



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Indústria 4.0 e a eficiência operacional na manufatura: Uma revisão de literatura sobre a transformação digital e seus desafios.

Fagner Asbahr de Oliveira

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Ana Lucia Figueiredo Facin

Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Gislaine Cristina Batistela

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Resumo: Este artigo tem como objetivo analisar a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos de manufatura, com foco na melhoria da eficiência operacional. A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão sistemática da literatura em estudos publicados entre 2018 e 2024 em bases de dados como Scopus. Foram utilizadas palavras-chave como "Indústria 4.0", "eficiência operacional" e "manufatura" para identificar artigos que discutem a aplicação de inovações como a Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos (CPS) e *big data*. Os resultados indicam que essas tecnologias têm o potencial de aumentar a produtividade, reduzir custos e otimizar o uso de recursos nas fábricas. No entanto, a implementação enfrenta desafios significativos, como a dificuldade de integração tecnológica, a necessidade de adaptação organizacional e a resistência cultural por parte de funcionários e gestores. Conclui-se que, embora as tecnologias da Indústria 4.0 ofereçam grandes benefícios, sua adoção depende de uma combinação de investimentos em infraestrutura e mudanças culturais dentro das empresas. A pesquisa apresenta limitações, como a exclusão de estudos em bases de dados além de Scopus e a concentração em desafios tecnológicos e organizacionais. Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de políticas públicas e incentivos governamentais que possam facilitar a adoção da Indústria 4.0, bem como o estudo dos impactos da digitalização na segurança cibernética e nas cadeias de suprimentos globais.

Palavras-chave: Indústria 4.0, eficiência operacional, manufatura, IoT, CPS

Industry 4.0 and Operational Efficiency in Manufacturing: A Literature Review on Digital Transformation and Its Challenges

Abstract: This article aims to analyze the adoption of Industry 4.0 technologies in manufacturing processes, focusing on improving operational efficiency. The research was conducted through a systematic literature review, covering studies published between 2018 and 2024 in databases such as Scopus. Keywords like "Industry 4.0", "operational efficiency", and "manufacturing" were used to identify articles discussing the application of innovations such as the Internet of Things (IoT), cyber-physical systems (CPS), and big data. The results indicate that these technologies have the potential to increase productivity, reduce costs, and optimize resource use in factories. However, their implementation faces significant challenges, such as technological integration difficulties, the need for organizational adaptation, and cultural resistance from employees and managers. It is concluded that, although Industry 4.0 technologies offer substantial benefits, their adoption depends on a

combination of investments in infrastructure and cultural shifts within companies. The research has limitations, including the exclusion of studies from databases beyond Scopus and a focus on technological and organizational challenges. For future research, it is suggested to analyze public policies and government incentives that could facilitate the adoption of Industry 4.0, as well as studying the impacts of digitalization on cybersecurity and global supply chains

Keywords: Industry 4.0, operational efficiency, manufacturing, IoT, CPS.

1. Introdução

O Fórum Econômico Mundial (WEF) destacou, em julho de 2024, que fatores geopolíticos recentes têm afetado severamente as empresas globais. A Conferência da ONU sobre Comércio e Desenvolvimento aponta que o investimento estrangeiro direto na manufatura caiu 12% nos três anos pós-COVID-19, enquanto o crescimento econômico global em 2024 é estimado em 2,6%, próximo à recessão. A desaceleração da globalização intensifica desequilíbrios regionais, criando desafios para as empresas. Ainda assim, globalização e inovação aberta permanecem cruciais para o desenvolvimento sustentável e a colaboração global (WEF, 2024).

No Brasil, especialmente na indústria automotiva, a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), menciona que o setor enfrenta grandes transformações, impulsionadas pela adoção de novas tecnologias e pela crescente necessidade de eficiência energética e redução de emissões. Apesar disso, melhorar a eficiência operacional continua sendo um desafio, principalmente nas áreas de automação e conectividade, que são vistas como oportunidades estratégicas para aumentar a produtividade e reduzir custos (ANFAVEA, 2024).

