

FÓRUM

Submetido 18-04-2024. Aprovado 05-08-2025

Avaliado pelo sistema de revisão duplo-anônimo. Editores convidados: Susana Carla Farias Pereira, Simone Sehnem, Ana Beatriz Lopes de Sousa Jabbour, Valentina Gomes Haensel Schmitt e Fanny Saruchera

Avaliadores/as: Vilmar Antonio Gonçalves Tondolo , Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Administração e de Turismo, Pelotas, RS, Brasil

O/A segundo/a e terceiro/a avaliador/a não autorizaram a divulgação de sua identidade e relatório de avaliação por pares.

O relatório de revisão por pares está disponível neste [link](#)

Versão traduzida | <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-759020250409x>

FATORES DE SUCESSO PARA A CIRCULARIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 EM EMPRESAS AGROALIMENTARES

Successful factors for industry 4.0 circularity in agri-food companies

Factores de éxito para la circularidad de la industria 4.0 en empresas agroalimentarias

Monika Varbanova^{1,2} | monika.varbanova@ugent.be | ORCID: 0009-0008-0082-8007

Marcia Dutra de Barcellos^{4,5} | marcia.barcellos@ufrgs.br | ORCID: 0000-0002-4311-2921

Milena Kirova³ | mkirova@uni-ruse.bg | ORCID: 0000-0001-7988-6673

Hans de Steur¹ | hans.desteur@ugent.be | ORCID: 0000-0003-1340-0882

Xavier Gellynck¹ | xavier.gellynck@ugent.be | ORCID: 0000-0002-8908-3310

¹Autora correspondente

²Ghent University, Department of Agricultural Economics, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Bélgica

³University of Ruse, Department of Business Development and Innovation, Faculty of Business and Management, Ruse, Bulgária

⁴University of Ruse, Department of Industrial Management, Faculty of Business and Management, Ruse, Bulgária

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Ciências Administrativas, Escola de Administração, Porto Alegre, RS, Brasil

RESUMO

Apesar do crescente interesse pelas tecnologias da Indústria 4.0, a perspectiva gerencial e sua integração com os princípios da economia circular ainda são pouco exploradas, especialmente no setor agroalimentar. Este estudo utiliza Scoping Review (PRISMA-ScR) combinada com análise de conteúdo para examinar como a Indústria 4.0 facilita a transição das empresas agroalimentares para a economia circular. Os resultados indicam que essa indústria pode transformar o desenvolvimento de produtos, a produção e as vendas, ao melhorar a eficiência dos recursos e a resiliência da cadeia de suprimentos. Abordar impactos sociais — como substituição de empregos e requalificação da força de trabalho — é fundamental. Ao sintetizar fatores críticos de sucesso, incluindo liderança forte, cultura organizacional adaptativa e infraestrutura robusta de cibersegurança, propõe-se um framework para orientar empresas na transformação digital alinhada à sustentabilidade. Este estudo oferece insights práticos para gestores e formuladores de políticas que buscam promover sustentabilidade e competitividade no setor agroalimentar.

Palavras-chave: Indústria 4.0, setor agroalimentar, economia circular, fatores críticos de sucesso, inovação social.

ABSTRACT

Despite the growing interest in Industry 4.0 technologies, the managerial perspective and its integration with circular economy principles remain underexplored, particularly within the agri-food sector. This study addresses this gap by employing a scoping review (PRISMA-ScR) combined with content analysis to examine how Industry 4.0 facilitates agri-food companies' transition to the circular economy. Findings reveal that Industry 4.0 can transform product development, production, and sales by enhancing resource efficiency and supply chain resilience. Addressing social impacts - such as job displacement and workforce retraining - is essential. This research synthesizes critical success factors for Industry 4.0 implementation, including strong leadership, adaptive organizational culture, and robust cybersecurity infrastructure, proposing a comprehensive framework to guide agri-food firms in aligning digital transformation with the circular economy goals. The review contributes to the literature by elucidating the interplay between these factors and offers actionable insights for policymakers and managers striving to enhance sustainability and competitiveness within the agri-food sector.

Keywords: Industry 4.0, agri-food sector, circular economy, critical success factors, social innovation.

RESUMEN

A pesar del creciente interés en las tecnologías de la industria 4.0, la perspectiva de gestión y su integración con los principios de la economía circular aún están poco exploradas, especialmente en el sector agroalimentario. Este estudio utiliza el método Scoping Review (PRISMA-ScR) combinado con análisis de contenido para examinar cómo la industria 4.0 facilita la transición de las empresas agroalimentarias a la economía circular. Los resultados indican que esta industria puede transformar el desarrollo de productos, la producción y las ventas al mejorar la eficiencia de los recursos y la resiliencia de la cadena de suministro. Abordar los impactos sociales — como la sustitución de empleos y la recualificación de la fuerza laboral — es fundamental. Al sintetizar factores críticos de éxito, como un liderazgo sólido, una cultura organizacional adaptable y una infraestructura robusta de ciberseguridad, se propone un marco para guiar a las empresas en su transformación digital orientada a la sostenibilidad. Este estudio ofrece insights prácticos para gestores y formuladores de políticas que buscan promover la sostenibilidad y la competitividad en el sector agroalimentario.

Palabras clave: Industria 4.0, sector agroalimentario, economía circular, factores críticos de éxito, innovación social.

INTRODUÇÃO

Considerando as recentes crises geopolíticas e sanitárias, é mais urgente do que nunca que as economias mundiais se tornem mais sustentáveis e ecologicamente corretas (Rajput & Singh, 2019), ao mesmo tempo em que avançam tecnologicamente. Nesse sentido, formuladores de políticas e empresas em todo o mundo estão se esforçando para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o aquecimento global, enfrentar a escassez de recursos, gerenciar o descarte e a reciclagem de resíduos (Dantas et al., 2021; Nerini et al., 2019) e implementar tecnologias limpas e práticas sustentáveis de forma mais eficiente (Ambekar et al., 2019).

Nesse contexto, a Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0 (I4.0), emergiu como uma força transformadora caracterizada por avanços em tecnologias de sensores, interconectividade e análise de dados que impulsionam a manufatura digital e a customização em massa (Piccarozzi et al., 2018). Kerin e Pham (2019) resumiram a literatura sobre a I4.0, destacando benefícios como a melhoria da cooperação entre *stakeholders*, o uso de inteligência artificial na tomada de decisões e a expansão de sistemas de produtos e serviços para o desenvolvimento de novos serviços ou produtos (Awan et al., 2021). Essa revolução começou em 2011 com a Estratégia de Alta Tecnologia 2020 do governo alemão e representou a primeira transformação significativa em direção ao futuro modelo econômico previsto.

A I4.0 refere-se às rápidas mudanças no desenvolvimento, fabricação, operação e serviço de sistemas de produção e produtos. Envolve a rede digital de toda a cadeia de suprimentos, criando uma cadeia de valor altamente integrada (Davies, 2015). Tecnologias como robótica, realidade virtual e aumentada, *big data*, blockchain e computação em nuvem estão impulsionando a transformação digital de empresas de manufatura em todo o mundo (Kashyap et al., 2023).

A UE pretende que 80% das PMEs adotem a I4.0 até 2040. A transformação digital das empresas industriais europeias é considerada como tendo efeitos positivos na melhoria da experiência do consumidor, na qualidade dos produtos e no potencial de inovação (Moeuf et al., 2018); aumento da rentabilidade, redução de defeitos e retrabalho (Yilmaz et al., 2022). Ao implementar os conceitos da I4.0, as empresas relatam melhor desempenho de gestão e resultados mais elevados, ao mesmo tempo que obtêm benefícios econômicos, sociais e ambientais (Sommer, 2015). A produção digitalizada também aumenta a resiliência, visto que algumas das tecnologias da I4.0 (como a “análise de *big data*”) têm demonstrado aumentar a inovação na cadeia de abastecimento durante a crise da COVID-19 (Hopkins, 2021). As organizações inteligentes são cada vez mais reconhecidas como impulsionadoras-chave da vantagem competitiva (Cefis et al., 2023), da produção baseada na economia circular (EC) (Adamik et al., 2018) e da inovação verde (Wang, 2024).

Na Europa, o alinhamento estratégico das transições digital e verde – frequentemente referido como a dupla transição – é fundamental para atingir a meta da União Europeia de neutralidade climática até 2050 (Jesus et al., 2019; Rashed & Shah, 2021). Esta orientação política é particularmente relevante para setores com elevada pegada ambiental, incluindo energia,

transportes e agricultura, onde a integração de tecnologias avançadas e princípios da EC pode gerar ganhos substanciais em sustentabilidade. As iniciativas da Comissão Europeia, como o Pacto Ecológico Europeu, o Plano de Ação para a Economia Circular e a Estratégia do Prado ao Prato, incorporam a sustentabilidade, a rastreabilidade e a eficiência de recursos nos sistemas agroalimentares, enquanto programas como o Programa Europa Digital apoiam a adoção tecnológica e o desenvolvimento de capacidades em todas as regiões (European Commission, 2022, 2023).

O setor agroalimentar europeu surge como um contexto particularmente estratégico para o estudo da intersecção entre a I4.0 e a EC por várias razões. Em primeiro lugar, a Europa possui um dos quadros regulamentares mais abrangentes do mundo, promovendo tanto a transformação digital como a sustentabilidade ambiental, criando um ambiente único onde a coerência política impulsiona a inovação. Em segundo lugar, mais de 99% das empresas agroalimentares europeias são pequenas e médias empresas (PMEs) (Farm Europe, 2023), que enfrentam desafios estruturais específicos na transformação digital, como capacidade técnica limitada e barreiras ao investimento. Compreender como a I4.0 pode apoiar a implementação da EC neste setor é, portanto, crucial para a concepção de intervenções políticas escaláveis e inclusivas. Em terceiro lugar, apesar de ser um dos setores menos digitalizados, a agricultura tem um potencial significativo para beneficiar da dupla transição através de melhorias na eficiência dos recursos, na transparência da cadeia de abastecimento e em sistemas de produção em circuito fechado (Quiroz-Flores et al., 2023; Stefanini & Vignali, 2023).

Além disso, a liderança da Europa em sustentabilidade e inovação digital a torna um cenário ideal para gerar *insights* com relevância mais ampla, embora as estruturas de EC frequentemente exijam adaptação às realidades específicas do setor, a experiência europeia oferece lições para outras regiões que buscam equilibrar a competitividade econômica com a gestão ambiental (Jabbour et al., 2023; Padilla-Rivera et al., 2020; Zhang et al., 2022). No entanto, apesar do crescente interesse acadêmico, ainda há uma compreensão limitada de como as tecnologias da I4.0 podem ser efetivamente alavancadas para operacionalizar estratégias de EC em contextos organizacionais e agroalimentares (Awan et al., 2021).

Este estudo, portanto, visa preencher essa lacuna examinando empiricamente a integração das tecnologias da I4.0 e dos princípios da EC no setor agroalimentar europeu, oferecendo *insights* sobre como intervenções tecnológicas e políticas direcionadas podem promover sistemas alimentares sustentáveis e resilientes, tanto na Europa quanto no mundo.

