

TRANSFORMAÇÕES INDUSTRIAIS, TECNOLOGIAS DIGITAIS E COMPETITIVIDADE: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

INDUSTRIAL TRANSFORMATIONS, DIGITAL TECHNOLOGIES, AND COMPETITIVENESS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Ismael Cristofer Baierle*  E-mail: ismaelbaierle@hotmail.com

Laís da Silva Benetti Santos*  E-mail: ismaelbaierle@hotmail.com

*Universidade Federal do Rio Grande (UFRG), Santo Antônio da Patrulha, RS, Brasil.

Resumo: Este artigo mapeia e analisa a evolução da produção científica que relaciona a Indústria 4.0 à competitividade por meio de um estudo bibliométrico longitudinal. Após a busca na base Scopus, os registros foram pré-processados e analisados no SciMAT, utilizando coocorrência de palavras-chave, índice de equivalência para normalização, algoritmo Simple Centers para clusterização e diagramas estratégicos (centralidade e densidade), além de mapas de sobreposição e de evolução temática. O recorte foi segmentado em quatro períodos: 1999–2010, 2011–2015, 2016–2020 e 2021–2024. Os resultados indicam que, em 1999–2010, o campo era disperso, com baixa conectividade; em 2011–2015, a Indústria 4.0 emerge como eixo organizador; em 2016–2020, o tema se consolida e intensifica; e, em 2021–2024, mantém-se central, mas passa a se articular mais com tecnologias digitais e competitividade. Como contribuição, o estudo organiza tendências e lacunas, orienta agendas de pesquisa e apoia decisões gerenciais ao evidenciar como a literatura tem associado a transformação digital a mecanismos de competitividade. Ao sintetizar a trajetória temática, o artigo reduz dispersão, indica temas prioritários para investigações futuras e oferece base para decisões de adoção e avaliação de projetos digitais.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Competitividade. Tecnologias Digitais. Fábricas Inteligentes. Transformação Digital.

Abstract: This article maps and analyzes the evolution of scientific production linking Industry 4.0 to competitiveness through a longitudinal bibliometric study. After searching the Scopus database, the records were preprocessed and analyzed in SciMAT using keyword co-occurrence, an equivalence index for normalization, the Simple Centers algorithm for clustering, and strategic diagrams (centrality and density), as well as overlay and thematic evolution maps. The time span was segmented into four periods: 1999–2010, 2011–2015, 2016–2020, and 2021–2024. The results indicate that, in 1999–2010, the field was scattered with low connectivity; in 2011–2015, Industry 4.0 emerged as an organizing axis; in 2016–2020, the topic consolidated and intensified; and, in 2021–2024, it remained central but became more strongly articulated with digital technologies and competitiveness. As a contribution, the study organizes trends and gaps, guides research agendas, and supports managerial decision-making by showing how the literature has linked digital transformation to mechanisms of competitiveness. By synthesizing the thematic trajectory, the article reduces dispersion, identifies priority topics for future investigations, and provides a basis for decisions on adopting and evaluating digital projects.

Keywords: Industry 4.0. Competitiveness. Digital Technologies. Smart Factories. Digital Transformation.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 consolidou-se como um marco recente de transformação dos sistemas produtivos ao articular digitalização, conectividade e automação para reorganizar processos, decisões e modelos de negócio. A expressão ganhou projeção a partir da agenda alemã de 2011 e passou a representar uma nova etapa da evolução industrial, associada a mudanças estruturais na forma como empresas projetam, operam e controlam suas cadeias de valor (Mosconi, 2015 *apud* Roblek; Meško; Krapež, 2016). Na literatura, o conceito é frequentemente conectado a um conjunto de tecnologias habilitadoras e à promessa de ganhos simultâneos em desempenho operacional, flexibilidade e qualidade, o que reforça seu potencial como fonte de diferenciação competitiva (Lasi *et al.*, 2014; Zhong; Xu; Klotz; Newman, 2017). Em paralelo, o debate recente também enfatiza que essa transformação não é apenas tecnológica, mas envolve capacidades organizacionais, integração de dados e mudança na lógica de criação de valor, aspectos que seguem em expansão no campo (Hassoun, 2025).

Apesar do crescimento do interesse acadêmico e gerencial, a própria definição de Indústria 4.0 ainda não é totalmente estável, o que afeta comparabilidade entre estudos e dificulta sínteses mais robustas. Em termos de finalidade, o modelo busca elevar automação, eficiência e produtividade ao integrar sistemas e dados em tempo real, com desdobramentos em tomada de decisão e desempenho (Yang Lu, 2017). Ao mesmo tempo, diferentes autores descrevem o fenômeno sob ângulos distintos (arquiteturas, tecnologias, níveis de integração e impactos), o que amplia a abrangência do tema, mas mantém o problema de heterogeneidade conceitual (Hermann *et al.*, 2016). Essa diversidade reforça a necessidade de organizar evidências e delimitar, com maior clareza, como a Indústria 4.0 vem sendo tratada pela literatura e quais dimensões são mais frequentemente associadas ao conceito (Culot; Nassimbeni; Orzes; Sartor, 2017).

Diante dessa heterogeneidade, este estudo adota três definições de referência que ilustram os diferentes ângulos do fenômeno. Hermann, Pentek e Otto (2016) caracterizam a Indústria 4.0 a partir de princípios de projeto, a saber: interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação a serviços e modularidade. Lasi *et al.* (2014) descrevem-na como a

convergência de sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas e integração horizontal e vertical que reorganiza a manufatura. Xu, Xu e Li (2018), em síntese de estado da arte, definem-na como a integração de tecnologias digitais que conferem autonomia, conectividade e inteligência aos sistemas produtivos. A revisão sistemática de Culot *et al.* (2020) confirma a ausência de consenso e propõe categorizar as definições por elementos tecnológicos e sociotécnicos, o que reforça a pertinência de um mapeamento longitudinal do campo.

Quando se observa a relação entre Indústria 4.0 e competitividade, a literatura sugere benefícios relevantes, mas apresenta resultados distribuídos em diferentes enfoques e níveis de análise. Parte dos estudos enfatiza ganhos de produtividade, qualidade e responsividade, enquanto outros destacam efeitos sobre inovação, redesenho de processos e posicionamento estratégico. Também há evidências de que os efeitos competitivos podem ser assimétricos entre empresas, variando conforme recursos, maturidade e contexto, o que inclui diferenças entre grandes organizações e firmas com restrições de capital e competências (Erik Hofmann; Marco Rüsç, 2017; Piyathanavong *et al.*, 2024). Em sínteses mais recentes, a Indústria 4.0 aparece associada a desempenho e competitividade por meio de mecanismos como integração e alinhamento de operações, uso intensivo de dados e capacidades digitais, mas a articulação entre esses mecanismos ainda tende a ser apresentada de forma fragmentada (Buer *et al.*, 2020). Além disso, a discussão sobre competitividade frequentemente se confunde com a discussão de transformação digital em sentido amplo, o que reforça a necessidade de mapear como cada termo tem sido operacionalizado e com que tipo de evidência (Santos; Martinho, 2020).

Entre os estudos que enfatizam ganhos de produtividade e desempenho operacional, Dalenogare *et al.* (2018) evidenciam empiricamente a contribuição das tecnologias da Indústria 4.0 para o desempenho industrial, enquanto Buer *et al.* (2021) associam o grau de digitalização e o porte da firma a resultados de manufatura. No tocante à competitividade, Gökalp, Şener e Eren (2017) e Calandreli, Valle e Deschamps (2025) relacionam a maturidade digital e indicadores como a eficiência global dos equipamentos (OEE, do inglês Overall Equipment Effectiveness) a vantagens operacionais. Revisões anteriores sobre o tema, como as de Liao *et al.* (2017) e de Oztemel e Gursev (2020), privilegiam a descrição de tecnologias e

aplicações, sem examinar de forma longitudinal, e por coocorrência de palavras-chave, como o vínculo específico entre Indústria 4.0 e competitividade se estruturou ao longo do tempo.

A complexidade do tema aumenta porque a Indústria 4.0 produz impactos que extrapolam o chão de fábrica, alterando estruturas organizacionais, perfis profissionais e formas de coordenação da produção e da cadeia. Estudos apontam que os efeitos podem alcançar a criação de valor industrial e provocar mudanças no papel de pessoas, sistemas e rotinas, exigindo novas competências e maior capacidade de gestão da mudança (Juliano Mário Müller; Daniel Kielekai-Ingo Voigt, 2018). Ao mesmo tempo, há desafios práticos relevantes: adoção tecnológica, governança de dados, custos de implementação, integração entre áreas e resistência organizacional, fatores que podem limitar ou retardar a conversão de iniciativas digitais em vantagem competitiva sustentada (Lorenz *et al.*, 2020; Chirumalla *et al.*, 2025).

Mesmo com esse volume crescente de publicações, ainda falta uma visão integrada que organize, de forma sistemática e ao longo do tempo, como a literatura tem conectado Indústria 4.0 e competitividade, quais temas se consolidaram como centrais, quais perderam força e onde permanecem lacunas. Em outras palavras, o campo apresenta muitos achados parciais, porém carece de um panorama que permita compreender a evolução temática e estruturar uma agenda de pesquisa e implicações gerenciais com base em evidências organizadas.

Diante desse contexto, o objetivo deste artigo é mapear e analisar a produção científica que relaciona Indústria 4.0 e competitividade, identificando a evolução dos temas, sua centralidade e suas tendências, de modo a (i) consolidar o estado da arte com base em evidências bibliométricas, (ii) indicar lacunas e oportunidades de pesquisa e (iii) apoiar a tomada de decisão gerencial ao esclarecer quais dimensões e mecanismos têm sido mais associados à competitividade no contexto da Indústria 4.0. Para orientar a investigação, o estudo é guiado pelas seguintes questões: (i) Existe uma interconexão direta entre competitividade e indústria 4.0? (ii) Existe alguma mudança de padrão em como a competitividade é tratada após a chegada da indústria 4.0? (iii) A competitividade empresarial na era digital é impulsionada apenas pela inovação e digitalização? (iv) Quais tipos de indústrias estão sendo estudados nas pesquisas mais recentes sobre Indústria 4.0?

