

BEATRIZ BRAGA GOLDENSTEIN
CATARINA WILTGEN TORTEROLLI

Economia Circular e Indústria 4.0:
uma Revisão Literária sobre Dois Temas em Ascensão

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
APRESENTADO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL
DA PUC-RIO, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ENGENHEIRO DE PRODUÇÃO

Orientador: Prof. Igor Tona Peres
Co-orientador: Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado

Departamento de Engenharia Industrial
Rio de Janeiro, 17 de Novembro de 2023.

Resumo

Em uma era marcada por transformações, a Indústria 4.0 (I4.0) e a Economia Circular (EC) tornam-se fatores importantes em ascensão. Preocupações crescentes com o meio ambiente ressaltam a necessidade da conexão entre práticas sustentáveis e a produção industrial. O mundo vive um momento de avanços tecnológicos significativos, tornando-se imprescindível que a virada de paradigma representada pela I4.0 seja um habilitador da EC, e que ambos caminhem juntos.

Nesse cenário, este estudo busca (1) entender como a literatura relaciona os temas quando em conjunto, (2) identificar os tópicos-chaves da EC que, quando combinados com as tecnologias 4.0, são impulsionados, (3) selecionar as tecnologias da I4.0 que melhor se adequem ao contexto circular, (4) propor investigações futuras e estratégias para pesquisadores e tomadores de decisão que desejam um modelo de negócio mais eficiente e sustentável.

Para atingir tais objetivos, adotou-se o método de revisão da literatura utilizando bibliometria (metodologia quantitativa), e análise de conteúdo (metodologia qualitativa). Num primeiro momento, a aplicação de métodos estatísticos se faz essencial para analisar a quantidade e a qualidade da produção acadêmica, identificar padrões, tendências, redes de colaboração e temas emergentes. Em seguida, a compreensão das oportunidades e aplicações dos tópicos possibilita a interpretação de fenômenos complexos de maneira holística, contribuindo para uma visão mais aprofundada.

Em conclusão, a pesquisa propõe diferentes abordagens para facilitar a integração entre EC e I4.0 a partir de um framework explicativo, em que tecnologias 4.0, práticas e focos de EC e setores industriais são pontos-chave. Por fim, uma agenda de pesquisa descreve as oportunidades identificadas para ampliar a discussão em explorações futuras.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Economia Circular, Sustentabilidade, Tecnologia.

Abstract

In the middle of a transformation decade, the Industry 4.0 (I4.0) and the Circular Economy (CE) become important factors. Growing concerns with the environment underscore the need for the connection between sustainable practices and the industrial means. In the meantime, the world lives a moment of significant technological advancements, becoming indispensable that this paradigm turn represented by I4.0, be a CE enabler, and that both walk together.

In this scenario, this study seeks (1) to understand how the literature relates the themes together, (2) to identify the key CE topics so that when combined with 4.0 technologies, they can be driven, (3) to select the technologies of I4.0 that best suit the circular context, (4) to propose future investigations for researchers and decision makers in companies and industries that want a more efficient and sustainable business model.

The study was conducted through a literature review using bibliometrics analysis (quantitative approach), and content analysis (qualitative approach). First, statistical methods were essential to analyze the quantity and quality of academic production and to identify patterns, trends, collaboration networks and emerging themes. Then, the understanding of opportunities and applications made it possible to interpret complex phenomena in a more holistic manner, contributing to a more complete and in-depth view of the reality.

In conclusion, the study proposes strategies to facilitate the integration of CE and I4.0 using an explanatory framework, where 4.0 technologies, CE focuses and practices and industrial sectors are key points. Finally, a research agenda reveals the most important themes to expand knowledge even further.

Keywords: Industry 4.0, Circular Economy, Sustainability, Technology.

Sumário

1. Introdução	1
2. Referencial Teórico	4
2.1 Indústria 4.0	4
2.2 Economia Circular	4
2.3 Análise Bibliométrica	5
3. Metodologia.....	7
4. Resultados.....	10
4.1 Publicações por Ano e Tendência.....	10
4.2 Relevância versus Tendência de Palavras-Chaves	10
4.3 Análise de Autores por Temas	12
4.4 Análise Fatorial.....	13
4.5 Análises Temáticas	15
5. Análise de Conteúdo.....	19
5.1 Práticas da Economia Circular inseridas no contexto da Indústria 4.0.....	19
5.2 Tecnologia 4.0 como facilitador da Economia Circular	23
6. Discussão	28
7. Agenda de Pesquisa	30
8. Conclusão	32
Bibliografia.....	33

Lista de Figuras

Figura 1: Metodologia de Pesquisa	7
Figura 2: Produção Científica Anual	10
Figura 3: Assuntos em Alta	12
Figura 4: Gráfico de três campos por Periódico, Autor e Palavra-Chave	13
Figura 5: Mapa Fatorial	14
Figura 6: Mapa Temático de Palavras-chaves	16
Figura 7: Mapa Temático Evolutivo.....	17
Figura 8: Framework da Interseção entre EC e I4.0.....	28

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais Palavras-Chave	11
Tabela 2: Principais Focos e Práticas de EC	19
Tabela 3: Principais Tecnologias 4.0 no contexto de EC	23

1. Introdução

Assim como as outras revoluções industriais, a 4ª Revolução operou mudanças bruscas no funcionamento operacional. A visão do futuro que se pode vislumbrar a partir das novas tecnologias da I4.0 é caracterizada por um cenário onde sistemas inteligentes controlam os meios de produção (LASI et al., 2014). Ao mesmo tempo em que o cenário global se modifica em função dessas inovações, a preocupação ambiental emerge como um princípio norteador das decisões empresariais. Sob essa perspectiva, De Souza Jabbour (2023) revela que a sustentabilidade se tornou um critério competitivo de extrema relevância no mercado.

Dessa maneira, as empresas que levam em consideração questões ambientais em suas operações tendem a ser mais atraentes aos olhos de investidores e clientes. Uma evidência dessa preocupação é a aquisição de certificados de sustentabilidade por grandes empresas, como o ISO 14001, norma que estabelece os critérios de gestão ambiental em organizações (SARTOR et al., 2019) e o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (AMIRI; OTTELIN; SORVARI, 2019). Nesse contexto, o impacto de um produto em questões como poluição hídrica, degradação do solo, geração de resíduos e desmatamento é considerado desde o momento de sua concepção. Geissdoerfer et al. (2017) afirmam que é sob essa perspectiva que surge o conceito de EC - um modelo de negócio regenerativo que busca minimizar o desperdício de recursos.

Uma vez que o ciclo de vida dos produtos está cada vez mais condicionado ao uso de tecnologias avançadas, torna-se evidente a relação direta entre a I4.0 e o avanço dos processos de implementação da EC. Como apontam Bai et al. (2020), os princípios e objetivos da revolução não estão limitados à melhora da performance econômica e organizacional, mas têm papel fundamental na promoção de um desenvolvimento sustentável.

Torna-se claro, portanto, que a integração dos dois conceitos tem forte potencial de transformar os modelos de negócios e as práticas industriais rumo a uma produção mais consciente (ROSA et al., 2020). Tendo isso em vista, mostra-se necessário buscar compreender melhor como a I4.0 e a EC se complementam em prol de uma produção industrial mais eficiente, sustentável e alinhada com os desafios globais da preservação ambiental. No entanto, a literatura ainda apresenta lacunas importantes no que diz respeito à adoção dos dois elementos em conjunto (SAHU; AGRAWAL; KUMAR, 2021).

Com isso, esta pesquisa objetiva realizar uma revisão da literatura através de uma análise bibliométrica e uma de conteúdo de forma a ampliar o conhecimento disponível sobre o tema, respondendo às seguintes perguntas de pesquisa:

1. Quais as principais aplicações da I4.0 envolvendo EC?
2. Que práticas e metas da EC têm sido utilizadas no contexto da I4.0?
3. Como a literatura apresenta a combinação de ambos os temas (I4.0 e EC)?
4. Quais são as tendências para pesquisas futuras que combinem I4.0 e EC?

Na literatura, existem exemplos recentes de uso da I4.0 para práticas sustentáveis, como o emprego de IoT na cadeia de suprimentos (AL-KHATIB, 2023). Por outro lado, Beltrami et al. (2021) apontam que a implementação de sistemas tecnológicos avançados também apresenta desvantagens em termos ambientais. Com a introdução de novas tecnologias, a quantidade de resíduos eletrônicos aumenta, bem como a demanda energética. Ainda assim, práticas de controle são capazes de amenizar esses impactos, como ressaltam os autores.

Além das consequências ambientais, há ainda desvantagens relacionadas aos custos operacionais envolvidos no uso dessas tecnologias avançadas. Ao mesmo tempo em que tais aplicações se mostram benéficas financeiramente, por reduzirem a mão de obra e otimizar tarefas, apresentam alto custo de instalação, manutenção e exigem mão de obra qualificada (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

A avaliação do impacto dessas tecnologias emergentes envolve diversas variáveis (BELTRAMI et al., 2021; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018) e é ainda mais desafiadora quando diz respeito às vantagens e desvantagens do seu uso para o avanço da sustentabilidade (BAI et al., 2020). Nesse sentido, as análises propostas por esta pesquisa podem contribuir para ampliar os ganhos e melhorar a estratégia de adoção dessas ferramentas.

Assim, este estudo contribui para a identificação de tecnologias 4.0 que estejam operando para atingir metas de EC em diferentes setores da indústria, desde auxílio no suporte ao consumidor, otimização da cadeia de suprimentos, até facilitação de práticas sustentáveis de remanufatura ou reciclagem. Além disso, a pesquisa busca esclarecer como ambos os conceitos vêm sendo tratados pelos autores e identificar os setores que merecem mais atenção dentro desse espectro.

Outra contribuição esperada é apontar aos tomadores de decisão, no contexto empresarial, como a definição de metas e práticas de EC podem alavancar processos, quando

aplicadas de forma sinérgica com as oportunidades oferecidas pela I4.0. Por fim, procura-se identificar áreas de pesquisa promissoras para investigações futuras, no intuito de contribuir para o avanço do conhecimento e aprimoramento das práticas em ambos os campos abordados.

A estrutura do estudo será segmentada em sete partes. O capítulo 2 apresenta o referencial teórico, onde serão definidos os conceitos de I4.0, EC e de análise bibliométrica, que será utilizada ao longo da pesquisa. Em seguida, o capítulo 3 é referente a metodologia, onde serão especificados os métodos utilizados neste estudo em termos de análise bibliométrica e análise de conteúdo. O capítulo 4 abrange os resultados das análises quantitativas, já o capítulo 5 inclui as descobertas feitas pela análise qualitativa. O capítulo 6 traz uma discussão mais articulada a partir das análises realizadas. Na sequência, o capítulo 7 descreve uma agenda de pesquisa, com sugestões de possíveis investigações futuras. Por fim, a conclusão apresenta as considerações finais do estudo.

2. Referencial Teórico

2.1 Indústria 4.0

Entender a trajetória das Revoluções Industriais é fundamental para compreensão plena do impacto da I4.0. Cada revolução representa transformações profundas na forma como a sociedade produz, consome e se relaciona com os recursos naturais, conforme descreve Li Da Xu et al. (2018). A 1ª Revolução Industrial teve início em meados do século XVIII, impulsionada pela mecanização de sistemas de manufatura movidos a água e vapor. Já a 2ª, no fim do século XIX, introduziu energia elétrica nos processos produtivos, levando ao início da produção em massa. E após a 2ª Guerra Mundial, ocorre a 3ª Revolução, com advento de computadores e outras tecnologias digitais.

