



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



INTEGRAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0, INDÚSTRIA 5.0 E CADEIA DE SUPRIMENTOS CIRCULAR: AVANÇOS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A SUSTENTABILIDADE INDUSTRIAL

TIAGO ESTRELA DA CUNHA MORAES - tiagoestrelam@gmail.com

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

TALITA BORGES TEIXEIRA - talitaborgesteixeira@gmail.com UNIVERSIDADE
ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ADRIANO ALVES TEIXEIRA - aatadrianobirigui@gmail.com
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL – UFMS – TRÊS LAGOAS

EDUARDO LOPES PEREIRA - eduardo.l.pereira@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ANDRÉ LUIZ FRANCISCO – andre.francisco@ufms.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL – UFMS – TRÊS LAGOAS

ÁREA: 9. ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE

SUBÁREA: 9.7 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

RESUMO: A CRESCENTE DEMANDA POR EFICIÊNCIA OPERACIONAL E SUSTENTABILIDADE IMPULSIONA A CONVERGÊNCIA ENTRE INDÚSTRIA 4.0, INDÚSTRIA 5.0 E CADEIA DE SUPRIMENTOS CIRCULAR. ESTE ESTUDO EXPLORA AS INTERSEÇÕES DESSAS TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS E MODELOS DE NEGÓCIOS SUSTENTÁVEIS, DESTACANDO O IMPACTO DAS TECNOLOGIAS EMERGENTES NA TRANSFORMAÇÃO DAS CADEIAS DE SUPRIMENTOS. A REVISÃO DA LITERATURA ABRANGE A ANÁLISE DE 39 ARTIGOS SELECIONADOS EM BASES DE DADOS CONFIÁVEIS, FORNECENDO DADOS SOBRE AVANÇOS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA ADOÇÃO DE PRÁTICAS CIRCULARES NA INDÚSTRIA CONTEMPORÂNEA.

PALAVRAS-CHAVES: INDÚSTRIA 4.0; INDÚSTRIA 5.0; CADEIA DE SUPRIMENTOS CIRCULAR; SUSTENTABILIDADE.

INTEGRATION OF INDUSTRY 4.0, INDUSTRY 5.0, AND CIRCULAR SUPPLY CHAIN: ADVANCES, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES FOR INDUSTRIAL SUSTAINABILITY

ABSTRACT: *THE GROWING DEMAND FOR OPERATIONAL EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY DRIVES THE CONVERGENCE OF INDUSTRY 4.0, INDUSTRY 5.0, AND THE CIRCULAR SUPPLY CHAIN. THIS STUDY EXPLORES THE INTERSECTIONS OF THESE TECHNOLOGICAL TRENDS AND SUSTAINABLE BUSINESS MODELS, HIGHLIGHTING THE IMPACT OF EMERGING TECHNOLOGIES ON SUPPLY CHAIN TRANSFORMATION. THE LITERATURE REVIEW ENCOMPASSES THE ANALYSIS OF 39 SELECTED ARTICLES FROM RELIABLE DATABASES, PROVIDING INSIGHTS INTO THE ADVANCES, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES IN THE ADOPTION OF CIRCULAR PRACTICES IN CONTEMPORARY INDUSTRY.*

KEYWORDS: *INDUSTRY 4.0; INDUSTRY 5.0; CIRCULAR SUPPLY CHAIN; SUSTAINABILITY.*

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente necessidade de eficiência operacional e sustentabilidade, a interseção entre "Industry 4.0", "Industry 5.0" e "Circular Supply Chain" tem sido objeto de maior atenção e pesquisa nos últimos anos (da Silva; Sehnem, 2024; Gebhardt *et al.*, 2022; Kayikci *et al.*, 2022; Sahoo; Upadhyay, 2024; Varma *et al.*, 2023). O ambiente industrial passou por uma transformação significativa com a introdução da Indústria 4.0 (I4.0) e, mais recentemente, da Indústria 5.0 (I5.0), estes desenvolvimentos criaram um novo potencial para melhorar a circularidade e a sustentabilidade nas cadeias de suprimentos (Gebhardt *et al.*, 2022). Ao mesmo tempo, a noção de Cadeia de Suprimentos Circular (CSC) tornou-se mais conhecida como um modelo que visa promover a reutilização de recursos e minimizar desperdícios (Holgado *et al.*, 2024; Kavota *et al.*, 2024).

Estudos recentes mostraram que novas oportunidades para a transformação da cadeia de abastecimento surgem à medida que a I5.0 aumenta sua capacidade de integrar sistemas com colaboração homem-máquina, assim ultrapassando os limites da I4.0, que se concentra na digitalização e automatização de processos industriais tradicionais (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024). Simultaneamente, a implementação de estratégias circulares de gestão da cadeia de suprimentos procura melhorar a eficiência econômica e social ao longo do ciclo de vida dos produtos, além de minimizar o efeito ambiental (Benatiya Andaloussi, 2024; Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024; Varma *et al.*, 2023).

Para promover a sustentabilidade da cadeia de suprimentos, é necessário investigar como estas tendências convergentes podem ser utilizadas de forma integrada (da Silva; Sehnem, 2024; Gebhardt *et al.*, 2022; Kayikci *et al.*, 2022; Sahoo; Upadhyay, 2024; Varma *et al.*, 2023). A literatura atual indica que ainda existe uma lacuna significativa de conhecimento sobre como I4.0 e I5.0 podem ser plenamente utilizadas para otimizar práticas circulares na gestão da cadeia de abastecimento, apesar dos avanços significativos na aplicação destas tecnologias em contextos isolados (da Silva; Sehnem, 2024; Gebhardt *et al.*, 2022; Kayikci *et al.*, 2022; Sahoo; Upadhyay, 2024; Varma *et al.*, 2023). O objetivo deste estudo é examinar as intrincadas relações entre essas ideias, bem como elas se relacionam e afetam a gestão moderna da cadeia de suprimentos.

