio de múltiplas fases.

No que tange ao uso dos recursos naturais são limitados e que o modelo tradicional de produção e consumo, linear, resulta em resíduos e poluição insustentáveis. Ao contrário desse sistema, a economia circular visa fechar o ciclo de vida dos produtos, incentivando o reaproveitamento contínuo de materiais. Dessa forma, propõe uma abordagem inovadora e distinta para os sistemas organizacionais e operacionais de produção e consumo, com ênfase na recuperação e valorização dos recursos utilizados e estabelecendo um modelo mais sustentável e menos danoso ao meio ambiente (Jabbour et al., 2018).

A economia circular propõe uma abordagem inovadora para os sistemas de produção e consumo, centrada na recuperação e revalorização dos recursos já utilizados. "Atualmente, os recursos e o financiamento não estão examinando nem abordando o que

ocorrerá com a produção de veículos elétricos em escala - mais notavelmente, a produção de resíduos" (Montemayor e Chanda, 2023). Isso reforça a necessidade urgente de integrar a economia circular de forma mais eficaz na cadeia de produção e descarte dos veículos elétricos, garantindo que a sustentabilidade seja alcançada em todas as etapas do ciclo de vida do produto.

Nesse sentido a investigação acerca da economia circular para os veículos elétricos seja orientada para questões envolvendo eficiência, devido ao fato de que a procura por veículos elétricos vem crescendo consideravelmente.

Buscar melhorias na produção, reutilização e recuperação de materiais que são utilizados para fabricar as baterias a fim de minimizar os danos ao meio ambiente é de suma importância. Entretanto, a preocupação com a eficiência negligencia o objetivo de diminuir o uso de recursos, que é de forma rotineira negligenciado nas análises do ciclo de vida de veículos elétricos. Destaca-se também que a pesquisa atual sobre a economia circular de veículos elétricos tem sido principalmente restrita aos veículos em final de vida (em reciclagem e remanufatura, por exemplo) de componentes individuais (Remme e Jackson, 2023; Deng et al., 2022).

Uma abordagem de Economia Circular faz-se necessária para os veículos elétricos, a fim de reduzir seu impacto ambiental além de garantir que as compensações sejam minimizadas no alcance dos objetivos climáticos necessários. As baterias e os componentes que contêm matérias-primas essenciais são um foco primordial no desenvolvimento de estratégias de Economia Circular. Existem estratégias de reutilização a fim de ampliar a vida útil das baterias de veículos elétricos, a fim de otimizar o valor do ciclo de vida direta por meio do reaproveitamento, reforma e remanufatura (Richter, 2022).

Entretanto, as estratégias que envolvem a Economia Circular precisam considerar os objetivos das políticas climáticas. A limitação dos fluxos entre fronteiras de veículos usados, com o objetivo de resolver a fuga do valor da Economia Circular deve ser

considerada tendo em vista as necessidades de todos os países para a transição dos combustíveis fósseis para combustíveis sustentáveis (Richter, 2022).

Em face do exposto até aqui, no que se refere aos veículos elétricos se pode considerar que a economia circular surge como um modelo de produção e consumo fundamental para viabilizar que os componentes deles sejam reutilizados ou reciclados ao final de sua vida útil, estabelecendo um ciclo contínuo de reaproveitamento de materiais e recursos, reduzindo o desperdício e a demanda por novos recursos naturais, relativos a esse segmento produtivo.

3. MÉTODO

Este estudo pode ser caracterizado como pesquisa exploratória utilizando-se uma abordagem bibliométrica, com a finalidade de examinar a evolução e o panorama atual das publicações relacionadas aos temas “Indústria 4.0”, “Veículos Elétricos” e “Economia Circular”. A análise bibliométrica foi empregada para identificar as tendências e características das publicações científicas pertinentes, levando em consideração o número de artigos publicados e os principais tópicos emergentes nessas áreas.

3.1 Período e Filtros

A busca foi delimitada ao período de 2014 a 2024, com o objetivo de compreender a evolução mais das pesquisas nas áreas de interesse. Apenas artigos publicados em periódicos e no idioma inglês foram considerados, visando garantir a qualidade e a comparabilidade dos estudos selecionados. A busca foi realizada na base Scopus, em função da disponibilidade de acesso, a disponibilidade de publicações e por ser reconhecida como referência para o tipo de pesquisa adotada neste estudo e em relação aos temas de interesse.

