



**Integração entre Indústria 4.0 e Economia Circular no
Desenvolvimento de Produtos Aeroespaciais:
uma análise bibliométrica**

Livia Grazielle Batista Pires

Universidade Federal Fluminense (liviapiresg@gmail.com)

Francisco Santos Sabbadini

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

Vanessa da Silva Garcia

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

Resumo

O setor aeroespacial, caracterizado pela alta complexidade tecnológica, enfrenta pressões crescentes para atender às demandas de sustentabilidade, como redução de emissões e uso eficiente de recursos. A integração entre Indústria 4.0 (I4.0) e Economia Circular (EC) surge como estratégia promissora para esses desafios, mas sua aplicação no Desenvolvimento de Produtos Aeroespaciais ainda é incipiente. Este estudo analisou a produção científica sobre a integração de I4.0 e EC no contexto do desenvolvimento de produtos, com ênfase no setor aeroespacial, por meio de abordagem bibliométrica. Os resultados indicaram que a combinação I4.0-EC está mais consolidada no contexto da Manufatura, e sua presença em Desenvolvimento de Produtos e Aeroespacial é embrionária, sem registros que integrem simultaneamente todos os temas. A literatura apresenta predominância teórica, com pouca evidência de soluções práticas, e as redes de coocorrência revelam abordagens mais generalistas ou voltadas à processos produtivos, enquanto práticas de *design* sustentável e implementação da circularidade parecem pouco



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

exploradas. Essa lacuna indica a necessidade de esforços interdisciplinares e pesquisa aplicada para ampliar a integração desses conceitos, especialmente em regiões subexploradas como América Latina, contribuindo para soluções mais consistentes e alinhadas às exigências tecnológicas e ambientais do setor.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Economia Circular; Desenvolvimento de Produtos; Aeroespacial; Bibliometria.

Abstract

The aerospace sector, characterized by high technological complexity, faces increasing pressure to meet sustainability demands, such as reducing emissions and ensuring efficient resource use. The integration of Industry 4.0 (I4.0) and Circular Economy (CE) emerges as a promising strategy to address these challenges, but its application in Aerospace Product Development remains incipient. This study analyzed the scientific literature on the integration of I4.0 and CE in the context of product development, with emphasis on the aerospace sector, through a bibliometric approach. Results indicate that the I4.0-CE combination is more consolidated in the Manufacturing context, while its presence in Product Development and Aerospace is embryonic, with no records integrating all themes simultaneously. The literature shows a theoretical predominance, with little evidence of practical solutions, and co-occurrence networks reveal more generalist approaches or those focused on production processes, while sustainable design practices and circularity implementation appear underexplored. This gap highlights the need for interdisciplinary efforts and applied research to expand the integration of these concepts, especially in underexplored regions such as Latin America, contributing to more consistent solutions aligned with the sector's technological and environmental requirements.

Keywords: Industry 4.0, Circular Economy, Product Development, Aerospace, Bibliometrics.



Resumen

El sector aeroespacial, caracterizado por su alta complejidad tecnológica, enfrenta presiones crecientes para cumplir con las demandas de sostenibilidad, como la reducción de emisiones y el uso eficiente de recursos. La integración entre Industria 4.0 (I4.0) y Economía Circular (EC) surge como una estrategia prometedora para estos desafíos, pero su aplicación en el Desarrollo de Productos Aeroespaciales sigue siendo incipiente. Este estudio analizó la producción científica sobre la integración de I4.0 y EC en el contexto del desarrollo de productos, con énfasis en el sector aeroespacial, mediante un enfoque bibliométrico. Los resultados indican que la combinación I4.0-EC está más consolidada en el contexto de la Manufactura, mientras que su presencia en Desarrollo de Productos y Aeroespacial es embrionaria, sin registros que integren simultáneamente todos los temas. La literatura presenta predominio teórico, con poca evidencia de soluciones prácticas, y las redes de coocurrencia revelan enfoques más generalistas o centrados en procesos productivos, mientras que las prácticas de diseño sostenible y la implementación de la circularidad parecen poco exploradas. Esta brecha indica la necesidad de esfuerzos interdisciplinarios e investigación aplicada para ampliar la integración de estos conceptos, especialmente en regiones poco exploradas como América Latina, contribuyendo a soluciones más consistentes y alineadas con las exigencias tecnológicas y ambientales del sector.

Palabras clave: Industria 4.0, Economía Circular, Desarrollo de Productos, Aeroespacial, Bibliometría.

1. INTRODUÇÃO

O setor aeroespacial desempenha papel estratégico na economia global, caracterizado por elevada complexidade tecnológica (Rauen; Furtado, 2013), ao mesmo tempo em que enfrenta pressões crescentes para atender às exigências de sustentabilidade, como a redução de emissões e a melhoria da eficiência no uso de recursos naturais e energéticos (Ernst & Young, 2023).

Nesse contexto, a integração entre Indústria 4.0 (I4.0) e Economia Circular (EC) surge como abordagem promissora para enfrentar esses desafios (Jabbour *et al.*, 2020). Embora estudos sobre essa convergência sejam amplamente documentados no âmbito da Manufatura (Galizia *et al.*, 2019), sua aplicação no Desenvolvimento de Produtos, conforme conceito de Rozenfeld (2006), ou seja, considerando todo o ciclo de vida do produto, e não apenas as etapas produtivas, aparenta ser pouco explorada.

Assim sendo, neste estudo foi realizada uma análise bibliométrica da produção científica sobre a integração entre I4.0 e EC no contexto do desenvolvimento de produtos, com ênfase no setor aeroespacial. O objetivo foi mapear a evolução nas produções científicas sobre os temas, tendências, identificar lacunas e avaliar oportunidades para pesquisas futuras, especialmente em um setor que precisa conciliar avanços tecnológicos com demandas crescentes por sustentabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O Setor Aeroespacial: Complexidade e Sustentabilidade

A indústria aeroespacial é reconhecida por sua elevada complexidade tecnológica e rigor técnico, envolvendo múltiplos atores e uma cadeia de suprimentos altamente integrada. Nesse contexto, qualquer alteração nos processos ou produtos requer análises preliminares para avaliar relevância e impactos, dada a interdependência entre sistemas e componentes (Guyon *et al.*, 2019).

Essa complexidade torna o setor particularmente desafiador frente às exigências de sustentabilidade. De acordo com os princípios da Economia Circular, é essencial projetar produtos com maior longevidade, incorporando práticas que considerem todo o ciclo de

vida, desde a concepção até a reciclagem ou descarte, inclusive com implementação viabilizada por tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 (Mamudu *et al.*, 2020).

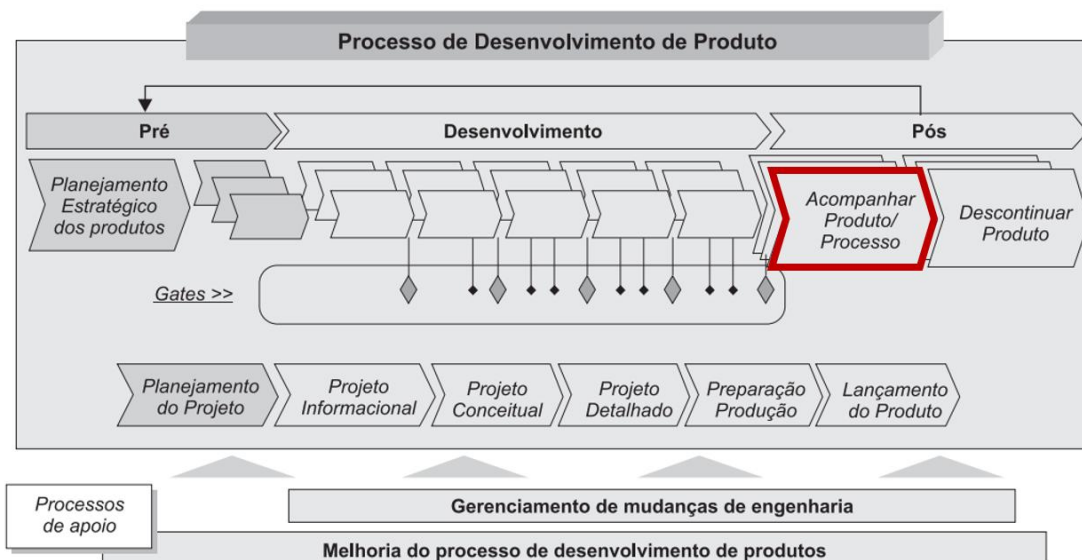
Além disso, como aponta Ernst & Young (2023), as demandas ambientais e sociais estão transformando o setor, exigindo maior alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a adoção de práticas que promovam a circularidade e a redução do impacto ambiental. Essa transição exige uma reconfiguração dos processos industriais e do modelo de negócios do setor, com ênfase na integração de novas tecnologias e abordagens regenerativas.

2.2. O Desenvolvimento de Produtos e a Manufatura

O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) compreende etapas que vão desde a concepção e definição do produto até a entrega das especificações detalhadas para produção (Rozenfeld *et al.*, 2006). Nessas fases, decisões críticas, como seleção de materiais, definição do *design* e estratégias de manufatura, influenciam diretamente etapas subsequentes, incluindo uso, manutenção e descarte (Back *et.al.*, 2008).

A manufatura, por sua vez, corresponde à fase operacional responsável por transformar especificações em produtos físicos. Enquanto o desenvolvimento é caracterizado por atividades exploratórias e criativas, com forte impacto de inovações tecnológicas, a manufatura apresenta processos estruturados e repetitivos, voltados à execução eficiente (Rozenfeld *et al.*, 2006). Essa distinção é ilustrada na Figura 1 e detalhada na Tabela 1, que compara aspectos como objetivos, grau de repetibilidade e duração das fases.

Figura 1 - Processo de Desenvolvimento de Produtos



Fonte: Adaptado de Rozenfeld (2006)

A Figura 1 ilustra as principais etapas do PDP, destacando a posição da fase de manufatura como parte do ciclo, mas não como elemento central. Essa representação reforça que a manufatura é apenas uma das fases do ciclo de vida, enquanto o desenvolvimento abrange decisões estratégicas que impactam todo o processo.

A Tabela 1 compara os dois processos, evidenciando diferenças fundamentais entre desenvolvimento e manufatura.