Na sequência, o artigo está estruturado da seguinte forma: após esta Introdução, apresenta-se a seção de Desenvolvimento, que cumpre o papel de referencial teórico, situando os principais conceitos que sustentam a discussão sobre Indústria 4.0 e competitividade. Em seguida, descreve-se a Metodologia, detalhando as etapas, critérios e ferramentas utilizadas na análise bibliométrica. Posteriormente, são apresentados e discutidos os Resultados do estudo. Por fim, o artigo é encerrado com as Considerações finais, consolidando as principais contribuições, limitações e direcionamentos para pesquisas futuras.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Indústria 4.0: conceito, evolução e tecnologias habilitadoras

A Indústria 4.0 representa uma etapa recente de transformação dos sistemas produtivos, marcada pela digitalização e integração de tecnologias avançadas com implicações em processos, decisões e modelos de negócio. A literatura indica que o conceito ganhou projeção internacional a partir da agenda alemã de 2011 e passou a compor agendas industriais voltadas à modernização e competitividade (Xu; Xu; Li, 2018; Oztemel *et al.*, 2020). Embora amplamente difundida, a Indústria 4.0 não é apenas um conjunto de tecnologias, mas um arranjo sociotécnico que articula automação, conectividade, integração de dados e capacidades organizacionais. Por isso, sua definição varia entre autores, o que afeta a comparabilidade de evidências e reforça a necessidade de sínteses mais estruturadas e sistemáticas (Hermann *et al.*, 2016; Culot; Nassimbeni; Orzes; Sartor, 2017).

Do ponto de vista operacional, o conceito é associado à integração de sistemas e dados em tempo real para elevar automação, eficiência e produtividade, ampliando a capacidade de monitorar, controlar e adaptar processos. Essa perspectiva aproxima a Indústria 4.0 de uma lógica de decisão orientada por dados, em que o desempenho depende menos de ações isoladas e mais da integração entre tecnologias e rotinas (Yang Lu, 2017; Vaidya; Ambad; Bhosle, 2018).

Entre as tecnologias habilitadoras frequentemente associadas à Indústria 4.0 destacam-se a Internet das Coisas Industrial (IIoT), a computação em nuvem, a

análise de big data, a inteligência artificial e o aprendizado de máquina, os sistemas ciberfísicos, a manufatura aditiva, os gêmeos digitais, a robótica colaborativa e a integração horizontal e vertical de dados (Xu; Xu; Li, 2018; Oztemel; Gursev, 2020; Zhong *et al.*, 2017). Quanto a ganhos práticos de competitividade, a literatura reporta exemplos concretos: redução de paradas não programadas e de defeitos por meio de manutenção preditiva baseada em sensores, aumento de disponibilidade de equipamentos mensurado por indicadores como o OEE (Calandrelli; Valle; Deschamps, 2025)., melhoria de prazos e flexibilidade pela integração de dados em tempo real (Fang *et al.*, 2025; Pang; Zhen, 2025). e ganhos de eficiência energética em fábricas inteligentes (Anjum *et al.*, 2025; Vetrivel; Saravanan; Maheswari, 2025). Esses resultados evidenciam que o valor competitivo não decorre da tecnologia isolada, mas de sua integração a rotinas e capacidades organizacionais.

2.2 Competitividade e a conversão da transformação digital em vantagem

Competitividade pode ser entendida como a capacidade de sustentar desempenho superior em relação a concorrentes, por meio de escolhas estratégicas e capacidades que se manifestam em resultados operacionais, inovação e posicionamento. Em termos práticos, isso envolve combinar eficiência e melhoria de processos com decisões de investimento e direcionamento estratégico coerentes com o ambiente competitivo (Alamsyah *et al.*, 2020; Calandrelli *et al.*, 2024). A literatura também sugere que competitividade não se manifesta de forma homogênea entre empresas, pois é condicionada por recursos, competências e contexto, especialmente quando se comparam empresas de diferentes portes e setores. Assim, o debate exige considerar não apenas “o que é competitividade”, mas “por quais mecanismos” ela é alcançada e sustentada em ambientes industriais distintos (Shan *et al.*, 2016; Alamsyah *et al.*, 2020).

Evidências empíricas reforçam essa leitura. Shan, Song e Ju (2016) demonstram que a velocidade de inovação medeia a relação entre orientação empreendedora e desempenho, indicando que a vantagem competitiva depende menos da intenção estratégica e mais da capacidade de convertê-la em ação rápida. No contexto industrial, Dalenogare *et al.* (2018) mostram que nem toda tecnologia da

Indústria 4.0 contribui igualmente para o desempenho, o que sugere que a competitividade decorre da seleção e da combinação adequadas de tecnologias e capacidades, e não da adoção indiscriminada. Assim, a competitividade é tratada na literatura menos como atributo estático e mais como resultado dinâmico de escolhas estratégicas e operacionais.

A conexão entre Indústria 4.0 e competitividade é frequentemente descrita pela capacidade de elevar produtividade, qualidade e flexibilidade por meio de integração tecnológica e digitalização, com impactos diretos sobre desempenho operacional. Nessa abordagem, a Indústria 4.0 funciona como um vetor de melhoria contínua orientada por dados, reduzindo perdas e ampliando capacidade de resposta (Gökalp *et al.*, 2017; Calandreli *et al.*, 2024). Entretanto, o ganho competitivo não decorre automaticamente da adoção tecnológica, porque depende de alinhamento entre estratégia, processos e capacidade de absorver conhecimento e reconfigurar rotinas. Por isso, além da dimensão tecnológica, o debate enfatiza a importância de capacidades organizacionais e governança para capturar valor ao longo do tempo (Lorenz *et al.*, 2020; Chirumalla *et al.*, 2025).

A literatura sugere que a conversão da Indústria 4.0 em competitividade ocorre por três mecanismos inter-relacionados: (i) ganhos operacionais (eficiência, qualidade e flexibilidade); (ii) capacidades organizacionais (competências, gestão da mudança e governança de dados); e (iii) incorporação de novas dimensões de valor, como sustentabilidade e eficiência energética. Esses mecanismos raramente são examinados de forma conjunta, o que dificulta compreender por quais caminhos a digitalização se traduz em desempenho.

Em sínteses recentes, a relação entre Indústria 4.0 e competitividade aparece associada a mecanismos como integração de operações, uso intensivo de dados e capacidades digitais, mas ainda com evidências fragmentadas e dispersas em diferentes linhas de pesquisa. Isso reforça a necessidade de organizar o campo para identificar tendências, convergências e lacunas persistentes, especialmente quando se considera a evolução temática ao longo do tempo (Buer *et al.*, 2020; Santos; Martinho, 2020).

2.3 Fábricas inteligentes, sustentabilidade e eficiência energética

No nível do chão de fábrica, as fábricas inteligentes são frequentemente apresentadas como expressão concreta da Indústria 4.0, por combinarem integração de dados, autonomia de controle e capacidade de adaptação do sistema produtivo. A literatura descreve tais sistemas como adaptáveis e voltados à otimização contínua, incluindo metas de desempenho e sustentabilidade (Anjum *et al.*, 2025; Oztemel *et al.*, 2020). Essa lógica operacional sugere que o valor competitivo está associado à capacidade de reduzir desperdícios, melhorar eficiência e aumentar flexibilidade por meio de sistemas que monitoram e ajustam processos em tempo real. Assim, a fábrica inteligente não é apenas “mais tecnologia”, mas uma forma de organizar decisões e fluxos de informação para sustentar desempenho em ambientes de variabilidade e restrição (Huiyuan *et al.*, 2025; Fang *et al.*, 2025).

Exemplos recentes ilustram esse funcionamento e amparam a noção de valor competitivo no nível operacional: sistemas de monitoramento inteligente que combinam arquiteturas Transformer e filtragem de sinais melhoram a detecção de anomalias em linhas de produção (Fang *et al.*, 2025), enquanto a otimização de sequenciamento em células de manufatura amplia a produtividade em fábricas inteligentes (Pang; Zhen, 2025). Esses ganhos operacionais articulam-se a dimensões de sustentabilidade e de eficiência energética que ampliam o conceito de competitividade para além de custo e produtividade.

A competitividade industrial tem incorporado, de maneira crescente, dimensões associadas a sustentabilidade e eficiência de recursos, especialmente energia. Como o setor industrial apresenta consumo energético elevado e impactos ambientais significativos, parte da agenda recente de Indústria 4.0 passa a enfatizar ganhos de eficiência energética e redução de perdas como componentes relevantes de desempenho competitivo (Vetrivel; Saravanan; Maheswari, 2025; Anjum *et al.*, 2025). Nesse contexto, tecnologias e sistemas orientados por dados podem apoiar metas de otimização energética e operacional simultaneamente, conectando desempenho econômico a requisitos ambientais e pressões de mercado. Isso amplia o entendimento de competitividade para além de custos e produtividade, incorporando

conformidade e eficiência de recursos como dimensões estratégicas na era digital (Vetrivel; Saravanan; Maheswari, 2025; Huiyuan *et al.*, 2025).

Estudos recentes quantificam esse vínculo: Anjum *et al.* (2025) demonstram que a agregação de informações em fábricas inteligentes eleva a eficiência energética sem comprometer o desempenho produtivo, e Vetrivel, Saravanan e Maheswari (2025) tratam a eficiência energética como componente explícito de competitividade na Indústria 4.0. Esses achados posicionam a sustentabilidade como dimensão estratégica, e não apenas como exigência regulatória, ainda que sua captura dependa de condições de adoção nem sempre presentes.