Assim como nestes outros grandes marcos, a 4ª Revolução Industrial, que ainda está em curso, já trouxe e ainda trará impactos profundos na forma como os produtos são desenvolvidos e distribuídos (ATIF, 2023). A Indústria 4.0 é marcada pelos Sistemas Ciber-físicos ou Sistemas Inteligentes, responsáveis pela interconexão entre o mundo virtual e físico (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

Além disso, Zhong et al. (2018) apontam que a incorporação de conceitos como IoT e Cloud Computing tem igual importância para implementação de processos de fabricação mais flexíveis, inteligentes e reconfiguráveis, visando ao aumento da conectividade ao longo das cadeias de suprimentos. A chave na “Era 4.0” é justamente a utilização de uma variedade de tecnologias interconectadas que proporcionam menores *lead-times* e, assim, melhorias tanto na performance organizacional quanto na qualidade dos produtos (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

Esse modelo atende, principalmente, à necessidade de transformar as máquinas convencionais em autoconscientes e autodidatas por meio da interação com o ambiente circundante. Segundo Vaidya et al. (2018), a I4.0 visa a construir uma plataforma inteligente e aberta para a aplicação de informações em rede industrial.

2.2 Economia Circular

A Economia Circular (EC) é um modelo econômico que busca o uso eficiente dos recursos ao minimizar resíduos, reter valor a longo prazo, reduzir o uso de recursos primários

e estabelecer circuitos fechados para produtos, componentes e materiais, com foco na proteção ambiental e em benefícios socioeconômicos (MORSELETTI, 2020). Esse sistema procura promover a redução, reutilização, reciclagem e recuperação alternativa de materiais nos processos de produção, distribuição e consumo (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

A Logística Reversa (LR) está diretamente ligada ao conceito de EC, já que representa uma economia com foco na redução do uso de recursos na fabricação, restauração do valor do produto e da usabilidade dos produtos acabados (BERNON; TIAHJONO; RIPANTI, 2018). Diferentemente da Logística Tradicional (LT), que vai da etapa da aquisição da matéria-prima até a distribuição dos produtos aos consumidores, a LR inclui a devolução dos produtos ao local de origem, onde podem ser revendidos, reutilizados, recuperados ou remanufaturados (KRSTIĆ et al., 2022).

Ao direcionar esses itens de volta para a cadeia de suprimentos, a LR minimiza o desperdício e a necessidade de novas matérias-primas (BIAZZI; SANTORO, 2002). Isso não apenas reduz o impacto ambiental, conserva recursos naturais e diminui a poluição, mas também cria oportunidades econômicas por gerar empregos em setores relacionados à recuperação e reciclagem (POKHAREL; MUTHA, 2009). Portanto, indústrias que incorporam esse modelo contribuem para um desenvolvimento mais sustentável e colocam em prática o princípio ressaltado por Geissdoerfer et al. (2017), de que economia e ambiente devem coexistir em equilíbrio.

Nesse sentido, a Logística Reversa é um importante pilar da EC, já que viabiliza o "fechamento do ciclo" dos produtos e materiais, ao evitar que se tornem resíduos (RASOOL et al., 2023).

Já a combinação dos fluxos de LR e LT representa o Closed-loop Supply Chain (CLSC), ou Cadeia de Fluxo Fechado, que tem como foco recolher os produtos pós-consumo e recuperar o seu valor agregado a partir da reutilização integral ou parcial dele (GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015). O objetivo é minimizar o desperdício e promover a reciclagem, constituindo-se como uma estratégia valiosa para redução do impacto ambiental e aumento da eficiência econômica (DELPLA; KENNÉ; HOF, 2022).

2.3 Análise Bibliométrica

O aumento constante no volume de publicações acadêmicas torna cada vez mais desafiador acompanhar o desenvolvimento de uma determinada área de pesquisa, como

apontam Aria e Cuccurullo (2017). Esse cenário expõe o papel fundamental das revisões de literatura para a síntese de descobertas de pesquisa e o avanço das investigações acadêmicas. As revisões bibliográficas servem a diferentes propósitos e cada tipo tem suas próprias diretrizes e métodos, que dependem dos objetivos da pesquisa e do tema em questão. Entre elas, a revisão narrativa oferece uma visão geral do assunto, enquanto a revisão sistemática busca uma análise objetiva e detalhada de estudos relevantes (JAHAN et al., 2016).

Já a análise bibliométrica utiliza ferramentas estatísticas e de análise de dados para quantificar e avaliar a produção acadêmica em uma determinada área. A bibliometria se apresenta como uma ferramenta capaz de avaliar a trajetória e os tópicos-chave de determinado tema e, assim, auxiliar na identificação de lacunas e oportunidades para a formulação de estratégias (DONTHU et al., 2021).

Trata-se de uma abordagem organizada e transparente, que proporciona insights imparciais e confiáveis, como pontuam Aria e Cuccurullo (2017). Os autores indicam que a eficácia do método é notável, pela capacidade de lidar com grandes volumes de informações, identificar tendências temporais, discernir temas de pesquisa, mapear fronteiras disciplinares, destacar pesquisadores e instituições, além de proporcionar uma compreensão ampla das paisagens de pesquisa.

As interpretações de uma análise bibliométrica podem ser objetivas, por meio de análises de desempenho, ou subjetivas, por análises temáticas. As análises de desempenho englobam dados como o total de publicações, total de citações ou a produtividade por ano de publicação. Por outro lado, as análises temáticas dizem respeito ao mapeamento científico e tem como foco identificar as relações entre publicações com base nas suas características (MUKHERJEE et al., 2022b).

Além dos métodos-chave, uma nova vertente, chamada Análise de Redes, utiliza técnicas de ciência de dados para desenvolver clusterização, análise fatorial e outras visualizações. Vale ressaltar que métricas de rede são comumente empregadas para aprofundar a análise de áreas de pesquisa em estudos bibliométricos (MAJUMDAR et al., 2023).

3. Metodologia

A análise bibliométrica e a análise de conteúdo serão utilizadas neste estudo para compreender a evolução e as tendências da interseção entre Indústria 4.0 e Economia Circular nas produções acadêmicas. Para isso, seguiu-se o fluxo descrito na imagem abaixo adaptada de (FACIN et al., 2022).

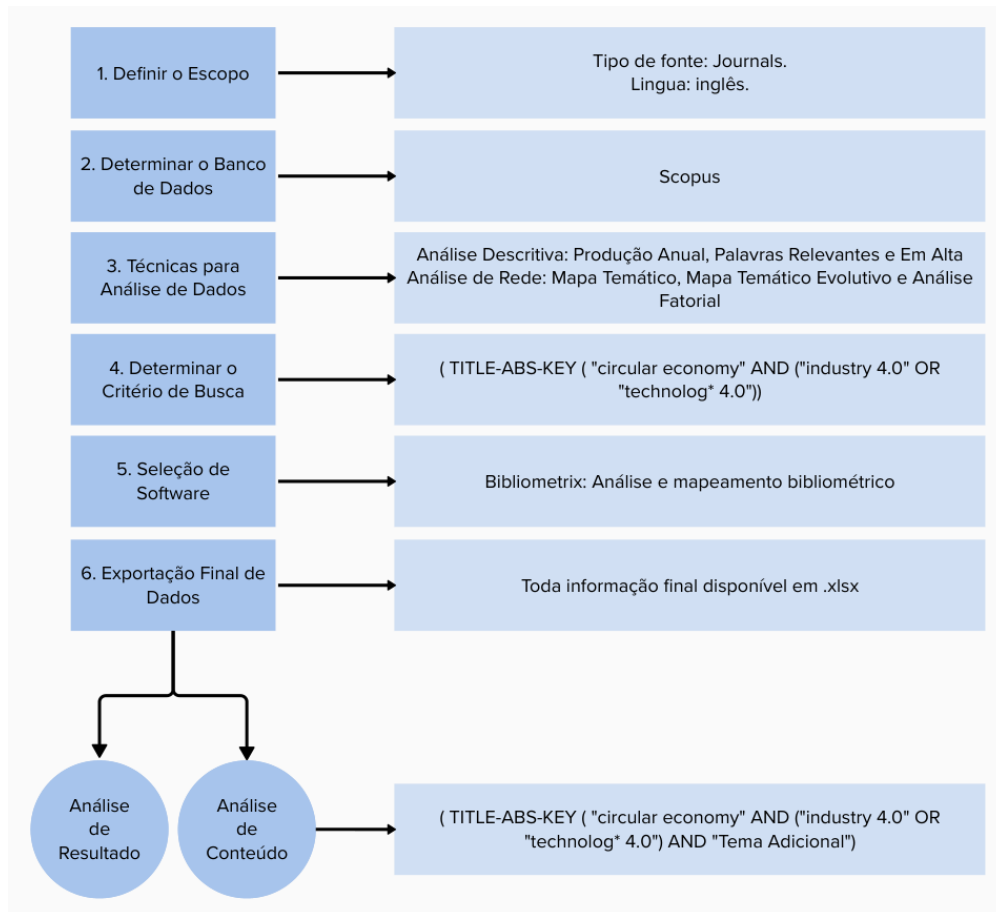


Figura 1: Metodologia de Pesquisa
Fonte: Adaptado de Facin et al. (2022)

A partir da metodologia definida por Donthu et al. (2021), o primeiro passo para a análise bibliométrica consiste em definir os objetivos e o escopo da revisão. Isso implica delimitar os tópicos de interesse, estabelecer critérios de inclusão e exclusão e garantir que o escopo seja amplo o suficiente para justificar a análise bibliométrica, mas também razoavelmente focado para atender aos objetivos de pesquisa. Nesse sentido, a coleta de dados foi limitada para artigos publicados em periódicos e publicações em inglês.

O segundo passo envolve a escolha das técnicas de análise bibliométrica. É necessário decidir entre técnicas quantitativas ou qualitativas, considerando qual delas melhor atende aos objetivos da revisão. Nesta pesquisa, foram escolhidas seis análises para esclarecer o comportamento da união dos dois tópicos ao longo do tempo: 1) análise sobre a produção científica ao longo dos anos; 2) análise das palavras relevantes e tópicos em alta; 3) análise de autores por temas; 4) análise fatorial; 5) análise temática; 6) análise temática evolutiva.

A análise da quantidade de produção científica, juntamente com a investigação das palavras relevantes e tópicos em alta, é essencial para compreender o panorama atual da pesquisa. Para a análise de autores por temas foi desenvolvido um Diagrama de Sankey, a partir dos periódicos, autores e palavras-chaves. Esta análise mostra a área de interesse dos principais autores da área de I4.0 e EC e, onde estão sendo publicados seus artigos.

A análise fatorial é uma técnica estatística utilizada para identificar padrões e relações subjacentes em conjuntos de dados complexos, reduzindo-os a menos variáveis latentes que capturam as informações essenciais (ULLAH; ASGHAR; GRIFFITHS, 2023). Já a Análise de Correspondência Múltipla (MCA), utilizada na análise fatorial, é uma técnica usualmente empregada para resumir grandes conjuntos de dados em um gráfico intuitivo, onde a proximidade das palavras-chave reflete a similaridade entre elas (B. P.; MAMDAPUR; SAHOO, 2021). Palavras próximas ao centro são as mais populares, enquanto as mais distantes estão ligadas a tópicos mais específicos ou diferentes (XIE; TIAN; TAO, 2022).

Já a análise temática baseada nas conexões entre palavras-chaves é utilizada para identificar os principais temas de pesquisa. Dessa maneira, as temáticas são caracterizadas por duas propriedades fundamentais: densidade e centralidade. A centralidade, representada no eixo horizontal, indica o grau de interligação entre diferentes temas. Quanto mais conexões um nó mantém com outros na rede temática, maior é sua centralidade e importância na rede. Enquanto isso, o critério de densidade, situado no eixo vertical, avalia a coesão entre os nós, que refletem a concentração dos temas em determinado campo de pesquisa e influenciam sua capacidade de desenvolvimento e sustentação. (AGBO et al., 2021). Essas duas propriedades permitem determinar se os temas são bem definidos e de relevância significativa.