Este estudo é norteado por duas questões de pesquisa:

1. Quais os fatores de sucesso mais importantes para a transformação digital de empresas industriais que contribuem para a EC?
2. Esses fatores de sucesso diferem no contexto do setor agroalimentar, que enfrenta distintas restrições e oportunidades em sua transição para a I4.0 e a EC?

Adotando uma abordagem de revisão de escopo, o estudo oferece uma síntese estruturada da literatura sobre a integração da I4.0 com a EC, com atenção específica ao setor agroalimentar. Destaca como os facilitadores digitais podem apoiar as metas de circularidade e identifica implicações organizacionais e políticas relevantes para a melhoria da sustentabilidade, da competitividade e da resiliência sistêmica.

O IMPACTO DA ADOÇÃO DA AGRICULTURA 4.0 NO DESEMPENHO DAS EMPRESAS NA ECONOMIA CIRCULAR

As tecnologias da Agricultura 4.0 podem impulsionar a inovação em áreas como desenvolvimento de produtos, produção, gestão de dados, engajamento do consumidor, estratégia e competitividade organizacional (Abbasi et al., 2022). Embora ainda esteja em evolução, a Agricultura 4.0 é amplamente reconhecida por seu potencial para aumentar a produtividade, aprimorar a qualidade dos alimentos, minimizar o desperdício e apoiar o uso sustentável de recursos (Satyro et al., 2023).

Tecnologias digitais avançadas, como IoT, IA e análise de *big data*, são cada vez mais utilizadas em fazendas e fábricas agroalimentares modernas para gerenciar insumos com eficiência, apoiar decisões em tempo real e reduzir impactos ambientais. Lezoche et al. (2020) enfatizam como a agricultura inteligente e as tecnologias de sensores aumentam a resiliência agrícola, especialmente em meio à variabilidade climática e às interrupções na cadeia de suprimentos.

A transformação digital associada à Agricultura 4.0 também se alinha a objetivos mais amplos de sustentabilidade, oferecendo às indústrias as ferramentas para buscar simultaneamente crescimento econômico, inclusão social e proteção ambiental (Jafari-Sadeghi et al., 2021; Saad et al., 2019). Ela pode permitir que empresas agroalimentares implementem inovações sistêmicas que reduzam as emissões, melhorem a circularidade e reduzam a intensidade de recursos dos sistemas industriais (Tseng et al., 2018).

É importante ressaltar que os objetivos da Agricultura 4.0 estão intimamente alinhados aos princípios da economia circular (EC). O modelo de EC — definido pela Agência Europeia do Meio Ambiente (2016) como abrangendo “ecodesign, reparo, reutilização, reforma, remanufatura, compartilhamento de produtos, prevenção de resíduos e reciclagem de resíduos” (p. 9) — oferece uma estrutura estratégica para a produção e o consumo sustentáveis. Nesse contexto, a Agricultura 4.0 pode ser fundamental, facilitando práticas circulares em toda a cadeia de valor agroalimentar (Jabbour et al., 2022).

Ao integrar os princípios da EC com tecnologias agrícolas inteligentes, as empresas agroalimentares estão repensando seus modelos de produção e cadeia de suprimentos para otimizar a eficiência dos recursos, estender os ciclos de vida dos produtos e minimizar o desperdício (Quiroz-Flores et al., 2023). Essa convergência de estratégias digitais e circulares representa uma nova fronteira para o desempenho organizacional, a sustentabilidade e a inovação no setor agroalimentar.

ACESSO DESIGUAL À TRANSFORMAÇÃO DIGITAL PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA UE

Embora a Indústria 4.0 (I4.0) tenha sido amplamente explorada sob os aspectos tecnológico e operacional, sua dimensão gerencial é menos desenvolvida (Strange & Zucchella, 2017). Embora estudiosos como Piccarozzi et al. (2018) tenham examinado tópicos de gestão como estratégia e transformação empresarial, ainda há uma carência de estruturas sistemáticas para orientar a implementação gerencial da I4.0 em consonância com os objetivos da economia circular (EC) (Ahmad et al., 2023). Essa lacuna é crítica em meio à crescente demanda por direcionamento estratégico em transições digitais sustentáveis.

As oportunidades de transformação digital permanecem desiguais em toda a UE, com os países da Europa Ocidental desfrutando de melhor infraestrutura e apoio institucional, enquanto as regiões Centro e Leste enfrentam desafios estruturais (Buglea et al., 2025). Essas disparidades afetam o setor agroalimentar, que, apesar de empregar mais de 44 milhões de pessoas – 20 milhões na agricultura – continua sendo o setor menos digitalizado da UE (European Commission, 2023).

Em resposta, a Comissão Europeia lançou diversas iniciativas e programas de financiamento para reduzir a pegada ambiental da produção agroalimentar e promover sua transformação digital. No entanto, barreiras como infraestrutura rural limitada, altos custos de tecnologia, resistência à mudança organizacional e baixa alfabetização digital continuam a dificultar o progresso (Annosi et al., 2020). Assim, há uma necessidade urgente de *insights* teóricos e práticos que possam apoiar as empresas agroalimentares na implementação estratégica de tecnologias da I4.0 para promover os resultados da EC.

CONECTANDO A INDÚSTRIA 4.0 À ECONOMIA CIRCULAR

Fortalecer o vínculo entre a Indústria 4.0 (I4.0) e a Economia Circular (EC) envolve examinar como as tecnologias digitais apoiam práticas sustentáveis. Ferramentas como automação, análises em tempo real e IA podem aumentar a resiliência da cadeia de suprimentos, reduzir o desperdício e melhorar a eficiência dos recursos (Stefanini & Vignali, 2022; 2023), alinhando-se aos princípios da EC de reutilização, reciclagem e redução de resíduos (Quiroz-Flores et al., 2023).

A integração das estruturas da I4.0 e da EC proporciona uma estratégia poderosa para empresas agroalimentares que buscam redesenhar suas operações em direção a maior sustentabilidade, circularidade e resiliência. Essa integração não é apenas crítica para a competitividade empresarial, mas também fornece uma base conceitual para o avanço da teoria sobre a transformação digital sustentável dos setores industriais.

Este estudo contribui examinando como as tecnologias da I4.0 podem ser estrategicamente alavancadas para apoiar práticas de EC, particularmente no setor agroalimentar. Ao fazê-lo, respondemos aos apelos por análises mais detalhadas de como os principais fatores facilitadores — tecnológicos, organizacionais e sistêmicos — interagem para moldar os resultados da EC. Em última análise, pretendemos identificar os elementos críticos necessários para uma implementação bem-sucedida e propor uma estrutura conceitual que apoie pesquisadores e profissionais no alinhamento da transformação digital com as metas de sustentabilidade.

Devido à compreensão limitada de como a I4.0 apoia a implementação da EC, há a necessidade de mapear e sintetizar sistematicamente os fatores críticos de sucesso que possibilitam essa transformação, especialmente sob perspectivas gerenciais e setoriais. Para abordar essa lacuna e nossas questões de pesquisa, conduzimos uma revisão de escopo para examinar a literatura na intersecção da I4.0 e da EC, com ênfase em aplicações estratégicas no setor agroalimentar. A próxima seção detalha as etapas metodológicas utilizadas para identificar, selecionar e analisar os trabalhos acadêmicos relevantes.

METODOLOGIA

O desenho da pesquisa consiste em duas partes: a metodologia para avaliar os fatores críticos de sucesso para a Indústria 4.0 (I4.0), por meio de um protocolo de Revisão de Escopo e a análise qualitativa de dados para avaliar como esses fatores diferem no setor agroalimentar. O estudo foi conduzido de março de 2022 a setembro de 2023.

A metodologia foi orientada pela lista de verificação e diretrizes *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses—Extension for Scoping Reviews* (PRISMA-ScR) (Tricco et al., 2018) para garantir um processo robusto e replicável. O estudo seguiu a estrutura metodológica proposta por Arksey e O'Malley (2005), posteriormente desenvolvida por Levac et al. (2010) e Degieter et al. (2022), e integrou aspectos de uma revisão de escopo completa para melhorar a replicabilidade e a completude.

Identificação de estudos relevantes

Um protocolo de revisão foi definido para analisar a bibliografia. O estudo incluiu estudos de periódicos revisados por pares, utilizando métodos qualitativos, quantitativos e mistos. Os termos de busca foram inseridos na base de dados *Web of Science*. Uma ampla lista de palavras-chave foi selecionada com base em revisões e artigos anteriores (Kashyap et al., 2023; Naveed et al., 2019; Sony et al., 2021; Tseng et al., 2018), incluindo: (“*Critical Success Factors*” [fatores críticos de sucesso] OR “*Key Success Factors*” [fatores-chave de sucesso] OR “*Success Drivers*” [promotores de sucesso] OR “*Key Enablers*” [facilitadores-chave]) AND (“*Industry 4.0*” [Indústria 4.0] OR

“*Fourth Industrial Revolution*” [quarta revolução industrial] OR “I4.0” OR “4IR” OR “*Digital Transformation*” [transformação digital] OR “*Smart Manufacturing*” [manufatura inteligente] OR “*Agriculture 4.0*” [Agricultura 4.0] OR “*Agri-food 4.0*” [Agri-food 4.0 ou Agroalimentar 4.0]) AND (“*Circular Economy*” [economia circular] OR “*Sustainable Production*” [produção sustentável] OR “*Sustainability*” [sustentabilidade] OR “*Green Manufacturing*” [manufatura verde] OR “*Resource Efficiency*” [eficiência no uso de recursos]) AND (“*European Union*” [União Europeia] OR “EU” OR “*Europe*” [Europa]).