3.2 Procedimento de Coletas de Dados

A busca foi conduzida utilizando uma combinação de palavras-chave, conforme segue: "Industry 4.0" AND "Electric Vehicles" AND "Circular Economy", com as duas primeiras palavras sendo aplicadas em conjunto com "Circular Economy" separadamente, e em seguida as três palavras foram combinadas para capturar tanto estudos focados em cada tema individualmente quanto aqueles que abordam a interseção entre os três tópicos e por fim a combinação das palavras chaves "Industry 4.0" AND "Electric Vehicles", conforme segue a seguir:

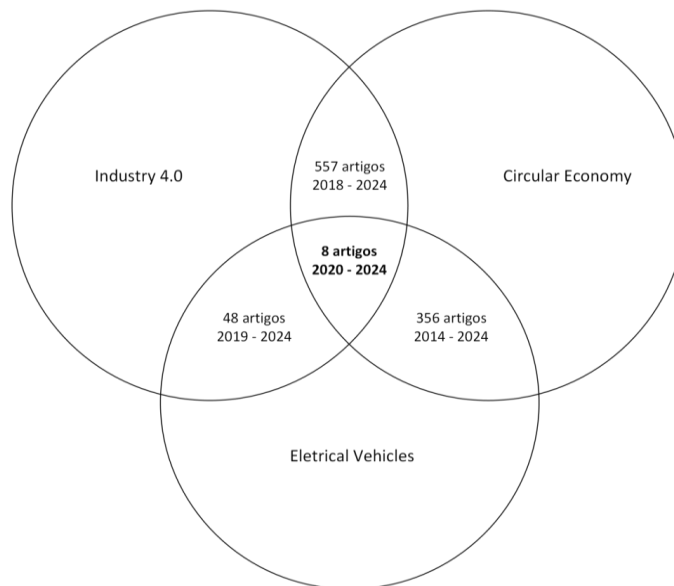
- "Industry 4.0" AND "Electric Vehicles" AND "Circular Economy"
- "Electric Vehicles" AND "Circular Economy"
- "Industry 4.0" AND "Circular Economy"
- "Industry 4.0" AND "Electric Vehicles"

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da busca realizada resultou um total inicial de 969 publicações. Após a coleta, os dados foram transferidos para o software Endnote, onde foram organizadas e removidas as duplicatas (24 artigos), resultando numa redução para 945.

Na Figura 1, é possível verificar a quantidade de artigos identificados nas interseções temáticas consideradas na busca. Cabe observar que elas aparecem agrupados em períodos distintos, como por exemplo Indústria 4.0 e Economia Circular, com 557 artigos contidos no período de 2018 a 2024, indicando a não ocorrência de trabalhos associando os dois temas, na base Scopus, de 2014 a 2017. Também se pode constatar que publicações contendo os 03 temas, no número total de 8, somente aparecem a partir de 2020, sugerindo um estágio inicial conjunção de interesses nas questões relacionadas a eles.

Figura 1 - Interseções palavras-chaves



Fonte: Elaborado pelos Autores

Para uma melhor compreensão de como se deu essa evolução, a Tabela 1 apresenta a distribuição temporal da quantidade de publicações por combinação de palavras-chave, possibilitando observar o número de artigos identificados nas interseções, distribuída ao longo dos anos, desde a primeira publicação até a mais recente, no período considerado.

Tabela 1 – Evolução do número de publicações por combinação de termos de busca

Ano	“Industry 4.0” AND “Electric Vehicles” AND “Circular Economy”	“Industry 4.0” AND “Electric Vehicles”	“Industry 4.0” AND “Electric Vehicles”	“Industry 4.0” AND “Electric Vehicles”
2014	0	0	1	0
2015	0	0	0	0
2016	0	0	2	0
2017	0	0	6	0
2018	0	0	9	7
2019	0	2	15	20
2020	1	5	18	43
2021	1	8	51	94
2022	0	8	60	124
2023	1	10	84	142
2024	5	15	110	127
Total	8	48	356	557