Tabela 1 - Desenvolvimento de Produtos e Manufatura

Aspecto	Desenvolvimento do Produto	Manufatura
Produto	Dados e informações (conjunto de informações para a produção industrial)	Físico (tangível e bem determinado)
Objetivos da gestão	Resolver problemas de maneira rápida e eficaz	Executar com eficiência tarefas bem estabelecidas
Unidade elementar para melhoria	Aumentar a competência dos indivíduos	Racionalizar o fluxo de materiais e recursos
Prazo de duração	Longo	Curto ou médio (a depender da complexidade do produto)

Grau de repetibilidade	Baixa	Alta
---------------------------	-------	------

Fonte: Adaptado de Rozenfeld (2006)

A análise da Tabela 1 permite verificar que o desenvolvimento é orientado pela inovação e pela resolução de problemas, enquanto a manufatura se concentra na execução eficiente e repetitiva. Essa distinção é essencial para compreender como práticas de Indústria 4.0 e Economia Circular podem ser aplicadas de forma diferenciada em cada fase, considerando seus objetivos e características (Jabbour *et al.*, 2020).

No setor aeroespacial, essa diferenciação é ainda mais evidente. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018), o ciclo de vida de produtos aeroespaciais envolve nove fases, desde concepção até desativação, incluindo manutenção e modernização. Além disso, Rozenfeld *et al.* (2006) destaca que, em produtos complexos, como aeronaves, o ciclo não se encerra com a descontinuação da manufatura, mas apenas quando cessam as atividades de suporte pós-venda.

Assim, a manufatura representa apenas uma parcela do ciclo de vida, especialmente em setores de alta complexidade, como o aeroespacial, reforçando a necessidade de considerar práticas sustentáveis e digitais desde as fases iniciais do desenvolvimento (Jabbour *et al.*, 2020; Rozenfeld *et al.*, 2006).

2.3. O Desenvolvimento de Produtos e a Manufatura no setor Aeroespacial

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018), o setor aeroespacial brasileiro é estruturado em nove fases: concepção, viabilidade, definição, desenvolvimento, produção, implantação, manutenção, modernização e desativação, sendo esta última fortemente relacionada às questões de sustentabilidade.

Rozenfeld *et al.* (2006) destacam que, em produtos complexos como aeronaves, o ciclo de vida não se encerra com a descontinuação da manufatura, pois esses produtos permanecem em uso por longos períodos após o fim das vendas. O encerramento do ciclo

ocorre apenas quando cessam as atividades de suporte pós-venda, como fornecimento de componentes e serviços de manutenção.

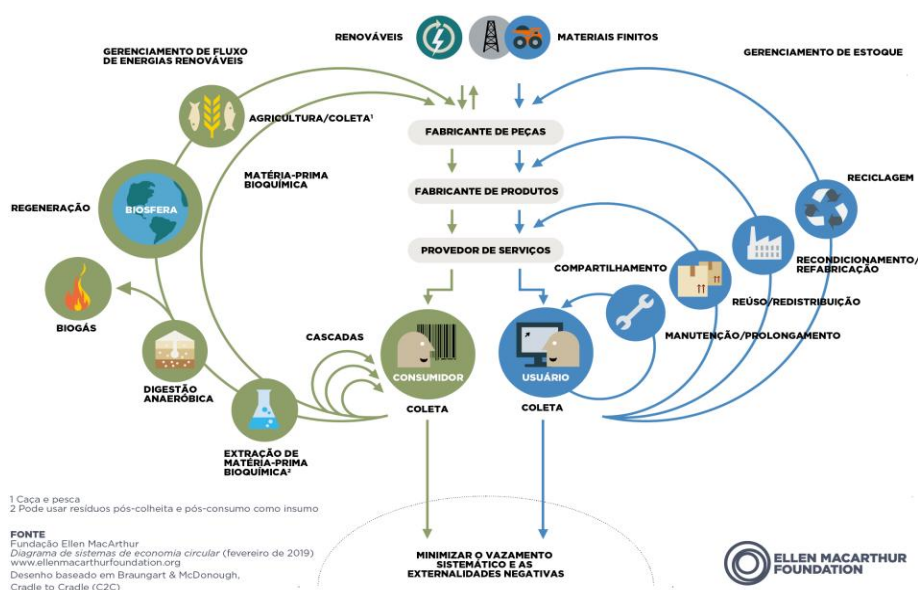
Dessa forma, os processos de manufatura representam apenas uma parcela do ciclo de vida, especialmente em setores de alta complexidade, como o aeroespacial, reforçando a necessidade de considerar práticas sustentáveis e digitais desde as fases iniciais do desenvolvimento (Rozenfeld et al., 2006).

2.4. Economia Circular e Indústria 4.0 no Desenvolvimento de Produtos

A literatura indica que a maior parte das aplicações de Indústria 4.0 no setor aeroespacial está concentrada na fase de manufatura, com destaque para tecnologias como Realidade Aumentada (RA), Manufatura Aditiva, Internet das Coisas Industrial (IoT), soluções de manufatura avançada para conectividade em tempo real e robôs autônomos (Galizia et al., 2019; Guyon et al., 2019).

Em relação à Economia Circular, a Figura 2 apresenta o diagrama sistêmico da Fundação Ellen MacArthur, que ilustra os fluxos de materiais em uma Economia Circular, abrangendo os ciclos técnico e biológico.

Figura 2 - Diagrama de Borboleta da Economia Circular



Fonte: Fundação Ellen MacArthur (2019)

Esse modelo mostra operações como fabricação de peças, produção e prestação de serviços, mas não explicita de forma clara o papel do desenvolvimento de produtos dentro do ciclo (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Essa predominância de práticas digitais e circulares na etapa de manufatura reforça uma lacuna: o desenvolvimento de produtos, que influencia todas as fases do ciclo de vida, permanece menos explorado na literatura (Jabbour *et al.*, 2020).

2.5. Relação EC e I.40 no Desenvolvimento de Produtos Aeroespaciais

A integração entre Economia Circular (EC) e Indústria 4.0 (I4.0) no Desenvolvimento de Produtos Aeroespaciais é considerada estratégica para superar barreiras tradicionais, como a falta de dados sobre o ciclo de vida e incertezas financeiras relacionadas à sustentabilidade (Jabbour *et al.*, 2020).

Segundo Garcia *et al.* (2022), as tecnologias da I4.0 aplicadas ao contexto da EC possibilitam:

- Planejar o ciclo de vida completo: gêmeos digitais e big data permitem prever impactos ambientais e econômicos;
- Incorporar circularidade desde o *design*: produtos mais reparáveis, desmontáveis e recicláveis são concebidos com base em análises preditivas;
- Rastrear impactos em tempo real: IoT possibilita monitorar o uso de recursos e a eficiência ambiental ao longo do ciclo.

Essa relação amplia a perspectiva sobre práticas sustentáveis e digitalização para além da manufatura, abrangendo as fases iniciais do ciclo de vida. Entretanto, a literatura indica que o Desenvolvimento de Produtos ainda recebe menor atenção em comparação à manufatura, onde predominam aplicações diretas como fabricação aditiva e robótica avançada (Galizia *et al.*, 2019; Guyon *et al.*, 2019).

Estudos bibliométricos reforçam essa concentração, apontando que pesquisas sobre EC e I4.0 são majoritariamente voltadas à produção, com menor foco nas etapas iniciais do ciclo industrial (Marques *et al.*, 2023). Esse cenário evidencia a necessidade de

investigações que explorem as contribuições da EC e da I4.0 no PDP, especialmente no setor aeroespacial, caracterizado por alta complexidade tecnológica e crescente demanda por sustentabilidade.

3. MÉTODO

Este estudo caracteriza-se como quantitativo e possui caráter descritivo, pois busca analisar padrões presentes na literatura científica (Gil, 2019), incluindo aspectos exploratórios ao interpretar os dados obtidos para sugerir novas direções de investigação. Como discutido por Aria e Cuccurullo (2017), o mapeamento científico é especialmente relevante para áreas emergentes, pois permite identificar lacunas e oportunidades de pesquisa.

A metodologia baseia-se em análise bibliométrica, reconhecida como eficaz para mapear tendências científicas, identificar lacunas na literatura e avaliar colaborações, bem como a relevância de autores e instituições em áreas específicas do conhecimento (Aria & Cuccurullo, 2017). As etapas seguidas e adaptadas para este estudo foram:

3.1. Planejamento do estudo:

O objetivo definido foi mapear a literatura científica sobre a integração de Economia Circular (EC) e Indústria 4.0 (I4.0) no contexto do Desenvolvimento de Produtos, com foco no setor Aeroespacial. As seguintes questões guiaram a pesquisa:

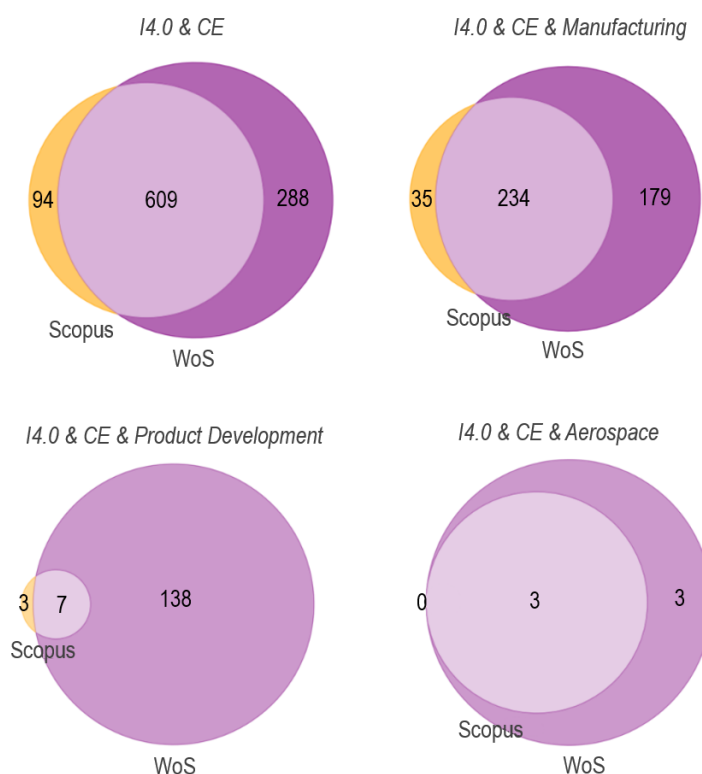
- a. Quais as principais tendências em publicações científicas nesse campo?
- b. Quais países e instituições lideram a produção científica do tema?
- c. Quais lacunas na literatura podem ser identificadas?