Além disso, a análise temática evolutiva oferece uma visão da dinâmica das ideias e conceitos, revelando como eles se desenvolvem, se interconectam e ganham importância ao longo de períodos (XIE; TIAN; TAO, 2022). Esta abordagem não apenas nos ajuda a compreender o estado atual da pesquisa em um campo, mas também a traçar sua trajetória e prever futuras direções (SPIES; GASPAROTTO, 2023).

Após a definição das análises a serem feitas, os autores (DONTU et al., 2021) recomendam a coleta dos dados bibliométricos. A partir daí, precisam ser estabelecidos critérios claros de seleção dos estudos, para que se defina quais artigos serão incluídos ou excluídos da análise. Para a extração de dados, foi utilizada a plataforma Scopus. A pesquisa incorporou títulos, resumos e palavras-chave na plataforma, a partir da busca: "Industry 4.0" ou "Technology 4.0", e "Circular Economy", que são as categorias de interesse deste estudo bibliométrico. A busca foi feita no dia 26 de setembro de 2023 sem limitar a data inicial de publicação. Como resultado, obteve-se um total de 417 trabalhos.

Com a amostra definida, foi realizada a geração do arquivo de exportação com todos os metadados disponíveis na base de dados da Scopus para ser posteriormente importado. Em seguida, foi utilizado o pacote Bibliometrix do software R para executar as análises bibliométricas a serem apresentadas (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

Após a coleta de dados, segue-se à análise propriamente dita. Nessa etapa, os resultados devem ser reportados de maneira clara e objetiva, no sentido de contribuir para uma compreensão aprofundada da área de pesquisa sob investigação. Esta pesquisa inclui uma análise qualitativa, baseada nos resultados encontrados nas etapas anteriores. Tópicos que se destacaram na análise bibliométrica foram explorados mais a fundo, com intuito de responder às perguntas de pesquisa e revelar exemplos e aplicações que aparecem na literatura. Partindo da leitura dos artigos relevantes, foram construídas tabelas para sumarizar e analisar as informações, incluindo autores, temas, ano de publicação e objetivo da pesquisa.

Adicionalmente, foram destacadas as principais contribuições desta pesquisa e as principais oportunidades detectadas para futuros estudos acadêmicos. Tópicos mais relevantes identificados foram pesquisados com intuito de verificar se já haviam sido endereçadas por outros pesquisadores presentes na amostra de artigos e se sim, como. Esse processo sistemático possibilitou o mapeamento de questões pouco exploradas e o desenvolvimento de um *framework* a respeito da interseção entre I4.0 e a EC.

4. Resultados

4.1 Publicações por Ano e Tendência

A produção científica sobre Economia Circular e Indústria 4.0, de forma conjunta, apresenta uma taxa de crescimento anual significativa, conforme mostra a Figura 1.

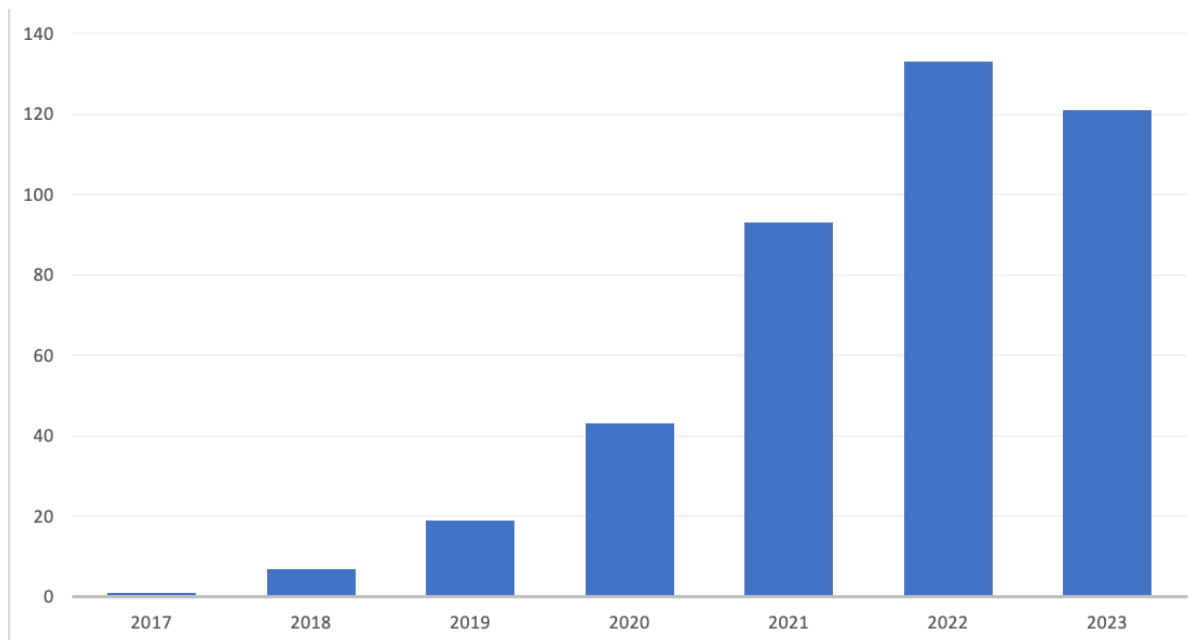


Figura 2: Produção Científica Anual

Os trabalhos acadêmicos desse tipo começaram a ser produzidos a partir de 2017 e cresceram de forma exponencial. Entre 2017 e 2018, foram publicados 8 artigos no total. Já em 2019, foram 19 publicações, mais do que o dobro dos dois anos anteriores. Em 2022, os artigos já haviam ultrapassado 150 publicações por ano - número significativamente maior do que dos anos anteriores.

Também cabe pontuar que a queda no gráfico em 2023 se dá pelo fato de que os dados foram extraídos da plataforma Scopus em setembro do ano corrente, restando ainda quatro meses para o fim do ano.

4.2 Relevância versus Tendência de Palavras-Chaves

As palavras-chaves mais utilizadas pelos autores ao longo do tempo foram reunidas na Tabela 1. Nota-se que a maior parte das palavras começa a aparecer com maior relevância a partir de 2020 e, em seguida, permanecem em estado de crescimento. A presença de Indústria 4.0 e Economia Circular já era de se esperar, por serem o foco da pesquisa.

Tabela 1: Principais Palavras-Chave

Ano	Sustainable Development	Industry 4.0	Circular Economy	Economic Aspect	Waste Management	Technology	Manufacturing	Supply Chain Management	Decision Making
2018	2	2	3	6	0	2	1	1	1
2019	12	11	9	13	12	4	4	4	3
2020	35	27	20	36	17	9	9	7	6
2021	100	57	47	68	35	19	25	18	15
2022	166	98	95	90	73	39	42	31	31
2023	223	146	141	112	103	67	50	49	46

A tabela 1 expõe a importância do Desenvolvimento Sustentável na era da I4.0 e da EC. Além disso, a presença do Aspecto Econômico e da Gestão de Resíduos sugere uma preocupação central com a eficiência econômica e o gerenciamento eficiente de resíduos. Ambos apresentam um crescimento rápido e significativo ao longo dos anos. Por isso, torna-se evidente que os dois assuntos desempenham um papel crucial na interseção entre EC e I4.0.

Ademais, a presença de Tomada de Decisão destaca a importância das escolhas estratégicas embasadas, tomadas pelos decisores dentro desse contexto. Tecnologia é a sexta palavra de maior relevância e tem relação intrínseca com o tema da Indústria 4.0. Por fim, Manufatura e Gestão da Cadeia de Suprimentos refletem o compromisso dos setores industriais em adotar abordagens avançadas e sustentáveis para a produção de fábricas individuais e para a gestão da cadeia como um todo.

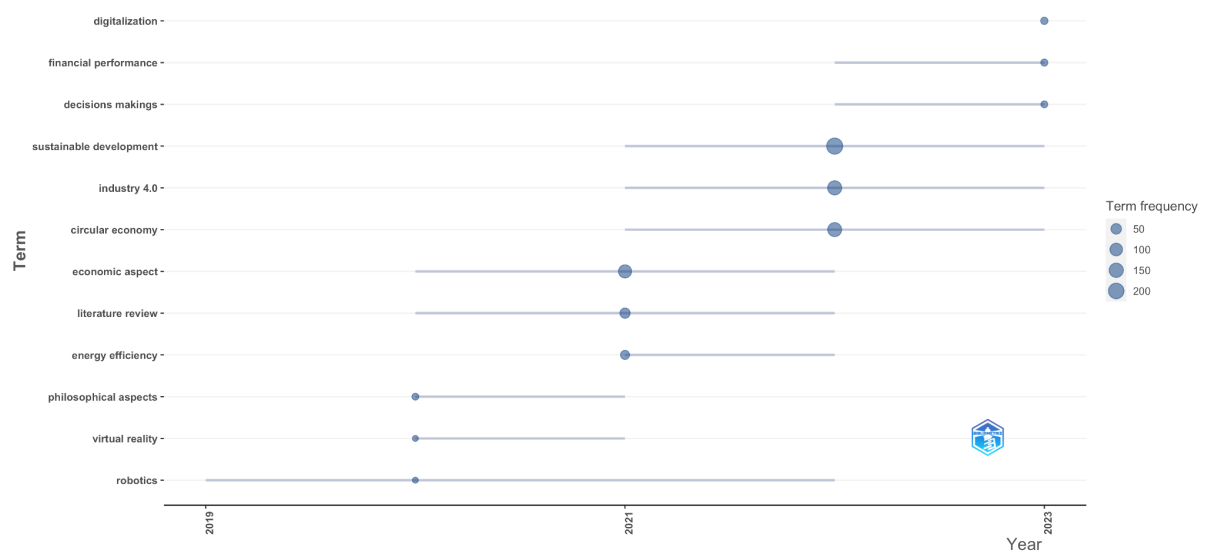


Figura 3: Assuntos em Alta

A Figura 3 revela os tópicos que estão em destaque e que são discutidos com frequência pelos artigos ao longo dos anos. Certas palavras-chave aparecem dentre as mais relevantes, porém não estão entre as maiores tendências. Isso indica que esses conceitos são fundamentais para a pesquisa estabelecida na área, mas não se encontram atualmente no centro das discussões emergentes. Essas palavras-chave não apenas indicam as tendências atuais, mas também fornecem insights sobre os temas emergentes na área de estudo.

Nessa perspectiva, observa-se uma ênfase contínua nos termos: Gestão de Resíduos, Cadeia de Suprimentos, Tecnologia e Manufatura, mas nada indica que eles tenham mudado drasticamente ou evoluído recentemente. Por outro lado, a inserção de Realidade Virtual, Robótica, e Eficiência Energética, exclusivamente na Figura 3, sugere um aumento significativo na relevância e nas discussões em torno desses campos nas pesquisas mais recentes.

4.3 Análise de Autores por Temas

A visualização de Sankey, apresentada pela Figura 4, revela as relações complexas entre periódicos, autores e os temas predominantes em diferentes publicações. É possível entender como os principais autores contribuem para diferentes tópicos, especialmente, os mais relevantes para o escopo específico deste estudo.

Nesta análise, observa-se que, com exceção do Sunil Luthra e do Chris Turner, todos autores se encaixam em um ou mais dos cinco agrupamentos, divididos justamente por Desenvolvimento Sustentável, Indústria 4.0, Economia Circular, Aspecto Econômico e Gestão de Resíduos, as palavras-chaves mais relevantes apresentadas anteriormente.

É possível observar também que Chiappetta Jabbour é o autor com maior quantidade de publicações. No entanto, seus artigos focam em I4.0 e Economia Industrial, não adentrando temas relacionados à sustentabilidade. Além dele, Anil Kumar possui as mesmas características.