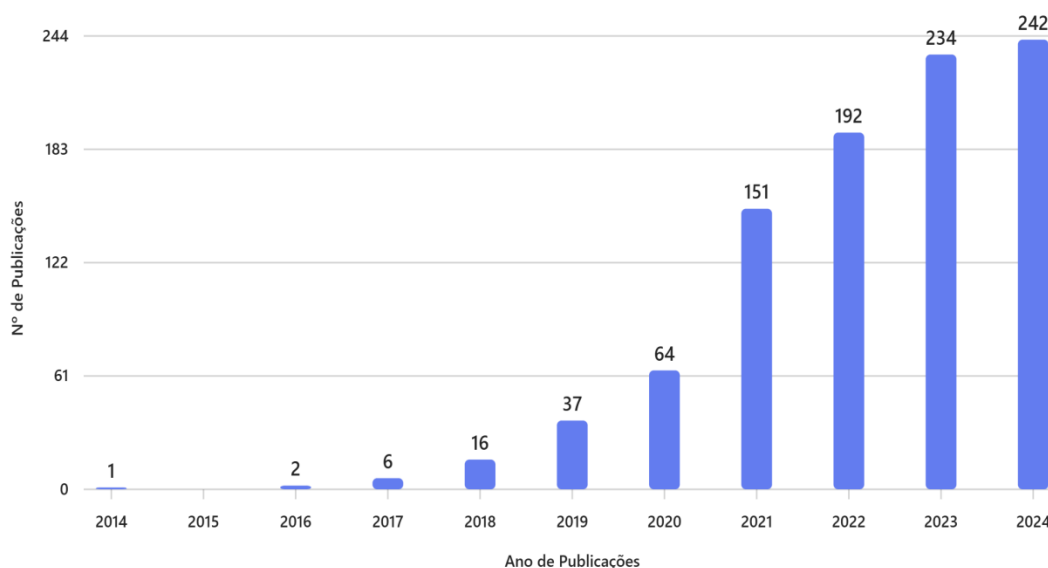
Fonte: Scopus. Elaboração dos autores.

Com o se pode observar na Tabela 1, os estudos publicados associando pelo menos 2 palavras-chave ganhou se acelerou à partir de 2019 tendo impulso significativo no que se refere ao número absoluto publicações entre 2021 e 2023. A observação da intersecção entre os três termos Economia Circular, Indústria 4.0 e Veículos Elétricos, apresenta poucas publicações tendo um salto em 2024. Isso sugere que às pesquisas na intersecção temática está em estágio embrionário, podendo apresentar potencial de crescimento.

Outro aspecto relevante deste estudo refere-se à evolução da quantidade de trabalhos publicados na base ao longo do tempo, apresentada na Figura 2. Essa análise considera tanto os valores absolutos quanto as variações comparativas entre os anos, permitindo identificar tendências de crescimento e períodos de maior incremento na produção científica.

A Figura 2 mostra a evolução das publicações relacionadas à Indústria 4.0, Economia Circular e Veículos Elétricos entre 2014 e 2024. Observa-se uma tendência consistente de crescimento, com variações expressivas nos primeiros anos e desaceleração nos últimos. Em 2014, houve apenas 1 publicação (0,11%), enquanto 2015 não registrou artigos. Em 2016, o número subiu para 2 (0,21%), seguido por 6 em 2017 (0,63%) e 16 em 2018 (1,69%). A partir de 2019, o crescimento torna-se mais significativo, com 37 publicações (3,91%), intensificando-se em 2020, quando atingiu 64 (6,77%). O maior incremento ocorre em 2021, com 151 artigos (15,98%), seguido por 192 em 2022 (20,32%). Em 2023, o total chega a 234 (24,76%), e em 2024, 242 publicações (25,61%). Embora o crescimento continue, observa-se uma desaceleração, indicando consolidação do tema na literatura científica.

Figura 2 - Evolução das publicações por ano no período de 2014 a 2024



Fonte: Scopus. Elaborado pelos autores.

Em relação aos 8 artigos encontrados, relacionados com a interseção dos termos "Industry 4.0", "Electric Vehicles" e "Circular Economy", foi feita a consolidação de informação na Tabela 2.

Tabela 2 – Publicações na interseção temática Economia Circular, I4.0 e Veículos Elétricos