2.4 Barreiras, maturidade e assimetrias de adoção

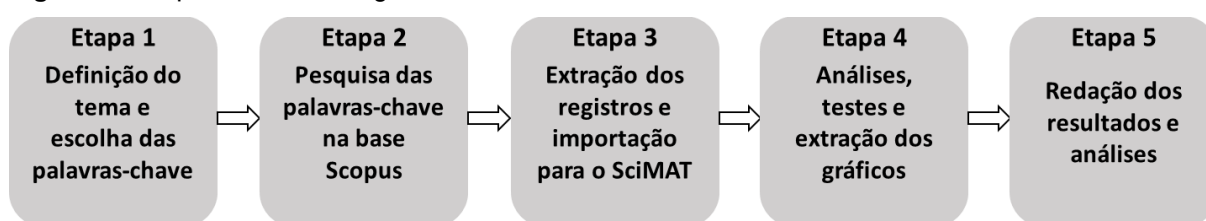
Apesar das oportunidades, a adoção da Indústria 4.0 permanece heterogênea e enfrenta barreiras recorrentes, incluindo limitações de infraestrutura, cultura organizacional, qualificação e instabilidade econômico-institucional. Em especial, em países emergentes, essas restrições tendem a afetar velocidade de implementação e a capacidade de converter digitalização em ganhos competitivos sustentáveis (Dalenogare; Benitez; Ayala; Frank, 2018; Chirumalla *et al.*, 2025). Além disso, a transformação digital altera demandas sobre a força de trabalho e exige reconfiguração de funções, elevando a necessidade de qualificação e gestão da mudança. Essa dimensão organizacional torna-se crítica, pois a competitividade depende não apenas da tecnologia implantada, mas da capacidade de operar, aprender e sustentar melhorias com novas competências e estruturas de decisão (Yan Yi *et al.*, 2021; Vaidya; Ambad; Bhosle, 2018).

Em síntese, a literatura sugere que a relação entre Indústria 4.0 e competitividade é mediada por (i) ganhos operacionais (eficiência, qualidade, flexibilidade), (ii) capacidades organizacionais (competências, gestão da mudança, governança) e (iii) incorporação de novas dimensões de valor, como sustentabilidade e eficiência energética. Esse entendimento sustenta a necessidade de mapear, longitudinalmente, como o campo evoluiu, quais temas se tornaram centrais e onde persistem lacunas, o que fundamenta a abordagem bibliométrica apresentada a seguir (Gökalp *et al.*, 2017; Buer *et al.*, 2020; Vetrivel; Saravanan; Maheswari, 2025).

3 METODOLOGIA

Este estudo adotou uma análise bibliométrica com mapeamento científico longitudinal, operacionalizada no software SciMAT (Science Mapping Analysis Tool), por sua capacidade de integrar pré-processamento, construção de redes e visualizações (diagramas estratégicos, redes de clusters e mapas de evolução) em diferentes períodos temporais (Moral-Muñoz *et al.*, 2020; Cobo *et al.*, 2012; Cobo *et al.*, 2011). A metodologia foi estruturada em cinco etapas: (i) definição do tema e das palavras-chave; (ii) busca nas bases; (iii) exportação e importação no SciMAT; (iv) configuração do SciMAT e geração das saídas analíticas por período e longitudinalmente; e (v) síntese e redação dos resultados (Cobo *et al.*, 2012; Cobo *et al.*, 2011). Essas etapas estão sintetizadas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas da metodologia



A seguir, todas as etapas serão explicitadas.

3.1 Etapa 1 - Definição do tema e escolha das palavras-chave

A definição do tema foi orientada pela relação entre transformações digitais na indústria e seus efeitos sobre competitividade, buscando capturar tanto o léxico consolidado (p.ex., “Industry 4.0”, “smart manufacturing”) quanto termos mais amplos associados a digitalização (“digital technolog*”). A estratégia de termos foi desenhada para equilibrar precisão e abrangência, evitando restringir o corpus a um único rótulo conceitual (Moral-Muñoz *et al.*, 2020). Com base nessa lógica, o conjunto final de termos de busca foi estruturado como: (“industry 4.0” OR “smart manufacturing” OR “digital technolog*”) AND (“competitiveness” OR “competitive advantage”), aplicado

aos campos de título, resumo e palavras-chave (TITLE-ABS-KEY) da base selecionada (Moral-Muñoz *et al.*, 2020).

3.2 Etapa 2 - Pesquisa das palavras-chave em bases de dados

Após a definição do tema e das palavras-chave, foi feita uma busca na base de dados Scopus, a escolha de usar o Scopus veio por sua relevância e abrangência na área do presente estudo. O Quadro 1 apresenta os critérios adotados para a execução da busca bibliográfica na base de dados escolhida para este estudo.

Quadro 1 - Filtros de pesquisa

Critérios considerados na pesquisa:	
Período de publicação	De 1999 a 2025
Tipo de documento	Artigos científicos
Área de estudo	Sem filtro
Idioma	Inglês

Fonte: Autores (2025).

O período de publicação foi delimitado de 1999 a 2025, tendo em vista que, com base nos critérios citados acima em conjunto com as palavras-chave, a primeira publicação documental foi feita no ano de 1999. Em relação ao tipo de documento considerado, optamos por artigos científicos, por tratarem-se de fontes que garantem um maior rigor de confiança. Não foram aplicados critérios em relação à área de estudo a fim de obter uma abordagem mais ampla e, por fim, selecionamos o idioma em inglês, em razão de ser o idioma mais usado entre as publicações analisadas.

A busca foi executada em outubro de 2025, diretamente na interface da Scopus, sem filtro de área do conhecimento. O funil amostral resultante foi o seguinte: a consulta inicial retornou 4.502 documentos; após a restrição ao tipo documental (artigo científico), restaram 2.092, e, com o idioma inglês, restaram 1.922, sendo esse o corpus final analisado no SciMAT. Cabe registrar que não foi realizada a etapa de triagem por leitura de títulos e resumos. Essa opção decorre da natureza do método: a análise de coocorrência de palavras-chave opera sobre o conjunto indexado e busca

representar o campo tal como registrado na base, e não uma seleção qualitativa de estudos. A ausência dessa triagem, contudo, admite a permanência de registros marginalmente aderentes ao escopo e é assumida como limitação do estudo, conforme discutido na seção 5.2.

3.3 Etapa 3 - Extração e importação dos artigos para o SciMAT

Subsequentemente a busca ser realizada na base de dados selecionada, foi feita uma revisão bibliométrica com o programa Science Mapping Analysis Software Tool (SciMAT). O SciMAT permite a visualização e o mapeamento do conjunto de artigos selecionados por meio de construções gráficas. O programa auxilia na identificação de temas e conceitos em tendência de uma determinada área de conhecimento. Todo o pré-processamento foi executado dentro do próprio SciMAT, no módulo de gestão da base de conhecimento, e não na interface da Scopus nem em ferramenta externa. Os registros foram exportados da Scopus em formato RIS e, já importados no software, os termos foram tratados pelas funções de agrupamento de palavras (word group manager). Nesse ambiente foram unificadas variações ortográficas e de hifenização (por exemplo, “industry 4.0”, “industry 4-0” e “industrie 4.0”), consolidados sinônimos (“smart factory” e “smart manufacturing”; “internet of things” e “IoT”), harmonizadas formas de singular e plural (“digital technology” e “digital technologies”) e removidos termos genéricos não informativos (“paper”, “study”, “approach”). Os agrupamentos foram construídos manualmente, item a item, e revisados pelos autores, o que reduz ruído e evita a fragmentação artificial de temas na rede de coocorrência (Cobo *et al.*, 2012; Cobo *et al.*, 2011).

3.4 Etapa 4 – Análises, testes e extração individual dos gráficos

3.4.1 Correção do recorte temporal e segmentação longitudinal

Para a análise longitudinal, o acervo foi segmentado em quatro períodos não sobrepostos e exaustivos: 1999–2010, 2011–2015, 2016–2020 e 2021–2024. O ano de 2025 foi mantido na série anual de produção (Figura 3), mas excluído da

segmentação longitudinal, por estar incompleto na data da coleta. Esse recorte evita sobreposições (que inviabilizam a replicação) e permite observar as fases de emergência, consolidação e tendências recentes do campo, conforme a lógica de análise longitudinal implementada no SciMAT (Cobo *et al.*, 2011; Cobo *et al.*, 2012).

3.4.2 Parâmetros explícitos do SciMAT para replicação

A configuração do SciMAT foi definida para análise de coocorrência de palavras-chave (co-word analysis), com parâmetros reportados de modo a permitir replicação. Especificamente: (a) unidade de análise: palavras-chave (keywords do registro); (b) tipo de rede: coocorrência; (c) medida de normalização: Equivalence Index; (d) algoritmo de clusterização: Simple Centers Algorithm; (e) métricas de desempenho/qualidade por tema: número de documentos, total de citações e h-index; (f) análise estratégica baseada em centralidade e densidade (Callon's centrality e density, conforme implementado pelo SciMAT); e (g) análise longitudinal com mapas de sobreposição/evolução para rastrear continuidade e mudanças entre períodos (Cobo *et al.*, 2012; Cobo *et al.*, 2011). Para reduzir ruído e manter densidade interpretável das redes por período, adotou-se redução por frequência mínima de termos e de ligações de coocorrência no wizard do SciMAT, preservando os elementos mais representativos sem comprometer a conectividade necessária à formação de clusters. Os limiares utilizados (redução de dados e redução de rede) foram mantidos constantes entre os períodos para garantir comparabilidade longitudinal (Cobo *et al.*, 2012; Cobo *et al.*, 2011).