Essa abordagem é justificada pelo caráter emergente do tema, que demanda identificação de lacunas, tendências e redes de colaboração (Aria & Cuccurullo, 2017). Assim, foram feitas as seguintes definições iniciais:

- **Base científica:** coleta de dados foi realizada exclusivamente na base Web of Science (WoS). A escolha por utilizar apenas a WoS em vez de combinações com outras bases, como Scopus, por exemplo, se deve a decisão de prezar pela

qualidade total dos dados e consistência metodológica, visto que a unificação entre bases pode gerar ruídos. Conforme estudo comparativo publicado por Costa; Silva; Assunção (2023), a WoS apresenta indexação seletiva e rigorosa, garantindo maior confiabilidade dos registros, metadados padronizados. Além disso, foi feita análise que demonstra que a escolha da WoS ao invés da Scopus ocorre por conta de sua maior cobertura sobre os assuntos, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de Venn: Duplicatas das bases científicas WoS e Scopus



Fonte: WoS e Scopus. Elaborado pelos autores (2025)

- **Palavras-chave:** foram definidos os termos *Industry 4.0*, *Circular Economy*, *Product Development* e *Aerospace* para busca na base. As combinações de palavras-chave foram estruturadas com operadores booleanos “AND” para concatenar e aspas para isolar os termos conforme matriz apresentada na Tabela 2 (Souza *et al.*, 2020).

Tabela 2 – Matriz de operadores de busca

Operador	Descrição da Combinação
1	<i>“Industry 4.0” & “Circular Economy”</i>
2	<i>“Industry 4.0” & “Circular Economy” & “Manufacturing”</i>
3	<i>“Industry 4.0” & “Circular Economy” & “Product Development”</i>
4	<i>“Industry 4.0” & “Circular Economy” & “Aerospace”</i>
5	<i>“Industry 4.0” & “Circular Economy” & “Product Development” & “Aerospace”</i>

Fonte: Os autores (2025)

- **Idioma:** os termos foram pesquisados em inglês.
- **Período:** o intervalo de análise foi delimitado em 10 anos (2015 - 2025).
- **Tipos de documento:** artigos e revisões.

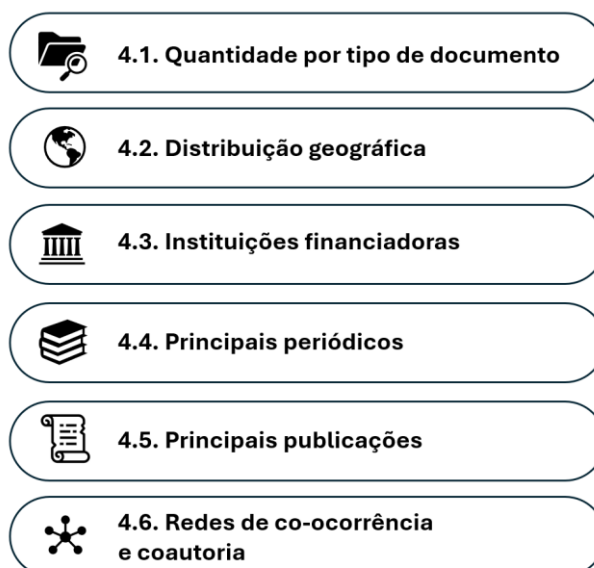
3.2. Tratamento e análise dos dados

Os registros foram exportados da WoS em formato “.csv” e “.txt”, compatível com análise através de Microsoft Excel e VOSviewer (versão 1.6.19). Duplicatas entre operadores foram removidas por UT (*Unique WOS ID*) e DOI, e alguns metadados inconsistentes (nomes de autores, afiliações) foram padronizados manualmente para garantir precisão.

Para fins de organização da análise, a seção de resultados será apresentada conforme a estrutura da Figura 4. Nesta seção, algumas informações representam:

- **Dados consolidados:** para evitar redundâncias, os dados de quantidade total foram tratados com remoção de duplicatas entre operadores;
- **Dados por operador:** dados expandidos, com duplicatas, pois trata-se dos números obtidos em cada uma das 5 operações de busca.

Figura 4 – Estrutura da seção de resultados



Fonte: Os autores (2025)

3.3. Limitações do estudo:

A pesquisa está limitada à literatura científica disponível na base Web of Science. Além disso, o foco em publicações entre 2015 e 2025 restringe a análise a abordagens recentes. A análise bibliométrica considera apenas documentos indexados como *Articles* e *Reviews*. Autores por publicação foram considerados até o 5º autor. País correspondente por publicação, refere-se ao país (*Adress*) do primeiro autor. Por fim, a interpretação dos clusters temáticos depende da qualidade dos metadados fornecidos pela base.

4. RESULTADOS

4.1. Número de publicações por tipo de documento

Após a remoção de duplicatas, obteve-se um conjunto consolidado de 933 publicações. Deste total, a maior parcela corresponde a:

- Artigos: 740 (79%)
- Revisões: 193 (21%)

Esse resultado indicou predominância de estudos empíricos aplicados, mas também uma presença significativa de trabalhos de revisão.

Considerando os dados expandidos por operador de busca (com duplicatas), a distribuição por tipo de documento é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de publicações por tipo de documento e operador de busca

Operador	Descrição da Combinação	Artcles	Reviews	Total
1	<i>I4.0 & CE</i>	706 (79%)	191 (21%)	897
2	<i>I4.0 & CE & Manufacturing</i>	323 (78%)	90 (22%)	413
3	<i>I4.0 & CE & Product Development</i>	110 (76%)	35 (24%)	145
4	<i>I4.0 & CE & Aerospace</i>	4 (67%)	2 (33%)	6
5	<i>I4.0 & CE & Product Development & Aerospace</i>	0	0	0

Fonte: A autora (2025)

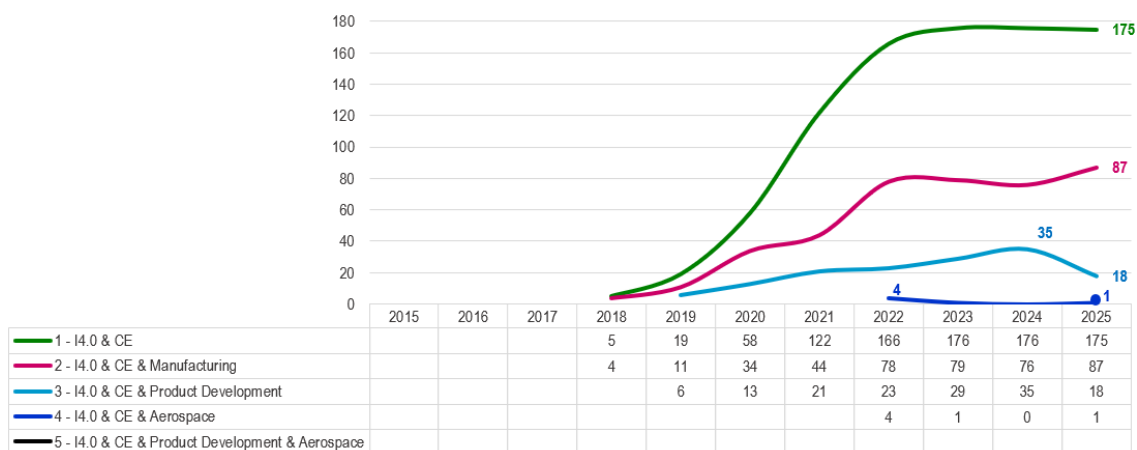
A comparação entre os dados consolidados e os específicos por operador revelou padrão semelhante na distribuição percentual, mas destaca um ponto crítico: o operador 4 (*I4.0 & CE & Aerospace*) apresenta quantidade extremamente menor (apenas 6 publicações) e demonstra maior proporção de revisões (33%) em vista dos demais. O ponto de maior atenção é da integração entre *I4.0 & EC & Product Development & Aerospace*, pois não foram encontrados registros de produções científicas na integração dos quatro temas.

Compreender mais detalhadamente essa baixa representatividade requer observar como as publicações evoluíram ao longo do tempo, abordado na subseção seguinte.

4.2. Distribuição temporal das publicações

No que se refere à evolução temporal, observou-se a contribuição anual de cada país. A Figura 5 apresenta a distribuição das publicações por operador, permitindo observar tendências.

Figura 5 – Distribuição geográfica temporal



Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Conforme ilustrado na Figura 5, verifica-se início a partir de 2018, com crescimento constante nos anos seguintes, com destaque para a combinação *I4.0 & CE*, que lidera em quantidade e projeta cerca de 175 publicações em 2025 até o presente momento. A combinação com Manufatura (*I4.0 & CE & Manufacturing*) também apresenta evolução contínua, alcançando aproximadamente 87 publicações no mesmo período. Em contrapartida, as demais combinações de *I4.0 & EC* mantêm participação reduzida, com picos inferiores a 40 publicações para combinação com *Product Development*, 4 publicações iniciando do ano de 2022 para combinação com *Aerospace* e zero ocorrências da combinação de *I4.0 & EC & Product Development & Aerospace*.

4.3. Distribuição geográfica-temporal das publicações

Considerando o panorama geral sem duplicatas, a produção científica está concentrada em países como Índia, que lidera com 156 publicações, seguida por China e Itália. O Brasil ocupa a quarta posição, evidenciando participação ativa na discussão sobre os temas. A Tabela 4 apresenta os dez países mais produtivos, enquanto a Figura 5 ilustra a concentração total em escala global.