Para isso, foi realizada uma revisão da literatura utilizando fontes confiáveis como

Scopus e Web of Science, empregando uma abordagem rigorosa para seleção e análise de documentos. Encontrar revisões e artigos que abordassem simultaneamente as questões da "Industry 4.0" e "Industry 5.0" foi o principal objetivo da investigação. Ao examinar como esses desenvolvimentos tecnológicos estão influenciando as práticas da indústria em direção à sustentabilidade e à eficiência operacional, "Circular Supply Chain" foi incluída na análise.

As conclusões preliminares desta revisão proporcionam novas informações substanciais sobre tendências emergentes, desenvolvimentos tecnológicos e desafios na adoção de processos circulares na indústria contemporânea. Este estudo não apenas identifica áreas que necessitam de investigação adicional, mas também ilustra como tecnologias de vanguarda, como blockchain e inteligência artificial, podem ser integradas de maneira eficaz na gestão circular da cadeia de abastecimento.

Por meio do mapeamento das relações entre "Industry 4.0", "Industry 5.0" e "Circular Supply Chain", este estudo busca oferecer uma perspectiva completa que direciona futuras investigações e planos comerciais no interesse da eficiência operacional e da sustentabilidade global. Os resultados obtidos até agora destacam a importância crescente dos métodos multidisciplinares e das parcerias globais na abordagem dos problemas empresariais atuais.

2. REFERENCIAL

2.1 Indústria 4.0/5.0 e EC

Um desenvolvimento importante no ambiente industrial moderno é a mudança da Indústria 4.0 (I4.0) para a Indústria 5.0 (I5.0) (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024). A quarta revolução industrial, ou I4.0, mudou completamente a produção e outros setores da economia, introduzindo tecnologia de ponta como inteligência artificial, computação em nuvem e análise de dados em tempo real (da Silva; Sehnem, 2024; He *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2023; Sahoo; Upadhyay, 2024; Tsolakis; Goldsmith, *et al.*, 2023; Tsolakis; Harrington, *et al.*, 2023). Impulsiona a automação e a conexão em processos industriais com foco principal na produtividade, eficiência e integração de sistemas (da Silva; Sehnem, 2024; Faisal, 2023; He *et al.*, 2024; D. Kumar *et al.*, 2023; Sahoo; Upadhyay, 2024; Tsolakis; Goldsmith, *et al.*, 2023).

Os avanços técnicos da I4.0 mudaram completamente como o processo de fabricação e o gerenciamento do sistema logístico são feitos (Gebhardt *et al.*, 2022; Sahoo; Upadhyay, 2024; Tsolakis; Goldsmith, *et al.*, 2023). A Internet das Coisas (IoT), por exemplo, é um componente-chave da gestão do ciclo de vida do produto, melhorando a comunicação e a transparência entre muitas indústrias (Gebhardt *et al.*, 2022; Jamil *et al.*, 2024; Rejeb; Appolloni, 2022). A fim de

garantir a troca segura de informações e promover a confiança na economia circular, também foram investigadas novas tecnologias como a blockchain (Gebhardt *et al.*, 2022).

Nesse contexto de avanços tecnológicos e integração de sistemas, apesar das dificuldades orçamentais, a utilização destas tecnologias demonstrou ter certas vantagens, incluindo aumento da eficiência dos recursos, transparência dos processos e recolha de dados mais precisa (da Silva; Sehnem, 2024; Faisal, 2023; Jamil *et al.*, 2024; Mastos *et al.*, 2021; Rejeb; Appolloni, 2022). Além disso, a I4.0 incentiva a coordenação eficaz através da tecnologia móvel, o que é fundamental para os gestores colocarem em prática as metas de sustentabilidade e eficiência operacional (A. Kumar *et al.*, 2023; D. Kumar *et al.*, 2023).

Como uma progressão lógica, a I5.0 se constroi sobre o trabalho estabelecido pela I4.0 e busca avançar ainda mais na revolução digital iniciada por sua antecessora, isto é realizado ao priorizar a sustentabilidade ambiental, práticas industriais centradas no ser humano e encontrar um equilíbrio entre eficiência econômica e responsabilidade social (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024). Este novo paradigma industrial prioriza a colaboração homem-máquina e utiliza tecnologia de ponta para melhorar a sustentabilidade ambiental, o bem-estar dos trabalhadores e a produção (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024).

As iniciativas da I5.0 procuram modernizar os processos industriais através da tecnologia, promovendo um crescimento económico alinhado com os objetivos ambientais (Dwivedi *et al.*, 2023). A crescente procura dos clientes por atividades ecológica e socialmente conscientes é a força motriz por trás desta mudança para modelos de empresa mais sustentáveis (Dwivedi *et al.*, 2023; Jamil *et al.*, 2024; A. Kumar *et al.*, 2023; Tsolakis; Harrington, *et al.*, 2023). Além disso, devido à sua capacidade de aumentar a eficiência dos recursos, diminuir o desperdício e criar empregos, a I5.0 tem potencial para melhorar significativamente a inclusão social e o padrão de vida nas comunidades locais (Gamberini; Pluchino, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024).

No entanto, um forte apoio organizacional e uma gestão eficiente das partes interessadas também são necessários para que a Indústria 5.0 seja implementada com sucesso; isto realça a importância de uma liderança dedicada e de políticas flexíveis que incentivam a adoção destas novas práticas (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; A. Kumar *et al.*, 2023; Rejeb; Appolloni, 2022). Além disso, há uma série de obstáculos enfrentados pela mudança para a Indústria 5.0, tais como a exigência de grandes despesas em investigação e infra-estruturas e a possibilidade de modificações nos atuais modelos de negócio que terão de

ser cuidadosamente considerados a fim de reduzir riscos imprevistos (da Silva; Sehnem, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2023; Sharma; Gupta, 2024).