Por fim, é importante ressaltar que nenhum desses autores realiza abordagens que relacionam, simultaneamente, EC e I4.0. Essa observação sugere que a combinação de ambos os conceitos não é um tópico amplamente estudado. Por isso, pode indicar que há uma lacuna na literatura acadêmica em relação à análise simultânea dessas duas temáticas.

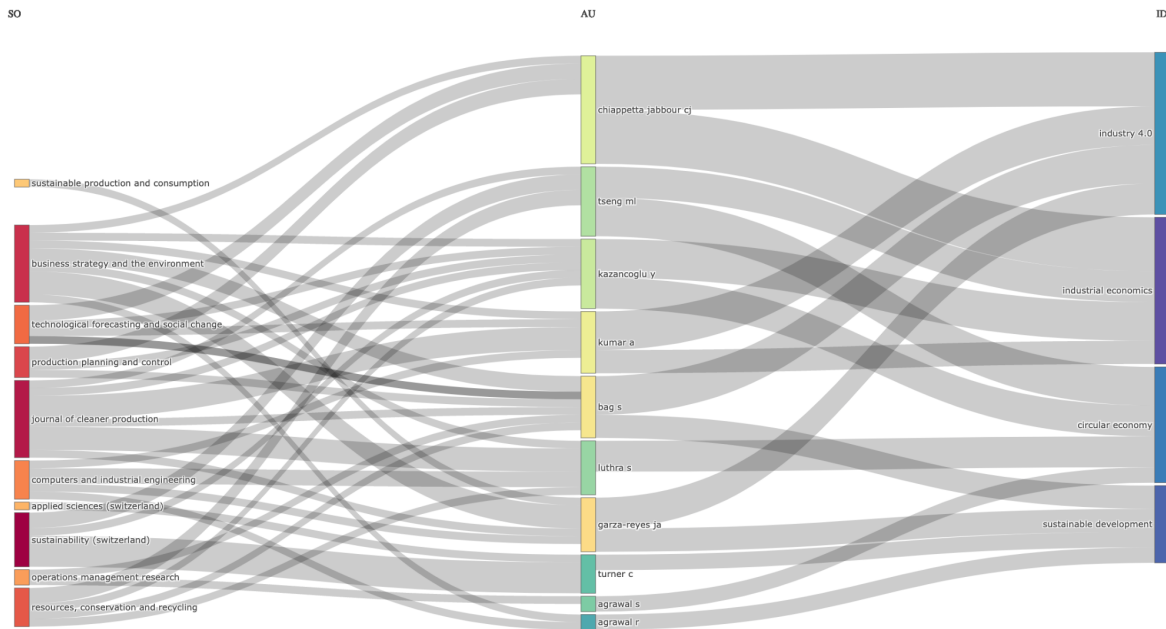


Figura 4: Gráfico de três campos por Periódico, Autor e Palavra-Chave

4.4 Análise Fatorial

Foram identificados cinco agrupamentos a partir da análise fatorial, Figura 5. O cluster em vermelho representa o grupo central, isto é, os conceitos mais discutidos na atualidade. Fazem parte deles as seguintes tecnologias: Digitalização; Impressoras 3D; Blockchain, Realidade Aumentada; Inteligência das Coisas; Robótica; Big Data; Realidade Virtual; Metadados; Sistema Ciber-físico; e Mineração de Dados. Além disso, diferentes setores também se encontram no centro do quadro: Saúde; Biorrefinaria; Têxtil; Químico; Indústria de Óleo; Cadeia de Suprimentos; Construção; Agricultura; Elétrico; Gestão Ambiental; Gestão de Informações; Reciclagem e Reuso; Resíduos; e Energia.

O segundo cluster (azul) está fortemente atrelado ao primeiro, localizando-se logo abaixo dele. Esse representa temas em alta e foca principalmente em conceitos da área de estudos, como Revisão Literária; Método de Avaliação; Trabalho de Pesquisa; Estudo Teórico; e Análise Multicritério. O terceiro cluster, em verde, revela a proximidade de indivíduos com Inteligência Artificial e Machine Learning. Já o quarto cluster, em roxo, une conceitos que são relacionados à sustentabilidade, mas que, por outro lado, se afastam do tema de EC. São eles Emissão de Gás, Recuperação de Recursos e Aquecimento Global. Por fim, o quinto cluster, em laranja, engloba temas mais distantes do eixo de EC e I4.0, como Recursos Naturais e Radiofrequência.

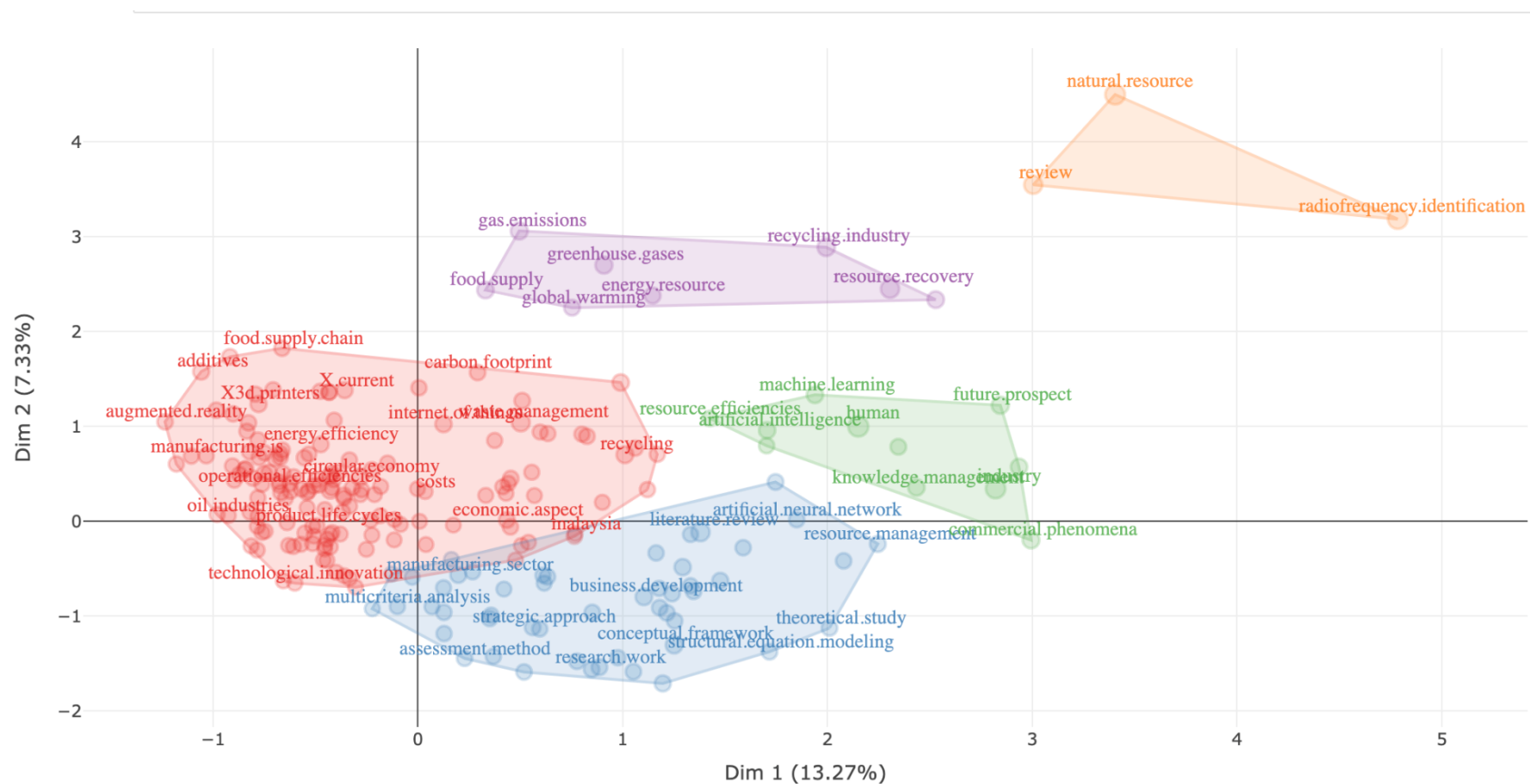


Figura 5: Mapa Fatorial

4.5 Análises Temáticas

A análise temática e a análise temática evolutiva são fundamentais para o estudo, pois possibilitam a identificação de padrões, tendências e transformações ao longo do tempo. Com isso, destacam as transformações e nuances que moldam a trajetória das discussões acadêmicas. Além disso, essas metodologias enriquecem a compreensão sobre o desenvolvimento do campo.

Na análise temática, Figura 6, o Q1 representa os temas nicho. Os agrupamentos sugerem que o campo elétrico e de produtos eletrônicos são áreas com potencial e que desenvolvem laços entre si. No entanto, ainda prescindem de maior conexão com EC e I4.0. Já o Q2 revela que temas relacionados a decisores e investimentos no âmbito financeiro, assim como arquitetura e construção, têm sido bem desenvolvidos e mantêm sua relevância para uma linha de pesquisa futura.

No Q3, encontram-se temas que ainda precisam de maior estudo e aprofundamento, onde se encontram as palavras-chave Impressão 3d e Desperdício de Energia. Por fim, no Q4, estão os campos de pesquisa básicos, com a presença dos temas I4.0 e EC - assuntos chaves da pesquisa. Além deles, três agrupamentos menores revelam temas importantes, porém que ainda possuem grande margem para desenvolvimento. Cada um deles é definido por três palavras-chave que os representam. Em primeiro lugar, Simulação, Biomassa e Recursos Naturais. Em segundo plano, aparecem Indústria de Construção, Otimização e Design. Por último, o agrupamento que contém Análise de Sensibilidade, Biorrefinaria e Matéria Prima.

Este estudo explora ainda, na Figura 7, a maneira como as palavras-chave se transformam ao longo do tempo nas publicações sobre EC e I4.0. Tal esforço se justifica por enriquecer a compreensão sobre o desenvolvimento do tema, possibilitar a identificação de tendências emergentes, ampliar o contexto das discussões, validar ou refinar pesquisas em andamento e prever futuros tópicos em tendência.