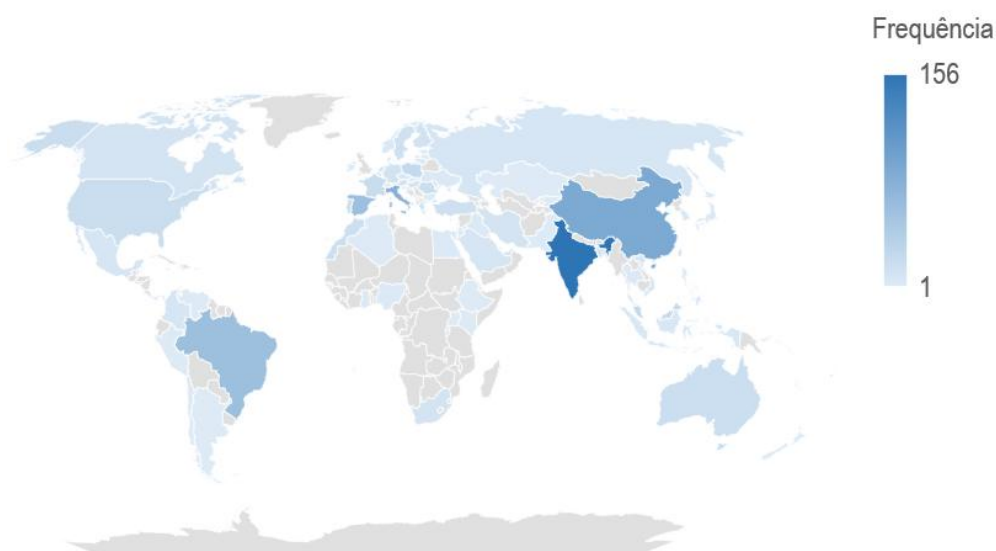
Tabela 4 – Distribuição geográfica (10 principais)

Posição	Países	Nº de publicações
1º	Índia	156
2º	China	87
3º	Itália	77
4º	Brasil	58
5º	Espanha	57
6º	Inglaterra	45
7º	Polônia	23
8º	Malásia	23
9º	Portugal	20
10º	França	19

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Conforme apresentado na Tabela 4, observa-se forte concentração da produção científica em países da Ásia. O Brasil ocupa a quarta posição, sendo o único do continente americano entre os 10 principais elencados. Isso evidencia participação ativa na temática, embora ainda distante dos demais países. A Figura 6 ilustra essa concentração em escala global, permitindo visualizar a distribuição espacial da quantidade total de publicações.

Figura 6 – Distribuição geográfica (mapa *mundi*)

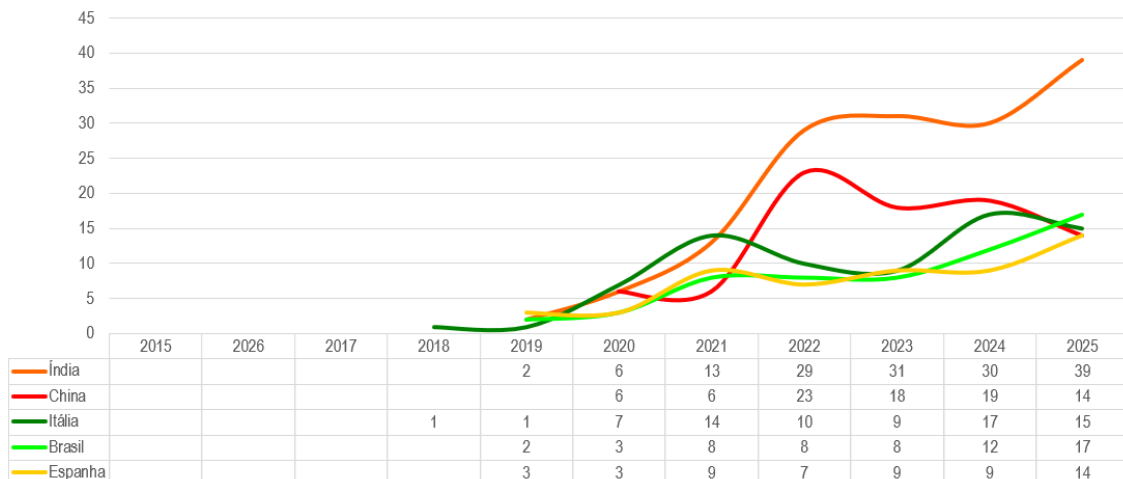


Fonte: Os autores (2025)

Na Figura 6, a predominância de países asiáticos e europeus reforça a correlação entre maturidade industrial e intensidade de pesquisa. Essa visualização complementa os dados da Tabela 4, evidenciando que a produção científica está concentrada em regiões com maior capacidade tecnológica, cadeias de suprimentos e políticas voltadas à sustentabilidade.

As Figuras 7 a 10 apresentam a evolução temporal por país e por operador. A Figura 6 ilustra as publicações relacionadas à integração entre *I4.0* & *CE*.

Figura 7 – Distribuição geográfica temporal: *I4.0* & *CE* (5 principais)

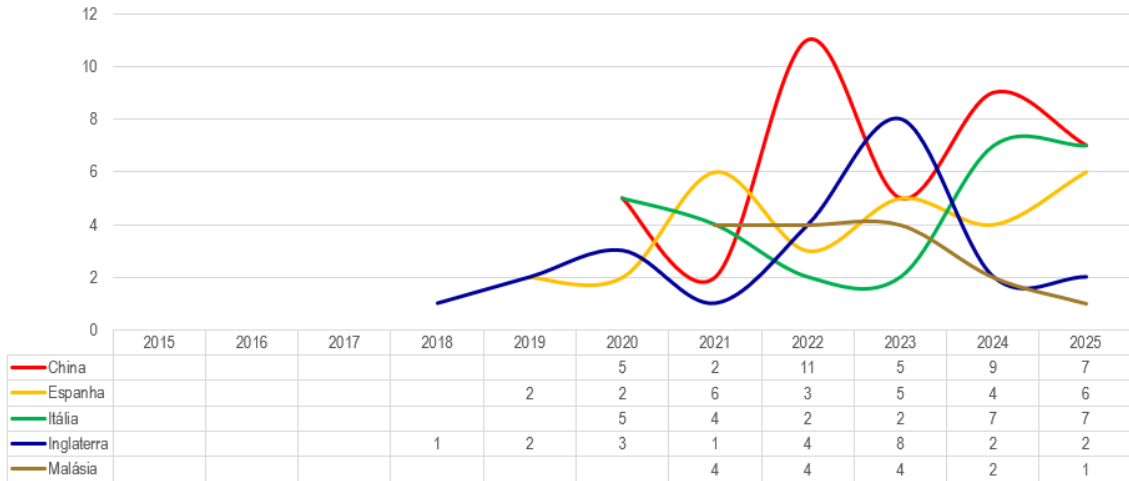


Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Conforme ilustrado na Figura 7, para os assuntos de *I4.0* & *CE*, observa-se um crescimento em quantidade de publicações anuais se iniciando em 2018 com a Itália, mas que é ultrapassada pela Índia e China a partir de 2022. Além disso, é possível observar na Figura 7 que a Índia segue em destaque em 2025 com quase 40 publicações indexadas, enquanto a China apresentou queda.

Em seguida, a Figura 8 apresenta a tendência para o segundo operador, que adiciona o contexto da Manufatura.

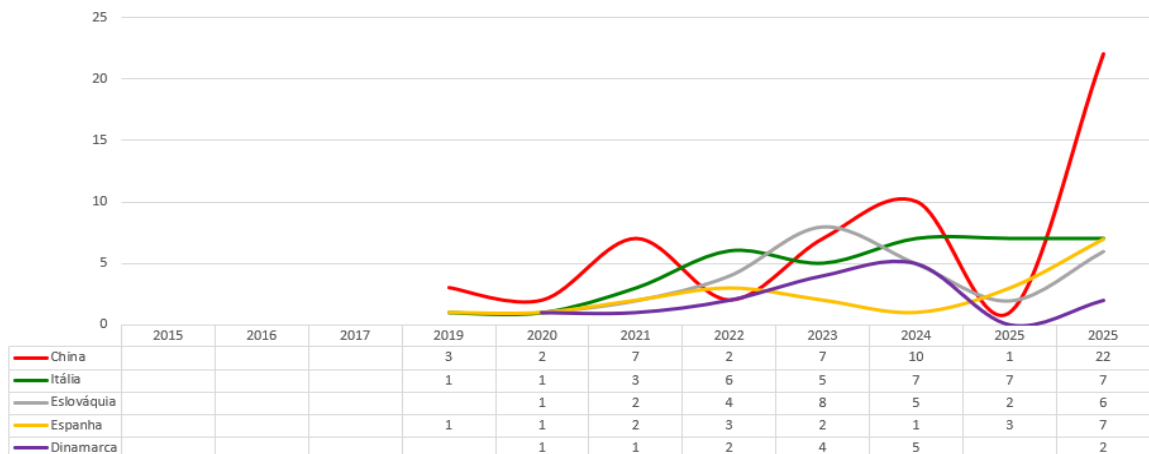
Figura 7 – Distribuição geográfica: *I4.0 & CE & Manufacturing* (5 principais)



Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Embora com quantidade inferior ao operador anterior (*I4.0 & CE*), a Figura 8 mostra que a China lidera a produção científica nesse contexto, atingindo aproximadamente 11 publicações em 2022, e atualmente em 2025 lidera com a Itália, seguidos da Espanha. Itália e Malásia mantêm participação mais discreta, com valores inferiores a 5 publicações por ano. Essa tendência confirma que países como China, Espanha e Itália lideram as publicações anuais tanto de pesquisas sobre *I4.0 & CE* quanto na integração de *I4.0 & CE* com *Manufacturing*. A Figura 9 evidencia um cenário distinto, relacionado ao Desenvolvimento do Produto.