A fim de eliminar a opacidade do procedimento e assegurar reprodutibilidade, detalham-se a versão do software e a execução de cada operação. As análises foram conduzidas no SciMAT versão v.1.1.06. A normalização das coocorrências adotou o índice de equivalência, definido como $e^{ij} = c^{ij2} / (c^i \cdot c^j)$, em que c^{ij} é o número de coocorrências entre os termos i e j , e c^i e c^j são suas ocorrências individuais; esse índice mede a força de associação entre termos independentemente de sua frequência absoluta, reduzindo o viés de termos muito frequentes (Cobo *et al.*, 2011). A clusterização pelo Simple Centers Algorithm parte dos termos de maior centralidade como núcleos (centros) e agrega iterativamente os termos vizinhos de maior

equivalência, formando temas internamente coesos. Procedimentos análogos com SciMAT e Scopus foram empregados por Cobo *et al.* (2011, 2012), Moral-Muñoz *et al.* (2020) e Sott *et al.* (2020), o que ampara metodologicamente as escolhas aqui reportadas.

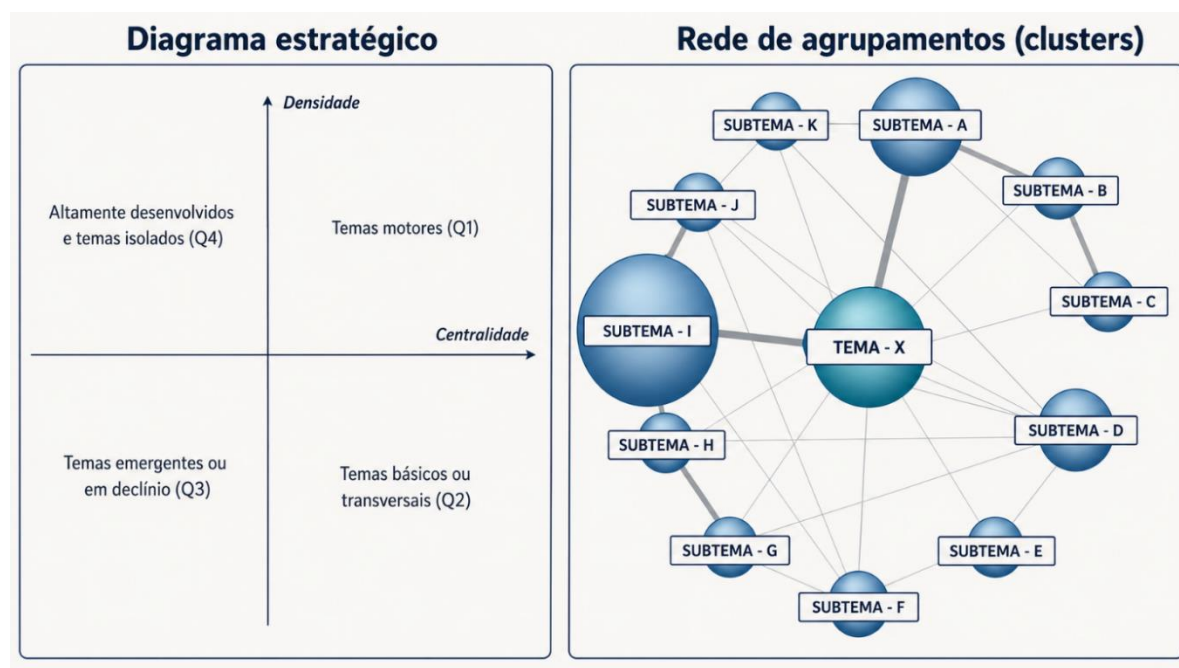
3.4.3 Saídas analíticas e interpretação

A interpretação foi conduzida principalmente por meio dos diagramas estratégicos (posição dos temas por centralidade/densidade) e pelas redes de clusters (estrutura interna e conexões) geradas pelo SciMAT, permitindo identificar temas motores, emergentes, básicos e declinantes, bem como trajetórias temáticas ao longo do tempo (Cobo *et al.*, 2011; Cobo *et al.*, 2012; Sott, 2020).

Os diagramas estratégicos são ferramentas essenciais para a análise de estruturas temáticas em campos de pesquisa. Os gráficos utilizam métricas baseadas em centralidade e densidade para classificar e visualizar as relações entre grupos temáticos. A centralidade mede a importância de um tema em termos de elos externos, indicando sua importância para a estrutura geral do campo. A densidade avalia a força das conexões internas de um grupo, representando o grau de desenvolvimento interno do tema. A Figura 2 mostra como a distribuição dos temas nos diagramas estratégicos está organizada, são quatro quadrantes ao total: no canto superior direito estão os temas motores (Q1), que combinam alta centralidade e alta densidade, sendo essenciais para o desenvolvimento da área pois é onde localiza-se temas centrais que impulsionam a pesquisa, servindo como o eixo em torno do qual outros elementos estão conectados; no canto inferior direito (Q2) estão temas em desenvolvimento ou em declínio, com alta centralidade mas baixa densidade, sugerindo importância externa mas pouco desenvolvimento interno; no canto superior esquerdo (Q4) estão temas muito desenvolvidos e isolados, caracterizados por uma forte coesão interna, mas pouca ligação externa; e no canto inferior esquerdo (Q3) estão os temas emergentes, que apresentam baixa densidade e centralidade, indicando menor desenvolvimento e poucos vínculos com outros temas. Estes diagramas permitem uma visão ampla e estruturada da dinâmica temática, que serve como uma ferramenta valiosa para identificar áreas-chave, tendências emergentes e

lacunas nas áreas de pesquisa. A lógica de classificação por quadrantes aqui descrita segue a proposta de Callon, Courtial e Laville, operacionalizada no SciMAT (Cobo *et al.*, 2011; Sott *et al.*, 2020). Já a Rede de agrupamentos (clusters), também presente na Figura 2, apresenta um modelo de rede, com um tema central, "THEME-X", interligado a diversos subtemas. Os subtemas, identificados pelas letras A a K, são representados como nós, com o tamanho de cada nó indicando sua importância relativa. A espessura das linhas que conectam os nós reflete a intensidade da relação entre os tópicos. Esse gráfico permite visualizar como os diferentes subtemas se interconectam e contribuem para o entendimento do tema principal. Como exemplo podemos citar o subtema I, que dentre os demais, se destaca com maior relevância na rede apresentada.

Figura 2 - Diagramas estratégicos e rede de agrupamentos (clusters)



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Cobo *et al.* (2011) e Sott *et al.* (2020).

3.5 Etapa 5 - Resultados e análises

Por fim, os outputs do SciMAT foram sintetizados para descrever padrões temporais (crescimento, estabilidade e mudanças), composição temática por período e conexões longitudinais, articulando os achados com o objetivo do estudo e

destacando tendências e lacunas para pesquisas futuras (Cobo *et al.*, 2011; Moral-Muñoz *et al.*, 2020).

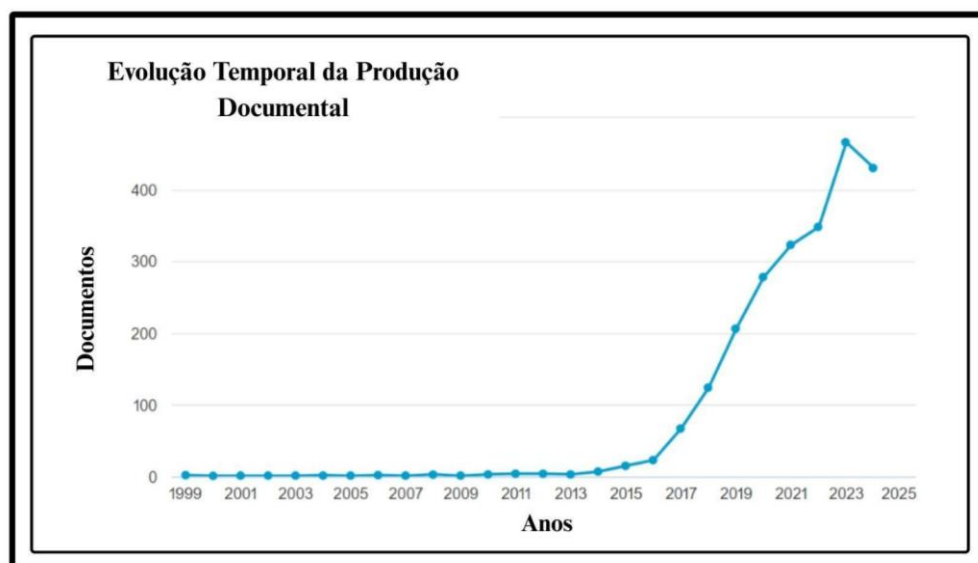
4 RESULTADOS

A seção de resultados apresenta a evolução temporal da produção científica e a dinâmica temática do campo que relaciona Indústria 4.0 e competitividade. Inicialmente, descreve-se o comportamento das publicações ao longo do tempo (Figura 3) e a expansão/conectividade temática entre períodos (Figura 4). Em seguida, discute-se a reestruturação dos temas a partir dos diagramas estratégicos do SciMAT por período (Figura 5) e aprofunda-se a análise especificamente para o núcleo temático associado à competitividade nos dois períodos mais recentes (Figura 6), considerando o recorte longitudinal definido na metodologia: 1999–2010; 2011–2015; 2016–2020; 2021–2024.

4.1 Evolução temporal da produção científica

A Figura 3, construída a partir da última atualização da base realizada em outubro de 2025, evidencia que, entre 1999 e 2025, houve crescimento discreto no número de publicações até aproximadamente 2015, seguido por um aumento expressivo. Observa-se pico em 2023 e leve redução em 2024-2025, o que sugere interesse da comunidade científica na relação entre transformação industrial/digital e competitividade.

Figura 3 - Evolução temporal da produção documental



Fonte: Autores (2025).