Portanto, as indústrias contemporâneas têm a ganhar significativamente com a transição da I4.0 para a I5.0 (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024). A I5.0 visa humanizar ainda mais o processo industrial, incorporando valores sociais e sustentabilidade ambiental, enquanto a I4.0 trouxe avanços consideráveis em automação e eficiência (He *et al.*, 2024; Rejeb; Appolloni, 2022). Para colher plenamente os frutos desta nova revolução industrial, são necessárias cooperação entre muitas partes interessadas, adaptabilidade organizacional e investimento em tecnologia de ponta (da Silva; Sehnem, 2024; Dwivedi *et al.*, 2023; Gebhardt *et al.*, 2022; Sharma; Gupta, 2024). Portanto, em linha com as atuais necessidades socioeconômicas e ambientais, a I5.0 não só melhora a eficiência operacional, mas também promove um futuro industrial mais inclusivo e sustentável (Dwivedi *et al.*, 2023; Gamberini; Pluchino, 2024; Jamil *et al.*, 2024; Sahoo; Upadhyay, 2024; Sharma; Gupta, 2024).

2.3 Cadeia de suprimentos circulares

Dada a crescente importância atribuída à sustentabilidade, práticas de SCM estão passando por transformações significativas (Amin; Kaur, 2024; Benatiya Andaloussi, 2024; He *et al.*, 2024; Holgado *et al.*, 2024). A atenção tem se voltado aos fornecedores sustentáveis e práticas de SCM, como proteção ambiental e logística reversa, visando reduzir impactos ambientais e melhorar eficiência operacional (Holgado *et al.*, 2024; Kavota *et al.*, 2024).

A adaptabilidade às flutuações de mercado é fundamental (Alghababsheh *et al.*, 2023; Amin; Kaur, 2024; He *et al.*, 2024; Holgado *et al.*, 2024). Assim, capacidade de adaptação e capacidade de resistir às mudanças de mercado, representadas pela resiliência, podem assegurar um sucesso econômico em mercados altamente competitivos, além de promover resultados sustentáveis na SCM (Holgado *et al.*, 2024).

Ademais, a gestão contemporânea das cadeias de suprimento demanda tecnologias avançadas e estratégias adaptáveis (Aman *et al.*, 2023; Benatiya Andaloussi, 2024; Bo; Yi, 2024; He *et al.*, 2024), essenciais para completar o ciclo de vida dos produtos e integrar modelos industriais que facilitem a desmontagem e remanufatura (Abideen *et al.*, 2021; He *et al.*, 2024). Dada a rápida obsolescência dos produtos e a necessidade de personalização em massa, é necessário gerir eficientemente o fim de vida útil e as operações de desmontagem (He *et al.*, 2024). Para isso, métodos e modelos eficazes são fundamentais, garantindo flexibilidade, eficiência energética e segurança no trabalho (Abideen *et al.*, 2021; He *et al.*,

2024). A integração de práticas circulares na SCM, junto com tecnologias avançadas e análise de dados robusta, promove um sistema sustentável e adaptável (Abideen *et al.*, 2021; Aman *et al.*, 2023; Benatiya Andaloussi, 2024; Bo; Yi, 2024; He *et al.*, 2024).

Nesse cenário, a Gestão Circular de Suprimentos (CSCM) surge da integração de estudos de gestão de resíduos com conceitos de economia circular e cadeias de suprimentos de circuito fechado (Varma *et al.*, 2023). Ela desempenha um papel crucial na abordagem dos desafios financeiros e ambientais causados por padrões de consumo irresponsáveis (Benatiya Andaloussi, 2024). Além de mitigar problemas, a CSCM promove um modelo de negócios mais responsável (Benatiya Andaloussi, 2024), utilizando eficazmente recursos para reduzir resíduos e maximizar a reutilização de materiais (Le *et al.*, 2023). A CSCM também busca criar redes simbióticas que transformem resíduos de uma empresa em recursos úteis para outras (Le *et al.*, 2023).

A necessidade urgente de transição para CSCM visa reduzir os efeitos ambientais negativos causados pelo consumo linear predominante (Benatiya Andaloussi, 2024). Essas cadeias encerram o ciclo de vida dos produtos reintegrando materiais ao processo produtivo, contrastando com as cadeias lineares que seguem um padrão de produção, uso e descarte (Benatiya Andaloussi, 2024; Le *et al.*, 2023).

A implementação do CSCM pode melhorar a competitividade ao minimizar desperdícios e usar recursos de forma eficiente (Primadasa *et al.*, 2024). A adoção de materiais ecológicos no CSCM pode impactar positivamente a ecologia da cadeia de abastecimento (Primadasa *et al.*, 2024). Análises recentes destacam os efeitos da Economia Circular nas cadeias de fornecimento, explorando desenvolvimentos tecnológicos e elementos de suporte para sua implementação bem-sucedida (Abideen *et al.*, 2021; Benatiya Andaloussi, 2024; Gebhardt *et al.*, 2022; Varma *et al.*, 2023).

A Indústria 4.0 é essencial para implementar práticas circulares eficazes, facilitando desde o design até a recuperação de produtos, promovendo a sustentabilidade e a eficiência na gestão de recursos (Abideen *et al.*, 2021; Gebhardt *et al.*, 2022). Por exemplo, tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT) e Tecnologias de Precisão, desempenham um papel crucial na promoção da Economia Circular, melhorando eficiência operacional e apoiando decisões precisas em toda a produção e distribuição (Benatiya Andaloussi, 2024). Além do monitoramento em tempo real e gestão eficaz de recursos, essas tecnologias contribuem significativamente para a integridade ambiental e econômica da CSC (Varma *et al.*, 2023).