Figura 9 – Distribuição geográfica: *I4.0 & CE & Product Development* (5 principais)

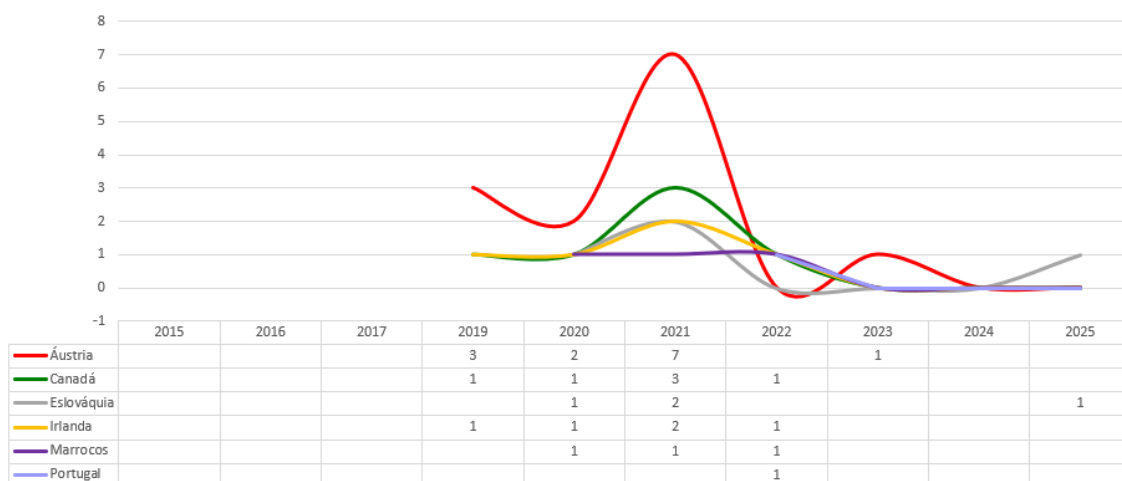


Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

A produção científica envolvendo *I4.0 & CE & Product Development* é ainda menor em comparação aos operadores anteriores, conforme mostra a Figura 9. Novamente, a China lidera, mas com picos pontuais, atingindo o máximo em 2025 com acima de 20 publicações, enquanto Itália, Espanha, Eslováquia e Dinamarca apresentam quantidade reduzida, geralmente inferiores a 5 publicações por ano. A tendência é irregular, sem crescimento consistente.

A Figura 10 apresenta a evolução temporal das publicações relacionadas à integração entre *I4.0 & CE & Aerospace* nos países identificados.

Figura 10 – Distribuição geográfica: *I4.0 & CE & Aerospace*



Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

A produção científica nesse contexto é ainda mais baixa em comparação aos demais operadores, com registros pontuais e sem tendência clara ao longo do período analisado, conforme ilustrado na Figura 10. Os seis países (Áustria, Canadá, Portugal, Eslováquia, Irlanda e Marrocos) representam todos os países da lista e apresentam valores inferiores a 8 publicações em qualquer ano.

4.4. Principais periódicos

Após analisar a distribuição geográfica e a evolução temporal das publicações, é igualmente relevante compreender onde esses estudos estão sendo divulgados. A identificação dos principais periódicos permite mapear as fontes dominantes e entender

quais veículos concentram a discussão sobre os temas. Assim, a Tabela 5 apresenta os dez periódicos mais produtivos, considerando tanto os dados consolidados quanto sua ocorrência nos diferentes operadores.

Tabela 5 – Principais periódicos

Ocorrência no ranking de 10 principais por operador	Posição	Periódicos	Publicações
1 - I4.0 & EC, 2 - I4.0 & EC & Manufacturing, 3 - I4.0 & EC & Product Development, 4 - I4.0 & EC & Aerospace	1º	<i>Sustainability</i>	115
	2º	<i>Journal of Cleaner Production</i>	71
1 - I4.0 & EC, 2 - I4.0 & EC & Manufacturing, 3 - I4.0 & EC & Product Development	3º	<i>Business Strategy and the Environment</i>	47
	4º	<i>Computers & Industrial Engineering</i>	24
	5º	<i>Sustainable Production and Consumption</i>	23
1 - I4.0 & EC, 2 - I4.0 & EC & Manufacturing	6º	<i>Technological Forecasting and Social Change</i>	21
2 - I4.0 & EC	7º	<i>Operations Management Research</i>	18
1 - I4.0 & EC, 3 - I4.0 & EC & Product Development, 4 - I4.0 & EC & Aerospace	8º	<i>Production Planning & Control</i>	15
1 - I4.0 & EC, 2 - I4.0 & EC & Manufacturing	9º	<i>Applied Sciences-Basel</i>	15
2 - I4.0 & EC	10º	<i>Resources Conservation and Recycling</i>	14

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Conforme apresentado na Tabela 5, destaca-se o periódico *Sustainability*, com 115 publicações, seguido pelo *Journal of Cleaner Production*, com 71 trabalhos únicos. Ambos aparecem em múltiplos operadores, evidenciando sua relevância tanto na integração pura de I4.0 & CE, quanto na integração I4.0 & CE & Manufacturing, assim como outros periódicos do topo da lista, como *Business Strategy and the Environment* e *Computers & Industrial Engineering*.

4.5. Principais instituições de fundings

Além dos principais periódicos, é relevante também compreender quais instituições e agências de fomento têm apoiado pesquisas sobre Indústria 4.0, Economia Circular e as demais integrações. Essa análise indica os atores que impulsionam a produção científica e revela padrões de investimento em diferentes operadores. Vale ressaltar que nem todos

os trabalhos informam dados de financiamento, portanto, os resultados refletem apenas os registros disponíveis.

As tabelas de 6 a 9 apresentam os principais financiadores por operador, permitindo visualizar também o país de origem das instituições.

Tabela 6 – Principais financiadores: *I4.0 & CE*

Posição	Instituição Financiadora	País da Instituição	Publicações
1	CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	Brasil	4
1	Beijing Key Laboratory of Urban Spatial Information Engineering	China	4
2	Khalifa University of Science and Technology	Emirados Árabes	3
2	European Union (EU)	União Europeia	3
2	Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK)	Turquia	3
2	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)	Canadá	3

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Um destaque relevante exibido pela Tabela 6 de principais financiadores da pesquisa em assuntos de *I4.0 & CE*, é o destaque para o CNPq (Brasil) na primeira posição junto com instituição da China. Inclusive, em seguida, temos organismos internacionais como a União Europeia.

A seguir, a Tabela 7 apresenta as instituições financiadoras mais relevantes para o operador *I4.0 & CE & Manufacturing*.

Tabela 6 – Principais financiadores: *I4.0 & CE & Manufacturing*

Posição	Instituição Financiadora	País da Instituição	Publicações
1	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)	Canadá	2
1	Ministry of Science and Technology, Taiwan	Taiwan	2
1	Maritime University of Szczecin	Polônia	2
1	Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES)	Brasil	2
1	European Union under the LIFE Program	União Europeia	2
1	European Union (EU); H2020 - Industrial Leadership	União Europeia	2

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Nota-se predominância de programas internacionais, como H2020 e LIFE Program (União Europeia), elencado na Tabela 7.

A Tabela 8 apresenta as instituições financiadoras mais relevantes para o operador *I4.0 & CE & Product Development*.

Tabela 8 – Principais financiadores: *I4.0 & CE & Product Development*

Posição	Instituição Financiadora	País da Instituição	Publicações
1º	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)	Canadá	3

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Conforme apresentado na Tabela 8, observa-se registro de uma única instituição, o NSERC (Canadá). A Tabela 9 apresenta as instituições financiadoras mais relevantes para o operador *I4.0 & CE & Aerospace*.

Tabela 9 – Principais financiadores: *I4.0 & CE & Aerospace*

Posição	Instituição Financiadora	País da Instituição	Publicações
1	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)	Brasil	1
2	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)	Canadá	1
3	University of Malaya	Malásia	1

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

Na Tabela 9 é mostrado que a produção científica no contexto Aeroespacial é baixa, mas embora pequena, um dos três registros de financiamento é da CAPES (Brasil). Com registros pontuais e pouca diversidade de financiadores, isto reforça a lacuna identificada anteriormente.

4.6. Principais publicações

Para complementar a análise, é interessante identificar as publicações mais citadas, pois elas representam os trabalhos de maior impacto na literatura. A Tabela 10 apresenta as principais publicações por operador, ordenados pela quantidade de citações. Adicionalmente, inclui-se uma coluna denominada “extração do contexto”, que destaca

termos específicos retirados diretamente do título da publicação, sem considerar termos já utilizados como operadores de busca.

Tabela 10 – Principais publicações por operador

Posição	Título artigo	Extração do contexto	Citações	Referência	Ano	DOI
1º	<i>Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability</i>	<i>Digitalization, Sustainability</i>	1335	(Ghobakhloo, 2020)	2020	10.1016/j.jclepro.2019.119869
2º	<i>Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations</i>	<i>Roadmap, Sustainable Operations</i>	841	(Jabbour <i>et al.</i> , 2018)	2018	10.1007/s10479-018-2772-8
3º	<i>A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements</i>	<i>IoT, Supply Chain</i>	711	(Manavalan; Jayakrishna, 2019)	2019	10.1016/j.cie.2018.11.030
4º	<i>Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context A business model proposal</i>	<i>Manufacturing</i>	682	(Nascimento <i>et al.</i> , 2019)	2019	10.1108/JMTM-03-2018-0071
5º	<i>Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities</i>	<i>Big Data, Artificial Intelligence, Manufacturing</i>	570	(Bag <i>et al.</i> , 2021)	2021	10.1016/j.techfore.2020.120420
1º	<i>Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0</i>	<i>Blockchain, Supply Chain</i>	569	(Esmacilian <i>et al.</i> , 2020)	2020	10.1016/j.resconrec.2020.105064
2º	<i>A survey of smart product-service systems: Key aspects, challenges and future perspectives</i>	<i>Product-Service Systems</i>	283	(Zheng <i>et al.</i> , 2019)	2019	10.1016/j.aei.2019.100973
3º	<i>A framework of digital technologies for the circular economy: Digital functions and mechanisms</i>	<i>Framework</i>	203	(Liu <i>et al.</i> , 2022)	2022	10.1002/bse.3015
4º	<i>Adoption of green finance and green innovation for achieving circularity: An exploratory review and future directions</i>	<i>Green Finance, Green Innovation</i>	189	(Agrawal <i>et al.</i> , 2024)	2024	10.1016/j.gsf.2023.101669
5º	<i>Digital technologies in product-service systems: a literature review and a research agenda</i>	<i>Product-Service Systems</i>	175	(Pirola <i>et al.</i> , 2020)	2020	10.1016/j.compind.2020.103301