Critérios para inclusão e exclusão de estudos

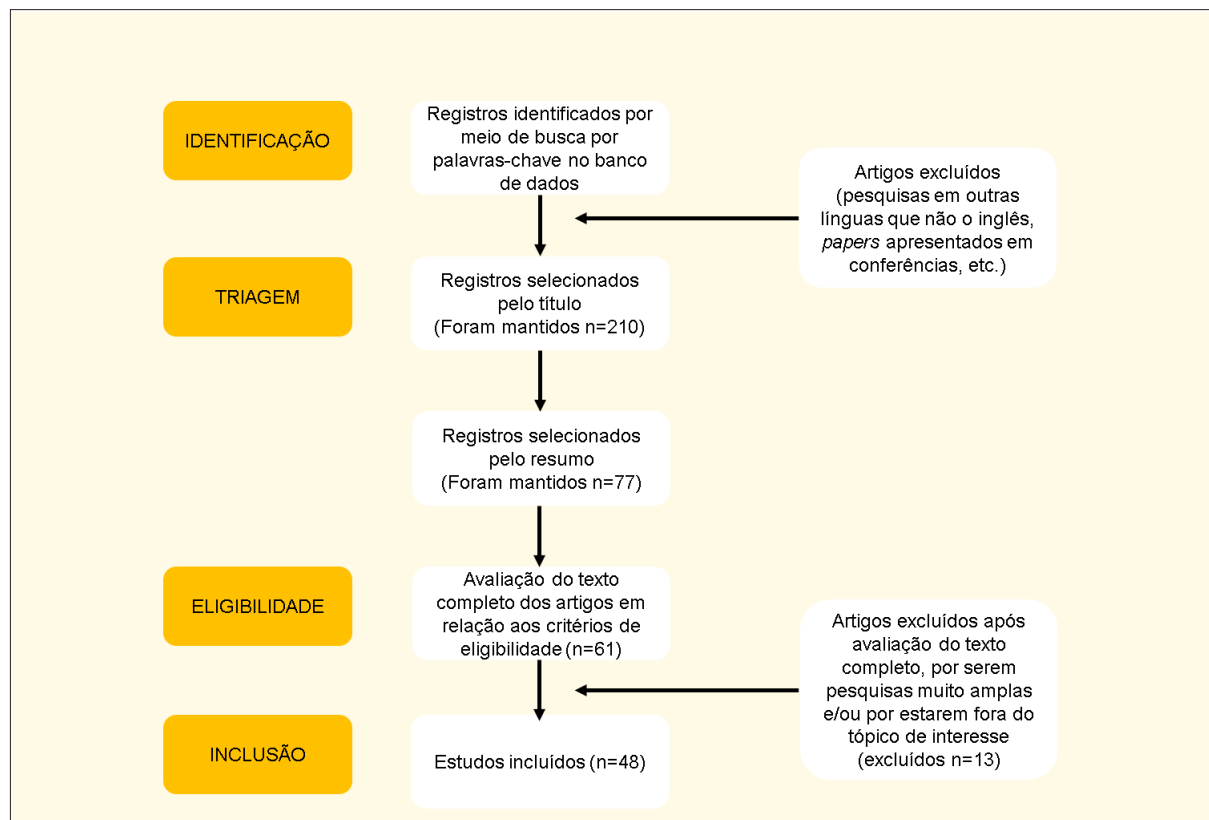
A análise considerou apenas artigos revisados por pares. O estudo envolveu a identificação de registros relevantes e a triagem de artigos da literatura de negócios e gestão que continham palavras-chave específicas publicadas em um determinado período. O estudo analisou semelhanças e diferenças entre a I4.0 e a *Agri-food 4.0* (ou Agroalimentar 4.0) no contexto da EC. Por fim, artigos duplicados foram removidos, estudos elegíveis foram incluídos e foram formuladas respostas às perguntas de pesquisa.

Seleção dos estudos

O processo de busca bibliográfica foi conduzido sistematicamente em quatro etapas – identificação, triagem, elegibilidade e inclusão – guiado pela metodologia PRISMA para garantir transparência e rigor. A etapa de identificação começou com uma busca ampliada na base de dados *Web of Science*, utilizando as palavras-chave específicas e os operadores booleanos descritos acima. Essa busca resultou em 301 artigos. Durante a etapa de triagem, entradas duplicadas foram removidas e os títulos foram revisados quanto à relevância, reduzindo a lista para 210 artigos.

Na etapa de elegibilidade, os resumos foram analisados para avaliar o alinhamento com os objetivos da pesquisa, reduzindo ainda mais o conjunto para 77 artigos. Nessa etapa, dois artigos foram excluídos por não terem sido publicados em inglês (o que era um dos critérios de elegibilidade). A revisão completa do texto foi então conduzida para avaliar se os artigos atendiam a critérios adicionais, como rigor metodológico e relevância para a implementação da I4.0.

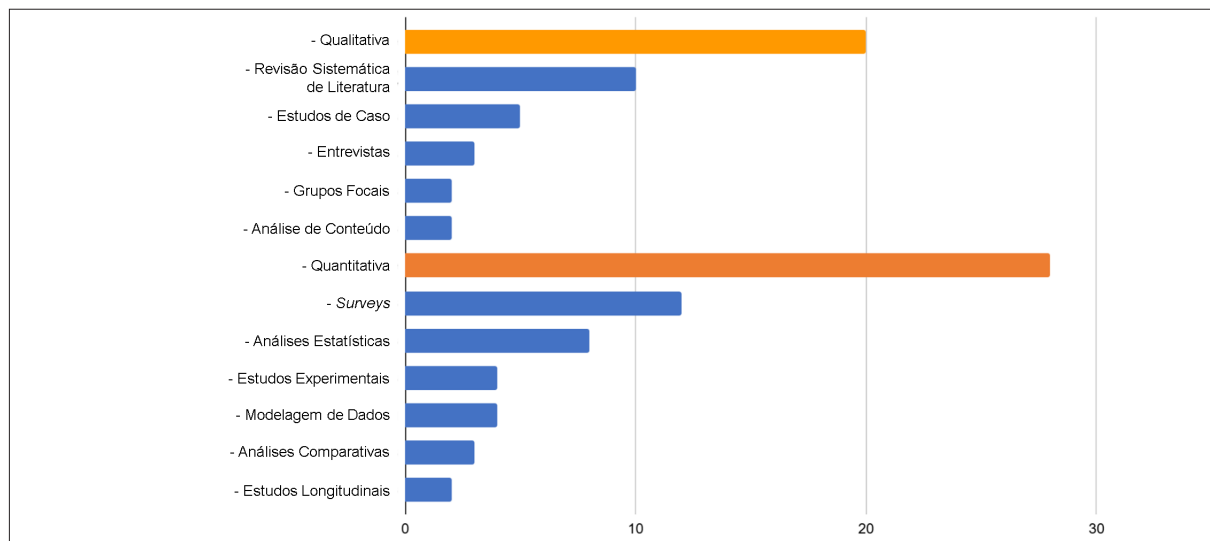
No final, 61 artigos foram considerados elegíveis com base em sua solidez metodológica e relevância temática. No entanto, a aplicação de nossos critérios finais de inclusão – que enfatizaram a atualidade (publicações a partir de 2015), o foco específico na I4.0 e a identificação de fatores críticos de sucesso – resultou em uma seleção final de 48 artigos para análise detalhada, conforme apresentado na Figura 1. Esses artigos formam a base da revisão sistemática, garantindo uma compreensão focada e contemporânea dos fatores críticos de sucesso para a implementação da I4.0.

Figura 1. Método PRISMA para Fatores-chave da Indústria 4.0

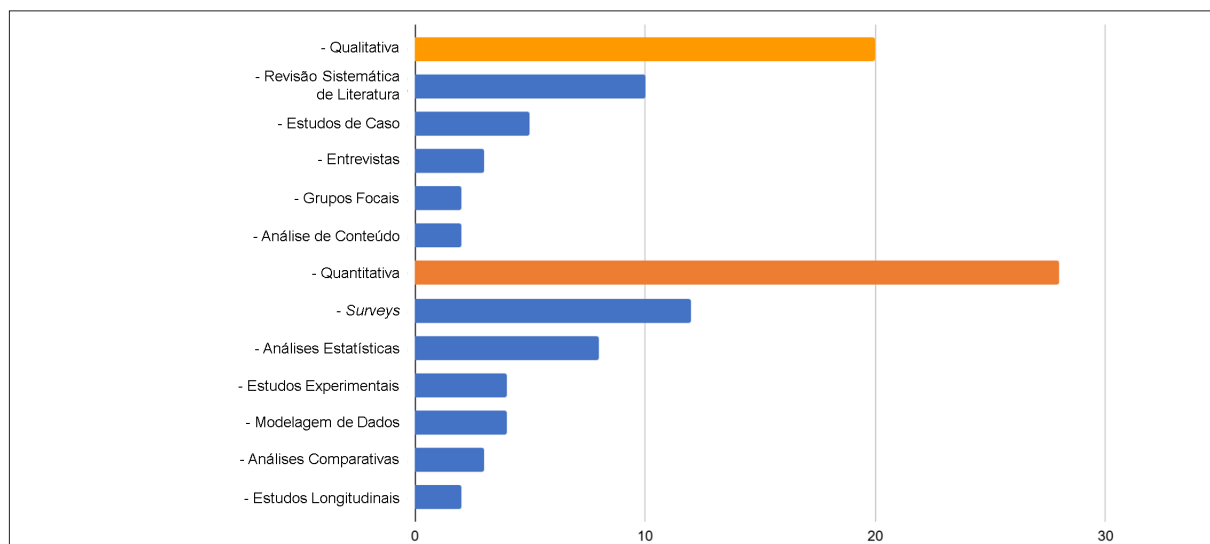
Extração de dados e gráficos

Um formulário padronizado do Excel foi utilizado para extrair os dados dos estudos durante a revisão completa do texto. As informações extraídas incluíram autor principal, ano, título, tipo de publicação, periódico, geografia, população, alimento/ponto de venda ou distribuição específico, coleta de dados e métodos de análise. O estudo revisou 48 publicações publicadas em inglês entre 1º de janeiro de 2015 e 1º de setembro de 2024, e a distribuição anual é mostrada na Figura 2.

O gráfico de barras mostra a evolução das publicações de pesquisa sobre “Indústria 4.0 e Economia Circular” e “Agricultura 4.0 e Economia Circular” de 2015 a 2024. Ambos os tópicos apresentaram crescimento constante em publicações, com pico em 2020, refletindo o aumento do interesse em práticas sustentáveis durante esse período. Enquanto “Indústria 4.0” domina consistentemente em volume, “Agricultura 4.0” tem demonstrado contribuições constantes, destacando sua relevância emergente. No entanto, observa-se um declínio nas publicações após 2020, possivelmente indicando uma mudança no foco da pesquisa ou uma transição da exploração conceitual para a implementação. Essa tendência ressalta a necessidade de uma ênfase renovada, particularmente na Agricultura 4.0, para enfrentar os desafios da sustentabilidade nos sistemas alimentares.

Figura 2. Número de Publicações por Ano

A Figura 3 mostra a ênfase em métodos quantitativos, particularmente pesquisas e análises estatísticas, indicando um foco em resultados generalizáveis e no comportamento das partes interessadas. Revisões sistemáticas de literatura são o método qualitativo mais frequentemente empregado, indicando um foco significativo na síntese e análise do conhecimento existente. Essa tendência destaca o papel fundamental da consolidação da literatura na definição de direções de pesquisa e na identificação de lacunas na área. No entanto, o uso relativamente limitado de outros métodos qualitativos, como grupos focais ou entrevistas, pode apontar lacunas na compreensão contextual e na exploração aprofundada, destacando áreas potenciais para pesquisas futuras que enriqueçam a área.

Figura 3. Métodos Aplicados nas Publicações Selecionadas (Número de Publicações)

Os principais periódicos no conjunto de dados com o maior número de publicações incluem *Computers in Industry*, *Journal of Cleaner Production* e *International Journal of Production Economics*, cada um com três publicações. Além disso, *Sustainability*, *Procedia Manufacturing*, *Technological Forecasting and Social Change* e *Sustainable Production and Consumption* destacam-se com duas publicações.

Esses periódicos destacam a importância da sustentabilidade, dos avanços tecnológicos e da eficiência produtiva no contexto da pesquisa sobre I4.0 e economia circular. A Tabela 1 apresenta a extensa lista de publicações extraídas do PRISMA.