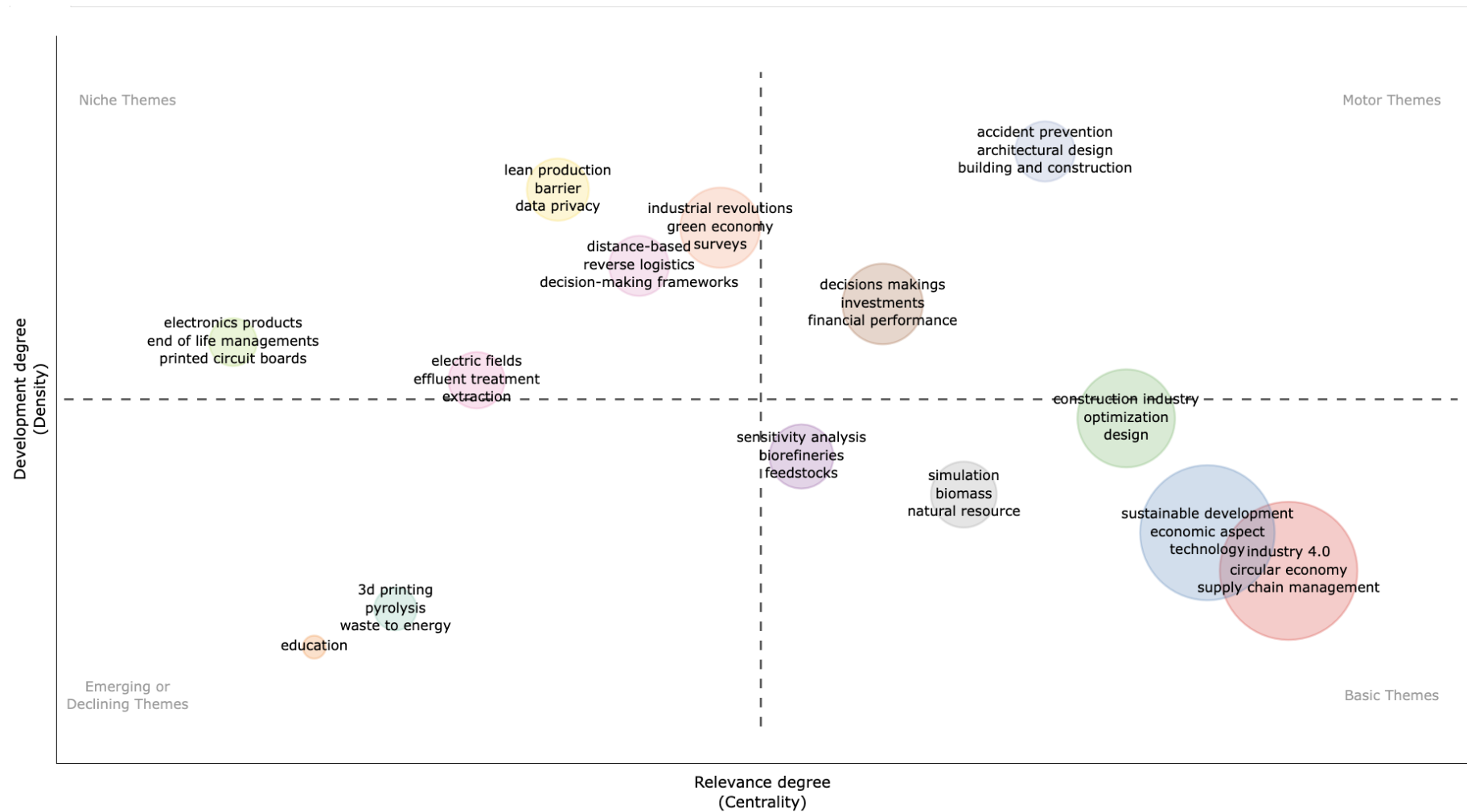


Figura 6: Mapa Temático de Palavras-chaves

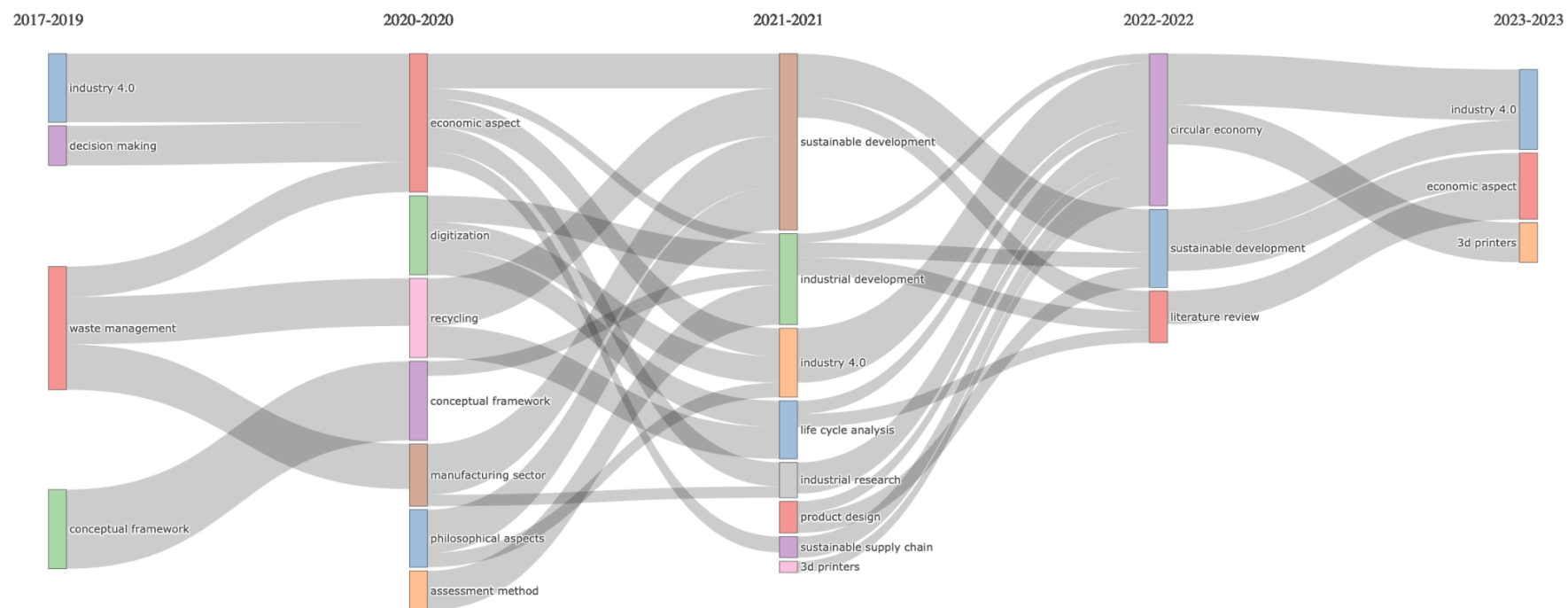


Figura 7: Mapa Temático Evolutivo

Na Figura 7, a largura das linhas representa a quantidade de palavras-chave em comum. Quanto mais robusta a linha, mais significativa é a relação entre os dois temas (XIE; TIAN; TAO, 2022). Observando o mapa, percebe-se que esta pesquisa ainda está em um estágio de desenvolvimento e não atingiu maturidade. Há uma diversidade de temas de pesquisa em diferentes períodos, e as relações entre eles são complexas, envolvendo diferenciação, integração, transferência e regeneração dos temas.

Nota-se que Gestão de Resíduos foi um tema especialmente relevante nos primeiros anos de publicações, entre 2017 e 2019. É possível perceber ainda que, após se dividir em três, o tema estabelece forte relação com Aspecto Econômico, o que revela a importância deste outro assunto no contexto da EC. Além disso, a relação entre I4.O e EC no período 2021-2022, e depois, novamente, em 2022-2023, demonstra a crescente conexão entre os dois temas nos últimos anos.

5. Análise de Conteúdo

5.1 Práticas da Economia Circular inseridas no contexto da Indústria 4.0

Segundo Rosa et al. (2020), existem duas abordagens para a implementação da EC com o uso das tecnologias da I4.0. Em primeiro lugar, pode-se definir focos de EC e selecionar as tecnologias da I4.0 que os apoiam. Por outro lado, os gestores podem identificar as tecnologias da I4.0 que facilitam a transição para a EC e, assim, monitorar seu impacto ao longo do tempo. Nessa perspectiva, este tópico irá abordar a primeira interpretação, por meio dos principais temas descobertos pela análise bibliométrica.

O objetivo central de práticas de EC é minimizar o desperdício e maximizar a eficiência no uso de recursos, transformando os padrões de produção, consumo e descarte (SEHNEM; PEREIRA, 2019). Assim, a transição para uma EC passa, entre outros processos, pela redução de resíduos, fechamento dos ciclos de produção, utilização mais eficiente dos recursos e otimização da retenção do valor econômico de materiais e produtos (MORSELETTI, 2020).

Nesse contexto, foi desenvolvida a Tabela 2, como uma síntese das principais práticas e focos da EC em convergência com as tecnologias da Indústria 4.0 identificadas no decorrer deste estudo.

Esse resumo é essencial para pesquisadores, empresas e formuladores de políticas interessados em compreender a interseção entre esses dois domínios e as oportunidades que surgem dessa convergência. Ele também pode orientar futuras pesquisas e estratégias de inovação, promovendo a adoção da EC impulsionada pela I4.0 para promover um desenvolvimento mais sustentável e eficiente.

Tabela 2: Principais Focos e Práticas de EC

Focos e Práticas de EC	Referências	Objetivo de Pesquisa
Desenvolvimento Sustentável	KHAN; AHMAD; MAJAVA, 2021	Mapear o campo do desenvolvimento sustentável.

Modelo de Negócio	GARCIA-MUIÑA et al., 2019	Definir o ponto de equilíbrio entre sustentabilidade e economia circular utilizando o ecodesign como ferramenta de teste.
Reciclagem	BLÖMEKE et al., 2020	Estudar como mitigar as consequências da manufatura através da reciclagem.
Tomada de Decisão	XIE; TIAN; TAO, 2022	Compreender o impacto da eficiência no desenvolvimento financeiro verde.
Gestão do Ciclo de Vida	PHAM et al., 2019	Explorar os fatores influentes da Indústria 4.0 que aceleram a economia compartilhada no contexto da Economia Circular.
Cadeia de Suprimentos Sustentável	PIYATHANAVONG et al., 2022	Estudar como a gestão de projetos, as tecnologias da Indústria 4.0 e a Economia Circular contribuem para o desenvolvimento de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis durante a pandemia.
Reuso	LASKURAIN-ITURBE et al., 2021	Investigar a influência das principais tecnologias da Indústria 4.0 nas principais áreas de atuação abrangidas pela economia circular.
Aspectos Financeiro	LIU et al., 2023	Desenvolver um modelo conceitual sobre os antecedentes e resultados de desempenho da CM e o papel moderador das tecnologias de produção da Indústria 4.0 nas relações entre CM e desempenho ambiental e financeiro.
Logística Reversa	RAJPUT; SINGH, 2022	Propor um modelo de programação linear inteira mista (MILP) da Indústria 4.0 para alcançar uma economia circular que inclui logística reversa.
Produção Limpa	GUPTA; KUMAR; WASAN, 2021	Avaliar o desempenho em sustentabilidade de empresas de manufatura.
Eficiência Energética	KHAYYAM et al., 2021	Apresentar uma abordagem para o design e análise de processos de um novo sistema de recuperação de calor residual para a fabricação de fibra de carbono.
Controle de Poluição	CHAUHAN; JAKHAR; CHAUHAN, 2021	Estudar a relação entre Indústria 4.0 e economia circular para o desenvolvimento de um sistema inteligente de descarte de resíduos de assistência médica

A seguir, serão descritos os benefícios da implementação conjunta das práticas de EC com a I4.0. A começar pelo Desenvolvimento Sustentável, o conceito contempla uma série de práticas que, em conjunto, resultam no desenvolvimento de um modelo de negócio sustentável (em inglês Sustainable Development Business Model - SBM). Por esse fato, é um dos mais relevantes da análise bibliográfica realizada.

Khan et al. (2021) afirmam que existe um foco no conceito de Triple Bottom Line. No entanto, outros SBMs também beneficiam questões sociais, ambientais e econômicas. Um exemplo disso é proposto por Garcia-Muinã et al. (2019), a partir da transição para modelos de negócios circulares, facilitada pela combinação de ecodesign com tecnologias 4.0, como o IoT.

Outra prática usual no contexto de EC e I4.0 é a reciclagem. Por meio de tecnologias de fabricação inteligente, essa prática passa a exercer um papel crucial, já que a integração da I4.0 nas operações de reciclagem e remanufatura melhora a eficiência e sustentabilidade desses processos (BLÖMEKE et al., 2020). Além da Reciclagem, o Reuso também é uma meta da EC a ser alcançada por meio da integração com essas tecnologias. Laskurain-Iturbe et al. (2021) apontam que o Reuso ajuda na promoção de práticas mais sustentáveis, como a redução do consumo de materiais, a recuperação de recursos e a diminuição de resíduos e emissões.