Nesse sentido, as tecnologias digitais estão transformando as indústrias e rompendo com os modelos de negócios tradicionais e um dos principais impactos é a adoção de modelos de negócios baseados em serviços, como a manutenção preditiva, que utiliza dados em tempo real para prevenir falhas antes que ocorram. Esse modelo permite às empresas melhorarem a eficiência de processos, reduzir o tempo de inatividade e aumentar a confiabilidade dos equipamentos, além de gerar novas oportunidades de receita ao oferecer esses serviços como parte do negócio (COLANGELO *et al.*, 2022).

A Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0 (I4.0), integra tecnologias digitais a sistemas físicos de produção. Sucedendo a mecanização, a produção em massa e a automação das revoluções industriais anteriores, a I4.0 se distingue pela adoção de inovações que aumentam a automação e a conectividade, elevando os padrões de eficiência e personalização (SINGH; GOYAT; PANWAR, 2024).

Segundo Oztemel e Gursev (2020) as principais tecnologias da I4.0 incluem sistemas ciberfísicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, *big data*, fábricas inteligentes, robôs autônomos, simulações, integração de sistemas horizontais e verticais, realidade aumentada (AR), manufatura aditiva (AM) e segurança cibernética. Essas tecnologias permitem a automação avançada e a transformação digital dos processos de fabricação, sendo cruciais para alcançar uma maior produtividade e competitividade no mercado global.

Diante disso, é essencial que as empresas invistam na adaptação à transformação digital, de modo a garantir maior lucratividade e eficiência. Para os consumidores, isso se traduz em acesso a serviços mais eficientes e personalizados, gerando maior satisfação (LLOPIS-ALBERT; RUBIO; VALERO, 2021).

O presente artigo tem como objetivo analisar a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos de manufatura, com ênfase na melhoria da eficiência operacional. Por meio de uma revisão de literatura, o estudo examina como inovações como IoT, CPS e o uso de

dados em tempo real estão sendo aplicados para otimizar a produção, reduzir custos e maximizar o uso de recursos. Além disso, o artigo explora os principais desafios que as empresas enfrentam ao adotar essas tecnologias.

A metodologia do artigo envolve uma revisão de literatura com foco em identificar estudos recentes sobre a aplicação da Indústria 4.0 na manufatura e seus desafios. A análise abrange publicações entre 2018 e 2024, obtidas na base de dados Scopus. Foram utilizados termos-chave relacionadas a "Indústria 4.0", "eficiência operacional" e "manufatura", com foco em pesquisas que tratam da integração tecnológica e da otimização produtiva. Para garantir a relevância e a atualidade das informações, os artigos foram

Este artigo está dividido em cinco seções. A primeira contextualiza o tema, apresentando o impacto das tecnologias da Indústria 4.0 e os objetivos do estudo. A segunda traz a metodologia utilizada, a terceira traz o referencial teórico das principais inovações, como IoT e CPS. A quarta apresenta os resultados obtidos, comparando-os com a literatura existente. Por fim, a quinta seção conclui o estudo, discutindo as contribuições, limitações e sugerindo direções para pesquisas futuras.

2. Metodologia

A metodologia deste estudo baseia-se em uma revisão sistemática da literatura (RSL) com o intuito de investigar o impacto das tecnologias da I4.0 nos processos de manufatura, com foco na melhoria da eficiência operacional. A pesquisa foi conduzida na base de dados *Scopus*, garantindo a abrangência e a relevância dos estudos selecionados. O período de análise abrange publicações entre 2018 e 2024, período considerado pertinente devido ao avanço das inovações tecnológicas e sua implementação industrial.