Tabela 1. Lista Ampliada de Publicações Extraídas do Prisma

Autores	Título	Revista
Abbasi et al. (2022)	The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0	Smart Agricultural Technology
Acerbi & Taisch (2020)	A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector	Journal of Cleaner Production
Alam et al. (2023)	Analysis of the drivers of Agriculture 4.0 implementation in the emerging economies: Implications towards sustainability and food security	Green Technologies and Sustainability
Albiero et al. (2020)	Agriculture 4.0: a terminological introduction	Revista Ciência Agronômica
Al-Obadi et al. (2022)	Perspectives on food waste management: Prevention and social innovations	Sustainable Production and Consumption
Almada-Lobo (2016)	The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)	Journal of Innovation Management
Arora et al. (2022)	Integrating agriculture and industry 4.0 under "agri-food 4.0" to analyze suitable technologies to overcome agronomical barriers	British Food Journal
Bilgen (2021)	A global comparison methodology to determine critical requirements for achieving industry 4.0	Technological Forecasting and Social Change
Bock (2016)	Rural marginalisation and the role of social innovation: A turn towards nexogenous development and rural reconnection	Sociologia Ruralis
Bongomin et al. (2020)	Sustainable and Dynamic Competitiveness towards Technological Leadership of Industry 4.0: Implications for East African Community	Journal of Engineering
Dantas et al. (2021)	How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals	Sustainable Production and Consumption
Elhabashy et al. (2019)	Cyber-Physical Security Research Efforts in Manufacturing: A Literature Review	Procedia Manufacturing
Fielke et al. (2019)	Conceptualizing the DAIS: Implications of the 'Digitalisation of Agricultural Innovation Systems' on technology and policy at multiple levels	Wageningen Journal

Continua

Tabela 1. Lista Ampliada de Publicações Extraídas do Prisma

Autores	Título	Revista
Fountas et al. (2015).	Farm management information systems: Current situation and future perspectives	Computers and Electronics in Agriculture
Frank et al. (2019)	Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies	International Journal of Production Economics
Glover et al. (2019)	Rethinking technological change in smallholder agriculture	Outlook on Agriculture
Jabbour et al. (2022)	'Better together': evidence on the joint adoption of circular economy and industry 4.0 technologies	International Journal of Production Economics
Jabbour et al. (2023)	Are food supply chains taking advantage of the circular economy? A research agenda on tackling food waste based on Industry 4.0 technologies	Production Planning & Control
Jabbour et al. (2018)	Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations	Annals of Operations Research
Jabbour et al. (2019)	Circular economy business models and operations management	Journal of Cleaner Production
Jafari-Sadeghi et al. (2021)	Exploring the impact of digital transformation on technology entrepreneurship and technological market expansion: The role of technology readiness, exploration, and exploitation	Journal of Business Research
Kashyap et al. (2023)	Investigation of the critical success factors in the implementation of lean industry 4.0 in manufacturing supply chain: An ISM approach	Management of Environmental Quality: An International Journal
Lezoche et al. (2020)	Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture	Computers in Industry
Martínez-Caro et al. (2020)	Digital technologies and firm performance: The role of digital organizational culture.	Technological Forecasting and Social Change
Masood & Sonntag (2020)	Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs.	Computers in Industry
Miranda et al. (2019)	Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0.	Computers in Industry
Moeuf et al. (2018)	The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0.	International Journal of Production Research
Moldavska & Welo (2017)	The concept of sustainable manufacturing and its definitions: A content-analysis based literature review.	Journal of Cleaner Production
Neves et al. (2023)	Agriculture 6.0: A New Proposal for the Future of Agribusiness.	Revista de Gestão Social e Ambiental
Padilla-Rivera et al. (2020)	Addressing the social aspects of a circular economy: A systematic literature review.	Sustainability (Switzerland)

Continua

Tabela 1. Lista Ampliada de Publicações Extraídas do Prisma

Conclusão

Autores	Título	Revista
Pagliosa et al. (2021)	Industry 4 .0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions.	Journal of Manufacturing Technology Management
Piccarozzi et al. (2018)	Industry 4 .0 in management studies: A systematic literature review.	Sustainability (Switzerland)
Prause & Atari (2017)	Sustainable production networks for Industry 4 .0.	The International Journal on Entrepreneurship and Sustainability Issues
Psarommatis et al. (2022)	Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4 .0: a position paper.	International Journal of Production Research
Raj et al.(2020)	Barriers to the adoption of industry 4 .0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective.	International Journal of Production Economics
Rajput & Singh (2019)	Connecting circular economy and industry 4 .0.	International Journal of Information Management
Rashed & Shah (2021)	The role of the private sector in the implementation of sustainable development goals.	Environment; Development; and Sustainability
Saad et al. (2019)	A general framework for sustainability assessment of manufacturing processes.	Ecological Indicators
Satyro et al. (2023)	Industry 4 .0 implementation projects: The cleaner production strategy—a literature review.	Sustainability
Scholz et al. (2020)	Implementation with agile project management approaches: Case Study of an Industry 4 .0 Learning Factory in China.	Procedia Manufacturing
Sommer (2015)	Industrial revolution-industry 4 .0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution?	Journal of Industrial Engineering and Management
Sony et al. (2021)	An empirical examination of benefits, challenges, and critical success factors of industry 4 .0 in the manufacturing and service sector.	Technology in Society
Stillitano et al. (2021)	Sustainable agri-food processes and circular economy pathways in a life cycle perspective: State of the art of applicative research.	Sustainability
Strange & Zucchella (2017)	Industry 4 .0, global value chains, and international business.	Multinational Business Review
Waibel et al. (2017)	Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements.	Procedia Manufacturing
Yaqot et al. (	Roadmap to precision agriculture under circular economy constraints.	Journal of Information & Knowledge Management
Yilmaz et al. (2022)	Lean and industry 4 .0: Mapping determinants and barriers from a social, environmental, and operational perspective.	Technological Forecasting and Social Change

O estudo produziu a análise de conteúdo utilizando o software NVivo para organizar e analisar sistematicamente dados qualitativos. Seguindo as diretrizes de Gibbs (2007), uma abordagem iterativa e estruturada garantiu transparência e profundidade na identificação de padrões. Os artigos foram codificados em dois eixos principais: o Eixo 01 capturou os principais fatores para a implementação da I4.0 – definições, tecnologias, benefícios, desafios e mudanças sistêmicas – enquanto o Eixo 02 identificou tendências de pesquisa em I4.0, EC e agricultura, revelando interseções temáticas. Para aumentar a confiabilidade e reduzir o viés, foi realizada uma segunda triagem manual de todos os artigos, conforme recomendado por Felsberger et al. (2020). A Figura 4 apresenta uma nuvem de palavras com os 50 termos mais frequentes.

Figura 4. Nuvem de Palavras dos Fatores-chave para a Fonte Indústria 4.0 (Desenvolvido com NVivo)



A análise revelou que 70% das pesquisas nessa área se concentram na indústria de manufatura, enquanto apenas 30% abordam o setor agroalimentar. As principais tendências identificadas incluem a ênfase em tecnologias sustentáveis de I4.0 para manufatura, avanços em inovações na cadeia de suprimentos, como *blockchain* e soluções baseadas em nuvem, e o impacto transformador da digitalização nas práticas de educação continuada.

Essa abordagem garante uma exploração rigorosa e abrangente dos dados, ao mesmo tempo em que revela padrões críticos de forma sistemática, aborda possíveis vieses do pesquisador e conecta insights teóricos a aplicações práticas.

RESULTADOS

Fatores-chave para a implementação da Indústria 4.0 na UE

O comprometimento da alta administração e sua inicialização, monitoramento e avaliação de desempenho, vantagens competitivas, canais de comunicação, experimentabilidade, observabilidade e usabilidade foram resumidos por [Benzidia et al. \(2021\)](#) como fatores para uma transformação digital sustentável. Uma estratégia de gestão bem definida tem maior probabilidade de fornecer contexto para a adoção bem-sucedida de tecnologias sustentáveis da Indústria 4.0 (I4.0) ([Pagliosa et al., 2021](#)). Alguns autores sugerem que a gestão moderna em empresas digitais é alcançada por meio da adaptação de novos sistemas de informação. Os sistemas de informação gerencial (SIG) utilizam novas soluções de processamento de dados para definir estratégias e construir sistemas corporativos altamente integrativos, como CRM, ERP e outros, para gerenciar processos ([Davenport, 1998](#)) e criar novos modelos de negócios ([Johnson, 2008](#)).

No entanto, embora a implementação de um SIG tenha potencial de trazer maior eficiência organizacional e eficácia estratégica devido à análise de dados (com implicações para o crescimento relacionadas ao aumento da flexibilidade, produtividade, segurança cibernética e qualidade de produtos e serviços), as empresas frequentemente falham em expandir seu potencial de produto ou mercado ou reduzir seus custos utilizando sistemas de suporte à decisão ([Dalmarco et al., 2017](#)).

Outros, como [Sony et al. \(2021\)](#), consideram outros aspectos da gestão, como liderança e experiência, pessoas e flexibilidade, como fatores-chave para o sucesso da gestão de projetos. Uma estratégia clara para a sustentabilidade operacional, econômica, ambiental e social da I4.0 deve ser definida na missão e na visão. Além disso, é necessário desenvolver a responsabilidade social corporativa (que também faz parte das iniciativas da UE), o que inclui o mínimo de desperdício, novos materiais reutilizáveis e a ausência de excedentes.

Para evoluir plenamente, as estruturas corporativas precisam de soluções de computação avançadas ([Göelzer & Fritzsche, 2017](#)) e de uma cultura organizacional alinhada à estratégia digital ([Martínez-Caro et al., 2020](#)). A descentralização e o envolvimento de tomadores de decisão com conhecimento são essenciais para o sucesso ([Sony et al., 2021](#)). Para as PMEs, o nível inicial de digitalização é especialmente importante devido à complexidade e ao custo da I4.0 ([Ghobakhloo et al., 2021](#)). Alcançar uma economia circular (EC) requer um roteiro estratégico com ações com prazo determinado ([Horváth & Szabó, 2019](#)) e sistemas de TI avançados para dar suporte a operações e automação em tempo real ([Sony et al., 2021](#)).

[Scholz et al. \(2020\)](#) descrevem como novos modelos de negócios estão surgindo em torno de mudanças nos ciclos de vida dos produtos e nas relações com os consumidores, inseridos em redes de valor que conectam equipamentos, processos, pessoas e produtos. Tecnologias disruptivas e inovações digitais estão transformando as práticas de negócios e o comportamento do consumidor, levando as empresas a se adaptarem rapidamente às mudanças nas preferências

e às demandas de criação de valor (Psarommatis et al., 2022). Nesse contexto, as empresas de manufatura que buscam uma transição sustentável para a I4.0 concentram-se na construção de parcerias sólidas, na compreensão dos concorrentes e no alinhamento com a legislação da UE e com as especificidades regionais (Sony et al., 2021).

A gestão inteligente e a manufatura automatizada, impulsionadas por *big data* e sistemas ciberfísicos, apresentam desafios em termos de integridade, privacidade e segurança de dados (Rajput & Singh, 2019). Ataques cibernéticos podem levar a danos em equipamentos ou alterações no design de produtos (Vitliemov et al., 2020), enquanto o blockchain oferece proteção contra manipulação de dados (Song & Moon, 2020), reforçando a cibersegurança como um fator-chave para a transformação digital sustentável (Ghobakhloo et al., 2021).