Nessa perspectiva, a Tomada de Decisão se torna cada vez mais relevante, no sentido de auxiliar na escolha do caminho a se seguir diante de tantas possibilidades. Ou seja, as empresas estão buscando especialização e aprimoramento no gerenciamento e na tomada de decisões em seus negócios. Um exemplo disso é o uso de técnicas de análise ponderada para auxiliar os tomadores de decisão na seleção eficaz de fornecedores sustentáveis, como proposto por Xie et al. (2022).

Já a Gestão do Ciclo de Vida do Produto é uma prática da EC em que, como mencionado por Tóth et al. (2017), a meta é criar produtos com vida útil mais longa, considerando as futuras demandas e minimizando o impacto ambiental. Como exemplo, um fabricante de scooters elétricas em Taiwan utilizou IoT e computação em nuvem da I4.0 para acelerar o uso da economia compartilhada alinhada à EC nesse ramo (PHAM et al., 2019). Nesse contexto, a preservação do ciclo de vida e o monitoramento preciso da bateria são essenciais para garantir a sustentabilidade dos veículos elétricos.

A análise de casos de empresas da indústria de metais na Tailândia (PIYATHANAVONG et al., 2022) revela que o gerenciamento de projetos apoia a adoção de tecnologias da I4.0 e da EC para o desenvolvimento de Cadeia de Suprimentos Sustentáveis. Essas tecnologias desempenham um papel fundamental, atingindo assim mais um foco de sustentabilidade da EC.

A performance financeira é um dos mais importantes focos da indústria, pois depende dela a vida de uma empresa. No artigo de Liu et al. (2023), este alvo é alcançado por meio de Manufatura Circular (MC), que se baseia na filosofia da EC e na incorporação de tecnologias de produção da I4.0. A pesquisa mostra que, fortalecendo a cultura de EC e os sistemas de gestão integrada, as empresas podem melhorar a implementação da MC e, consequentemente, alcançar melhor desempenho ambiental e financeiro. Isso implica que a abordagem de EC não apenas melhora a sustentabilidade ambiental, mas também tem um impacto positivo nas finanças das empresas.

Outro exemplo disso parte da integração da I4.0 com a EC e a Logística Reversa, que ajuda a otimizar as operações de negócios, promovendo o crescimento econômico e a sustentabilidade ambiental da empresa. O estudo proposto por Rajput et al. (2022) propõe a otimização de custos e a maximização da vida útil dos produtos, além da implantação de sensores IoT para capturar informações sobre a produção em tempo real, melhorando a transparência e a precisão. A Logística Reversa é mais uma prática de EC que, inserida na I4.0, pode propiciar inúmeros benefícios.

Além dela, o conceito de Produção Limpa também se destaca na literatura. Gupta et al. (2021) trazem um framework que combina os princípios da EC, Produção Limpa e padrões da I4.0 para avaliar o desempenho de sustentabilidade de empresas de manufatura.

Ademais, a Eficiência Energética e o uso responsável de recursos são critérios-chave para a sustentabilidade (KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021). No artigo de Khayyam et al. (2021), a implementação de um sistema de recuperação de calor residual é proposta para reduzir o consumo de energia, as emissões e os custos.

Por fim, a crescente preocupação ambiental e a necessidade de abordar questões relacionadas à poluição têm levado as empresas a adotar o Controle da Poluição como um foco fundamental. Isso se alinha perfeitamente com os princípios da EC, que preconiza a redução de resíduos e a recuperação de recursos como parte integrante de suas práticas. Em seu artigo, Chauhan et al. (2021) exemplifica isso ao propor um sistema inteligente de descarte de resíduos de saúde para recuperar valor a partir dos materiais descartados.

Nesse contexto, nota-se como a I4.0 desempenha um papel crucial na EC, pois fornece as ferramentas e tecnologias necessárias para monitorar, controlar e otimizar processos industriais com eficiência. A combinação desses dois conceitos permite que as empresas reduzam o impacto ambiental de suas operações, otimizem o uso de recursos e, ao mesmo tempo, alcancem suas metas de performance financeira e contribuam para um futuro mais responsável ambientalmente.

5.2 Tecnologia 4.0 como facilitador da Economia Circular

A literatura destaca que a I4.0 é geralmente considerada como um habilitador da EC, e não o contrário (ROSA et al., 2020). Esse cenário é demonstrado neste trabalho pelo alto número de palavras-chave relacionadas às tecnologias 4.0 detectadas pela análise bibliométrica. Nesta seção, serão exploradas as formas como a I4.0 pode influenciar positivamente a EC, levando ao desenvolvimento de novos modelos de negócios circulares e à otimização do gerenciamento do ciclo de vida de produtos.

A análise bibliométrica realizada indica uma tendência consistente na literatura, onde a ênfase recai sobre a capacidade da I4.0 de impulsionar práticas sustentáveis e circulares, reforçando a visão de que a mesma desempenha um papel fundamental como facilitadora da EC. A partir desse estudo, foram identificadas tecnologias-chave que caminham lado a lado com a EC e, foi desenvolvido um quadro de referência.

Esta síntese, apresentada na Tabela 3, é essencial para compreender como as tecnologias estão sendo aplicadas em contextos variados e como contribuem para a promoção da EC em diferentes domínios industriais desta nova era.

Tabela 3: Principais Tecnologias 4.0 no contexto de EC

Tecnologia	Referência	Setor	Objetivo de Pesquisa
Digitalização	GHOREISHI; HAPPONEN, 2022b)	Têxtil	Explorar a aplicação da digitalização na indústria têxtil, utilizando tecnologias da Indústria 4.0 para aprimorar a eficiência no design, prototipagem e reciclagem de materiais

	JÄRVENPÄÄ; KANTOLA; SALMINEN, 2021)	Resíduos	Explorar, por meio de três estudos de caso, a aplicação prática de estratégias para otimizar a produção e gestão de resíduos
Impressão 3d	(DE MATTOS NASCIMENTO et al., 2022)	Automobilístico /Resíduos	Investigar a implementação da impressão 3D no setor automotivo, visando estabelecer um modelo circular sustentável para a reciclagem de resíduos.
	(NASCIMENTO et al., 2022)	Manufatura	Explorar a implementação da impressão 3D no contexto da Indústria 4.0, visando impulsionar a Economia Circular no setor de manufatura.
Blockchain	RIZVI; AGRAWAL; MURTAZA, 2022	Automobilístico	Estudar o potencial da aplicação da tecnologia blockchain com referência especial à questão da 'sustentabilidade e circularidade' no setor automobilístico.
	MUKHERJEE et al., 2022a	Agricultura	Destacar os benefícios do blockchain na gestão da cadeia de suprimentos utilizando como base o setor agrícola.
Realidade Aumentada	ORTEGA-GRAS et al., 2023	Manufatura	Pesquisar e comparar software e hardware atuais de ferramentas de Realidade Estendida adequadas para Educação Técnica e Profissional no setor de manufatura.
	AKRAM et al., 2022	Manufatura/ Fashion	Estudar a implementação de Realidade Aumentada na indústria da moda.
IOT	GARRIDO- HIDALGO et al., 2019	Resíduos/ Elétrico	Propor uma solução para a Gestão da Cadeia de Suprimentos Reversa com base na cooperação entre diferentes padrões de comunicação da Internet das Coisas.
	FATIMAH et al., 2020	Resíduos	Propor um novo sistema de gerenciamento de resíduos utilizando tecnologias da Indústria 4.0.
Robótica	SARC et al., 2019	Resíduos	Estudar caminhos para tornar o tratamento de resíduos mais eficiente via robótica.
	HARTONO; RAMÍREZ; PHAM, 2022	Manufatura	Propor um modelo para planejar a sequência de passos que um robô precisa seguir para desmontar um produto.

Realidade Virtual	ROCCA et al., 2020	Resíduos/ Elétrico	Apresentar um caso de aplicação mostrando como as tecnologias baseadas na Indústria 4.0 podem apoiar práticas de EC com ferramentas de simulação.
	BOROWSKI, 2021	Energia / Alimentação	Analisar questões relacionadas aos processos de produção usando soluções baseadas na Realidade Virtual.

Primeiramente, o artigo de Ghoreishi e Happonen (GHOREISHI; HAPPONEN, 2022a) discute a aplicação da Digitalização na indústria têxtil, com foco na integração de dados em tempo real em todo o ciclo de vida dos produtos, contribuindo para práticas mais sustentáveis. O uso desse tipo de tecnologia afeta uma ampla gama de setores, desde a indústria alimentícia até a automobilística, evidenciando o alcance e a versatilidade das soluções digitais na promoção da EC.

Nessa perspectiva, Järvenpää et al. (2021) apresentam três estudos de caso do uso da Digitalização em diferentes áreas. No setor de resíduos orgânicos, essa tecnologia permite planejar a produção e transporte com base em previsões da indústria de alimentos. Para os resíduos de vidro, fornece informações em tempo real sobre os volumes dos fornecedores, o que otimiza a produção. E no setor de resíduos elétricos, possibilita a gestão da coleta variável, coletando de consumidores e empresas e oferecendo informações de volume com diferentes horizontes.

Além da Digitalização, Nascimento (2022; 2022) revela em dois artigos diferentes como o uso da Impressão 3D está sendo implementado com objetivo de promover a EC. Em primeiro lugar, ele propõe o uso dessa tecnologia para produzir componentes reciclados para a indústria automotiva. Em outro momento, ele combina a metodologia Value Stream Mapping (VSM) com tecnologias da I4.0 a fim de aplicar Impressão 3D no setor de manufatura.

Outro avanço significativo identificado repetidamente no decorrer das análises é o Blockchain. Em 2022, um estudo realizado na Índia por Syed Wasiul et al. (2022) sugere que o modelo proposto pode ajudar as empresas automobilísticas a desenvolver estratégias circulares eficientes no contexto da I4.0. Ainda a respeito da aplicação de Blockchain, Mukherjee et al. (2022) avaliam possíveis benefícios da ferramenta e destacam a adoção dela no setor agrícola, por meio de uma análise multicritério que utiliza a técnica do processo analítico hierárquico (AHP).

Mais uma tecnologia comum no contexto de EC é a Internet das Coisas (em inglês Internet of Things - IoT). Um exemplo da sua aplicação está no monitoramento de estoques de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (em inglês Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE). O sistema funciona baseado em nuvem, por meio de sensores embutidos, ou seja, pela cooperação entre diferentes padrões de comunicação da IoT (GARRIDO-HIDALGO et al., 2019).

Ademais, Fatimah et al. (2020) ressaltam a implementação de IoT para o gerenciamento de resíduos em toda Indonésia, com foco na criação de um sistema que permite a separação de resíduos municipais, identificação de características dos resíduos e a adoção de tecnologias de tratamento sustentável. A proposta visa a contribuir para várias metas de desenvolvimento sustentável, incluindo saúde, água limpa, crescimento econômico, consumo responsável e ação climática.

Em relação à Robótica, em ambas as referências, seu principal objetivo é a automação e otimização dos processos de remanufatura. Sarc et al. (2019) apresentam sistemas relacionados à coleta, logística, tratamento de resíduos, modelos de negócios e ferramentas de dados, enfatizando o potencial uso de tecnologias robóticas para a triagem de resíduos e análise de imagem digital para melhorar a eficiência no tratamento de resíduos. No âmbito de I4.0 e EC, a robótica desempenha um papel fundamental na desmontagem de produtos, visando à maximização de lucros, economia de energia e redução de impacto ambiental (HARTONO; RAMÍREZ; PHAM, 2022).

O conceito de Realidade Estendida (em inglês Extended Reality - XR) engloba Realidade Virtual (em inglês Virtual Reality - VR), Aumentada (em inglês Augmented Reality - AR) e Mista. Todas essas tecnologias se destacam no contexto de EC. Em seu artigo, Rocca et al. (ROCCA et al., 2020) demonstra como essas ferramentas apoiam as práticas de EC por meio de simulações virtuais que testam a configuração de uma planta de desmontagem de WEEE. Em outro cenário, no contexto dos setores de energia e alimentos, segundo Borowski (2021), a VR pode otimizar a produção, melhorar a eficiência operacional, economizar água e energia e reduzir a emissão de CO₂.