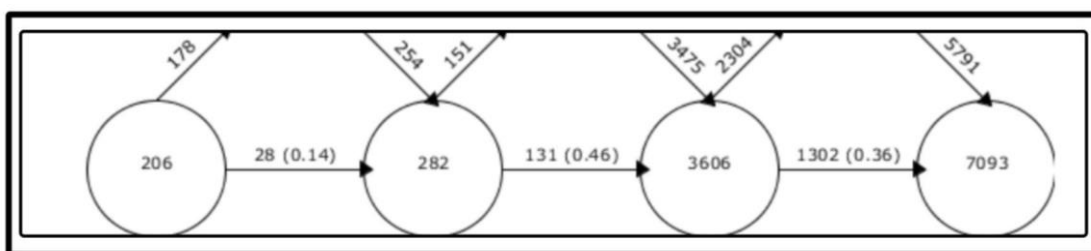
A leve redução observada em 2024–2025 não deve ser interpretada como perda de relevância do tema, admitindo ao menos três hipóteses complementares. A primeira é a defasagem de indexação na Scopus, que tipicamente subestima os anos mais recentes em razão do atraso de processamento e da inclusão progressiva de periódicos. A segunda é a maturação do campo, com a migração de parte da produção para temas derivados, como “digital transformation”, “sustainability” e “artificial intelligence”, que podem não ser plenamente capturados pela string específica deste estudo. A terceira é o efeito da janela de coleta, dado que os registros de 2025 ainda estavam em consolidação no momento da extração.

4.2 Expansão e interconexão temática entre períodos

Complementarmente, a Figura 4 (mapa de sobreposição) indica uma ampliação contínua do campo, representada pelo aumento do volume de publicações em cada período e pela maior interconexão entre os tópicos ao longo do tempo. As conexões sugerem continuidade temática, mas também reconfigurações progressivas, com temas que se transformam, se combinam ou se deslocam de posição conforme o campo amadurece.

Para a correta leitura da Figura 4, esclarece-se o significado dos números exibidos. O valor dentro de cada círculo indica a quantidade de palavras-chave (temas) presentes naquele período; os números sobre as setas horizontais que ligam períodos consecutivos representam o índice de estabilidade, isto é, a quantidade (ou proporção) de temas compartilhados entre os dois períodos; e as setas que entram ou saem na vertical contabilizam, respectivamente, os temas novos que surgem e os que deixam de aparecer na transição. Valores mais altos de compartilhamento indicam maior continuidade temática, ao passo que a entrada de novos termos sinaliza renovação da agenda de pesquisa. Dessa forma, a figura não apenas evidencia o crescimento do volume, mas quantifica a permanência e a renovação dos temas ao longo do tempo.

Figura 4 - Mapa de Expansão da Produção Artigos



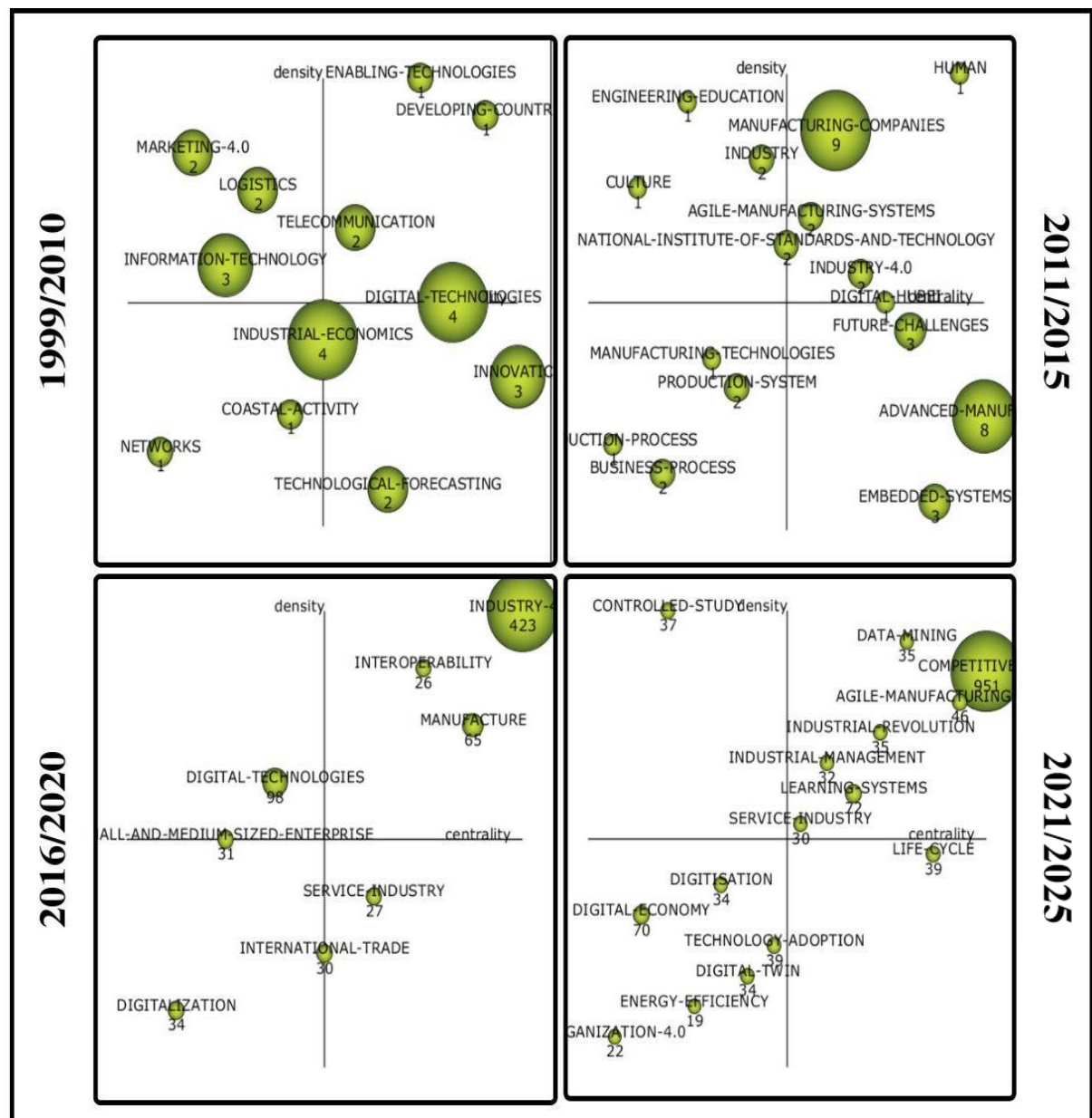
Fonte: Autores (2025).

A leitura desses valores revela três movimentos. O primeiro é a expansão acelerada do campo: o número de palavras-chave cresce gradativamente, com salto mais acentuado a partir de 2016, o que confirma quantitativamente a consolidação temática já sugerida pela série anual. O segundo é o aumento progressivo da estabilidade entre períodos consecutivos: o índice de temas compartilhados indica que o vocabulário do campo deixa de se reinventar a cada período e passa a acumular um núcleo conceitual persistente. O terceiro é a renovação continuada: mesmo com estabilidade crescente, o volume de termos que entram a cada período permanece elevado, o que sugere um campo simultaneamente consolidado em seu núcleo e permeável a novas agendas, como sustentabilidade e economia digital. Em conjunto, esses três movimentos sustentam a interpretação de maturidade do campo: há um eixo estável de discussão, mas ele continua incorporando dimensões novas em vez de se fechar.

4.3 Evolução e reestruturação temática nos quatro períodos

A Figura 5 sintetiza a dinâmica temática do campo por meio dos diagramas estratégicos, permitindo identificar temas centrais e sua evolução longitudinal.

Figura 5 - Resultados diagramas estratégicos



Fonte: Autores (2025).

No primeiro período (1999–2010), emergem como temas motores “Enabling technologies” e “digital technologies”, sinalizando uma fase inicial em que o debate se

organiza em torno de fundamentos tecnológicos associados à digitalização e inovação. Ainda nesse período, observa-se a presença de “innovation”, que não se mantém com o mesmo rótulo nos períodos seguintes, sugerindo reorganização do campo e mudanças na forma de enquadrar o fenômeno.

No segundo período (2011–2015), observa-se um movimento de diversificação temática e ampliação das conexões, indicando que o campo passa a incorporar novos enfoques e termos relacionados, o que tende a preparar a consolidação posterior de um núcleo mais claramente associado à Indústria 4.0. Esse comportamento é consistente com a transição de um debate centrado em tecnologias digitais para uma estrutura conceitual mais definida.

No terceiro período (2016–2020), “industry 4.0” se consolida como tema central/motor, refletindo o amadurecimento do conceito e sua incorporação como eixo organizador do campo. Paralelamente, conceitos associados à gestão e às transformações industriais, como “industrial management” e termos ligados a manufatura, aparecem como elementos que reforçam a continuidade do debate, agora mais alinhado à noção de sistemas produtivos inteligentes e interconectados.

No período mais recente (2021–2025), os resultados indicam um deslocamento para uma perspectiva mais ampla e estratégica, em que “industrial revolution” assume papel estruturante e o tema “competitiveness” ganha centralidade. Essa mudança sugere que o campo passa a discutir não apenas tecnologias e implementação, mas também efeitos estruturais e estratégicos dessas transformações sobre o desempenho competitivo, articulando a Indústria 4.0 dentro de uma trajetória mais abrangente de evolução industrial.