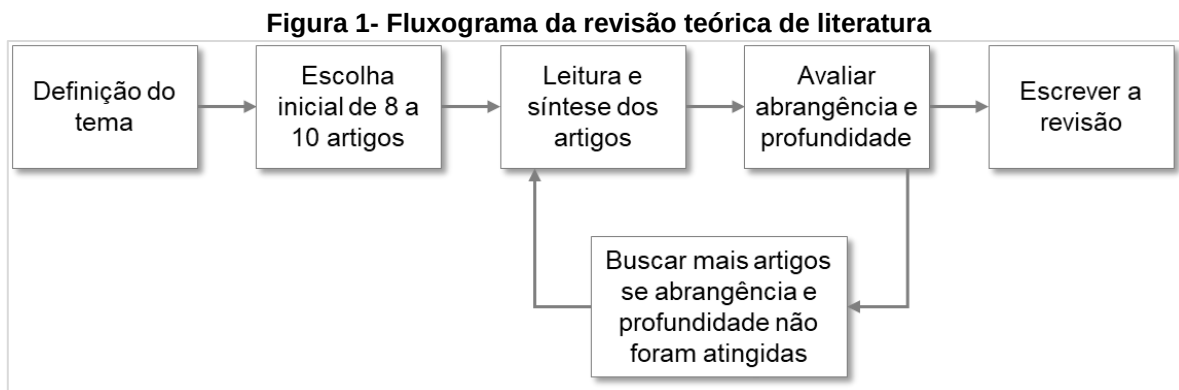
A revisão teórica seguiu o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), focando na relação das informações em uma revisão sistemática (MOHER *et al.*, 2016). Assim, a revisão foi organizada nas etapas de identificação, seleção e elegibilidade, conforme mostra a Tabela 1 que contém o memorial da seleção dos artigos.

Tabela 1 – Resultado da revisão teórica pelo protocolo Prisma na base Scopus

Critérios	Detalhes
Tópicos pesquisados (Identificação) — Artigos/ revisões — Em inglês — De 2018 a 2024	"Industr* 4.0" OR "Manufactur* of the Future" OR "Future Manufactur*" OR "Advanced Manufactur*" OR "Advanced Manufactur* Technolog*" OR "Smart Factor*" OR "Smart Manufactur*" OR "Digitalizat*" OR "Digitalisat*" OR "I4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitisat*" AND Analog OR "Pre digital" OR "pre-digital" OR "Paper-based" OR "Paper Based" OR "Pre-Digital" OR "Operati* efficienc*"
Resultados de documentos	867
Area Temática Selecionada (1º critério de exclusão)	Engineering; Business, Management and accounting; Multidisciplinary, Computer science.
Resultados de documentos	600 (549 Artigos e 51 Revisões).
Categorias (2º critério de exclusão)	Adesão dos documentos ao objetivo do artigo
Resultados de documentos	100 (90 Artigos e 10 Revisões)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A Figura 1 mostra como foi realizada a seleção de elegibilidade dos artigos identificados no PRISMA, para estabelecer uma base sólida para o argumento da pesquisa. Isso envolve revelar as teorias que sustentam o argumento, definir e clarificar os conceitos principais que serão usados nas seções empíricas e estabelecer os limites da discussão (NAKANO; MUNIZ Jr, 2018).



Fonte: Nakano e Muniz (2018)

3. Referencial Teórico

3.1 Indústria 4.0

A quarta revolução industrial, é caracterizada pela integração de tecnologias emergentes e disruptivas em ambientes de manufatura, como sistemas ciberfísicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, *big data*, inteligência artificial, impressão 3D entre outras. Essas tecnologias permitem a comunicação autônoma entre máquinas e a tomada de decisões em tempo real, transformando as fábricas em ambientes inteligentes e altamente automatizados (GHOBAKHLOO, 2020; SANTOS; MARTINHO, 2020).

Esta transformação é impulsionada por avanços tecnológicos que permitem às máquinas coletarem e analisarem dados e se comunicarem entre si, levando a fábricas mais inteligentes e interconectadas (GHADGE *et al.*, 2020).