1º	<i>Additive manufacturing and supply chains - a systematic review</i>	<i>Additive Manufacturing, Supply Chain</i>	106	(Kunovjanek; Knofius; Reiner, 2022)	2022	10.1080/09537287.2020.1857874
2º	<i>Additive Manufacturing in Off-Site Construction: Review and Future Directions</i>	<i>Additive Manufacturing</i>	48	(Pasco; Lei; Aranas, 2022)	2022	10.3390/buildings12010053
3º	<i>Possibilities for applying the circular economy in the aerospace industry: Practices, opportunities and challenges</i>	<i>Aerospace Industry</i>	34	(Dias <i>et al.</i> , 2022)	2022	10.1016/j.jairtraman.2022.102227
4º	<i>Efficient Use of Critical Raw Materials for Optimal Resource Management in EU Countries</i>	<i>Critical Raw Materials, Optimal Resource Management</i>	15	(Domaracka <i>et al.</i> , 2022)	2022	10.3390/su14116554
5º	<i>A Damage Detection Approach in the Era of Industry 4.0 Using the Relationship between Circular Economy, Data Mining, and Artificial Intelligence</i>	<i>Damage Detection, Data Mining, Artificial Intelligence</i>	7	(Gordan <i>et al.</i> , 2023)	2023	10.1155/2023/3067824

Fonte: WoS. Elaborado pelos autores (2025)

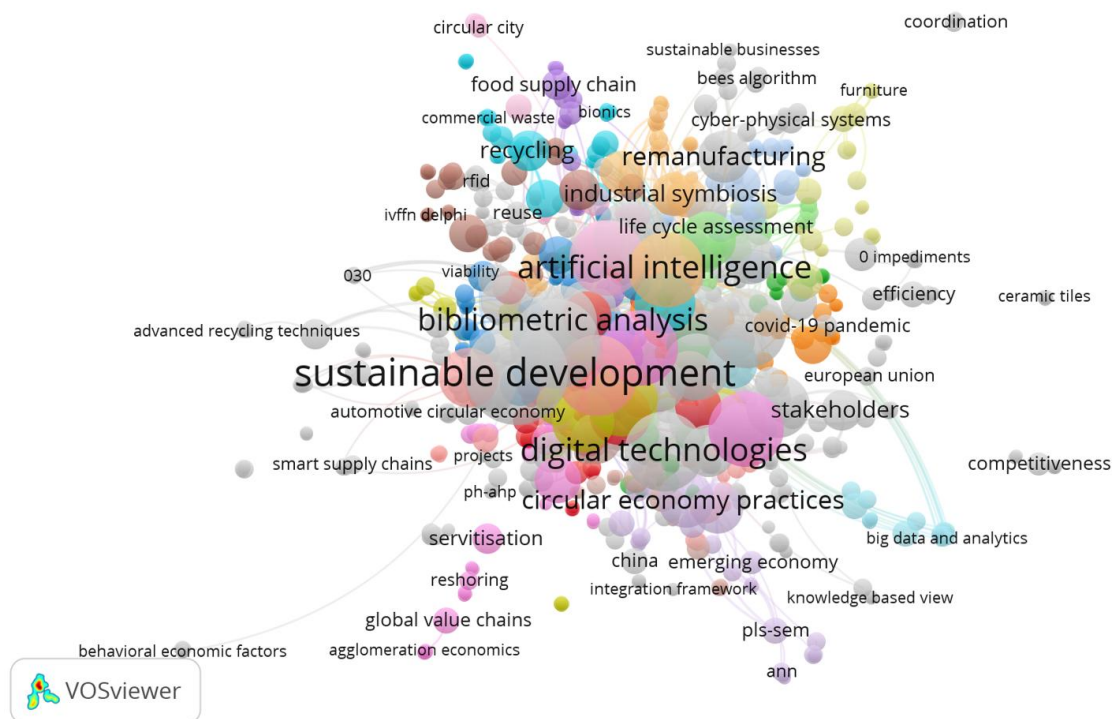
Os dados da Tabela 10 evidenciam que os trabalhos mais citados se concentram nos operadores *I4.0 & EC* e *I4.0 & EC & Manufacturing*, com destaque para “*Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability*”, que acumula mais de 1.300 citações. Essa predominância indica que as discussões iniciais de digitalização e sustentabilidade tiveram forte impacto na literatura. Além disso, a predominância de termos relacionados a Manufatura mostra que a literatura está fortemente orientada para processos produtivos.

4.7. Redes de *clusters*

4.7.1. Coocorrência de palavras-chave (*author keywords*)

Para compreender como os conceitos se relacionam entre si na literatura, as redes de co-ocorrência de palavras-chave oferecem visão dessas conexões, possibilitando identificar padrões, áreas de maior densidade ou lacunas. Essa abordagem também permite identificar *clusters* conceituais. A seguir, nas Figuras 11 a 14, são apresentadas as redes correspondentes aos quatro operadores analisados.

Figura 11 – Rede de coocorrência de palavras-chave: *I4.0 & CE*

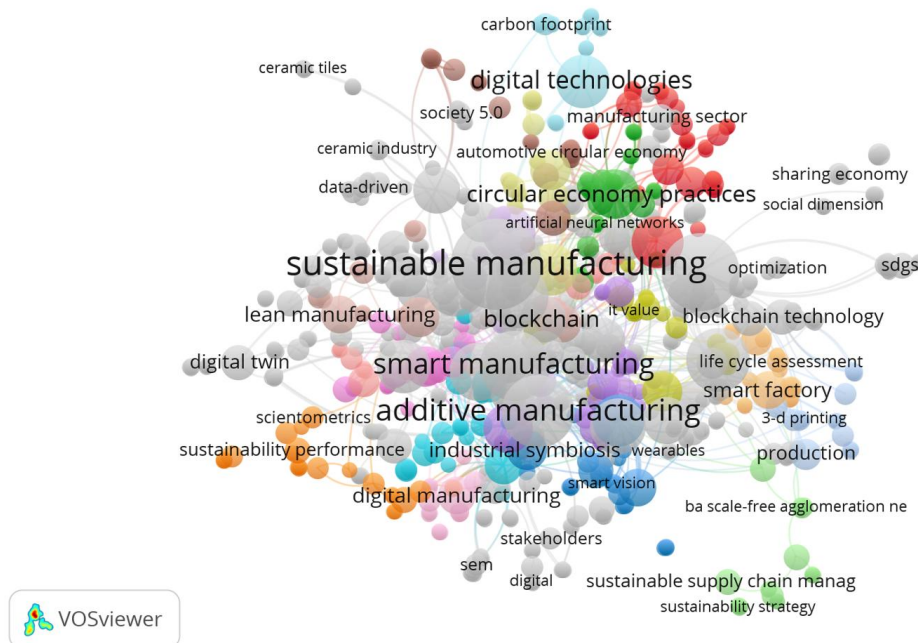


Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

Na rede 1, ilustrado na Figura 11, observa-se a maior complexidade entre os conjuntos, com alta densidade e múltiplos *clusters*. Termos centrais como *sustainable development*, *bibliometric analysis*, *artificial intelligence*, *industrial symbiosis* e *remanufacturing* indicam certa ligação com termos do contexto industrial produtivo, fragmentação temática e desafios para uma abordagem mais integrada.

Na figura 12, observamos o *cluster* relacionado à operação *I4.0 & CE & Manufacturing*.

Figura 12 – Rede de coocorrência de palavras-chave: *I4.0 & CE & Manufacturing*



Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

Na rede 2, ilustrada pela Figura 12, observou-se que a diversidade permaneceu alta, mas com menor densidade que a anterior. Termos como *sustainable manufacturing*, *lean manufacturing*, *blockchain*, *smart manufacturing*, *additive manufacturing* e *circular economy practices* aparecem com destaque, indicando foco em inovação digital e gestão sustentável. Apesar disso, as conexões mais fortes continuam associadas à manufatura, reforçando a predominância desse contexto na integração entre digitalização e circularidade.

O *cluster* relacionado à operação *I4.0 & CE & Product Development* pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Rede de coocorrência de palavras-chave: *I4.0 & CE & Product Development*

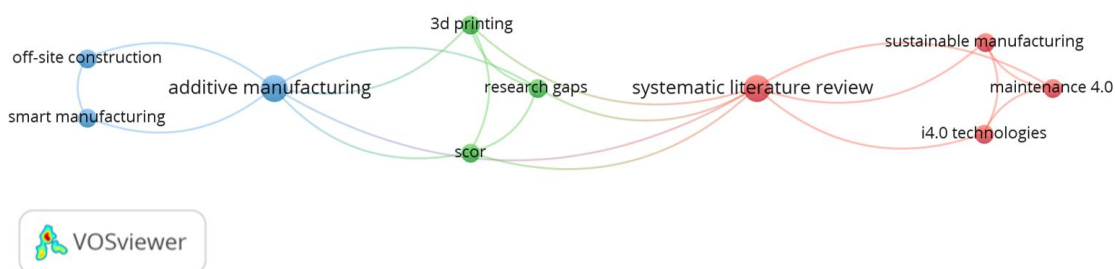


Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

Na rede 3 há maior concentração, conforme mostrado na Figura 13, com *clusters* associados a *sustainable design*, *new product development*, *literature review*, *circular design*, *product sustainability* e *stakeholders*. Essa configuração indica aproximação da integração entre *I4.0 & CE* às etapas de concepção e Desenvolvimento de Produtos, incorporando conceitos de *design* sustentável e participação de *stakeholders*.