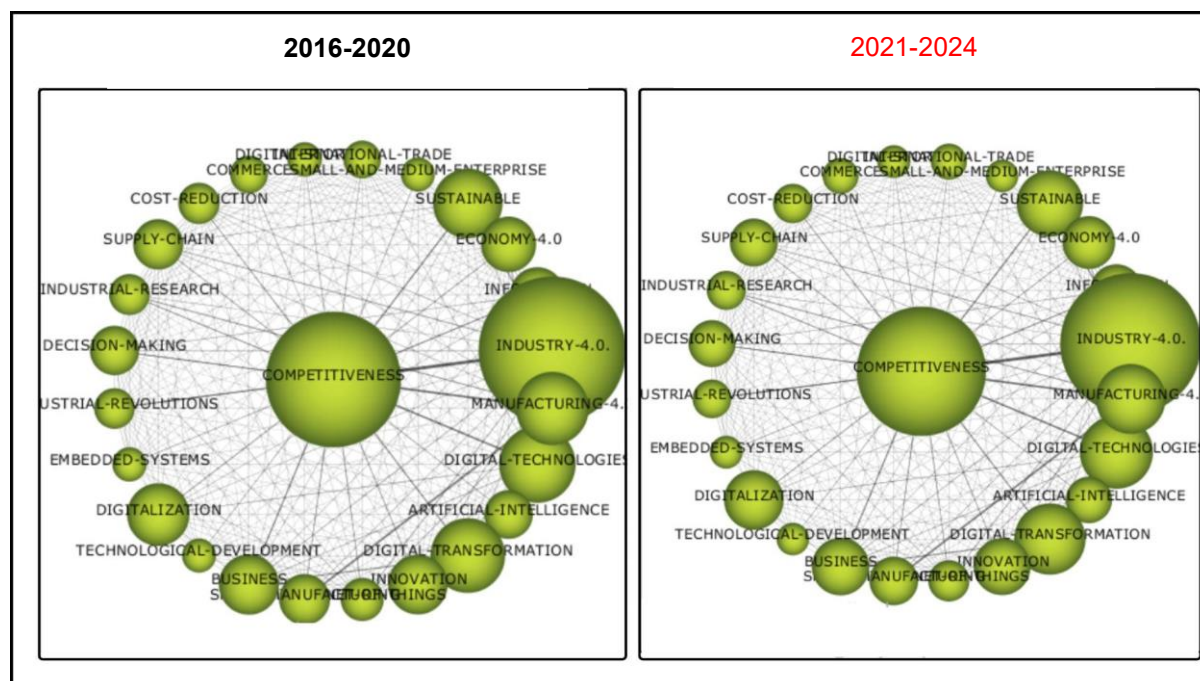
Quanto ao critério de catalogação dos termos nos diagramas (Figura 5), cada rótulo corresponde a uma palavra-chave normalizada do corpus, posicionada segundo a centralidade e a densidade calculadas pelo SciMAT; a denominação de cada cluster adota o termo de maior centralidade interna como representante do agrupamento. Termos aparentemente periféricos ao escopo industrial, como “coastal-activity”, surgem precisamente porque a busca, sem filtro de área, recupera aplicações setoriais específicas; neste caso, o termo agrega estudos sobre competitividade e digitalização em atividades costeiras, portuárias e de logística marítima. Optou-se por preservar tais termos, em vez de descartá-los, para não enviesar a leitura da

abrangência real do campo e para sinalizar ao leitor a difusão da Indústria 4.0 para setores não estritamente manufatureiros. A transição entre períodos permite uma inferência adicional. O deslocamento de “enabling technologies” para “industry 4.0” e, depois, para “competitiveness” e “industrial revolution” indica que o campo migrou de uma agenda centrada no artefato tecnológico para uma agenda centrada nos efeitos estratégicos e estruturais da digitalização, movimento coerente com o amadurecimento esperado de uma trajetória tecnológica. A título de ilustração, estudos da amostra que sustentam esse núcleo incluem trabalhos sobre manufatura inteligente e desempenho (Zhong *et al.*, 2017; Buer *et al.*, 2021) e sobre maturidade e competitividade digital (GÖKALP; ŞENER; EREN, 2017).

4.4 Rede de clusters: competitividade nos períodos recentes

A Figura 6 aprofunda o entendimento do núcleo temático de competitividade, comparando as redes de clusters de 2016–2020 e 2021–2024.

Figura 6 - Rede de Clusters nos períodos de 2016-2020 e 2021-2024



Fonte: Autores (2025).

Em 2016–2020, a competitividade aparece fortemente associada à digitalização, à inteligência artificial e à transformação digital, com destaque para elementos ligados à modernização do processo produtivo, como manufatura 4.0 e automação industrial, sugerindo uma ênfase competitiva centrada em eficiência e inovação tecnológica.

Em 2021–2024, a rede de competitividade se torna mais complexa e interconectada. A digitalização permanece como elemento central, porém sustentabilidade e economia digital passam a aparecer com relevância semelhante, indicando mudança no modo como a competitividade é tratada na literatura recente. Nesse período, a Indústria 4.0 deixa de ser apenas um vetor tecnológico e passa a ser discutida também como modelo operacional e estratégico, em que a capacidade de atuar em mercados digitais e globais, bem como de responder a exigências ambientais e regulatórias, se integra às estratégias competitivas.

A partição entre os períodos 2016–2020 e 2021–2024 permite uma leitura para além do que os grafos mostram, ao situar a pandemia de COVID-19 como possível inflexão. A emergência simultânea de “economia digital” e “sustentabilidade” como termos de relevância equivalente à digitalização sugere que a ruptura de cadeias e o trabalho remoto aceleraram a percepção da transformação digital como condição de resiliência competitiva, e não apenas de eficiência. Em outras palavras, a mudança temática não reflete somente a evolução natural da tecnologia, mas também uma resposta a um choque exógeno que reposicionou prioridades gerenciais, deslocando o foco da otimização de custos para a continuidade operacional, a flexibilidade e a conformidade socioambiental. Tal interpretação é coerente com a literatura que associa Indústria 4.0 a sustentabilidade e a sistemas alimentares e produtivos resilientes (Hassoun, 2025; Chirumalla *et al.*, 2025), e ajuda a explicar por que o núcleo de competitividade se torna mais heterogêneo no período recente.

4.5 Síntese dos achados frente às questões de pesquisa

Os resultados sustentam a existência de interconexão direta entre Indústria 4.0 e competitividade, na medida em que o núcleo competitivo se organiza, sobretudo a partir de 2016, em torno de digitalização e modernização de processos (2016–2020)

e, posteriormente, incorpora com maior intensidade dimensões estratégicas relacionadas a sustentabilidade e economia digital (2021–2024). Essa trajetória também evidencia mudança de padrão: o campo evolui de temas mais tecnológicos/fundacionais (1999–2010) para a consolidação do conceito de Indústria 4.0 como eixo central (2016–2020) e, por fim, para a ampliação do debate em direção a efeitos estruturais e estratégicos sobre competitividade (2021–2024). Além disso, os achados indicam que a competitividade na era digital não é explicada apenas por inovação e digitalização, mas também por fatores associados à sustentabilidade e à inserção em mercados digitais. Por fim, quanto aos setores estudados, observa-se maior incidência de discussões vinculadas à manufatura 4.0 e à automação industrial, com crescimento de tópicos associados a sustentabilidade e transformação digital no período mais recente.

4.6 Discussão e implicações gerenciais

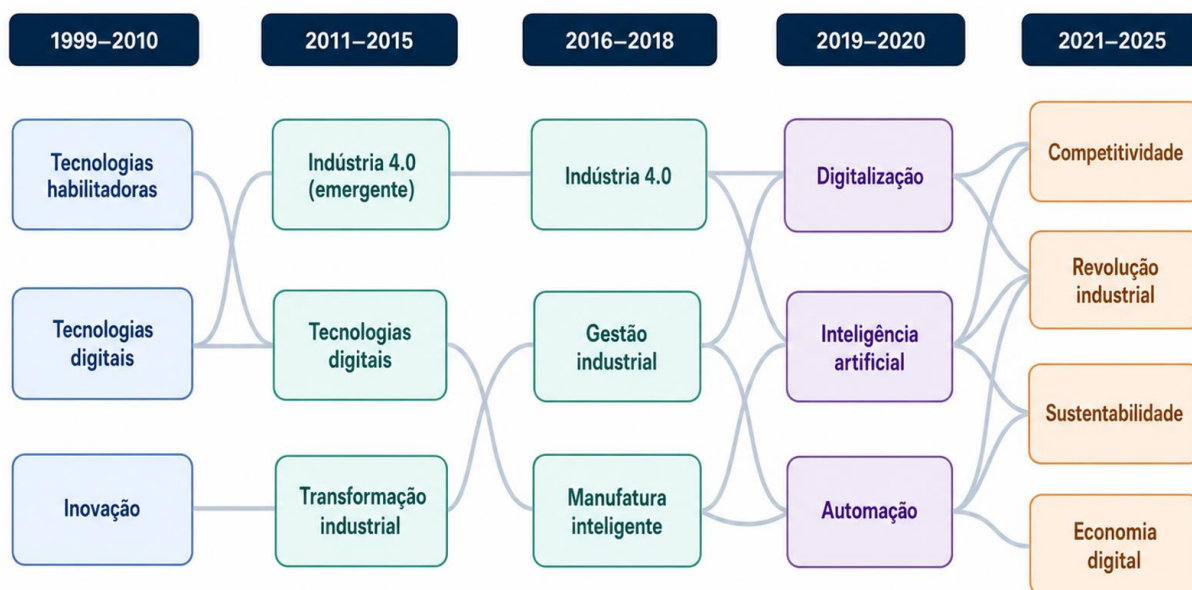
Para além do mapeamento bibliométrico, importa transpor os achados para a gestão estratégica da produção. A evolução dos temas motores detectados, de tecnologias habilitadoras para Indústria 4.0 e, depois, para competitividade e sustentabilidade, oferece três orientações práticas. Primeira, as decisões de investimento em digitalização devem ser pautadas por objetivos competitivos explícitos (redução de paradas, aumento de disponibilidade via OEE, encurtamento de prazos), e não pela adoção de tecnologia como fim em si; a constatação de que nem toda tecnologia contribui igualmente para o desempenho (Dalenogare *et al.*, 2018) reforça a necessidade de priorização. Segunda, a centralidade crescente de capacidades organizacionais indica que o retorno dos projetos depende de competências, governança de dados e gestão da mudança, de modo que programas de qualificação e redesenho de processos devem acompanhar a aquisição de equipamentos. Terceira, a entrada de sustentabilidade e eficiência energética como dimensões competitivas sugere que indicadores ambientais e energéticos passem a integrar o painel de desempenho industrial, alinhando competitividade e conformidade socioambiental.