Por fim, para alcançar eficácia total da CSC, é necessário integrar princípios circulares desde a fase de design e planejamento, assegurando que os produtos sejam duráveis, reparáveis e recicláveis (Gebhardt *et al.*, 2022). Garantindo que os bens sejam projetados com

durabilidade, reparabilidade e reciclabilidade em mente (Abideen *et al.*, 2021; Gebhardt *et al.*, 2022; Tseng *et al.*, 2024). O compromisso com a sustentabilidade ambiental, social e econômica, aliado ao uso responsável de novas tecnologias, é fundamental para enfrentar desafios globais e construir um futuro mais resiliente (Abideen *et al.*, 2021; Benatiya Andaloussi, 2024; Gebhardt *et al.*, 2022; Tseng *et al.*, 2024; Varma *et al.*, 2023). Entretanto, implementação efetiva da CSC requer não apenas inovações tecnológicas, mas também uma transformação cultural e estratégica nas empresas (Abideen *et al.*, 2021; Benatiya Andaloussi, 2024; Gebhardt *et al.*, 2022; Varma *et al.*, 2023).

3 MÉTODO

O objetivo deste artigo é compreender as interfaces entre as temáticas “Industry 4.0”, “Industry 5.0” e “Circular Supply Chain”. Para isso, foi conduzida uma revisão de literatura nas bases de dados Scopus e Web of Science.

A busca foi conduzida utilizando as palavras-chave “Industry 4.0”, “Industry 5.0” e “Circular Supply Chain”, combinadas com operadores booleanos: “OR” entre “Industry 4.0” e “Industry 5.0” e “AND” para associá-las a “Circular Supply Chain”. Foram considerados apenas documentos em que esses termos estivessem presentes no título, resumo ou palavras-chave.

Além disso, a pesquisa foi restrita a documentos do tipo artigo ou revisão, excluindo outros tipos de publicações. Este critério de inclusão e exclusão foi adotado para assegurar a precisão e a qualidade científica dos resultados. Após as buscas, foram encontrados 44 documentos, sendo 40 artigos e 4 revisões. No entanto, apenas 39 artigos foram analisados, pois não foi possível acessar 5 dos documentos encontrados.

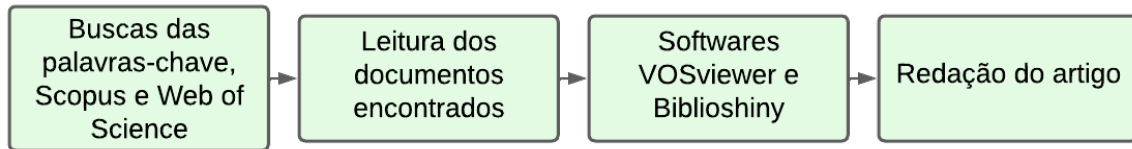
A coleta de dados ocorreu em três etapas, ambas realizadas em junho de 2024. Na primeira etapa, foram realizadas as buscas das palavras-chave nas bases de dados Scopus e Web of Science. A segunda etapa consistiu na leitura e fichamento dos documentos encontrados.

Como forma de aperfeiçoar as análises feitas pela leitura dos documentos, foram utilizados os softwares VOSviewer e Bibliometrix. VOSviewer é uma ferramenta para construção de redes bibliométricas, permitindo mapear e analisar a co-ocorrência de termos e a colaboração entre autores (Abbasi *et al.*, 2024). Bibliometrix, por sua vez, facilita a visualização de dados bibliométricos, oferecendo uma interface para explorar tendências na literatura científica (Odoi-Yorke *et al.*, 2024). Após esses passos, iniciaram-se as análises dos dados obtidos, seguidas pela redação deste artigo.

Os resultados da revisão foram sintetizados para fornecer uma visão abrangente das interfaces entre “Industry 4.0”, “Industry 5.0” e “Circular Supply Chain”. Identificaram-se as

principais tendências, avanços tecnológicos, bem como as barreiras e oportunidades para a implementação de práticas circulares na indústria contemporânea e futura. A Figura 1 resume as etapas realizadas para a construção desta pesquisa.

FIGURA 1 - Etapas da metodologia



Fonte: elaborada pelos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Coocorrência de Palavras-chave na Literatura sobre Industry 4.0, Economia Circular e Gestão da Cadeia de Suprimentos

A Figura 1 apresenta um gráfico de coocorrência de palavras-chave gerado pelo software VOSviewer, baseado na literatura revisada para este estudo. O gráfico ilustra a relação entre os principais termos e conceitos discutidos no artigo, destacando as áreas de maior relevância e interconexão temática.

Os nodos estão agrupados em clusters de diferentes cores, cada um representando um grupo de termos que frequentemente coocorrem na literatura. Estes clusters podem ser interpretados como subtemas no contexto geral do artigo:

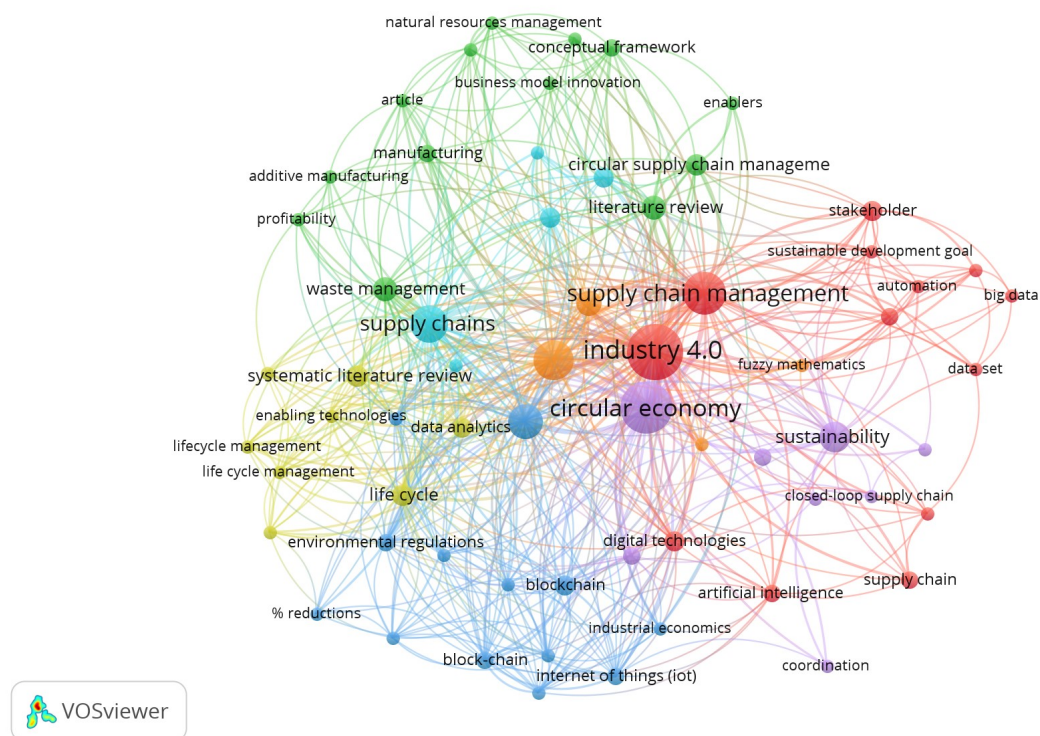
- Cluster Verde: este grupo inclui termos como "natural resources management" e "business model innovation", sugerindo um foco em práticas de gestão e inovação no contexto de recursos naturais e modelos de negócios.
- Cluster Azul: inclui termos como "blockchain", "life cycle management" e "environmental regulations", indicando uma ênfase em tecnologias emergentes e gestão de ciclo de vida, juntamente com regulamentações ambientais.
- Cluster Amarelo: agrupa termos como "systematic literature review" e "lifecycle management", apontando para uma metodologia robusta de revisão sistemática da literatura e gestão de ciclo de vida.
- Cluster Roxo: envolve termos como "sustainability" e "closed-loop supply chain", destacando a sustentabilidade e a gestão de cadeias de suprimentos em ciclo fechado como temas críticos.

- Cluster Vermelho: relaciona-se principalmente com "supply chain management" e "stakeholder", refletindo a importância da gestão da cadeia de suprimentos e o envolvimento dos stakeholders.

As linhas que conectam os termos representam a coocorrência destes nas fontes analisadas, com linhas mais espessas indicando uma maior frequência de coocorrência. As conexões mais frequentes entre "Industry 4.0", "Circular Economy" e "Supply Chain Management" sugerem uma forte inter-relação entre estes temas.

A presença de termos como "blockchain", "sustainability", "data analytics" e "automation" indica a abrangência e complexidade do estudo, cobrindo diversas tecnologias e práticas emergentes. A intersecção de temas como "environmental regulations", "artificial intelligence" e "natural resources management" sugere uma abordagem interdisciplinar, integrando múltiplas facetas dos tópicos principais.

FIGURA 2 – Mapa de Coocorrência de Palavras-chave na Literatura sobre Industry 4.0, Economia Circular e Gestão da Cadeia de Suprimentos



Fonte: elaborada pelos autores.

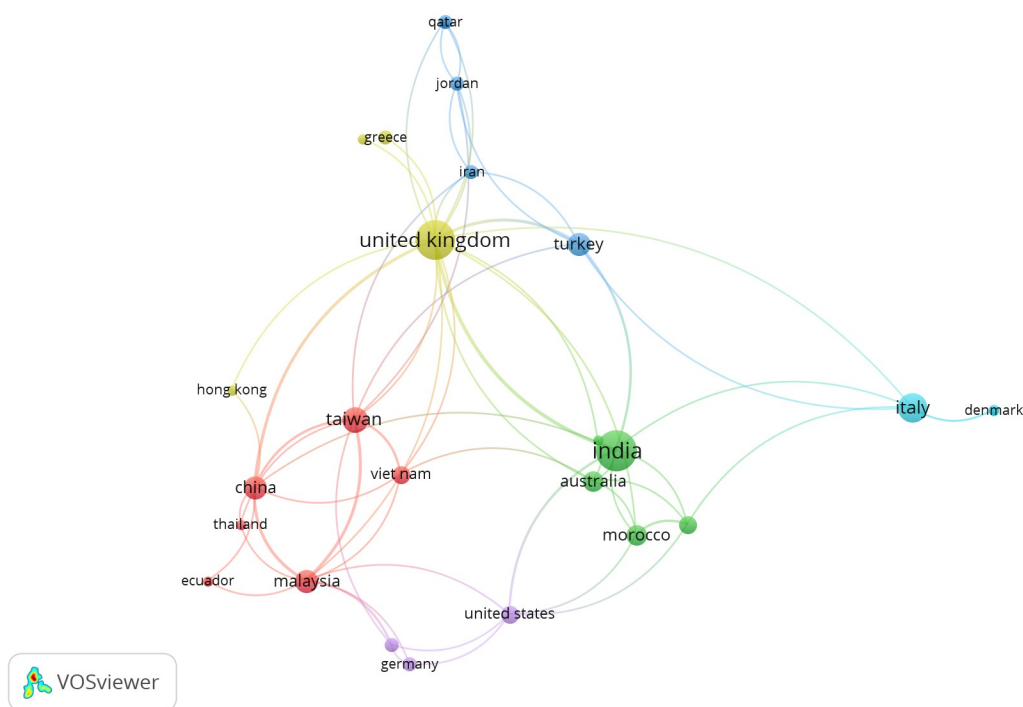
A Figura 2 apresenta um gráfico de coocorrência de países, ilustra as relações e colaborações entre diferentes países no contexto de pesquisa abordado, destacando os principais centros de colaboração. Os países centrais identificados no gráfico são Reino

Unido, Índia e Taiwan. Estes países, representados por nodos maiores e mais destacados, indicam sua importância central na rede de colaboração internacional, evidenciando que são centros significativos de pesquisa e parceria.