TÍTULO	AUTORES	JOURNAL	ANO	PALAVRAS CHAVES
Unveiling barriers to the integration of blockchain-based circular economy and Industry 5.0 in manufacturing industries: A strategic prioritization approach	Kannan, Devika Amiri, Alireza Shamekhi Shaayesteh, Mayssam Tarighi Nasr, Arash Khalili Mina, Hassan	Business Strategy and the Environment	2024	blockchain technology; circular economy; electric vehicle battery production; fuzzy weighted influence nonlinear gauge system method; Industry 4.0; Industry 5.0
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	Sorooshian, Shahryar Khiavi, Sina Fazel Karimi, Farzane Mina, Hassan	Business Strategy and the Environment	2024	circular economy; Industry 4.0; Internet of Things (IoT); optimization, simultaneous pickup and delivery; sustainable supply chain
Industry 4.0 and circular economy model for a sustainable electric vehicle battery with controllable wastewater and carbon emission	Thomas, Abin Mishra, Umakanta	Energy Reports	2024	Carbon neutrality; Circular Economic; EV battery recycling; Industry 4.0; Wastewater treatment
Implications of circular production and consumption of electric vehicle batteries on resource sustainability: A system dynamics perspective	Ojha, Ravindra Agarwal, Alpna	Environment Development and Sustainability	2024	Circular economy; Industry-4.0; Natural resource; Sustainability; System dynamics
Tracking mining company electric vehicles for sustainable development optimization using Distributed Ledger Technologies	Hristova, Teodora	Journal of Sustainable Mining	2024	distributed ledger technology; blockchain; electric vehicles; circular economy; Sustainable Development
Automotive industry's circularity applications and industry 4.0	Valladares Montemayor, Halia M. Chanda, Rayyan Hamza	Environmental Challenges	2023	Circular economy; Sustainability; Electric vehicles
A review of circular economy research for electric motors and the role of industry 4.0 technologies	Tiwari, Divya Miscandlon, Jill Tiwari, Ashutosh Jewell, Geraint W.	Sustainability (Switzerland)	2021	electrical machines; circular economy; remanufacturing; Industry 4.0
Recycling 4.0-digitalization as a key for the advanced circular economy	Kintscher, Lars Lawrenz, Sebastian Poschmann, Hendrik Sharma, Priyanka	Journal of Communications	2020	Industry 4.0; intelligent systems; Internet of Things (IoT); recycling, information marketplace, sustainability

Fonte: Scopus. Elaborado pelos autores

A partir da leitura dos artigos constantes da Tabela 2, foi gerada uma de palavras (Figura 4), que permitiu identificar, de maneira rápida e intuitiva, os principais termos predominantes, a partir das palavras-chaves dos 8 artigos analisados. Assim os termos mais recorrentes, foram destacados, proporcionando uma visualização clara das temáticas centrais. Através dessa abordagem, foi possível observar como os conceitos estão interconectados, além de identificar a evolução e as intersecções entre essas áreas ao longo do tempo. A nuvem de palavras não apenas facilitou a análise, mas também

ofereceu uma maneira eficiente de representar graficamente as relações entre os tópicos, ajudando a direcionar o foco para os temas emergentes e as áreas que têm ganhado mais relevância nas publicações científicas.

Figura 4 - Nuvem de palavras com palavras chaves encontradas na análise dos 8 artigos



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados extraídos da base Scopus.

As principais palavras-chave que aparecem com mais frequência são:

- Economia Circular (8 vezes);
- Indústria 4.0 (7 vezes);
- Sustentabilidade (4 vezes);

Também a partir da leitura dos artigos constantes da Tabela 2, no sentido da integração temática entre I4.0, Economia Circular e Veículos Elétricos, consolidada na Tabela 3, mostrando os principais aspectos identificados e destacados nos artigos compilados na interseção dos temas.

Tabela 3 – Palavras Associadas encontradas na nuvem de palavras

Grupo Temático	Termos Associados	Descrição
Indústria 4.0 (I4.0)	Indústria 4.0, Blockchain, Internet das Coisas, Otimização e Sistemas Inteligentes	Mostra o papel das tecnologias digitais na modernização do processos industriais.
Economia Circular	Reciclagem, Remanufatura, Coleta e entrega simultânea, tratamento de resíduos.	Destaca as estratégias de reaproveitamento e fechamento de ciclos produtivos.
Veículos Elétricos	Baterias, Neutralidade de Carbono, Sustentabilidade e Veículos Elétricos.	Enfase na busca por modelos energéticos limpos e redução de impactos ambientais.

Fonte: Scopus. Elaborada pelos autores.

Da análise resultante se pode constatar a convergência dos temas considerando que as tecnologias digitais estão orientadas para a modernização dos processos de produção, com foco no fechamento de ciclos e na busca por modelos energéticos limpos para a redução dos impactos ambientais. Cabe destacar que este o presente estudo exploratório está em seu estágio inicial num campo de convergência temática emergente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou avaliar a evolução das pesquisas relacionadas à Indústria 4.0, Economia Circular e Veículos Elétricos. Os resultados obtidos segerem que a integração das tecnologias associadas à Indústria 4.0 tem potencial para transformar de forma significativa a cadeia produtiva de veículos elétricos e da reformulação dos processos produtivos em direção ao fechamento de ciclo e a circularidade, assim como no sentido da redução dos impactos ambientais.