No contexto da indústria brasileira, o corpus internacional sinaliza um caminho de maturação que, no Brasil, esbarra em barreiras já documentadas: heterogeneidade de maturidade digital entre setores e portes, restrições de infraestrutura e de capital, escassez de mão de obra qualificada e instabilidade econômico-institucional, fatores especialmente críticos em economias emergentes (Dalenogare *et al.*, 2018; Chirumalla *et al.*, 2025). Para a indústria nacional, majoritariamente composta por pequenas e médias empresas, isso implica que a conversão de digitalização em competitividade tende a ser mais lenta e dependente de políticas de fomento, formação técnica e arranjos colaborativos (clusters, institutos SENAI/Embrapii, universidades). Os temas emergentes identificados (economia digital, sustentabilidade) representam, nesse cenário, oportunidades concretas de diferenciação para setores agroindustriais e manufatureiros brasileiros, desde que acompanhados de capacidades organizacionais compatíveis.

5 CONSIDERAÇÕES

Este estudo analisou, por meio de mapeamento bibliométrico no SciMAT, a evolução da produção científica relacionada a Indústria 4.0 e competitividade, com recorte longitudinal estruturado em quatro períodos (1999–2010; 2011–2015; 2016–2020; 2021–2024). Os resultados mostram que a literatura não evoluiu de forma linear, mas por “ondas” temáticas, nas quais os conceitos passam por fases de dispersão, emergência, consolidação e integração estratégica, com mudança clara na forma como a competitividade é discutida ao longo do tempo. A Figura 7 fornece uma visão temporal sobre a evolução do conceito de Indústria 4.0 e suas conexões com outras questões emergentes. O período 2016–2020 aparece na Figura 7 em dois subintervalos. Entre 2016 e 2018 predominam “Indústria 4.0” e “Gestão Industrial”, ao passo que, entre 2019 e 2020, ganham força “Digitalização”, “Inteligência Artificial” e “Automação”. Essa distinção evidencia que o deslocamento em direção à centralidade da competitividade já se prenuncia ao final desse período.

Figura 7 - Resumo dos resultados (temas em evidência)



Fonte: Autores (2025).

No período 1999–2010, o campo ainda se apresenta esparso, com baixa conectividade e sem um eixo temático dominante. Em termos bibliométricos, trata-se de uma fase anterior à consolidação do rótulo “Indústria 4.0” como organizador do debate, com pesquisas mais fragmentadas e sem densidade suficiente para caracterizar um foco teórico claro. Essa dispersão sugere que o conhecimento relacionado à digitalização industrial e às capacidades competitivas ainda estava distribuído em subagendas, sem se articular em um paradigma específico.

Entre 2011 e 2015, observa-se uma mudança qualitativa: o campo passa a se reorganizar em torno da Indústria 4.0 como conceito agregador, deslocando o debate das tecnologias digitais genéricas para um enquadramento mais estruturado da transformação industrial. Essa etapa pode ser compreendida como uma fase de emergência e de consolidação conceitual inicial, em que o termo Indústria 4.0 ganha tração e passa a orientar a forma de categorizar aplicações, desafios e promessas do novo paradigma, ainda com forte componente de definição, delimitação e amadurecimento teórico.

No período 2016–2020, a Indústria 4.0 se intensifica e consolida-se como eixo central do campo. Os resultados indicam um aumento relevante na produção científica e maior conectividade entre os tópicos, sugerindo que a agenda ultrapassa a fase de

“definição do conceito” e passa a priorizar a implementação, a integração tecnológica e o redesenho de operações. Em termos interpretativos, essa fase representa a consolidação do paradigma e o deslocamento para discussões mais aplicadas, em que a Indústria 4.0 deixa de ser apenas um “tema emergente” e passa a constituir um referencial recorrente para explicar a modernização de processos e a transformação da manufatura.

No período mais recente analisado (2021–2024), mantém-se a relevância da Indústria 4.0, mas ocorre um avanço decisivo: o campo passa a integrá-la de forma mais explícita com tecnologias digitais e, sobretudo, com a competitividade como dimensão central de análise. Ou seja, a Indústria 4.0 deixa de ser tratada predominantemente como um conjunto de iniciativas tecnológicas e passa a ser discutida como base para decisões estratégicas e para mecanismos de geração de vantagem competitiva. Esse movimento também acompanha a ampliação do debate para dimensões mais complexas (como sustentabilidade e economia digital, conforme indicado nos resultados), sugerindo uma maior maturidade do campo: o foco se desloca do “como implementar” para “como gerar valor competitivo, sustentar o desempenho e responder a novas exigências de mercado e de regulação”.

Em relação às questões de pesquisa, os resultados sustentam que existe interconexão direta entre Indústria 4.0 e competitividade; porém, essa conexão se fortalece de forma mais clara a partir da consolidação do conceito (especialmente a partir de 2016). Também se observa uma mudança de padrão: a competitividade deixa de ser tratada apenas como consequência da inovação/digitalização e passa a incorporar uma visão mais ampla, associada a tecnologias digitais e a dimensões estratégicas emergentes no período recente. Consequentemente, os achados indicam que a competitividade empresarial na era digital não é impulsionada apenas por inovação e digitalização em sentido estrito, mas por um conjunto mais amplo de mecanismos e exigências que ganham força no debate contemporâneo. Por fim, quanto aos tipos de indústrias analisados na literatura recente, o núcleo permanece fortemente relacionado a aplicações industriais e à manufatura, com uma crescente diversidade de enfoques no período mais recente.

5.1 Contribuição central e implicações para pesquisa e prática

A principal entrega deste artigo é uma síntese longitudinal baseada em evidências que organiza como a literatura evoluiu, ao longo do tempo, na articulação entre Indústria 4.0 e competitividade. Diferentemente de abordagens que discutem o tema de forma ampla e descritiva, o estudo demonstra que o campo passou por fases distintas: desde uma produção inicial dispersa (1999–2010), seguida pela emergência do rótulo Indústria 4.0 como eixo estruturante (2011–2015) e sua forte consolidação (2016–2020), até alcançar um estágio recente em que a Indústria 4.0 permanece relevante, mas passa a se relacionar de forma mais direta com tecnologias digitais e com competitividade como foco explícito (2021–2024). Essa leitura, sintetizada também na Figura 7, oferece um panorama que permite compreender não apenas o crescimento do campo, mas sobretudo a mudança no modo como competitividade é tratada e conectada à transformação industrial.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui ao reduzir a dispersão típica de um tema amplo e ao explicitar trajetórias e convergências temáticas. Essa entrega apoia a condução de novas pesquisas com maior precisão, pois facilita a identificação do que já está consolidado e do que se apresenta como direção recente do campo. Assim, o mapeamento pode orientar a formulação de estudos que avancem de forma mais rápida e cumulativa, concentrando esforços em tópicos mais promissores e evitando duplicação de abordagens já saturadas, especialmente na transição do debate de “implementação de Indústria 4.0” para “mecanismos de competitividade apoiados por tecnologias digitais”. Para a Engenharia de Produção, especificamente, esses achados conectam-se a agendas consolidadas da área, como gestão de operações, qualidade, manutenção, gestão da tecnologia e estratégia de produção, oferecendo um mapa para posicionar novas contribuições e evitar esforços redundantes.

Do ponto de vista prático, os resultados reforçam que a Indústria 4.0 vem sendo discutida, no período recente, menos como um conjunto isolado de iniciativas tecnológicas e mais como um meio de sustentar a competitividade em ambientes digitais. Essa evidência pode apoiar gestores e organizações ao posicionar investimentos e decisões de transformação digital sob uma lógica estratégica: não

apenas “adotar tecnologia”, mas orientar a adoção para objetivos competitivos explícitos, alinhando tecnologias digitais a resultados esperados. Em síntese, o artigo funciona como referencial de priorização: indica como o debate evoluiu e quais dimensões passaram a ser centrais, oferecendo subsídios para decisões mais informadas tanto para a pesquisa quanto para a prática. Concretamente, esse referencial de priorização pode ser usado para: orientar editais e linhas de pesquisa em direção a temas emergentes e de alta centralidade (competitividade digital, sustentabilidade); apoiar gestores na seleção de tecnologias com maior retorno competitivo comprovado; e subsidiar a formulação de roteiros de transformação digital que articulem investimento tecnológico, desenvolvimento de competências e metas de desempenho e sustentabilidade. Assim, mais do que descrever a evolução do campo, o estudo aponta onde concentrar esforços futuros.