O *cluster* relacionado à operação *I4.0 & CE & Aerospace* é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Rede de coocorrência de palavras-chave: *I4.0 & CE & Aerospace*



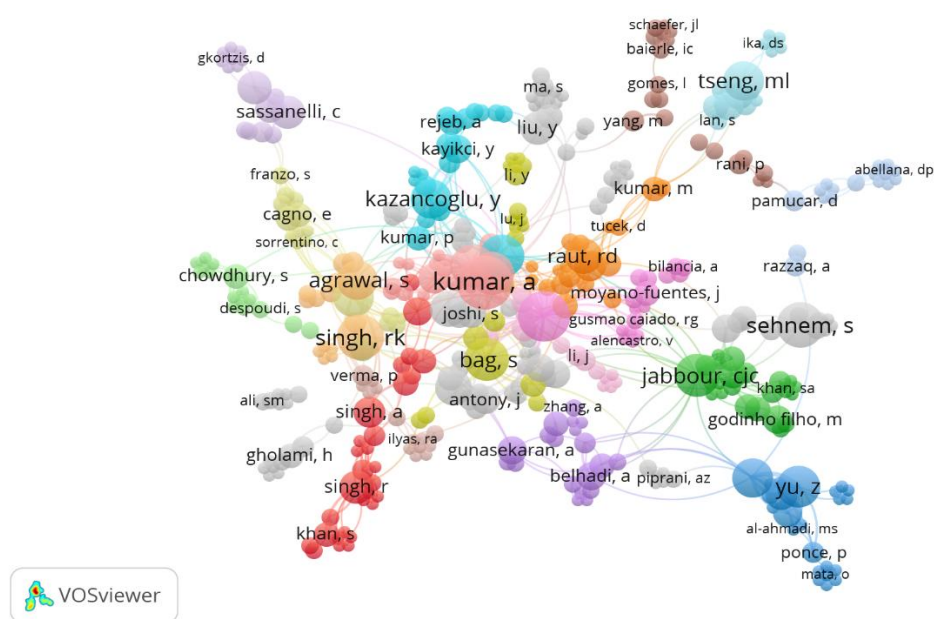
Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

Na rede 4, ilustrada pela figura 14, a estrutura é mais simples, com conexões centradas em conceitos como *systematic literature review*, *additive manufacturing*, *research gaps*, *smart manufacturing* e *maintenance 4.0*. Essa configuração indica foco teórico e pouca evidência de aplicações práticas.

4.7.2. Coautoria (*authors*)

Em complemento, a análise das redes de coautoria permitiu identificar padrões de colaboração entre os pesquisadores, evidenciando núcleos centrais, conforme demonstra as Figuras 15 a 18.

Figura 15 – Rede de coautoria: *I4.0 & CE*

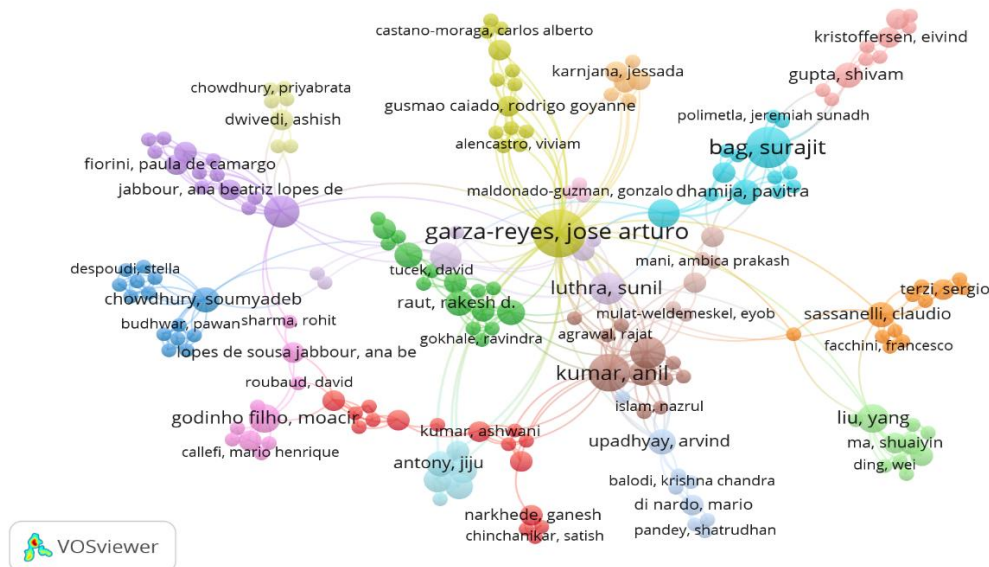


Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

A figura 15 ilustrou a rede de colaboração entre autores da temática, além dos nós mostrarem o volume de produções por autor, evidenciando nomes como A. Kumar, R. K. Singh, J. A. Garza-Reyes e C. J. C. Jabbour em núcleos diferentes, embora, com colaborações. Além disso, poucos grupos concentram a maior parte das interações, enquanto outros aparecem isolados.

Observou-se na Figura 16 a rede de coautoria relacionada à pesquisa de *I4.0 & CE & Manufacturing*.

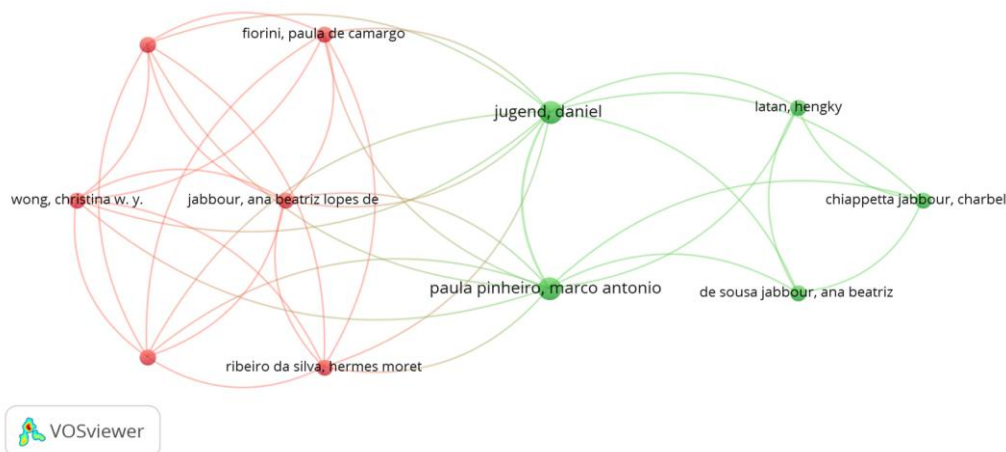
Figura 16 – Rede de coautoria: *14.0 & CE & Manufacturing*



Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

Na figura 16 observou-se que ao centro da imagem temos um *cluster* dominante ocupado também por J. A. Garza-Reyes, com conexões diversas, seguido por S. Bag e A. Kumar, que também formam núcleos relevantes. Essa configuração indica concentração de colaborações em torno de poucos pesquisadores. Sobre a rede de coautoria de *14.0 & CE & Product Development*, temos o diagrama da figura 17.

Figura 17 – Rede de coautoria: *14.0 & CE & Product Development*

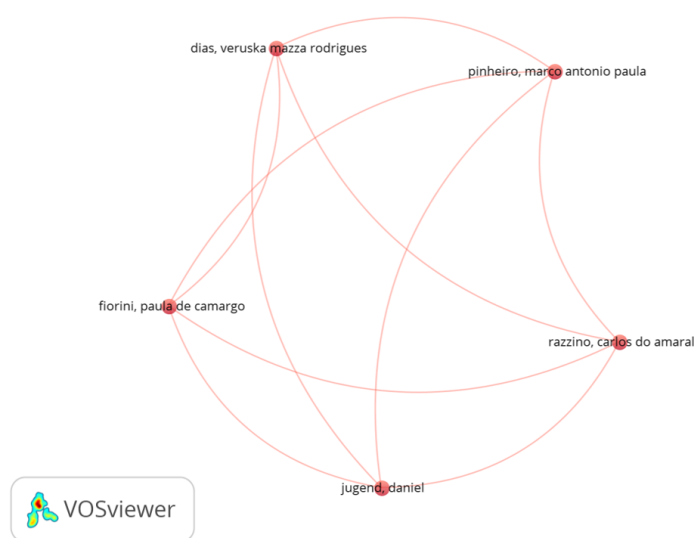


Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

A Figura 17 apresenta a rede representando o menor volume de produções, com dois grupos principais. Esses grupos possuem autores diferentes dos *clusters* anteriores, que tiveram similaridade. O primeiro grupo, com autores como C.W.Y. Wong e P. C. Fiorini, enquanto o outro tem autores D. Jugend e, novamente, C. J. C. Jabbour.

Por fim, a Figura 18 mostra a rede de coautoria de *I4.0 & CE & Aerospace*.

Figura 18 – Rede de coautoria: *I4.0 & CE & Aerospace*



Fonte: WoS e VOSviewer. Elaborado pelos autores (2025)

Na rede apresentada pela Figura 18, com volume ainda menor que a anterior, há cinco autores com colaborações entre si. Similar à rede anterior, temos D. Jugend e P. C. Fiorini, indicando parcerias pontuais com potencial para expansão.

5. DISCUSSÕES

O mapeamento da literatura indica que o campo evolui para uma consolidação prática, evidenciada pela predominância de estudos empíricos. Em paralelo, cerca de 20% das publicações são revisões voltadas à sistematização teórica, resultando em uma proporção aproximada de 80% de trabalhos aplicados e 20% de estudos conceituais. Essa configuração demonstra maturidade crescente, mas também revela lacunas críticas: a integração entre Indústria 4.0 (I4.0) e Economia Circular (EC) com Desenvolvimento de



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Produtos e o setor Aeroespacial permanece incipiente. Esse *gap* é estratégico, pois as decisões de circularidade e digitalização são tomadas justamente nas etapas iniciais do ciclo de vida de um produto, mas a literatura não reflete essa relevância, evidenciando uma oportunidade para pesquisas futuras.

A análise por tipo de documento e operador confirma essa assimetria: enquanto I4.0 & EC e sua integração com Manufatura apresentam crescimento contínuo, os recortes envolvendo Desenvolvimento de Produtos têm quantidade significativamente menor, e a integração com Aeroespacial é extremamente baixa, sendo que a quantidade de produção científica da integração entre todos os temas é zero. Ou seja, não há registros que combinem simultaneamente I4.0, EC, Desenvolvimento de Produto e Aeroespacial, evidenciando fragmentação onde a integração seria importante.

A dinâmica temporal também reforça essa tendência. As publicações iniciam em 2018, com crescimento consistente para I4.0 & EC e sua aplicação à Manufatura, mas evolução irregular com Desenvolvimento de Produtos e Aeroespacial. Em 2022, Índia e China assumem protagonismo em publicações sobre I4.0 & EC, sinalizando a priorização do tema em agendas de digitalização e sustentabilidade dos países. Mas em seguida observa-se uma queda nas contribuições chinesas, possivelmente associada à redução de produção no tema ou aumento de sub-indexação chinesa na base consultada. Ainda assim, a China mantém liderança em outro recorte no período recente. Em I4.0 & EC & Desenvolvimento de Produtos, destaca-se o salto da China de 1 publicação em 2024 para 25 em 2025, superando todos os demais países e indicando foco crescente na integração com Desenvolvimento de Produto. Já no contexto Aeroespacial, a quantidade geral é mínima, abaixo de sete publicações por ano, com picos pontuais, como em 2021 (liderado por Áustria e Canadá), e queda acentuada em 2025, com apenas um registro da Eslováquia.