A análise bibliométrica permitiu identificar que o interesse acadêmico nessa convergência temática vem crescendo de maneira constante, especialmente a partir de 2020, o que indica um campo de pesquisa ainda recente, mas em rápida expansão. Esse avanço reforça a importância de compreender como as tecnologias digitais podem contribuir para uma produção mais eficiente, sustentável e adaptada às demandas ambientais contemporâneas.

REFERÊNCIAS

DENG, Sidi; KPODZRO, Edwin; MAANI, Thomas; LI, Zhongtian; HUANG, Aihua; YIH, Yuehwen; ZHAO, Fu; SUTHERLAND, John W. Planning a circular economy system for electric vehicles using network simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 63, p. 95-106, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.03.003>.

FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 15-26, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.

GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy M. P.; HULTINK, Erik Jan. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

HELMERS, E.; MARX, P. Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 14, p. 9973-9982, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14>.

HRISTOVA, T. Tracking mining company electric vehicles for sustainable development optimization using Distributed Ledger Technologies. *Journal of Sustainable Mining*, v. 23, n. 3, art. 8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1425>.

JABBOUR, Ana Beatriz Lopes de Sousa; JABBOUR, Charbel Jose Chiappetta; GODINHO FILHO, Moacir; ROUBAUD, David. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of*



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Operations Research, v. 270, n. 15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>.

KANNAN, D.; SHAMEKHI AMIRI, A.; SHAAAYESTEH, M. T.; NASR, A. K.; MINA, H. 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*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.3886>.

KINTSCHER, L.; LAWRENZ, S.; POSCHMANN, H.; SHARMA, P. Reciclagem 4.0 – digitalização como chave para a economia circular avançada. *Journal of Communications*, v. 15, n. 9, p. 652-660, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12720/jcm.15.9.652-660>.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

LASI, Heiner; FETTKKE, Peter; KEMPER, Hans-Georg; FELD, Thomas; HOFFMANN, Michael. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.

LIAO, Yongxin; DESCHAMPS, Fernando; LOURES, Eduardo de Freitas Rocha; RAMOS, Luiz Felipe Pierin. 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.

LIEDER, Michael; RASHID, Amir. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 36-51, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>.

LLOPIS-ALBERT, C.; RUBIO, F.; VALERO, F. Impacto da transformação digital na indústria automotiva. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 162, p. 120343, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120343>.

LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 6, p. 1-10, 2017 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.

OJHA, R.; AGARWAL, A. Implications of circular production and consumption of electric vehicle batteries on resource sustainability: a system dynamics perspective. *Environment, Development and Sustainability*, v. 26, p. 15905-15929, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03279-w>.

OZTMEL, Ercan; GURSEV, Samet. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 31, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.

PAPOUTSOGLU, 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, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121517>.

REMME, Devyn; JACKSON, James. Green mission creep: The unintended consequences of circular economy strategies for electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, v. 394, 136346, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136346>.

RICHTER, Jessika Luth. A circular economy approach is needed for electric vehicles. *Nature Electronics*, v. 5, n. 1, p. 5-7, 2022. DOI: [10.1038/s41928-021-00711-9](https://doi.org/10.1038/s41928-021-00711-9).

SOROOSHIAN, S.; KHIAMI, S. F.; KARIMI, F.; MINA, H. 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*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.3905>.

THOMAS, A.; MISHRA, U. Industry 4.0 and circular economy model for a sustainable electric vehicle battery with controllable wastewater and carbon emission. *Energy Reports*, v. 11, p. 4044-4066, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.054>.

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. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13179668>.

VALLADARES MONTEMAYOR, Halia Mayela; CHANDA, Rayyan. Automotive industry's circularity applications and Industry 4.0. *Environmental Challenges*, v. 12, n. 6, 100725, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100725>.

WANG, X.; LI, B.; GERADA, D.; HUANG, K.; STONE, I.; WORRALL, S.; YAN, Y. A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars. *Applied Thermal Engineering*, v. 201, Part A, 117758, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117758>.

WILBERFORCE, Tabbi; EL-HASSAN, Zaki; KHATIB, F. N.; AL MAKKY, Ahmed; BAROUTAJI, Ahmad; CARTON, James G.; OLABI, Abdul G. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 25695-25734, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.054>.

XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.

ZHONG, Ray Y.; XU, Xun; KLOTZ, Eberhard; NEWMAN, Stephen T. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review. *Engineering*, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ENG.2017.05.015>.