As linhas que conectam os países representam colaborações ou coocorrências nas publicações. As conexões mais frequentes entre os nodos centrais e outros países sugerem que Reino Unido, Índia e Taiwan são centros de colaboração.

O gráfico de coocorrência de países revela informações fundamentais sobre as redes de colaboração internacional. Reino Unido, Índia e Taiwan destacam-se como principais centros de colaboração, enquanto diferentes clusters mostram redes regionais e transnacionais significativas. Este mapa demonstra a complexidade e a interconectividade das colaborações globais, proporcionando uma compreensão abrangente das dinâmicas de cooperação científica.

FIGURA 3 – Mapa de coocorrência de países na colaboração científica internacional



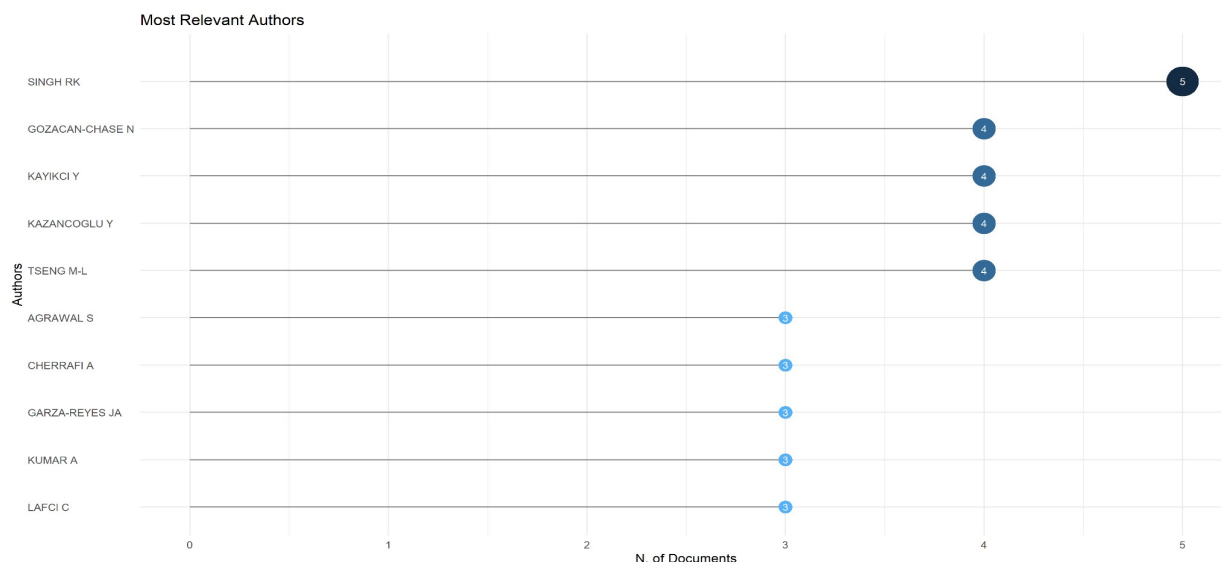
Fonte: elaborada pelos autores.

4.2 Distribuição dos autores mais relevantes em publicações científicas

A Figura 3, gerada pelo software Bibliometrix, apresenta um gráfico destacando os autores mais relevantes no campo de estudo analisado. O eixo X representa o número de documentos publicados por cada autor, enquanto o eixo Y lista os nomes dos autores. Singh R.K. emerge como o autor mais relevante com 5 publicações, seguido por Gozacan-Chase N., Kayikci

Y., Kazancoglu Y., e Tseng M.-L., cada um com 4 publicações. Outros autores, como Agrawal S. e Cherrafi A., possuem 3 publicações cada.

FIGURA 4 – Distribuição dos autores mais relevantes em publicações científicas

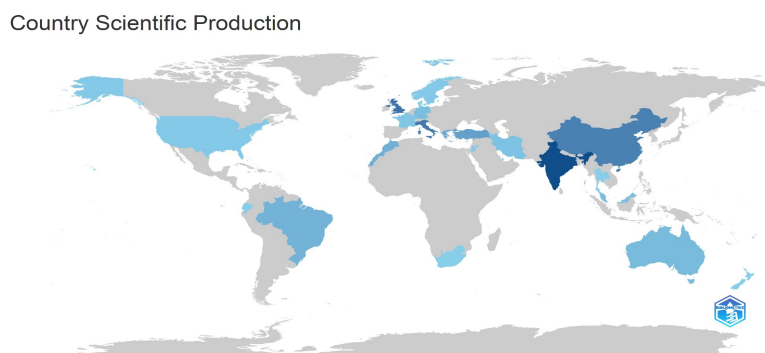


Fonte: elaborada pelos autores.

4.3 Distribuição global da produção científica por país

A Figura 4 ilustra a produção científica global por país. Países como Índia e China destacam-se com os tons mais escuros de azul, indicando alta produção científica. Países como Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha, França, Brasil, Japão e Austrália mostram produção moderada em tons de azul-médio. Regiões da África, América Latina e partes da Ásia e Europa Oriental, representadas em tons claros ou cinza, indicam produção baixa. O mapa evidencia a desigualdade na produção científica global e a concentração de pesquisa em poucas regiões.