A transição da fabricação tradicional para a I4.0 é vista como um empreendimento estratégico para manter a competitividade em um mercado global, aumentando a produtividade, melhorando a qualidade dos produtos e aprimorando a eficiência operacional (SANTOS; MARTINHO, 2020).

Vários modelos foram desenvolvidos para descrever a I4.0 e sua aplicação. A maioria segue uma abordagem de evolução da maturidade, detalhando como a implementação das tecnologias deve acontecer. Na indústria, é possível encontrar diferentes modelos, como o *Industrie 4.0 Maturity Index Managing the Digital Transformation of Companies* desenvolvido pela ACATECH (Academia Nacional Alemã de Ciência e Engenharia) (SCHUH *et al.*, 2020).

A Tabela 2 abaixo mostra os estágios de maturidade digital na indústria, desde o uso inicial de ferramentas digitais básicas até a autonomia completa dos sistemas produtivos. Cada estágio representa um avanço na integração tecnológica e no uso de dados em tempo real para otimizar operações e facilitar a tomada de decisões. A evolução começa com a digitalização, passa pela conectividade e visibilidade dos processos, e culmina na adaptabilidade autônoma, onde os sistemas se ajustam automaticamente às mudanças, criando um ambiente totalmente digital e alinhado aos fundamentos da Indústria 4.0 (SCHUH *et al.*, 2020).

Tabela 2. Estágios da evolução das tecnologias da indústria 4.0

Estágio	Descrição
1. Digitalização	Utilização de ferramentas digitais básicas de forma isolada para tarefas repetitivas. Máquinas podem não possuir interfaces digitais, sendo operadas manualmente.
2. Conectividade	Máquinas e sistemas começam a se conectar e a trocar dados entre si, permitindo o feedback em tempo real sobre o status das operações de produção.
3. Visibilidade	Monitoramento de processos de ponta a ponta por meio de sensores e dados em tempo real, criando um "sombreamento digital" que reflete o status atual da fábrica.
4. Transparência	O "sombreamento digital" é usado para analisar as causas e efeitos nos processos produtivos, ajudando na tomada de decisões mais fundamentadas e precisas.
5. Capacidade preditiva	Capacidade de simular cenários futuros com base nos dados coletados, permitindo prever falhas e otimizar o planejamento e a eficiência da produção.
6. Adaptabilidade	Sistemas tornam-se autônomos, adaptando-se automaticamente às mudanças, utilizando dados em tempo real para tomar decisões sem necessidade de intervenção humana.

Fonte: Adaptado de Schuh et al., (2020)

3.2 Tecnologias da indústria 4.0 e seus impactos na eficiência operacional

Impulsionada pelas tecnologias da I4.0, a eficiência operacional é a capacidade de uma empresa melhorar seu desempenho em áreas como custo, qualidade, tempo de entrega, flexibilidade e produtividade, sendo é essencial para o sucesso empresarial, permitindo melhor controle de processos, decisões mais ágeis e maximização de recursos (HASEEB et al., 2019).

Segundo Teixeira et al. (2021), no contexto da Indústria 4.0 e das práticas de produção enxuta, a eficiência operacional pode ser compreendida como a capacidade de maximizar a produção utilizando o menor número possível de recursos, economizando o uso de energia, materiais e mão de obra, enquanto se minimizam desperdícios e tempos de inatividade.

Sunder e Prascar (2024) argumentam que a integração de tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e CPS, associados com métodos de produção enxuta voltados à eliminação de desperdícios, resulta em uma abordagem mais eficiente para melhorar processos.

A digitalização potencializa os benefícios da estratégia de produção enxuta, capacitando a força de trabalho para enfrentar desafios em um ambiente digital. Empresas que equilibram tecnologias avançadas e práticas enxutas alcançam melhorias significativas em produtividade, qualidade e flexibilidade, enquanto a digitalização sem uma base nesse sentido pode não gerar o retorno esperado (SUNDER; PRASHAR, 2024).