Já no caso da AR, um exemplo de aplicação se dá no setor de manufatura, mais precisamente na indústria da moda, onde a tecnologia é usada para personalização de roupas e fornecimento de sugestões de vestuário com base na cor da pele (AKRAM et al., 2022). Quando combinadas, VR e AR são capazes de apoiar a transformação digital e sustentável em organizações e empresas (ORTEGA-GRAS et al., 2023). Em resumo, essas duas tecnologias

têm o potencial de aprimorar experiências e simulações, facilitando a tomada de decisões informadas e permitindo aos usuários adquirir habilidades e conhecimentos de forma mais eficaz e segura.

6. Discussão

No decorrer desse estudo, foi explorada a dinâmica complexa entre a EC e a I4.0, reconhecendo o potencial transformador dessa interseção. Numa visão integrada, a I4.0 assume o papel de facilitadora essencial na transição para práticas mais circulares (KHAN; AHMAD; MAJAVA, 2021). A análise bibliométrica e de conteúdo desta pesquisa demonstrou que esse processo envolve três grupos elementares: os setores industriais, como o domínio da aplicação; as tecnologias 4.0, como ferramentas propulsoras; e ainda as práticas e focos da EC, que descrevem os princípios de sustentabilidade a serem alcançados.

Esse caminho pode ocorrer por fluxos distintos, a depender do ordenamento desses grupos, conforme mostra a Figura 8.

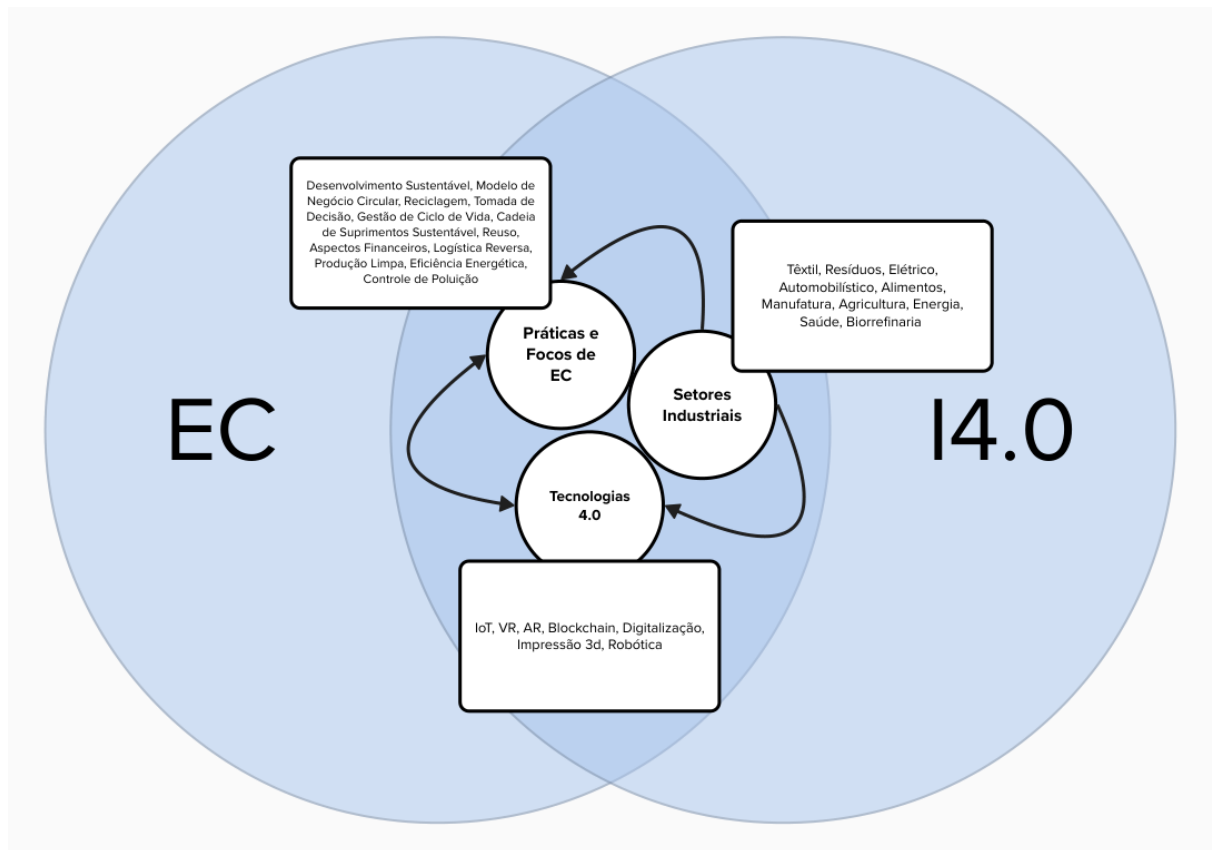


Figura 8: Framework da Interseção entre EC e I4.0

Fonte: Autoria Própria

Os setores industriais são sempre os pontos de partida da abordagem, ou seja, o contexto em que a dinâmica industrial se desenrola. A partir daí, apresentam-se duas possibilidades. A primeira retrata as tecnologias 4.0 como ferramentas e técnicas necessárias para implementar intervenções nesses setores. As práticas e focos de EC são, nesse caso, os benefícios resultantes

do processo. Sob outro ponto de vista, essas mesmas práticas de EC podem ser entendidas como as intervenções necessárias para a promoção da I4.0 com foco mais sustentável (resultado).

A compreensão de que a aplicação dessas abordagens pode variar conforme as características específicas de cada setor industrial é fundamental. Por exemplo, no setor automotivo, a ênfase pode ser no aumento da reciclabilidade de componentes (DE MATTOS NASCIMENTO et al., 2022), enquanto na indústria alimentícia, pode se concentrar na gestão eficiente de resíduos e na otimização da produção (BOROWSKI, 2021). O conhecimento sobre as nuances do setor facilita a criação de soluções adaptadas, alinhando-se melhor com os objetivos estratégicos e ambientais.

A partir disso, a abordagem centrada nas tecnologias 4.0 busca explorar como essas ferramentas podem facilitar a adoção de práticas circulares. A IoT opera por meio de dispositivos e sensores valiosos na rastreabilidade de produtos (FATIMAH et al., 2020) e no monitoramento eficaz de processos circulares (GARRIDO-HIDALGO et al., 2019). Paralelamente, o Blockchain assume um papel estratégico no gerenciamento de cadeia de suprimentos (MUKHERJEE et al., 2022a), contribuindo significativamente para a circularidade.

Já na outra perspectiva, o estabelecimento de focos e práticas de EC se destaca como parte fundamental da estratégia empresarial, funcionando como guia para seleção da tecnologia mais apropriada. Um exemplo disso é relatado no artigo de Khayyam et al. (2021), em que a partir do objetivo de eficiência energética, é proposta uma abordagem integrada com I4.0.

Com isso, a Figura 8 apresenta uma síntese robusta e abre oportunidades para descobertas transversais, contribuindo para o desenvolvimento do conhecimento. Ao examinar como diferentes setores adotam tecnologias avançadas e incorporam práticas da EC, é possível identificar padrões, sinergias e desafios comuns que transcendem limites setoriais.

Por outro lado, ao observar como uma tecnologia é utilizada para uma estratégia circular específica, podem ser identificados princípios e estratégias que têm aplicabilidade em contextos industriais variados. Essa abordagem multidimensional permite a extração de lições valiosas e a aplicação de conhecimentos de forma mais ampla.

Além disso, o *framework* serve como referência para elaboração de diretrizes mais eficientes e sustentáveis, permitindo que as empresas personalizem suas escolhas entre setores, adotem tecnologias 4.0 e priorizem os princípios da EC de acordo com suas metas específicas. Por fim, a Figura 8 ressalta a importância de uma abordagem integrada, onde a colaboração e a sinergia entre os três grupos podem gerar benefícios significativos.

7. Agenda de Pesquisa

Nesta seção, serão abordadas as oportunidades de pesquisa identificadas a partir das análises realizadas. Em um cenário em constante evolução, é crucial entender como os dois campos em foco interagem e podem ser alavancados de maneira conjunta. Para isso, a análise bibliométrica teve um papel crucial na identificação de tendências emergentes e temas centrais na interseção entre EC e I4.0.

Nesse tópico, foi especialmente relevante a análise temática, detalhada na Figura 6. Um dos quadrantes aponta os principais temas emergentes, como a pirólise, processo de decomposição de materiais orgânicos. Nessa área, pesquisas futuras podem se concentrar na integração de tecnologias para melhora da eficiência desse processo, assim como da Gestão de Resíduos Energéticos, que aparece no mesmo agrupamento. Além disso, entre os temas emergentes, consta ainda a Impressão 3D. O uso dessa ferramenta para confecção de materiais sustentáveis se revela como uma abordagem altamente promissora.

A análise temática revela ainda que os temas de nicho, embora já estejam em estágio avançado de desenvolvimento, não apresentam total alinhamento com os princípios da EC e da I4.0. Essa discrepância representa uma lacuna relevante, que, se explorada, pode se tornar crucial para acelerar o processo de sinergia entre esses dois campos. Entre os campos mais isolados, está o elétrico. Nessa área, um potencial tema de pesquisa é a Gestão de Resíduos Eletrônicos, especialmente no que diz respeito à etapa de descarte e fim da vida útil dos produtos.

Ademais, na criação de modelos circulares, o foco na educação e conscientização, a formulação de políticas públicas e incentivos, e a investigação de estratégias para promover a sustentabilidade em todas as etapas da produção são áreas de estudo cruciais para o avanço da EC combinada com a I4.0. Essas pesquisas podem orientar a transição em direção a práticas mais sustentáveis e eficientes em diversos setores industriais.

Ademais, por meio da análise fatorial, sintetizada na Figura 5, foi possível mapear os temas mais próximos do contexto em pauta. Com isso, linhas de pesquisa promissoras podem se concentrar na investigação aprofundada das tecnologias destacadas no cluster central, como Digitalização, Impressoras 3D, Blockchain, Realidade Aumentada, e outras, explorando seu potencial impacto na sustentabilidade, eficiência econômica e economia circular. É uma sugestão que o enfoque seja à análise de estudos de caso e exemplos práticos de implementação

em vários setores, permitindo uma compreensão mais profunda de como essas tecnologias estão moldando o desenvolvimento sustentável.

Outra abordagem promissora reside na exploração dos setores-chave posicionados no centro da Figura 5, como Saúde, Biorrefinaria e Têxtil, sendo vantajoso investigar as especificidades de cada um deles na implementação da EC na era da 4ª Revolução Industrial. Essa pesquisa permitiria uma análise comparativa entre diferentes setores, destacando abordagens bem-sucedidas e desafios enfrentados, além de considerar o impacto de regulamentações e políticas na adoção de estratégias.

Através de uma abordagem interdisciplinar, essa linha de pesquisa poderia contribuir para o desenvolvimento de melhores práticas, influenciar políticas e orientar empresas e organizações na integração eficaz de tecnologias emergentes e estratégias sustentáveis em direção a um futuro mais sustentável e economicamente eficiente.

Além disso, tanto na análise temática evolutiva, quanto na das principais palavras, Gestão de Resíduos aparece como um tema significativo desde o início. Entretanto, sua ausência dentre as palavras em alta e nos anos seguintes do quadro evolutivo, evidencia uma inconsistência e, conseqüentemente, uma oportunidade de se aprofundar mais no tema. Essa pesquisa poderia se concentrar em identificar como essa prática se relaciona e influencia mutuamente EC e I4.0 ao longo do tempo, bem como explorar o impacto dessas relações em diferentes setores e regiões.