Portanto, a implementação bem-sucedida da I4.0 na UE depende de vários fatores críticos alinhados com os objetivos da EC. Uma liderança forte garante o direcionamento estratégico para a redução de resíduos e a eficiência de recursos (Sony et al., 2021), enquanto uma cultura organizacional proativa apoia práticas de EC, como reciclagem e remanufatura (Martínez-Caro et al., 2020). O nível inicial de digitalização influencia a viabilidade da adoção de sistemas inteligentes e eficientes em termos de recursos (Ghobakhloo et al., 2021), e a flexibilidade auxilia as empresas a se adaptarem às tecnologias em evolução e às necessidades dos consumidores (Psarommatis et al., 2022). Fatores externos, incluindo conformidade regulatória e parcerias, também são vitais (Sony et al., 2021). A segurança cibernética protege a integridade dos sistemas digitais, garantindo operações sustentáveis e resilientes (Ghobakhloo et al., 2021). Coletivamente, esses elementos aumentam a eficiência, reduzem o desperdício e apoiam a transformação alinhada à EC (Benzidia et al., 2021; Pagliosa et al., 2021).

Após a revisão teórica e a análise dos autores, esses seis fatores podem ter o maior impacto na implementação sustentável da I4.0 nas empresas, de acordo com a pesquisa (ver Tabela 2).

Tabela 2. Fatores-chave para a Implementação da Indústria 4.0, Respeitando os Princípios da EC

Gestão
Liderança forte em direção à manufatura verde e digital (Jabbour et al., 2021)
Implementação de sistemas de informação gerencial (SIGs) (Fountas et al., 2023; Lezoche et al., 2020)
Aplicação de práticas eficientes de gestão de projetos (Scholz et al., 2020)
Cultura Organizacional
Comprometimento e motivação inclusivos da equipe (Martínez-Caro et al., 2020)
Construir uma cultura organizacional pronta para a mudança (vertical e horizontal) (Sony et al., 2021)
Aumentar o conhecimento, o apoio e a compreensão para práticas sustentáveis (Satyro et al., 2023)
Descentralizar (Moeuf et al., 2018)

Continua

Tabela 2. Fatores-chave para a Implementação da Indústria 4.0, Respeitando os Princípios da EC Conclusão

Nível inicial de Digitalização
Planejar de acordo com o tamanho da empresa (Bilgen, 2021; Sommer, 2015)
Atrair tomadores de decisão com conhecimento e compreensão do processo (Raj et al., 2020)
Investir de forma inteligente em novas tecnologias, seguindo um plano pré-definido com base no tempo para a Indústria 4.0 (Frank et al., 2019)
Implementar suporte técnico e treinamento (Bongomin et al., 2020)
Avançar nos sistemas de TI para um fluxo de informações fluido (Almada-Lobo, 2016)
Consumerização
Trabalhar com o consumidor para o consumidor (Yaqot et al., 2021)
Focar constantemente na qualidade (Psarommatis et al., 2022)
Ambiente Externo
Estreitar vínculos interorganizacionais e construir laços sólidos com parceiros e concorrentes (Pagliosa et al., 2021)
Seguir rigorosamente as novas decisões e regulamentações governamentais, especialmente na área da EC (Rashed & Shah, 2021)
Considerar as especificidades regionais (Prause & Atari, 2017)
Gestão de Dados e Segurança Cibernética
Acesso fácil aos dados dentro da organização para reduzir erros e utilizar os recursos de forma mais eficiente (Kashyap et al., 2023)
Proteção dos dados dos consumidores e da empresa (Kashyap et al., 2023)

Esses fatores, em conjunto, permitem que as empresas naveguem pelas complexidades da transformação digital, aprimorem a eficiência operacional e garantam um crescimento sustentável. Ao integrar tecnologias avançadas como sistemas ciberfísicos, IoT e blockchain em uma estrutura de gestão bem definida, as empresas podem impulsionar a inovação e, ao mesmo tempo, atingir as metas de EC. No entanto, os desafios de implementação, especialmente para PMEs, destacam a necessidade de roteiros claros, investimentos direcionados e esforços colaborativos para preencher as lacunas na maturidade digital. À medida que as empresas continuam a se adaptar ao cenário dinâmico da I4.0, esses fatores permanecerão essenciais para garantir a competitividade e a sustentabilidade em uma economia global em rápida evolução.

Fatores-chave para a I4.0 no setor agroalimentar

A indústria agroalimentar representa uma grande porcentagem do valor agregado total da indústria, gera muitos empregos e responde por uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) da maioria dos países (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2023). Enquanto isso, o setor também enfrenta desafios relacionados à crescente demanda por alimentos, segurança e insegurança alimentar, cadeias de suprimentos interrompidas, externalidades ambientais e sustentabilidade, competitividade e adoção tecnológica por PMEs (Stillitano et al., 2021), além de alguns dos desafios relacionados aos recentes choques geopolíticos, sanitários e econômicos.

O termo “Agri-food 4.0” (ou Agroalimentar 4.0) faz uma analogia direta com a “Indústria 4.0” e se origina da evolução mais ampla da “Agricultura 4.0”. Essa evolução reflete como o setor agroalimentar progrediu junto com as mudanças tecnológicas industriais – começando com a “Agricultura 1.0”, marcada por equipamentos mecanizados; passando para a “Agricultura 2.0”, com a introdução da eletricidade e da produção intensiva; seguida pela “Agricultura 3.0”, com robótica e máquinas especializadas capazes de completar ciclos completos de trabalho de campo. Hoje, o setor entra em uma nova fase influenciada pelas tecnologias da I4.0, adotando ferramentas, métodos e estratégias como a agricultura autônoma (Miranda et al., 2019).

De acordo com a estratégia europeia para a I4.0, a Agricultura 5.0 prevê empresas digitalmente integradas, utilizando robótica e IA para gerenciar a produção, apoiadas por tecnologias como IoT, *big data*, *blockchain* e práticas como colaboração e inovação aberta (Abbasi et al., 2022). Essa mudança transforma a infraestrutura de produção – fazendas em rede, máquinas inteligentes e instalações avançadas – aumentando a produtividade, a qualidade e a proteção ambiental. Também remodela as cadeias de valor e os modelos de negócios, enfatizando a gestão do conhecimento (European Commission, 2023), o controle inteligente dos subsistemas agroalimentares (Miranda et al., 2019) e a adoção de sistemas de informação de gestão agrícola (SIGA) para reduzir custos, garantir a conformidade e manter altos padrões (Fountas et al., 2015).

Empresas agroalimentares inteligentes estão constantemente adaptando seus ciclos de vida de produtos para atender às rápidas mudanças nas preferências dos consumidores, com maior ênfase na produção ecologicamente correta (Veza et al., 2015). Um dos requisitos mais importantes a serem atendidos é a constante competitividade no mercado, mas também a capacidade de responder adequadamente a interrupções inesperadas na cadeia de suprimentos devido a pandemias, à guerra na Ucrânia ou a outros fatores externos (Miranda et al., 2019).

Pesquisas anteriores identificaram os seguintes fatores relevantes para a transformação digital de pequenas e médias empresas do setor agroalimentar: apoio da gestão para a adoção de tecnologias, presença de lideranças, gestão estratégica, cultura organizacional e recursos. Outros autores se concentraram no porte da empresa (Grau & Reig, 2021). Apesar dos desafios enfrentados por algumas empresas e setores, a I4.0 no setor agroalimentar abrange “fabricação em rede”, “logística adaptativa auto-organizada” e “engenharia integrada ao cliente” (Prause, 2017) e contribui para um melhor desempenho de gestão e maiores resultados na empresa industrial, ao mesmo tempo em que realiza a criação de valor industrial sustentável em todas as três dimensões da sustentabilidade – econômica, ambiental e social. A sustentabilidade em empresas

agroalimentares digitalizadas, conforme descrito por Albiero et al. (2020) e Moldavska e Welo (2017), pode estar relacionada à eficiência energética e de recursos, aumento da produtividade, redução do tempo de inovação, etc. Outros autores sugerem rastreabilidade e transparência do produto ao longo do ciclo de vida do produto, bem como estratégias operacionais (Gunasekaran et al., 2013) para atingir metas sustentáveis. Abordagens populares baseadas em EC para resolver os problemas enfrentados pelo setor alimentício consistem em soluções baseadas em tecnologia, mudanças sociais e comportamentais e recomendações de políticas.

No entanto, a literatura acadêmica existente sobre Agri-food 4.0 carece de um foco consistente na EC. Alguns estudos analisaram o desempenho de diferentes regiões geográficas, cadeias de suprimentos e sistemas de gestão de resíduos em relação à EC (Padilla-Rivera et al., 2020). Zeller et al. (2020) compararam os impactos ambientais do desvio de fluxos de materiais de sistemas lineares para circulares e reconheceram o desempenho ambiental de cada um. Embora a EC tenha o potencial de auxiliar o setor agroalimentar na transição para uma perspectiva equitativa e sustentável, os desafios e limitações da aplicação da EC ao setor alimentício permanecem obscuros (Friant et al., 2020; Zhang et al., 2022). Com base em Friant et al. (2020), dividimos a cronologia dos conceitos de EC em três fases: o período preâmbulo (1945-1980), que trata dos limites de recursos e do desperdício (ou seja, EC 1.0); o período de entusiasmo (1980-2010), que trata da ecoeficiência e das soluções tecnológicas (ou seja, EC 2.0); e o período de desafio (2010-presente), que se preocupa com abordagens integradas de recursos, consumo e desperdício (ou seja, EC 3.0), onde diversas inconsistências e disputas conceituais teóricas da EC precisam ser resolvidas.

Alguns estudos enumeraram os fatores por trás da transição do setor agroalimentar para a EC e a produção digitalizada (Borrello et al., 2017). Padilla-Rivera et al. (2020) propuseram uma estrutura holística e a utilizaram como critério de avaliação para identificar indicadores sociais para avaliar o desempenho das estratégias de EC. Mais notavelmente, os desafios sociais incluem o imenso risco de crimes cibernéticos devido ao aumento da conectividade e à perda de empregos (Stoycheva & Antonova, 2018), resultante da automação de grande parte dos fluxos de trabalho em muitos setores. Embora novas oportunidades para categorias altamente qualificadas estejam surgindo, o volume desses empregos está diminuindo. As intenções dos gestores de PMEs de usar modelos digitais no setor agroalimentar dependem principalmente das expectativas de desempenho das tecnologias, da complexidade das tecnologias e da influência social exercida sobre elas (Psarommatis et al., 2022).