5.2 Limitações da pesquisa

Este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Primeira, a coleta restringiu-se à base Scopus e a artigos em inglês, o que pode subestimar a produção indexada exclusivamente em outras bases (Web of Science, SciELO) ou publicada em português e espanhol, restrição relevante para a leitura do caso brasileiro. Segunda, a análise por coocorrência de palavras-chave depende da qualidade e da padronização dos termos atribuídos pelos autores e pela base, o que, apesar das rotinas de limpeza, não elimina por completo ruídos e ambiguidades. Terceira, os parâmetros de redução e clusterização do SciMAT, ainda que mantidos constantes, envolvem escolhas que influenciam a granularidade dos temas; valores alternativos poderiam produzir agrupamentos distintos. Quarta, a defasagem de indexação dos anos mais recentes limita conclusões sobre 2024–2025. Quinta, não foi realizada triagem por leitura de títulos e resumos, procedimento coerente com a natureza da análise de coocorrência, mas que admite a permanência, no corpus, de registros apenas marginalmente aderentes ao escopo e pode introduzir ruído em temas periféricos. Por fim, trata-se de estudo descritivo-bibliométrico, que mapeia tendências, mas não estabelece relações causais entre adoção de Indústria 4.0 e ganhos de competitividade.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

A partir das correlações ainda pouco exploradas identificadas neste mapeamento, sugerem-se as seguintes direções: (i) ampliar o corpus com Web of Science e SciELO e incluir publicações em português e espanhol, viabilizando comparação entre a agenda internacional e a nacional; (ii) conduzir estudos de caso e surveys que testem empiricamente o papel mediador das capacidades organizacionais entre adoção tecnológica e competitividade; (iii) investigar de forma integrada a relação entre Indústria 4.0, sustentabilidade e eficiência energética, dimensões que emergem conjuntamente mas raramente são modeladas juntas; (iv) aprofundar a análise do nó “economia digital”, examinando como modelos de negócio digitais afetam a competitividade de manufatura e agroindústria; (v) realizar análises bibliométricas complementares com acoplamento bibliográfico e co-citação, que captem a estrutura intelectual subjacente à estrutura conceitual aqui mapeada; (vi) testar empiricamente, por setor, quais tecnologias habilitadoras efetivamente convertem digitalização em vantagem competitiva; e (vii) aprofundar o exame de pequenas e médias empresas e de economias emergentes, segmentos sub-representados na literatura internacional e especialmente relevantes para o caso brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ALAMSYAH, D.; ARYANTO, R.; UTAMA, I.; MARITA, L.; OTHMAN, N. O modelo antecedente do cliente de consciência verde. **Management Science Letters**, v. 10, n. 11, p. 2431-2436, 2020. DOI: 10.5267/j.msl.2020.4.007.
- ANJUM, M.; KRAIEM, N.; MIN, H. *et al.* Otimizando a sustentabilidade: agregação de informações em fábricas inteligentes para aumento da eficiência energética. **Scientific Reports**, v. 15, art. 8603, 2025. DOI: 10.1038/s41598-024-83304-8.
- BUER, S.-V.; STRANDHAGEN, J. W.; SEMINI, M.; STRANDHAGEN, J. O. A digitalização da manufatura: investigando o impacto do ambiente de produção e do tamanho da empresa. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 32, n. 3, p. 621-645, 2021. DOI: 10.1108/JMTM-05-2019-0174.
- CALANDRELI, P. R.; VALLE, P. D.; DESCHAMPS, F. Maximizando a eficiência operacional com a tecnologia da Indústria 4.0: integrando o OEE como indicador de desempenho. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 138, p. 855-872, 2025. DOI: 10.1007/s00170-025-15408-y.

CHIRUMALLA, K.; OGHAZI, P.; NNEWUKU, R. E. *et al.* Fatores críticos que afetam a transformação digital em empresas de manufatura. **International Entrepreneurship and Management Journal**, v. 21, art. 54, 2025. DOI: 10.1007/s11365-024-01056-3.

COBO, M. J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIDEIRA, E.; HERRERA, F. SciMAT: A new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 63, n. 8, p. 1609–1630, 2012. DOI: 10.1002/asi.22688. IDEAS/RePEc

COBO, M. J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIDEIRA, E.; HERRERA, F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: a practical application to the Fuzzy Sets Theory field. **Journal of Informetrics**, v. 5, n. 1, p. 146–166, 2011. DOI: 10.1016/j.joi.2010.10.002.

CULOT, Giovanna; NASSIMBENI, Guido; ORZES, Guido; SARTOR, Marco. Behind the definition of Industry 4.0: analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, v. 226, art. 107617, 2020. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107617.

DALENOGARE, Lucas Santos; BENITEZ, Guilherme Brittes; AYALA, Néstor Fabián; FRANK, Alejandro Germán. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018. DOI: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019.

FANG, Xiaohui; SONG, Qinghua; LI, Zhenyang; WANG, Xiaojuan; MA, Haifeng; LIU, Zhanqiang. Intelligent monitoring system for production lines in smart factories: a hybrid method integrating Transformer and Kalman filter. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 79, p. 27-47, 2025. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.12.014.

GÖKALP, E.; ŞENER, U.; EREN, P. E. Desenvolvimento de um Modelo de Avaliação para a Indústria 4.0: Indústria 4.0-MM. In: MAS, A.; MESQUIDA, A.; O'CONNOR, R.; ROUT, T.; DORLING, A. (org.). **Software Process Improvement and Capability Determination (SPICE, 2017)**. Cham: Springer, 2017. (Communications in Computer and Information Science, v. 770). DOI: 10.1007/978-3-319-67383-7_10.

HASSOUN, A. Sustentabilidade alimentar 4.0: aproveitando as tecnologias da quarta revolução industrial para sistemas alimentares sustentáveis. **Discover Food**, v. 5, art. 171, 2025. DOI: 10.1007/s44187-025-00461-z.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Princípios de design para cenários da Indústria 4.0. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES (HICSS), 49., 2016, Koloa, HI. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2016. p. 3928-3937. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488.

HOFMANN, Erik; RÜSCH, Marco. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23-34, 2017. DOI: 10.1016/j.compind.2017.04.002.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G. *et al.* Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, p. 239-242, 2014. DOI: 10.1007/s12599-014-0334-4.

LIAO, Yongxin; DESCHAMPS, Fernando; LOURES, Eduardo de Freitas Rocha; RAMOS, Luiz Felipe Pierin. Passado, presente e futuro da Indústria 4.0 – uma revisão sistemática da literatura e proposta de agenda de pesquisa. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017. DOI: 10.1080/00207543.2017.1308576.

LORENZ, R.; BENNINGHAUS, C.; FRIEDLI, T.; NETLAND, T. H. Digitalização da manufatura: o papel da busca externa. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 40, n. 7/8, p. 1129-1152, 2020. DOI: 10.1108/IJOPM-06-2019-0498.

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

MORAL-MUÑOZ, José A.; HERRERA-VIDEMA, Enrique; SANTISTEBAN-ESPEJO, Antonio; COBO, Manuel J. Ferramentas de software para conduzir análises bibliométricas em ciências: uma revisão atualizada. **El Profesional de la Información**, v. 29, n. 1, 2020. DOI: 10.3145/epi.2020.ene.03.

MÜLLER, Juliano Mário; KIEL, Daniel; VOIGT, Kai-Ingo. O que impulsiona a implementação da Indústria 4.0? O papel das oportunidades e desafios no contexto da sustentabilidade. **Sustainability**, v. 10, n. 1, e247, 2018.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Revisão de literatura sobre Indústria 4.0 e tecnologias relacionadas. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, p. 127-182, 2020. DOI: 10.1007/s10845-018-1433-8.

PANG, Huiyuan; ZHEN, Lu. Production scheduling optimization for manufacturing cells in smart factory. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 201, art. 104223, 2025. DOI: 10.1016/j.tre.2025.104223.

ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A complex view of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, 2016. DOI: 10.1177/2158244016653987.

SANTOS, R. C.; MARTINHO, J. L. Uma proposta de modelo de maturidade para a Indústria 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 1023-1043, 2020. DOI: 10.1108/JMTM-09-2018-0284.

SHAN, P.; SONG, M.; JU, X. Orientação empreendedora e desempenho: a velocidade da inovação é um elo perdido? **Journal of Business Research**, v. 69, n. 2, p. 683-690, 2016. DOI: 10.1016/j.jbusres.2015.08.032.

ŚLUSARCZYK, B. Industry 4.0 – are we ready? **Polish Journal of Management Studies**, v. 17, n. 1, p. 232-248, 2018. DOI: 10.17512/pjms.2018.17.1.19.

SOTT, Michele Kremer; BENDER, Mariluza Sott; FURSTENAU, Leonardo Bertolin; MACHADO, Laura Moraes; COBO, Manuel J.; BRAGAZZI, Nicola. The use of science mapping software tools in the health sciences: a scoping review. **Frontiers in Psychology**, v. 11, art. 598676, 2020. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.598676.

VAIDYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh. Industry 4.0 – a glimpse. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 233-238, 2018. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.

VETRIVEL, S. C.; SARAVANAN, T. P.; MAHESWARI, R. Fábricas inteligentes e eficiência energética na Indústria 4.0. In: CHOUDHURY, Tanupriya; SINGH, Rahul Kumar; TOMAR, Ravi; BALAMURUGAN, S.; PATNI, J. C. (Ed.). **Sistemas distribuídos sensíveis ao tempo**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2025. cap. 4. DOI: 10.1002/9781394197798.ch4.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Indústria 4.0: estado da arte e tendências futuras. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806.

YAN YI, L.; AB LATIB, H.; RATNASINGAM, J. *et al.* Readiness for and adoption of Industry 4.0 among small and medium-sized enterprises in the Malaysian furniture industry. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 8289-8308, 2021. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/readiness-for-and-adoption-of-industry-4-0-among-small-and-medium-sized-enterprises-in-the-malaysian-furniture-industry/>

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.

Biografia do(s) autor(es)

Ismael Cristofer Baierle

Professor Adjunto no curso de Engenharia de Produção e no Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Agroindustriais da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), campus Santo Antônio da Patrulha. Sua titulação mais alta é Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas, obtido na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Atua em pesquisas nas áreas de Inovação e Competitividade, com foco em Indústria 4.0, Agricultura 4.0 e Transformação Digital, além de desenvolver estudos e aplicações em otimização de processos, análise multicritério para tomada de decisão e Smart Energy.

Laís da Silva Benetti Santos

Graduanda em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), campus Santo Antônio da Patrulha. Sua especialidade/interesses concentram-se em extensão universitária, ensino e marketing aplicado a projetos educacionais, com experiência prática em desenvolvimento e gestão de iniciativas estudantis (como os projetos Drive – PET e PET Recicla +), além de atuação em logística e organização de eventos e atividades de docência.



Artigo recebido em: 07/01/2026 e aceito para publicação em: 09/08/2026

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v26i3.5806>