De forma complementar ao IoT, Castaño et al., (2019) definem que os Sistemas Ciberfísicos (CPS) são essenciais para o monitoramento e controle em tempo real de processos industriais. Esses sistemas integram sensores, atuadores, *Programmable Logic Controllers* (PLC) e algoritmos avançados, conectados pela Internet das Coisas (IoT), para coletar dados críticos e oferecer uma visão contínua e detalhada das operações. Essa integração permite detectar anomalias, prever falhas e ajustar automaticamente os processos, resultando em maior confiabilidade, redução de desperdícios e aumento da produtividade.

3.3 Desafios da transformação digital e tecnologias da I4.0 em manufaturas

A implementação da Indústria 4.0 e da transformação digital nas manufaturas enfrenta uma série de desafios que podem ser categorizados em três grandes áreas: tecnológicos, organizacionais e culturais. Esses desafios estão relacionados a integração das tecnologias a infraestrutura, resistência a mudanças por parte das pessoas, e necessidade de revisão de processos internos (VEILE *et al.*, 2020). Os autores ainda destacam que muitas empresas na Alemanha tiveram que repensar seus modelos organizacionais para facilitar essa transição, enfrentando a complexidade de alinhar estratégias de negócios com a adoção de tecnologias como IoT, *big data* e CPS, sendo essencial que as organizações tenham um planejamento adequado e recursos financeiros disponíveis.

Para Eriksson *et al.* (2022) a resistência dos funcionários à substituição de processos manuais por ferramentas digitais é um grande obstáculo à transformação digital, especialmente em empresas com mentalidade tradicional. Para superar isso, é essencial adotar uma abordagem centrada no ser humano, investir em treinamentos e promover a colaboração entre pessoas e tecnologias, facilitando a transição para um ambiente de manufatura mais digitalizado.

Por fim os desafios tecnológicos esbarram na infraestrutura inadequada, em que a implantação de tecnologias como *big data*, IA, IoT enfrentam dificuldades pela falta de preparo técnico e muitas vezes a necessidade de integração com sistemas novos a plataformas antigas. Além disso a necessidade contínua de investimentos em cibersegurança limita o progresso da digitalização. É essencial que as empresas estejam preparadas para o sucesso na transformação digital (HOPKINS, 2021).

A Tabela 3 apresenta um resumo dos principais desafios de implementação da transformação digital em manufaturas, de acordo com as literaturas identificadas.

Tabela 3. Desafios da implementação da transformação digital.

Título & Autor(es)	Desafios		
	Tecnológicos	Organizacionais	Culturais
<i>Lessons Learned from Industry 4.0 Implementation in the German Manufacturing Industry.</i> (VEILE <i>et al.</i> , 2020)	Dificuldade de integração de sistemas ciberfísicos, big data e IoT. Política de segurança de dados e infraestrutura inadequada	Adoção de novas tecnologias requer reestruturação organizacional e treinamento de funcionários para suportar mudanças	Resistência dos funcionários e gestores às mudanças tecnológicas, e a necessidade de uma cultura de inovação.
<i>Why Do So Many Digital Transformations Fail?</i> (NOEL; MARKUS, 2024)	Falha na implementação de tecnologias digitais por falta de planejamento técnico adequado.	Falhas organizacionais, como planejamento deficiente e falta de suporte adequado na alocação de recursos para digitalização.	Falta de adesão de funcionários e líderes, com resistência cultural sendo um fator chave nas falhas de transformação.
<i>To Digitalize or Not? Navigating Human and Technology Perspectives in Production Planning</i> (ERIKSSON; CARLSSON; OLSSON, 2022)	Implementação de ferramentas digitais de controle e planejamento da produção, com desafios técnicos de automação.	Necessidade de ajustar processos organizacionais para a integração de ferramentas digitais, o que requer treinamento específico.	Resistência dos funcionários a novas tecnologias e necessidade de balancear aspectos humanos e tecnológicos.