Do ponto de vista da gestão, a sustentabilidade no setor agroalimentar abrange as dimensões de inovação, tecnologia e social da I4.0. Um aspecto fundamental disso é a inovação social (Al-Obadi et al., 2022; Piccarozzi et al., 2018), que envolve a criação e a implementação de soluções eficazes para desafios sociais e ambientais complexos e frequentemente sistêmicos, apoiando assim o progresso social (European Commission, 2023). No contexto agroalimentar, o conceito de inovação social é complexo e multidimensional, frequentemente denominado mecanismos sociais de inovação, responsabilidade social da inovação e inovação da sociedade (Bock, 2016). Inclui também desafios como o compartilhamento de dados e os padrões de comunicação, bem como a capacidade dos agricultores de investir e modernizar suas práticas de produção,

que variam entre regiões e sociedades. Portanto, a inovação social pode ser definida como um fator de sucesso com alto impacto na implementação sustentável da I4.0 no setor agroalimentar (Tabela 3).

Tabela 3. Fatores-chave para a Implementação da Agricultura 4.0, Respeitando os Princípios da EC

Gestão
Liderança forte em direção à manufatura verde e digital (Miranda et al., 2019)
Implementação de SIGs e computação em nuvem para análise de informações relacionadas ao solo (Fountas et al., 2015)
Cultura Organizacional
Comprometimento e motivação inclusivos da equipe (Grau & Reig, 2021)
Construir uma cultura organizacional preparada para mudanças (vertical e horizontal) (Grau & Reig, 2021)
Nível inicial de Digitalização
Rede de comunicação sem fio aprimorada para equilibrar a crescente demanda e oferta (Veza et al., 2015)
Utilização de equipamentos avançados de TI para plantio e colheita em larga escala (Alam et al., 2023)
Consumerização
Agricultura de precisão para reduzir a poluição e o uso de pesticidas e fertilizantes químicos (Gunasekaran et al., 2013)
Produção integrada ao cliente (Miranda et al., 2019)
Ambiente Externo
Seguir rigorosamente as novas decisões e regulamentações governamentais, especialmente no campo de políticas agrícolas sustentáveis (Zeller et al., 2020)
Considerar as especificidades regionais (Padilla-Rivera et al., 2020)
Gestão de dados e segurança cibernética
Troca de dados entre diferentes dispositivos e máquinas (Alam et al., 2023)
Análise de dados para impulsionar a produção agrícola (Alam et al., 2023)
Desafios Sociais a Serem Considerados
Identificação dos aspectos sociais da produção na economia circular (Padilla-Rivera et al., 2020)

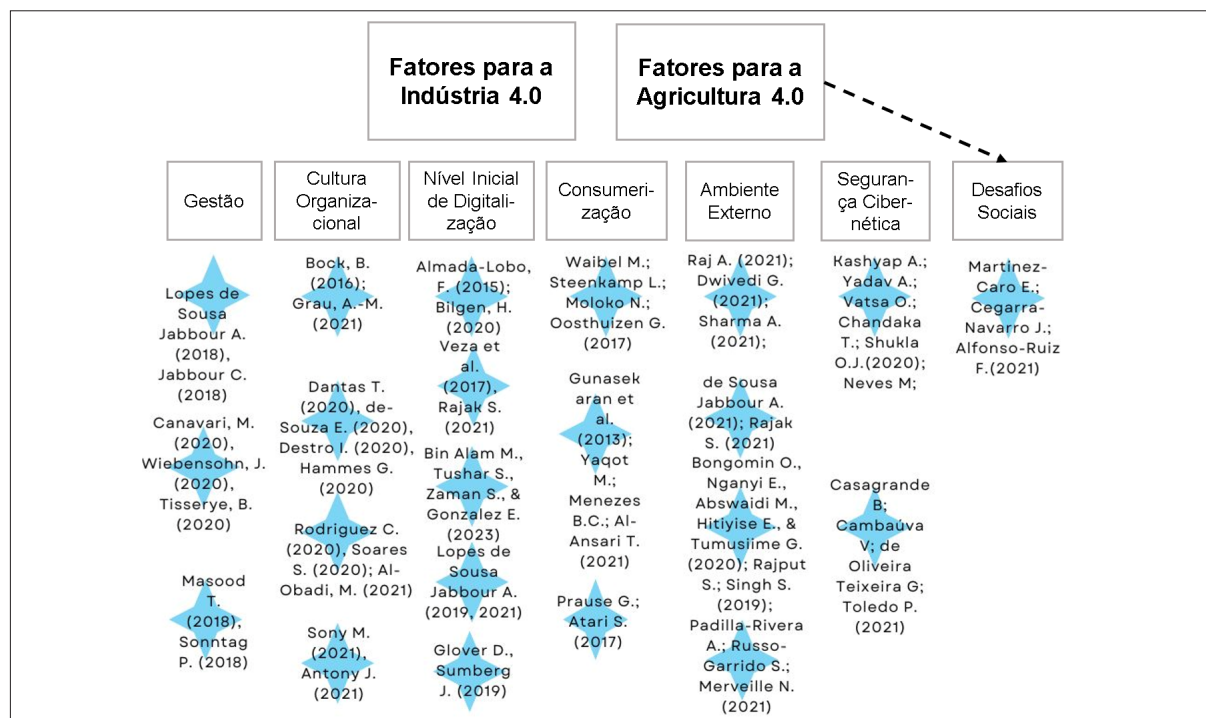
O sucesso da implementação da I4.0 no setor agroalimentar depende de diversos fatores críticos que integram as dimensões tecnológica, organizacional e social. Uma liderança forte e uma gestão estratégica são essenciais para navegar pelas complexidades da transformação digital, com tecnologias como SIGs e computação em nuvem desempenhando papéis fundamentais no aumento da produtividade e da sustentabilidade. Uma cultura organizacional adaptável que promova a motivação e a prontidão para a mudança é igualmente vital. O nível inicial de digitalização, incluindo redes de comunicação sem fio e equipamentos avançados de TI, determina a viabilidade e o escopo da implementação de sistemas agrícolas inteligentes. A consumerização, com foco na agricultura de precisão e na produção integrada ao cliente, garante práticas ambientalmente sustentáveis e se alinha às preferências dos consumidores em rápida

evolução. Além disso, fatores externos, como a adesão às regulamentações governamentais e adaptações regionais, devem ser cuidadosamente gerenciados para facilitar uma transição tranquila. A gestão de dados e a segurança cibernética continuam sendo essenciais para proteger informações valiosas e impulsionar a eficiência operacional, enquanto a inovação social aborda desafios sistêmicos, garantindo um progresso equitativo e sustentável.

No setor agroalimentar, a Agricultura 4.0 compartilha fatores-chave de implementação com a I4.0, adaptados ao seu contexto. Estes incluem: apoio da gestão para o alinhamento com as metas de EC (Albiero et al., 2020); liderança para conduzir estratégias sustentáveis (Grau & Reig, 2021); uma cultura organizacional adaptativa para incentivar a adoção de ecoinovações e práticas de EC (Martínez-Caro et al., 2020); recursos e infraestrutura suficientes para implementar sistemas agrícolas inteligentes (Fountas et al., 2015); adoção de tecnologias para impulsionar a inovação e a sustentabilidade (Abbasi et al., 2022); e inovação social para enfrentar desafios sistêmicos, garantindo um progresso equitativo e sustentável (Piccarozzi et al., 2018). Juntos, esses fatores promovem a EC, permitindo a agricultura de precisão, reduzindo o uso de recursos e aprimorando a rastreabilidade (Gunasekaran et al., 2013).

Os fatores descritos na Figura 5, juntamente com suas fontes acadêmicas originais, formam a base para o desenvolvimento de uma teoria fundamentada. Seguindo Gibbs (2007), essa teoria pode emergir da análise dos elementos interconectados que moldam a implementação da I4.0 no setor agroalimentar da UE. Por meio de uma análise sistemática, essa teoria poderia explicar como as empresas agroalimentares podem navegar pelos desafios tecnológicos, sociais e de sustentabilidade, ao mesmo tempo em que promovem as metas de EC.

Figura 5. Quadro dos Fatores Críticos para a Indústria 4.0 e Agricultura 4.0 (por Autores)



Inter-relação entre fatores críticos para I4.0 / Agricultura 4.0 e EC

Figura 5 mostra a integração da I4.0 e da Agricultura 4.0 em uma estrutura de EC, enfatizando a interconexão de fatores-chave. A liderança desempenha um papel vital no alinhamento das estratégias com os objetivos de EC, com foco na redução de desperdícios e na eficiência de recursos (Sony et al., 2021), enquanto o suporte da gestão permite a adoção de tecnologias como IoT e *blockchain* para melhorar a transparência e a rastreabilidade (Gunasekaran et al., 2013). Juntos, esses elementos impulsionam a sustentabilidade e a eficiência operacional.

A interação entre a cultura organizacional e a adoção de tecnologias também é crucial. Uma cultura organizacional proativa promove um melhor preparo para mudanças, apoiando práticas de EC como reciclagem e remanufatura (Martínez-Caro et al., 2020). Por sua vez, a adoção de tecnologias da I4.0 aumenta a eficiência da produção, reduz o impacto ambiental e mantém a competitividade (Prause & Atari, 2017). Essa sinergia é essencial para a criação de valor sustentável nas áreas econômica, ambiental e social.

Finalmente, a disponibilidade de recursos e vantagens competitivas tem um papel significativo na implementação bem-sucedida dos princípios da EC. Recursos suficientes permitem iniciativas escaláveis, como ecodesign e prevenção em relação à produção de resíduos (European Environment Agency, 2016), enquanto as vantagens impulsionadas pela EC fortalecem o posicionamento de mercado e a conformidade com a sustentabilidade (Padilla-Rivera et al., 2020). Alavancar esses ativos permite que as empresas impulsionem o desempenho em sustentabilidade e permaneçam competitivas, o que ressalta a necessidade de uma abordagem holística que integre as dimensões tecnológica, organizacional e social para construir uma EC resiliente.

Essa estrutura holística enfatiza a necessidade de equilibrar os avanços tecnológicos com as metas de sustentabilidade, refletindo a dinâmica única do setor agroalimentar no cenário industrial mais amplo. Além disso, destaca a importância da mudança social como um impulsionador crítico, garantindo que a transição para a I4.0 esteja alinhada às expectativas da sociedade por um desenvolvimento sustentável e equitativo. Ao integrar esses diversos elementos, o estudo oferece *insights* práticos para pesquisadores e profissionais que trabalham para aumentar a resiliência e a inovação no setor agroalimentar. Priorizar esses fatores interconectados permite que esse setor aproveite efetivamente o potencial da I4.0 para atender às demandas globais por alimentos, aumentar a competitividade e fazer a transição para a EC.

CONCLUSÕES

O ritmo acelerado da transformação digital reforça a necessidade de as organizações se adaptarem rapidamente para se manterem competitivas nos mercados local e global. Interrupções recentes, como a pandemia da COVID-19 e os desafios da cadeia de suprimentos, destacaram a urgência de reavaliar as estratégias de negócios para aprimorar a flexibilidade, a personalização em massa e a produção de alta qualidade. Políticas europeias – como roteiros tecnológicos e polos

de inovação – apoiam as PMEs na transição para tecnologias inteligentes e sustentáveis. No entanto, muitas ainda enfrentam desafios devido a restrições de recursos, aversão ao risco e conhecimento técnico limitado.