Quanto aos principais periódicos, a produção científica concentra-se em canais voltados à sustentabilidade e gestão industrial, com baixa presença em fontes especializadas em Desenvolvimento de Produto ou Aeroespacial. Em financiamento, observa-se diversidade geográfica para pesquisas sobre I4.0 & EC, com destaque para o CNPq (Brasil), mas

baixa diversidade nos recortes com Desenvolvimento de Produtos e registros pontuais para Aeroespacial, sugerindo oportunidades para políticas de incentivo e programas direcionados, especialmente em regiões subexploradas como na América Latina.

O impacto por citações confirma menor foco em estudos que envolvem Desenvolvimento de Produtos e Aeroespacial, reforçando a lacuna identificada. As redes de co-ocorrência evidenciam conexões com abordagens mais teóricas, com foco em Manufatura, e baixa transposição para Desenvolvimento de Produtos, sugerindo que a tradução dos princípios de I4.0 e EC em métodos, processos e ferramentas de projeto e engenharia ainda é incipiente. Além disso, as redes de coautoria demonstraram poucos grupos concentrando maior parte das interações, com outros isolados, sugerindo baixa integração entre comunidades. Isso sugeriu que há liderança intelectual em poucos pesquisadores e potencial para expansão das redes.

Em síntese, a integração entre I4.0 e EC configura-se como um campo consolidado e em expansão, impulsionado por países asiáticos e alinhado aos pilares de digitalização e sustentabilidade. Mas há uma assimetria: a literatura favorece aplicações em manufatura e etapas intermediárias do ciclo de vida, enquanto fases iniciais de concepção e projeto, cruciais para decisões de circularidade, permanecem pouco exploradas. Especialmente em indústrias complexas como a aeronáutica. Esse diagnóstico aponta rotas estratégicas:

1. Pesquisa aplicada orientada às etapas iniciais do desenvolvimento, com métricas de circularidade e artefatos de engenharia integrados desde a concepção;
2. Cooperação internacional e interdisciplinaridade para superar barreiras tecnológicas e organizacionais em setores regulados;
3. Fomento direcionado (incluindo CNPq e programas regionais) para projetos e *frameworks* que conectem digitalização e circularidade desde a concepção até o descarte.



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração entre Indústria 4.0 e Economia Circular apresenta-se como um domínio consolidado e em expansão. Entretanto, quando direcionada a áreas específicas, como Desenvolvimento de Produtos e o setor Aeroespacial, a produção científica é escassa e fragmentada, revelando lacunas críticas. Essa assimetria é preocupante, pois as decisões determinantes para a circularidade ocorrem nas etapas iniciais do ciclo de vida do produto, ainda pouco exploradas na literatura.

Os resultados indicam que a aplicação prática se concentra no contexto da Manufatura, enquanto todo o ciclo de Desenvolvimento do Produto, aplicável a empresas de alta complexidade, permanece sub-representado. Essa configuração reforça a necessidade de esforços interdisciplinares, cooperação internacional e políticas de fomento capazes de promover *frameworks* que integrem digitalização e circularidade desde a concepção até o descarte. Avançar nessa direção é essencial para consolidar soluções inovadoras e sustentáveis, alinhadas aos desafios estratégicos da indústria.

REFERÊNCIAS

- Agrawal, R.; Agrawal, S.; Samadhiya, A.; Kumar, A.; Luthra, S.; Jain, V. *Adoption of green finance and green innovation for achieving circularity: an exploratory review and future directions*. Geoscience Frontiers, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 101669, 2024. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101669.
- Aria, M.; Cuccurullo, C. *Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis*. Journal of Informetrics, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.
- Back, N.; Ogliari, A.; Dias, A.; Silva, J. C. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.
- Bag, S.; Pretorius, J. H. C.; Gupta, S.; Dwivedi, Y. K. *Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities*. Technological Forecasting and Social Change, [S. l.], v. 163, p. 120420, 2021.
- Confederação Nacional da Indústria (CNI). **Nota técnica - Aeroespacial e Defesa**. Brasília, 2022.
- Costa, D.; Silva, G. J. C.; Assunção, M. A. **Scopus vs. Web of Science: uma avaliação comparativa das principais bases de dados para a pesquisa acadêmica**. Cadernos do FNDE, Ano 4, v. IV, n. 09, jul./dez. 2023.
- Dias, V. M. R.; Jugend, D.; Fiorini, P. D.; Razzino, C. D.; Pinheiro, M. A. P. *Possibilities for applying the circular economy in the aerospace industry: practices, opportunities and challenges*. Journal of Air Transport Management, [S. l.], v. 102, p. 102227, 2022.
- Domaracka, L.; Matuskova, S.; Tausova, M.; Senova, A.; Kowal, B. *Efficient use of critical raw materials for optimal resource management in EU countries*. Sustainability, [S. l.], v. 14, n. 11, p. 6554, 2022. DOI: 10.3390/su14116554.
- Ernst & Young. **Como a sustentabilidade pode decolar no setor aeroespacial e de defesa?** [S.l.]: Ernst & Young Global Limited, 2025.
- Esmailian, B.; Sarkis, J.; Lewis, K.; Behdad, S. *Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0*. Resources, Conservation and Recycling, [S. l.], v. 163, p. 105064, 2020.
- Galizia, F. R.; Jabbour, C. J. C.; Ruiz, R. *A cross-sectorial review of industrial best practices and case histories on Industry 4.0 technologies*. Journal of Manufacturing Processes, v. 40, p. 1-20, 2019.
- Garcia, F.; Mendes, D.; Furtado, P. S. **ESG e Economia Circular na Gestão 4.0: ações para negócios mais sustentáveis**. São Paulo: Blucher, 2022.
- Ghobakhloo, M. *Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability*. Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 252, p. 119869, 2020.
- Gil, A. C. (2019). **Métodos e técnicas de pesquisa social** (7. ed.). São Paulo: Atlas. ISBN 978-85-9702-057-1. <https://www.esfera.com.vc/p/livro-metodos-e-tecnicas-de-pesquisa-social-7a-edicao2019-antonio-carlos-gil/e101011106>

Gordan, M.; Sabbagh-Yazdi, S. R.; Ghaedi, K.; Ismail, Z. *A damage detection approach in the era of Industry 4.0 using the relationship between circular economy, data mining, and artificial intelligence*. Advances in Civil Engineering, [S. l.], v. 2023, p. 3067824, 2023.

Guyon, N.; Heisler, A.; Furtado, J. L.; Mamudu, A. *Analysis of the opportunities of Industry 4.0 in the aeronautical sector*. HAL Archives, 2019.

Jabbour, C. J. C.; Jabbour, A. B. L. D.; Ruiz, R.; Santos, F. C. A. *Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations*. Annals of Operations Research, v. 295, n. 1, p. 1-24, 2020.

Kunovjanek, M.; Knofius, N.; Reiner, G. *Additive manufacturing and supply chains – a systematic review*. Production Planning & Control, [S. l.], v. 33, n. 2-3, p. 158–177, 2022.

Liu, Q. L.; Trevisan, A. H.; Yang, M. Y.; Mascarenhas, J. *A framework of digital technologies for the circular economy: digital functions and mechanisms*. Business Strategy and the Environment, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 1488–1503, 2022. DOI: 10.1002/bse.3015.

Mamudu, A.; Furtado, J. L.; Guyon, N.; Silva, C. B. *Circular economy in the manufacturing sector: Digital transformation and sustainable practices*. Procedia CIRP, v. 90, p. 169-174, 2020.

Manavalan, E.; Jayakrishna, K. *A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements*. Computers & Industrial Engineering, [S. l.], v. 127, p. 925–953, 2019.

Marques, A. R.; Pereira, M. R. S.; Rosa, R. R. *A contribuição da bibliometria no estudo da economia circular e da Indústria 4.0*. Revista de Gestão e Tecnologia, v. 23, n. 2, p. 85-99, 2023.

Martin, C. J.; Kilpatrick, H.; Clark, A. *Exploring circular economy approaches for sustainable business*. Journal of Cleaner Production, v. 145, p. 89-98, 2017.

Nascimento, D. L. M.; Alencastro, V.; Quelhas, O. L. G.; Caiado, R. G. G.; Garza-Reyes, J. A.; Lona, L. R.; Tortorella, G. *Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: a business model proposal*. Journal of Manufacturing Technology Management, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 607–627, 2019.

Pasco, J.; Lei, Z.; Aranas, C. *Additive manufacturing in off-site construction: review and future directions*. Buildings, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 53, 2022. DOI: 10.3390/buildings12010053.

Pirola, F.; Boucher, X.; Wiesner, S.; Pezzotta, G. *Digital technologies in product-service systems: a literature review and a research agenda*. Computers in Industry, [S. l.], v. 123, p. 103301, 2020.

Rauen, T.; Furtado, J. L. *Indústria de alta tecnologia: uma tipologia baseada na intensidade de P&D e no desempenho comercial*. Revista Brasileira de Inovação, v. 10, n. 2, p. 13-28, 2013.

Rozenfeld, H.; Santos, F. C.; Gomes, A. L. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo*. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2006. Acesso em: 7 dez. 2024.



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Silva, A. L.; Souza, R. G. De; Santos, M. F. **ESG e Economia Circular na Gestão 4.0: ações para negócios mais sustentáveis.** São Paulo: Blucher, 2022.

Sousa, L. L. De; Barros, T. H. B.; Gomes, N. F. **Gestão do conhecimento em bibliotecas universitárias: estudo bibliométrico na base de dados Web of Science no período de 1945 a 2018.** Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação, v. 13, n. 3, p. 852-869, 2020.

Zheng, P.; Wang, Z. X.; Chen, C. H.; Khoo, L. P. *A survey of smart product-service systems: key aspects, challenges and future perspectives.* Advanced Engineering Informatics, [S. l.], v. 42, p. 100973, 2019. DOI: 10.1016/j.aei.2019.100973.