<i>An Investigation into Emerging Industry 4.0 Technologies as Drivers of Supply Chain Innovation</i> (HOPKINS, 2021)	Adoção de <i>big data</i> , inteligência artificial e IoT, com desafios de infraestrutura, preparo técnico e cibersegurança.	Dificuldades na preparação e treinamento da força de trabalho para usar as tecnologias da Indústria 4.0.	Não abordado.
<i>Digital Transformation and Total Factor Productivity: Empirical Evidence from China</i> (LEI; WANG, 2023)	Resistência na implementação de novas tecnologias para aumentar a produtividade e reduzir custos operacionais.	A necessidade de adaptação organizacional para otimizar processos e alocar recursos adequadamente.	Não abordado.
<i>Digitalization Priorities of Quality Control Processes for SMEs</i> (DUTTA et al., 2021)	Falta de maturidade digital e dificuldade em digitalizar processos de controle de qualidade em PMEs.	Adoção limitada de processos digitais devido à falta de estrutura organizacional e suporte para mudanças digitais.	Não abordado
<i>Impact of Internet Things (IoT) on Inventory Management</i> (MASHAYEKHY et al., 2022)	dificuldade na implementação de IoT para gerenciamento de inventários, com foco em infraestrutura e integração de sistemas.	Não abordado.	Não abordado.
<i>Roles of IoT, Big Data Analytics, and Cyber-Physical Systems in Sustainable Manufacturing</i> (IKUMAPAYI; LASEINDE; AKINLABI, 2024)	Integração de IoT, <i>big data</i> e sistemas ciberfísicos para melhorar eficiência e sustentabilidade, com desafios de segurança.	Necessidade de adaptação organizacional para lidar com novos fluxos de trabalho baseados em dados e automação.	Não abordado
<i>Review of Deep Learning Concepts, CNN Architectures, Challenges</i> (ALZUBAIDI et al., 2021)	Escalabilidade e processamento de grandes volumes de dados usando <i>deep learning</i> e redes neurais convolucionais.	Não abordado	Não abordado
<i>Digitalization of Maintenance Activities in Small and Medium-Sized Enterprise</i> (GROOSS, 2024)	Digitalização de atividades de manutenção, especialmente em relação a limitações de infraestrutura e custo.	Adaptação e capacitação dos funcionários para novas tecnologias em PMEs com recursos limitados.	Não abordado
<i>Fundamental Pillars for Industry 4.0 Development in Manufacturing Environments</i> (SINGH; GOYAT; PANWAR, 2024)	Integração de IoT, IA e outras tecnologias digitais como desafios técnicos para a implementação eficaz.	A necessidade de planejamento organizacional para integrar os pilares da Indústria 4.0 em manufaturas.	Resistência à adoção das novas tecnologias, especialmente em economias emergentes.
<i>The Role of Digital Transformation Practices in Operations Improvement in Manufacturing Firms</i> (TIAN et al., 2023)	Implementação de tecnologias digitais como <i>big data</i> e IoT para melhorar a eficiência operacional.	A necessidade de adaptar as operações para melhorar a produtividade e integração de práticas digitais.	Não abordado

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. Resultados

Os resultados desta pesquisa indicam que a adoção das tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, CPS e *big data*, pode de fato trazer melhorias significativas para a eficiência operacional dos processos de manufatura, corroborando as afirmações encontradas na literatura. Os estudos de Veile *et al.* (2020) e Hopkins (2021) corroboram que a integração dessas tecnologias leva a uma maior automação, melhor controle dos processos e redução de custos operacionais. Ademais, a melhoria na flexibilidade produtiva e a capacidade de prever e corrigir falhas em tempo real são identificadas como benefícios centrais, conforme apontado por Castaño *et al.* (2019).