FIGURA 5 – Distribuição global da produção científica por país



Fonte: elaborada pelos autores.

4.4 Outras dimensões analisadas

Acerca da metodologia, dos artigos analisados, 13 são qualitativos, 16 são quantitativos e 10 utilizam uma abordagem mista (quali-quant). Entre os artigos qualitativos, predominam as revisões de literatura, frameworks e metodologias de design research. Nos quantitativos, destacam-se modelagem matemática, estudos bibliométricos, surveys e métodos de análise multicritério como AHP, DEMATEL e TOPSIS. As abordagens mistas frequentemente combinam estudos de caso com entrevistas e modelagem de equações estruturais.

A análise dos fichamentos revela que as pesquisas são predominantemente conduzidas no setor privado, abrangendo diversas indústrias específicas como eletrônicos, baterias, alimentos, farmacêutica, automotiva, eólica, biofertilizantes, construção e têxtil. Algumas pesquisas não especificam o setor, indicando uma abordagem teórica ou de revisão.

Os objetivos dos artigos analisados, resumidamente, incluem explorar a coordenação e eficiência das cadeias de suprimentos, desenvolver modelos matemáticos e contratos para maximizar lucro e eficiência, além de investigar como tecnologias avançadas, como IoT e blockchain, promovem a sustentabilidade. Revisões bibliométricas e sistematização do conhecimento são comuns, assim como o desenvolvimento de modelos e frameworks para apoiar a transição para cadeias de suprimentos circulares. Muitos artigos focam na integração de tecnologias da Indústria 4.0 com gestão da qualidade, lean six sigma e logística reversa para melhorar o desempenho organizacional.

4.5 Recomendações de pesquisa

Com base nos dados encontrados e nas discussões realizadas, recomenda-se investigar os seguintes tópicos, os quais são elencados a seguir:

R1: investigar como a integração de tecnologias emergentes como blockchain, IoT e inteligência artificial pode ser otimizada para aumentar a sustentabilidade e eficiência das cadeias de suprimentos circulares.

R2: explorar abordagens interdisciplinares que integrem aspectos de regulamentações ambientais, inovação de modelos de negócios e gestão de recursos naturais para desenvolver soluções holísticas.

R3: realizar estudos comparativos entre diferentes setores industriais para identificar práticas e tecnologias mais eficazes na implementação de cadeias de suprimentos circulares.

R4: incentivar colaborações internacionais, especialmente entre países emergentes e desenvolvidos, para compartilhar conhecimento e tecnologias inovadoras.

R5: continuar a desenvolver e testar frameworks que apoiem empresas na transição para cadeias de suprimentos circulares, garantindo a integração de diretrizes práticas e mensuráveis.

R6: examinar o impacto da Indústria 4.0 em práticas de sustentabilidade, com foco na melhoria contínua de processos e redução de desperdícios.

R7: utilizar métodos de análise avançados, como modelagem de equações estruturais e análise multicritério, para avaliar o desempenho e a eficácia das práticas de Economia Circular.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo proporcionou uma análise abrangente da literatura existente sobre a integração da Indústria 4.0, a Economia Circular e a gestão da cadeia de suprimentos. Por meio da revisão, foi possível identificar as principais tendências, desafios e oportunidades. Os resultados destacam a interconectividade entre os conceitos e a importância de tecnologias emergentes, como blockchain, IoT e inteligência artificial, na promoção da sustentabilidade e eficiência operacional.

A análise de coocorrência de palavras-chave revelou que os subtemas mais relevantes incluem a gestão de recursos naturais, inovação em modelos de negócios, regulamentações ambientais e metodologias robustas de revisão literária. Além disso, a coocorrência de países evidenciou centros de colaboração científica significativos, como Reino Unido, Índia e Taiwan, indicando uma rede global de parcerias de pesquisa.

A distribuição dos autores mais relevantes mostrou a predominância de pesquisadores como Singh R.K., Gozacan-Chase N., Kayikci Y., Kazancoglu Y., e Tseng M.-L., refletindo a contribuição significativa desses indivíduos para o campo de estudo. A análise da produção científica por país destacou desigualdades na produção de conhecimento, com uma concentração notável em países como Índia, China e Estados Unidos.

Em termos metodológicos, houve a prevalência de revisões de literatura, modelagem matemática e estudos de caso. Setores como eletrônicos, baterias, alimentos, farmacêutico, automotivo, eólico, biofertilizantes, construção e têxtil foram os mais frequentemente investigados.

Para futuras pesquisas, recomenda-se explorar tópicos como a integração de tecnologias emergentes, abordagens interdisciplinares, estudos comparativos entre setores industriais, incentivo a colaborações internacionais, desenvolvimento de frameworks práticos e mensuráveis, impacto da Indústria 4.0 em práticas de sustentabilidade e utilização de métodos de análise avançados.