Portanto, o estudo identifica seis fatores críticos de sucesso para a implementação da I4.0: (1) liderança forte, (2) cultura organizacional adaptável, (3) alinhamento com os níveis iniciais de digitalização, (4) foco nos ciclos de vida dos produtos e nas relações com os consumidores, (5) consideração dos ambientes externos e (6) medidas robustas de segurança cibernética. Esses fatores fornecem uma estrutura abrangente para que as organizações naveguem pela transformação digital de forma eficaz, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e às metas da economia circular (EC).

É crucial alinhar as estratégias de transformação digital com os principais fatores de sucesso para alcançar crescimento sustentável e competitividade na I4.0 e no Agri-food 4.0. Ao abordar os desafios únicos enfrentados pelas PMEs e enfatizar a integração dos princípios de EC e inovação social, as organizações podem navegar eficazmente pelas complexidades da digitalização. A estrutura proposta fornece um roteiro para gestores globais promoverem a inovação, aumentarem a resiliência e contribuírem para um futuro mais sustentável e equitativo em todos os sistemas industriais e agrícolas.

Contribuições teóricas

Este estudo contribui para a crescente literatura sobre I4.0 e Agri-food 4.0, oferecendo uma estrutura integrada que combina teorias de transformação digital, EC e inovação social. Promove a compreensão ao identificar fatores críticos que possibilitam a transformação digital sustentável em diversos setores. Ao enfatizar a interseção entre agricultura, tecnologia, ciências ambientais e economia, o estudo destaca a natureza interdisciplinar desse campo e a importância de abordar dimensões sociais, como o deslocamento de empregos e o acesso equitativo à tecnologia.

A integração da I4.0 e da Agricultura 4.0 com a EC envolve o enfrentamento de desafios sociais, como o deslocamento de empregos e os riscos de segurança cibernética (Stoycheva & Antonova, 2018). A inovação social desempenha um papel fundamental na criação de soluções para esses desafios sistêmicos, apoiando o progresso social e práticas sustentáveis (Al-Obadi et al., 2022; Piccarozzi et al., 2018). Ao enfatizar a inovação social, as empresas podem aprimorar seu desempenho em sustentabilidade e se adaptar às mudanças nas preferências dos consumidores, mantendo a competitividade (Psarommatis et al., 2022).

Implicações gerenciais

Para os gestores, as descobertas oferecem *insights* práticos sobre como navegar nas transições da I4.0. Uma liderança forte e uma cultura organizacional de apoio são essenciais para promover a adaptabilidade e a resiliência. Os gestores são incentivados a avaliar os modelos de negócios existentes, garantindo que os investimentos em tecnologias digitais sejam complementados por uma infraestrutura robusta e treinamento de funcionários. A colaboração com provedores

de tecnologia e a adesão às estruturas regulatórias são essenciais para o alinhamento com os princípios da EC e o alcance das metas de sustentabilidade. No setor agroalimentar, a inovação social deve ser integrada ao planejamento estratégico para acessar mercados premium que valorizam a sustentabilidade e as práticas éticas, ao mesmo tempo em que abordam desafios sistêmicos como o compartilhamento de dados e a modernização da força de trabalho.

A adoção bem-sucedida da I4.0 no setor agroalimentar depende da integração das dimensões tecnológica, organizacional e social. Uma liderança forte e uma gestão estratégica são vitais para gerenciar a transformação digital, com ferramentas como SIGs e computação em nuvem impulsionando tanto a produtividade quanto a sustentabilidade (Davenport, 1998). Uma cultura organizacional adaptável que acolha a mudança é fundamental para a implementação eficaz de práticas de EC (Martínez-Caro et al., 2020). Ao abordar esses fatores interconectados, as empresas agroalimentares podem se alinhar às metas relacionadas à EC, alcançando crescimento sustentável e competitividade a longo prazo em um mercado global em rápida transformação.

Limitações e pesquisas futuras

Este estudo está sujeito a limitações comuns a revisões sistemáticas, como critérios de inclusão subjetivos e potencial viés de publicação. O foco na Europa pode restringir a generalização dos resultados para regiões com diferentes contextos econômicos e tecnológicos, e a dependência de dados secundários limita a validação empírica da estrutura proposta.

Pesquisas futuras devem testar empiricamente os fatores de sucesso identificados em todos os setores e geografias, especialmente em regiões sub-representadas como a América Latina, onde a infraestrutura e o preparo da força de trabalho continuam sendo barreiras. Estudos longitudinais podem acompanhar os desafios em evolução para a adoção da I4.0, enquanto pesquisas quantitativas podem avaliar o papel da inovação social em PMEs agroalimentares em toda a Europa. Além disso, explorar paradigmas emergentes como a Agricultura 5.0 e 6.0 – e seus impactos sociais e ambientais – enriqueceria o discurso (Neves et al., 2023).

REFERÊNCIAS

- Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry: A systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>
- Acerbi, F., & Taisch, M. (2020). A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086>
- Adamik, A., Nowicki, M., & Szymańska, K. (2018). Openness to co-creation as a method of reducing the complexity of the environment and dynamizing companies' competitive advantages. *Management & Marketing: Challenges for the Knowledge Society*, 13(2), 880–896. <https://doi.org/10.2478/mmcks-2018-0011>

- Ahmad, F., Bask, A., Laari, S., & Robinson, C. V. (2023). Business management perspectives on the circular economy: Present state and future directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 187, 122182. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122182>
- Alam, M. F. B., Tushar, S. R., Zaman, S. M., Santibanez Gonzalez, E. D. R., Bari, A. B. M. M., & Karmaker, C. L. (2023). Analysis of the drivers of Agriculture 4.0 implementation in the emerging economies: Implications towards sustainability and food security. *Green Technologies and Sustainability*, 1(2), 100021. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100021>
- Albiero, D., Paulo, R. L. de, Félix, J. C., Jr, Santos, J. da S. G., & Melo, R. P. (2020). Agriculture 4.0: A terminological introduction. *Revista Ciência Agronômica*, 51(5), e20200083. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200083>
- Almada-Lobo, F. (2016). The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3(4), 16–21. https://doi.org/10.24840/2183-0606_003.004_0003
- Al-Obadi, M., Ayad, H., Pokharel, S., & Ayari, M. A. (2022). Perspectives on food waste management: Prevention and social innovations. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 190-208. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.012>
- Ambekar, S., Kapoor, R., Prakash, A., & Patyal, V. S. (2019). Motives, processes, and practices of sustainable sourcing: A literature review. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 12(1), 2-41. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-11-2017-0046>
- Annosi, M. C., Brunetta, F., Capo, F., & Heideveld, L. (2020). Digitalization in the agri-food industry: The relationship between technology and sustainable development. *Management Decision*, 58(8), 1737-1757. <https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1328>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Arora, C., Kamat, A., Shanker, S., & Barve, A. (2022). Integrating agriculture and Industry 4.0 under “agri-food 4.0” to analyze suitable technologies to overcome agronomical barriers. *British Food Journal*, 124(7), 2061–2095. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2021-0934>
- Awan, U., Sroufe, R., & Shahbaz, M. (2021). Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research. *Business Strategy and the Environment*, 30(4), 2038-2060. <https://doi.org/10.1002/bse.2731>
- Benzidia, S., Makaoui, N., & Subramanian, N. (2021). Impact of ambidexterity of blockchain technology and social factors on new product development: A supply chain and Industry 4.0 perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120819. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120819>
- Bilgen, H. (2021). A global comparison methodology to determine critical requirements for achieving Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 172, 121036. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121036>
- Bock, B. B. (2016). Rural marginalisation and the role of social innovation: A turn towards nexogenous development and rural reconnection. *Sociologia Ruralis*, 56(4), 552-573. <https://doi.org/10.1111/soru.12119>

- Bongomin, O., Nganyi, E. O., Abswaidi, M. R., Hitiyise, E., & Tumusiime, G. (2020). Sustainable and dynamic competitiveness towards technological leadership of Industry 4.0: Implications for East African Community. *Journal of Engineering*, 2020, 8545281. <https://doi.org/10.1155/2020/8545281>
- Borrello, M., Caracciolo, F., Lombardi, A., Pascucci, S., & Cembalo, L. (2017). Consumers' perspective on circular economy strategy for reducing food waste. *Sustainability*, 9(1), 141. <https://doi.org/10.3390/su9010141>
- Buglea, A., Cişmaşu, I. D., Gligor, D. A. G., & Jurcuţ, C. N. (2025). Exploring the Impact of Digital Transformation on Non-Financial Performance in Central and Eastern European Countries. *Electronics*, 14(6), 1226. <https://doi.org/10.3390/electronics14061226>
- Cefis, E., Leoncini, R., Marengo, L., & Montresor, S. (2023). Firms and innovation in the new industrial paradigm of the digital transformation. *Industry and Innovation*, 30(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/13662716.2022.2161875>
- Dalmarco, G., Maehler, A. E., Trevisan, M., & Schiavini, J. M. (2017). The use of knowledge management practices by Brazilian startup companies. *RAI Revista de Administração e Inovação*, 14(3), 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.rai.2017.05.005>
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021). How the combination of circular economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- Davenport, T. H. (1998, Julho-Agosto). Putting the enterprise into the enterprise system. *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/1998/07/putting-the-enterprise-into-the-enterprise-system>
- Davies, R. (2015). Industry 4.0: Digitalisation for productivity and growth. *European Parliamentary Research Service*. <https://policycommons.net/artifacts/1335939/industry-40/1942749/>
- Degijeter, M., Gellynck, X., Goyal, S., Ott, D., & Steur, H. De. (2022). Life cycle cost analysis of agri-food products: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 850(1), 158012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158012>
- Elhabashy, A. E., Wells, L. J., & Camelio, J. A. (2019). Cyber-physical security research efforts in manufacturing – A literature review. *Procedia Manufacturing*, 34, 921–931. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.115>
- European Commission. (2022). *Strategic foresight report: Twinning the green and digital transitions in the new geopolitical context*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0289>
- European Commission. (2023). *DESI report*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
- European Environment Agency. (2016). *Circular economy in Europe: Developing the knowledge base* (EEA Report No. 2/2016). <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>
- Farm Europe. (2023). *The keys to continuous and sustainable growth of the EU food chain* [Policy briefing]. Farm Europe. Retrieved from <https://www.farm-europe.eu/travaux/food-chain/>