Entretanto, os desafios tecnológicos, organizacionais e culturais levantados estão alinhados com as dificuldades mencionadas por autores como Noel e Markus (2024), que afirmam que falhas na transformação digital muitas vezes decorrem de planejamento técnico inadequado e da falta de estrutura organizacional. Da mesma forma, Eriksson *et al.* (2022) sugerem que a resistência dos funcionários à substituição de processos manuais por ferramentas digitais é uma barreira cultural significativa, algo também destacado nos resultados desta revisão.

Além disso, a necessidade de adaptação organizacional mencionada por Lei e Wang (2023) e Singh, Goyat e Panwar (2024) foi confirmada como um dos principais obstáculos para a implementação eficaz das tecnologias da I4.0. A reestruturação dos processos internos e a capacitação da força de trabalho são passos essenciais para garantir o sucesso da digitalização, especialmente em empresas que enfrentam resistências culturais e técnicas.

A literatura também menciona o impacto da digitalização nas pequenas e médias empresas (PMEs), como mostrado por Dutta *et al.* (2021), que destacam a dificuldade dessas empresas em acompanhar o ritmo da transformação digital devido à limitação de recursos e infraestrutura. Isso está consistente com os resultados observados, que mostram que, embora as tecnologias da I4.0 ofereçam benefícios substanciais, sua adoção é desigual entre diferentes tipos de organizações.

Por fim, embora a literatura, como no caso de Sunder e Prascar (2024), evidencie os benefícios da I4.0, a integração bem-sucedida dessas tecnologias depende de uma combinação equilibrada entre práticas de gestão inovadoras e o uso eficiente das novas ferramentas digitais, reforçando que a tecnologia sozinha não é suficiente, sendo necessário também uma transformação organizacional profunda e uma cultura de inovação.

Portanto, a I4.0 pode revolucionar a manufatura, mas o caminho para essa transformação é desafiador e devem ser cuidadosamente gerenciados para que os benefícios sejam alcançados de forma sustentável.

5. Conclusões

Este artigo revisou e analisou a literatura em relação à adoção das tecnologias da I4.0, com ênfase na melhoria da eficiência operacional nos processos de manufatura. Assim, o objetivo do estudo foi explorar como inovações como a IoT, CPS e *big data* estão sendo implementadas para otimizar a produção, reduzir custos e maximizar o uso de recursos nas fábricas.

Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, analisando publicações entre 2018 e 2024, a partir de bases de dados Scopus. A metodologia seguiu o protocolo PRISMA, assegurando a seleção de estudos relevantes para o tema proposto. Os critérios de inclusão focaram em artigos que tratam da integração tecnológica nos processos de manufatura e os desafios relacionados à sua adoção.

Os resultados indicam que as tecnologias da I4.0 podem, de fato, trazer melhorias significativas na eficiência operacional, incluindo redução de desperdícios, aumento da produtividade e maior controle de processos em tempo real. No entanto, destaca-se os desafios tecnológicos, como a integração de sistemas e a necessidade de infraestrutura robusta, além de obstáculos organizacionais e culturais, como a resistência à mudança por parte de funcionários e a necessidade de reestruturação dos processos internos.

Este trabalho contribui ao fornecer uma visão ampla dos benefícios e desafios da I4.0, apontando que o sucesso da implementação dessas tecnologias depende de uma combinação equilibrada de investimento tecnológico, adaptação organizacional e desenvolvimento de uma cultura de inovação.

Como limitações, este estudo focou-se principalmente em artigos disponíveis na base *Scopus*, o que pode ter restringido a abrangência da análise ao excluir estudos relevantes presentes em outras bases de dados. Além disso, a revisão concentrou-se nos desafios tecnológicos e organizacionais, deixando em segundo plano aspectos econômicos e regulatórios, que também podem impactar significativamente a adoção das tecnologias da I4.0.

Para trabalhos futuros, é interessante examinar como diferentes políticas públicas e incentivos governamentais podem facilitar a adoção das tecnologias da I4.0, especialmente em países em desenvolvimento. Além disso, uma análise mais detalhada sobre os efeitos da digitalização na segurança de dados das operações industriais e nas cadeias de suprimentos globais pode oferecer novos horizontes para evitar riscos associados à transformação digital.