Portanto, conclui-se que este estudo contribui para o entendimento aprofundado das dinâmicas entre Indústria 4.0, Economia Circular e gestão da cadeia de suprimentos, fornecendo

um panorama abrangente e identificando direções estratégicas para pesquisas futuras. A implementação de práticas sustentáveis e inovadoras, apoiada por tecnologias emergentes, é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos e promover a sustentabilidade global.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, F. A. et al. Fostering UAM implementation: from bibliometric analysis to insightful knowledge on the demand. **Social Network Analysis and Mining**, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.
- ABIDEEN, A. Z. et al. **Leveraging capabilities of technology into a circular supply chain to build circular business models: A state-of-the-art systematic review**. **Sustainability (Switzerland)**MDPI AG, , 2 ago. 2021.
- ALGHABABSHEH, M.; BUTT, A. S.; ALI, S. M. The role of buyers justice in achieving socially sustainable global supply chains: A perspective of apparel suppliers and their workers. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 29, n. 2, 1 mar. 2023.
- AMAN, S.; SEURING, S.; KHALID, R. U. Sustainability performance measurement in risk and uncertainty management: An analysis of base of the pyramid supply chain literature. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 4, p. 2373–2398, 1 maio 2023.
- AMIN, R.; KAUR, G. A Study of Supply Chain Management Strategies and Challenges Through Systematic Literature Review. Em: [s.l: s.n.]. p. 159–188.
- BENATIYA ANDALOUSSI, M. A Bibliometric Literature Review of Digital Supply Chain: Trends, Insights, and Future Directions. **SAGE Open**, v. 14, n. 2, 1 abr. 2024.
- BO, X.; YI, B. Sustainable development and supply chain management in renewable-based community based self-sufficient utility: an analytical review of social and environmental impacts and trade-offs in digital twin. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 65, 1 maio 2024.
- DA SILVA, T. H. H.; SEHNEM, S. **Circular Supply Chains and Industry 4.0: An Analysis of Interfaces in Brazilian Foodtechs**. Procedia Computer Science. **Anais...Elsevier B.V.**, 2024.
- DWIVEDI, A. et al. Studying the interactions among Industry 5.0 and circular supply chain: Towards attaining sustainable development. **Computers and Industrial Engineering**, v. 176, 1 fev. 2023.
- FAISAL, M. N. Role of Industry 4.0 in circular supply chain management: a mixed-method analysis. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 36, n. 1, p. 303–322, 27 jan. 2023.
- GAMBERINI, L.; PLUCHINO, P. Industry 5.0: A comprehensive insight into the future of work, social sustainability, sustainable development, and career. **Australian Journal of Career Development**, v. 33, n. 1, p. 5–14, 1 abr. 2024.
- GEBHARDT, M. et al. **Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review**. **International Journal of Production Research**Taylor and Francis Ltd., , 2022.
- HE, J. et al. **Multi-objective disassembly line balancing and related supply chain management problems under uncertainty: Review and future trends**. **International Journal of Production Economics**Elsevier B.V., , 1 jun. 2024.
- HOLGADO, M. et al. Brilliance in resilience: operations and supply chain management's role in achieving a sustainable future. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 44, n. 5, p. 877–899, 26 abr. 2024.
- JAMIL, MD. A. et al. A structural equation modeling framework for exploring the industry 5.0 and sustainable supply chain determinants. **Supply Chain Analytics**, v. 6, p. 100060, jun. 2024.

KAVOTA, J. K.; CASSIVI, L.; LÉGER, P. M. **A Systematic Review of Strategic Supply Chain Challenges and Teaching Strategies.** *Logistics* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2024.

KAYIKCI, Y. et al. Analyzing the drivers of smart sustainable circular supply chain for sustainable development goals through stakeholder theory. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 7, p. 3335–3353, 1 nov. 2022.

KUMAR, A. et al. Analysis of critical success factors for implementing Industry 4.0 integrated circular supply chain—moving towards sustainable operations. **Production Planning and Control**, v. 34, n. 10, p. 984–998, 2023a.

KUMAR, D. et al. Coordination of circular supply chain for online recommerce platform in industry 4.0 environment: a game-theoretic approach. **Operations Management Research**, v. 16, n. 4, p. 2081–2103, 1 dez. 2023b.

LE, T. T.; BEHL, A.; GRAHAM, G. The Role of Entrepreneurship in Successfully Achieving Circular Supply Chain Management. **Global Journal of Flexible Systems Management**, v. 24, n. 4, p. 537–561, 1 dez. 2023.

MASTOS, T. D. et al. Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 300, 1 jun. 2021.

ODOI-YORKE, F. et al. **Employing bibliometric analysis to identify the trends, evolution, and future research directions of sand-based thermal energy storage systems.** *Journal of Energy Storage* Elsevier Ltd, , 30 jul. 2024.

PRIMADASA, R. et al. An investigation of the interrelationship among circular supply chain management indicators in small and medium enterprises. **Supply Chain Analytics**, v. 7, 1 set. 2024.

REJEB, A.; APPOLLONI, A. **The Nexus of Industry 4.0 and Circular Procurement: A Systematic Literature Review and Research Agenda.** *Sustainability (Switzerland)* MDPI, , 1 dez. 2022.

SAHOO, S.; UPADHYAY, A. Improving triple bottom line (TBL) performance: analyzing impacts of industry 4.0, lean six sigma and circular supply chain management. **Annals of Operations Research**, 2024.

SHARMA, R.; GUPTA, H. Leveraging cognitive digital twins in industry 5.0 for achieving sustainable development goal 9: An exploration of inclusive and sustainable industrialization strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 448, 5 abr. 2024.

TSENG, M. L. et al. Modelling hierarchical circular supply chain management enablers in the seafood processing industry in Vietnam under uncertainties. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 27, n. 1, p. 30–58, 2024.

TSOLAKIS, N. et al. Microalgae-based circular supply chain configurations using Industry 4.0 technologies for pharmaceuticals. **Journal of Cleaner Production**, v. 395, 1 abr. 2023.

TSOLAKIS, N.; HARRINGTON, T. S.; SRAI, J. S. Digital supply network design: a Circular Economy 4.0 decision-making system for real-world challenges. **Production Planning and Control**, v. 34, n. 10, p. 941–966, 2023.

VARMA, S.; SINGH, N.; ZHANG, J. Z. Evolving trajectories of circular supply chain domain: a citation path analysis. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 36, n. 6, p. 1610–1646, 8 nov. 2023.