- Felsberger, A., Qaiser, F. H., Choudhary, A., & Reiner, G. (2020). The impact of Industry 4.0 on the reconciliation of dynamic capabilities: evidence from the European manufacturing industries. *Production Planning & Control*, 33(2–3), 277–300. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810765>
- Fielke, S. J., Garrard, R., Jakku, E., Fleming, A., Wiseman, L., & Taylor, B. M. (2019). Conceptualising the DAIS: Implications of the ‘digitalisation of agricultural innovation systems’ on technology and policy at multiple levels. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100296. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.002>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Digital agriculture*. <https://www.fao.org/digital-agriculture/en/>
- Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., & Tisserye, B. (2015). Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Friant, M. C., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2020). A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104917>
- Ghobakhloo, M., Fathi, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., & Morales, M. E. (2021). Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. *Journal of Cleaner Production*, 302, 127052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127052>
- Gibbs, G. R. (2007). *Analyzing qualitative data*. SAGE Publications.
- Glover, D., Sumberg, J., & Badstue, L. (2019). Rethinking technological change in smallholder agriculture. *Outlook on Agriculture*, 48(3), 169–180. <https://doi.org/10.1177/0030727019864978>
- Gölzer, P., & Fritzsche, A. (2017). Data-driven operations management: Organizational implications of the digital transformation in industrial practice. *Production Planning & Control*, 28(16), 1332–1343. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1375148>
- Grau, A., & Reig, A. (2021). Operating leverage and profitability of SMEs: Agri-food industry in Europe. *Small Business Economics*, 57, 221–242. <https://doi.org/10.1007/s11187-019-00294-y>
- Gunasekaran, A., Irani, Z., & Papadopoulos, T. (2013). Modelling and analysis of sustainable operations management: Certain investigations for research and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 65(6), 806–823. <https://doi.org/10.1057/jors.2013.171>
- Hopkins, J. L. (2021). An investigation into emerging Industry 4.0 technologies as drivers of supply chain innovation in Australia. *Computers in Industry*, 125, 103323. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103323>
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>

- Jabbour, A. B. L. de S., Frascareli, F. C. de O., Gonzalez, E. D. R. S., & Jabbour, C. J. C. (2023). Are food supply chains taking advantage of the circular economy? A research agenda on tackling food waste based on Industry 4.0 technologies. *Production Planning & Control*, 34(10), 967-983. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980903>
- Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Choi, T. M., & Lata, H. (2022). Better together: Evidence on the joint adoption of circular economy and Industry 4.0 technologies. *International Journal of Production Economics*, 252, 108581. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108581>
- Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Filho, M. G., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: A proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1/2), 273-286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>
- Jabbour, A. B. L. de S., Luiz, J. V. R., Luiz, O. R., Jabbour, C. J. C., Ndubisi, N. O., Oliveira, J. H. C. de, & Junior, F. H. (2019). Circular economy business models and operations management. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1525-1539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.349>
- Jafari-Sadeghi, V., Garcia-Perez, A., Candelo, E., & Couturier, J. (2021). Exploring the impact of digital transformation on technology entrepreneurship and technological market expansion: The role of technology readiness, exploration, and exploitation. *Journal of Business Research*, 124, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.11.020>
- Jesus, A. De, Antunes, P., Santos, R., & Mendonça, S. (2019). Eco-innovation pathways to a circular economy: Envisioning priorities through a Delphi approach. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1494-1513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.049>
- Johnson, M. W., Christensen, C. M., & Kagermann, H. (2008). Reinventing your business model. *Harvard Business Review*, 86(12), 50-59.
- Kashyap, A., Yadav, A. K., Vatsa, O. N., Chandaka, T. N., & Shukla, O. J. (2023). Investigation of the critical success factors in the implementation of the lean Industry 4.0 in manufacturing supply chain: An ISM approach. *Management of Environmental Quality*, 34(4), 981-996. <https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2021-0092>
- Kerin, M., & Pham, D. T. (2020). Smart remanufacturing: A review and research framework. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(6), 1205-1235. <https://doi.org/10.1108/JMTM-06-2019-0205>
- Levac, D., Colquhoun, H., & O'Brien, K. K. (2010). Scoping studies: Advancing the methodology. *Implementation Science*, 5, 69. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Lezoche, M., Hernandez, J. E., Mar, E. A. D. del, Panetto, H., & Kacprzyk, J. (2020). Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in Industry*, 117, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103187>
- Martínez-Caro, E., Cegarra-Navarro, J. G., & Alfonso-Rui, F. J. (2020). Digital technologies and firm performance: The role of digital organizational culture. *Technological Forecasting and Social Change*, 154, 119962. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119962>
- Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>

- Miranda, J., Ponce, P., Molina, A., & Wright, P. (2019). Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0. *Computers in Industry*, 108, 21-36. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.02.002>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118-1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1392591>
- Moldavska, A., & Welo, T. (2017). The concept of sustainable manufacturing and its definitions: A content-analysis based literature review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 744-755. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.006>
- Naveed, Q. N., Mohamed, R. N., Qureshi, M., Shaikh, A., Alsayed, A. O., Sanobar, S., & Mohiuddin, K. (2019). Evaluating and ranking cloud-based e-learning critical success factors (CSFs) using combinatorial approach. *IEEE Access*, 7, 157145-157157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949955>
- Nerini, F. F., Sovacool, B., Hughes, N., Cozzi, L., Cosgrave, E., Howells, M., Tavoni, M., Tomei, J., Zerriffi, H., & Milligan, B. (2019). Connecting climate action with other Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2(8), 674-680. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0334-y>
- Neves, M., Casagrande, B., Cambaúva, V., de Oliveira Teixeira, G., & Toledo, P. (2023). Agriculture 6.0: A new proposal for the future of agribusiness. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(9), e04004. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n9-021>
- Padilla-Rivera, A., Russo-Garrido, S., & Merveille, N. (2020). Addressing the social aspects of a circular economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 12(19), 7912. <https://doi.org/10.3390/su12197912>
- Pagliosa, M., Tortorella, G., & Ferreira, J. C. E. (2021). Industry 4.0 and lean manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 543-569. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2018-0446>
- Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. *Sustainability*, 10(10), 3821. <https://doi.org/10.3390/su10103821>
- Prause, G., & Atari, S. (2017). Sustainable production networks for Industry 4.0. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 4(4), 421-431. [https://doi.org/10.9770/jesi.2017.4.4\(2\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2017.4.4(2))
- Psarommatis, F., Sousa, J., Mendonça, J. P., & Kiritsis, D. (2022). Zero-defect manufacturing: The approach for higher manufacturing sustainability in the era of Industry 4.0 – A position paper. *International Journal of Production Research*, 60(1), 73-91. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551>
- Quiroz-Flores, J. C., Acuña-Cervantes, F., Quicaña-Arbieto, A., & Nallusamy, S. (2023). Lean operations management model to increase on-time project delivery in a construction company. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 10(4), 22-28. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V10I4P104>
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., Jabbour, A. B. L. de S., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, 107546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>

- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and Industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49, 98-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>
- Rashed, A. H., & Shah, A. (2021). The role of private sector in the implementation of sustainable development goals. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2931-2948. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00718-w>
- Saad, M. H., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2019). A general framework for sustainability assessment of manufacturing processes. *Ecological Indicators*, 97, 211-224. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.062>
- Satyro, W. C., Contador, J. C., Monken, S. F. P., Lima, A. F., Soares, G. G., Jr, Gomes, J. A., & Zanette, A. (2023). Industry 4.0 implementation projects: The cleaner production strategy – A literature review. *Sustainability*, 15(3), 2161. <https://doi.org/10.3390/su15032161>
- Scholz, J. A., Sieckmann, F., & Kohl, H. (2020). Implementation with agile project management approaches: Case study of an Industry 4.0 Learning Factory in China. *Procedia Manufacturing*, 45, 234-239. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.100>
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution – Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512-1532. <https://doi.org/10.3926/jiem.1470>
- Song, J., & Moon, Y. (2020). Security enhancement against insiders in cyber-manufacturing systems. *Procedia Manufacturing*, 48, 864-872. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.124>
- Sony, M., Antony, J., McDermott, O., & Garza-Reyes, J. A. (2021). An empirical examination of benefits, challenges, and critical success factors of Industry 4.0 in the manufacturing and service sector. *Technology in Society*, 67, 101754. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101754>
- Stefanini, R., & Vignali, G. (2023). The influence of Industry 4.0 enabling technologies on social, economic and environmental sustainability of the food sector. *International Journal of Production Research*, 62(10), 3800–3817. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2248523>
- Stillitano, T., Spada, E., Iofrida, N., Falcone, G., & Luca, A. I. De. (2021). Sustainable agri-food processes and circular economy pathways. *Sustainability*, 13(5), 2472. <https://doi.org/10.3390/su13052472>
- Stoycheva, B. Y., & Antonova, D. (2018). Investigating factor interactions in formalizing the process of developing new products. *Serbian Journal of Management*, 13(1), 173-184. <https://doi.org/10.5937/sjm13-16409>
- Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains, and international business. *Multinational Business Review*, 25(3), 174-184. <https://doi.org/10.1108/MBR-05-2017-0028>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., Lewin, S., Godfrey, C. M., Macdonald, M. T., Langlois, E. V., Soares-Weiser, K., Moriarty, J., Clifford, T., Tunçalp, Ö., & Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467-473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

- Tseng, M. L., Tan, R. R., Chiu, A. S. F., Chien, C. F., & Kuo, T. C. K. (2018). Circular economy meets Industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 146-147. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>
- Veza, I., Mladineo, M., & Gjeldum, N. (2015). Managing innovative production network of smart factories. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 555-560. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.139>
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N., & Oosthuizen, G. A. (2017). Investigating the effects of smart production systems on sustainability elements. *Procedia Manufacturing*, 8, 731-737. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094>
- Wang, X., Yao, Z., Ma, C., & Wang, C. (2024). Does digital economy policy benefit green innovation? Evidence from heavily polluting industries in China. *Industry and Innovation*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/13662716.2024.2304745>
- Yaqot, M., Menezes, B. C., & Al-Ansari, T. (2023). Roadmap to precision agriculture under circular economy constraints. *Journal of Information & Knowledge Management*, 22(5), 2250092. <https://doi.org/10.1142/S0219649222500927>
- Yilmaz, A., Dora, M., Hezarkhani, B., & Kumar, M. (2022). Lean and Industry 4.0: Mapping determinants and barriers from a social, environmental, and operational perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121320. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121320>
- Zeller, V., Lavigne, C., D'Ans, P., Towa, E., & Achten, W. M. J. (2020). Assessing the environmental performance for more local and more circular biowaste management options at the city-region level. *Science of the Total Environment*, 745, 140690. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140690>
- Zhang, Q., Dhir, A., & Kaur, P. (2022). Circular economy and the food sector: A systematic literature review. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 655-668. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.010>

AGRADECIMENTOS

Marcia Dutra de Barcellos agradece o apoio concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de sua Bolsa de Produtividade. A autora também agradece, de forma especial, o apoio recebido de fundos nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), no âmbito do Contrato do Programa CEEC [2023.09134.CEECIND/CP2836/CT0020, <https://doi.org/10.54499/2023.09134.CEECIND/CP2836/CT0020>], bem como no âmbito do projeto UIDB/04152 – Centro de Investigação em Gestão de Informação (MagIC)/NOVA IMS.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os/as autores/as não têm conflitos de interesse a declarar.

DISPONIBILIDADE DOS DADOS

O conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo não está disponível publicamente.

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Monika Varbanova: Conceitualização; Análise formal; Investigação; Metodologia; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição.

Marcia Dutra de Barcellos: Análise formal; Metodologia; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição.

Milena Kirova: Aquisição de financiamento; Administração de projetos; Supervisão; Redação – revisão e edição.

Hans de Steur: Análise formal; Metodologia; Supervisão; Redação – revisão e edição.

Xavier Gellynck: Aquisição de financiamento; Recursos; Supervisão; Redação – revisão e edição.