8. Conclusão

Ao analisar a interseção entre I4.0 e EC, é possível compreender de forma mais profunda as sinergias que direcionam a evolução desses dois domínios. A análise bibliométrica revelou três agrupamentos centrais: Tecnologias 4.0, Práticas de EC e Setores Industriais. Esses conjuntos foram posteriormente abordados na análise de conteúdo, fornecendo uma visão mais completa das dinâmicas envolvidas. Nessa perspectiva, a criação de tabelas de síntese propostas neste estudo, disponibilizam uma visão clara das oportunidades e aplicações emergentes dessas convergências.

Além disso, tornam-se evidentes duas abordagens distintas para a implementação da EC com suporte da I4.0: a definição de focos circulares específicos e a subsequente seleção de ferramentas que as sustentam e impulsionam, tendo como resultado uma indústria como foco mais sustentável; e a identificação direta de tecnologias que facilitam a transição para a EC. Em ambos os cenários, é fundamental iniciar com uma contextualização que se baseie na compreensão aprofundada do setor industrial, como apresentado no framework (Figura 8) desenvolvido.

Em conclusão, a I4.0 é um grande habilitador da EC, desempenhando um papel fundamental na promoção de práticas circulares no mundo moderno. Essa interseção estratégica não apenas ressalta a importância da inovação tecnológica, mas também sugere um caminho promissor para o desenvolvimento de modelos de negócios mais otimizados e com menor impacto ambiental. Além disso, à medida que as tecnologias 4.0 continuam a evoluir, espera-se que impulsionem ainda mais a transição em direção a uma economia mais circular, alinhada com os imperativos globais de sustentabilidade e eficiência econômica.

Observa-se ainda que a combinação de ambos os assuntos está em fase inicial, e possui um longo caminho pela frente, consequentemente, há certa inconsistência com resultados encontrados nas análises. No entanto, isso sugere novas oportunidades para avançar nos debates sobre I4.0 e EC. Com isso, o estudo oferece caminhos promissores para futuras investigações em cima dessas lacunas.

Em última análise, este estudo não apenas contribui para o entendimento da interseção entre EC e I4.0, mas também fornece orientações valiosas para pesquisadores, empresas e formuladores de políticas que buscam promover práticas mais sustentáveis e eficientes nesta era de avanços tecnológicos e transformações industriais.

Bibliografia

AKRAM, S. V. et al. Implementation of Digitalized Technologies for Fashion Industry 4.0: Opportunities and Challenges. **Scientific Programming**, v. 2022, p. e7523246, 17 ago. 2022.

AL-KHATIB, A. WAEL. The impact of dynamic capabilities on circular economy: the mediating effect of the industrial Internet of things. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 34, n. 6, p. 873–895, 1 jan. 2023.

AMIRI, A.; OTTELIN, J.; SORVARI, J. Are LEED-Certified Buildings Energy-Efficient in Practice? **Sustainability**, v. 11, n. 6, p. 1672, jan. 2019.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.

ATIF, S. Analysing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review. **Sustainable Development**, v. 31, n. 4, p. 2155–2175, 2023.

BAI, C. et al. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 229, p. 107776, 1 nov. 2020.

BELTRAMI, M. et al. Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127733, 20 ago. 2021.

BERNON, M.; TIAHJONO, B.; RIPANTI, E. F. Aligning retail reverse logistics practice with circular economy values: an exploratory framework. **Production Planning & Control**, v. 29, n. 6, p. 483–497, 26 abr. 2018.

BIAZZI, L. F. DE; SANTORO, M. Logística reversa: o que é realmente e como é gerenciada. 2002.

BLÖMEKE, S. et al. Recycling 4.0 – Mapping smart manufacturing solutions to

remanufacturing and recycling operations. **Procedia CIRP**, 27th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE2020) Advancing Life Cycle Engineering : from technological eco-efficiency to technology that supports a world that meets the development goals and the absolute sustainability. v. 90, p. 600–605, 1 jan. 2020.

BOROWSKI, P. F. Innovative Processes in Managing an Enterprise from the Energy and Food Sector in the Era of Industry 4.0. **Processes**, v. 9, n. 2, p. 381, fev. 2021.

CHAUHAN, A.; JAKHAR, S. K.; CHAUHAN, C. The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123854, 10 jan. 2021.

DE MATTOS NASCIMENTO, D. L. et al. A sustainable circular 3D printing model for recycling metal scrap in the automotive industry. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 33, n. 5, p. 876–892, 1 jan. 2022.

DELPLA, V.; KENNÉ, J.-P.; HOF, L. A. Circular manufacturing 4.0: towards internet of things embedded closed-loop supply chains. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 118, n. 9, p. 3241–3264, 1 fev. 2022.

DONTHU, N. et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 1 set. 2021.

FACIN, A. L. F. et al. TEMAS DE DESTAQUE NA PESQUISA EM TRANSFORMAÇÃO DIGITAL: EVIDÊNCIAS DE ESTUDO BIBLIOMÉTRICO E ANÁLISE DE CONTEÚDO. **Revista de Administração de Empresas**, v. 62, p. e2021, 22 ago. 2022.

FATIMAH, Y. A. et al. Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122263, 1 out. 2020.

GARCIA-MUIÑA, F. E. et al. Identifying the Equilibrium Point between Sustainability Goals and Circular Economy Practices in an Industry 4.0 Manufacturing Context Using Eco-Design.

Social Sciences, v. 8, n. 8, p. 241, ago. 2019.

GARRIDO-HIDALGO, C. et al. An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0. **Computers in Industry**, v. 112, p. 103127, 1 nov. 2019.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 1 fev. 2017.

GHOREISHI, M.; HAPPONEN, A. **The Case of Fabric and Textile Industry: The Emerging Role of Digitalization, Internet-of-Things and Industry 4.0 for Circularity**. (X.-S. Yang et al., Eds.) Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. **Anais...: Lecture Notes in Networks and Systems**. Singapore: Springer, 2022a.

GHOREISHI, M.; HAPPONEN, A. **The Case of Fabric and Textile Industry: The Emerging Role of Digitalization, Internet-of-Things and Industry 4.0 for Circularity**. (X.-S. Yang et al., Eds.) Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. **Anais...: Lecture Notes in Networks and Systems**. Singapore: Springer, 2022b.

GOVINDAN, K.; SOLEIMANI, H.; KANNAN, D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. **European Journal of Operational Research**, v. 240, n. 3, p. 603–626, 1 fev. 2015.

GUPTA, H.; KUMAR, A.; WASAN, P. Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126253, 1 maio 2021.

HARTONO, N.; RAMÍREZ, F. J.; PHAM, D. T. Optimisation of robotic disassembly plans using the Bees Algorithm. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 78, p. 102411, 1 dez. 2022.

JAHAN, N. et al. How to Conduct a Systematic Review: A Narrative Literature Review. **Cureus**, 4 nov. 2016.

JÄRVENPÄÄ, A.-M.; KANTOLA, J.; SALMINEN, V. **Information Sharing in Industrial Symbiosis**. (J. I. Kantola, S. Nazir, V. Salminen, Eds.) *Advances in Human Factors, Business Management and Leadership. Anais...: Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2021.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 408–425, 1 jul. 2018.

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126655, 15 maio 2021.

KHAYYAM, H. et al. Improving energy efficiency of carbon fiber manufacturing through waste heat recovery: A circular economy approach with machine learning. **Energy**, v. 225, p. 120113, 15 jun. 2021.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 1 dez. 2017.

KRSTIĆ, M. et al. Applicability of Industry 4.0 Technologies in the Reverse Logistics: A Circular Economy Approach Based on COMprehensive Distance Based RAnking (COBRA) Method. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5632, jan. 2022.

KUMAR, P.; SINGH, R. K.; KUMAR, V. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105215, 1 jan. 2021.

LASI, H. et al. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 1 ago. 2014.

LASKURAIN-ITURBE, I. et al. Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the

circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 128944, 25 out. 2021.

LIU, Y. et al. Antecedents of circular manufacturing and its effect on environmental and financial performance: A practice-based view. **International Journal of Production Economics**, v. 260, p. 108866, 1 jun. 2023.

LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B. et al. Does applying a circular business model lead to organizational resilience? Mediating effects of industry 4.0 and customers integration. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 194, p. 122672, 1 set. 2023.

MAJUMDAR, A. et al. Two years of COVID-19 pandemic: Understanding the role of knowledge-based supply chains towards resilience through bibliometric and network analyses. **Operations Management Research**, v. 16, n. 3, p. 1105–1121, 1 set. 2023.

MORSELETTI, P. Targets for a circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, p. 104553, 1 fev. 2020.

MUKHERJEE, A. A. et al. Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: justification framework. **Operations Management Research**, v. 15, n. 1, p. 46–61, 1 jun. 2022a.

MUKHERJEE, D. et al. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research. **Journal of Business Research**, v. 148, p. 101–115, 1 set. 2022b.

NASCIMENTO, D. L. DE M. et al. Circular value stream mapping 4.0: Proposed general model and application to a digital 3D printing recycling factory. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 600–612, 1 nov. 2022.

ORTEGA-GRAS, J.-J. et al. Designing a Technological Pathway to Empower Vocational Education and Training in the Circular Wood and Furniture Sector through Extended Reality. **Electronics**, v. 12, n. 10, p. 2328, jan. 2023.

PHAM, T. T. et al. Industry 4.0 to Accelerate the Circular Economy: A Case Study of Electric Scooter Sharing. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6661, jan. 2019.

PIYATHANAVONG, V. et al. Role of project management on Sustainable Supply Chain development through Industry 4.0 technologies and Circular Economy during the COVID-19 pandemic: A multiple case study of Thai metals industry. **Operations Management Research**, 28 jun. 2022.

POKHAREL, S.; MUTHA, A. Perspectives in reverse logistics: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 4, p. 175–182, 1 fev. 2009.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 25, n. 4–5, p. 837–877, 4 maio 2022.

RASOOL, F. et al. What is next? The effect of reverse logistics adoption on digitalization and inter-organizational collaboration. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 53, n. 5/6, p. 563–588, 1 jan. 2023.

RIZVI, S. W. H.; AGRAWAL, S.; MURTAZA, Q. Circularity issues and blockchain technology in the auto industry. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 3, p. 7132–7144, 14 set. 2022.

ROCCA, R. et al. Integrating Virtual Reality and Digital Twin in Circular Economy Practices: A Laboratory Application Case. **Sustainability**, v. 12, n. 6, p. 2286, jan. 2020.

ROSA, P. et al. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 6, p. 1662–1687, 18 mar. 2020.

SAHU, A.; AGRAWAL, S.; KUMAR, G. Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 35, n. 3, p. 885–917, 1 jan. 2021.

SARC, R. et al. Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management – A review. **Waste Management**, v. 95, p. 476–492, 15 jul. 2019.

SARTOR, M. et al. ISO 14001 standard: Literature review and theory-based research agenda. **Quality Management Journal**, v. 26, n. 1, p. 32–64, 2 jan. 2019.

SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v. 18, n. 1, p. 35–62, 1 jan. 2019.

TÓTH SZITA, K. THE APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN CIRCULAR ECONOMY. **Hungarian Agricultural Engineering**, n. 31, p. 5–9, 2017.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 – A Glimpse. **Procedia Manufacturing**, 2nd International Conference on Materials, Manufacturing and Design Engineering (iCMMD2017), 11-12 December 2017, MIT Aurangabad, Maharashtra, INDIA. v. 20, p. 233–238, 1 jan. 2018.

XIE, Z.; TIAN, G.; TAO, Y. A Multi-Criteria Decision-Making Framework for Sustainable Supplier Selection in the Circular Economy and Industry 4.0 Era. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16809, jan. 2022.

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, 18 abr. 2018.