Referências

ALZUBAIDI, Laith *et al.* Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. **Journal of Big Data**, v. 8, p. 1-74, 2021.

ANFAVEA. **Anuário Anfavea indústria automobilística brasileira 2024**. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2024/05/ANFAVEA-ANUARIO-DIGITAL-2024-NOVOATUALIZADOalta_compressed.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2024.

CASTAÑO, Fernando *et al.* Sensor reliability in cyber-physical systems using internet-of-things data: A review and case study. **Remote Sensing**, v. 11, n. 19, p. 2252, 2019.

COLANGELO, Eduardo *et al.* Maturity model for ai in smart production planning and control system. **Procedia CIRP**, v. 107, p. 493-498, 2022.

DUTTA, G. *et al.* Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 32, n. 6, p. 1679–1698, 1 ago. 2021.

ERIKSSON, K. M.; CARLSSON, L.; OLSSON, A. K. To digitalize or not? Navigating and merging human- and technology perspectives in production planning and control. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 122, n. 11–12, p. 4365–4373, 1 out. 2022.

GHADGE, A. *et al.* The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 4, p. 669–686, 19 maio 2020.

GHOBAKHLOO, Morteza. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119869, 2020.

GROOSS, Oliver Fuglsang. Digitalization of maintenance activities in small and medium-sized enterprises: A conceptual framework. **Computers in Industry**, v. 154, p. 104039, 2024.

HASEEB, M. *et al.* Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance. **Social Sciences**, v. 8, n. 5, p. 154, 2019.

HOPKINS, J. L. An investigation into emerging industry 4.0 technologies as drivers of supply chain innovation in Australia. **Computers in Industry**, v. 125, p. 103323, 2021.

IKUMAPAYI, O. M.; LASEINDE, O. T.; AKINLABI, E. T. Roles of IoT, Big Data Analytics, and Cyber-Physical Systems in a Sustainable Manufacturing. **E3S Web of Conferences**, v. 552, p. 01046, 23 jul. 2024.

LEI, Z.; WANG, D. Digital transformation and total factor productivity: Empirical evidence from China. **Plos One**, v. 18, n. 10, p. e0292972, 2023.

LLOPIS-ALBERT, C.; RUBIO, F.; VALERO, F. Impact of digital transformation on the automotive industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 162, p. 120343, 2021.

MASHAYEKHY, Yasaman *et al.* Impact of Internet of Things (IoT) on inventory management: A literature survey. **Logistics**, v. 6, n. 2, p. 33, 2022.

MOHER, David *et al.* Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. **Systematic reviews**, v. 4, p. 1-9, 2015.

NAKANO, D.; MUNIZ Jr; J. Writing the literature review for empirical papers. **Production**, v. 28, p. e20170086, 2018

NOEL, C.; MARKUS, H. Why do so many digital transformations Fail. **Journal of Business Research**, v. 174, p. 114528, mar. 2024.

OZTEMEL, Ercan; GURSEV, Samet. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of intelligent manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 127-182, 2020.

SANTOS, R. C.; MARTINHO, J. L. An Industry 4.0 maturity model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 1023–1043, 18 nov. 2020.

SCHUH, Günther *et al.* (Ed.). **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies-UPDATE 2020**. Acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften eV, 2020.

SINGH, M.; GOYAT, R.; PANWAR, R. Fundamental pillars for industry 4.0 development: implementation framework and challenges in manufacturing environment. **TQM Journal**, v. 36, n. 1, p. 288–309, 2 jan. 2024.

SUNDER M, V.; PRASHAR, A. The interplay of lean practices and digitalization on organizational learning systems and operational performance. **International Journal of Production Economics**, v. 270, 1 abr. 2024.

TEIXEIRA, P. *et al.* Connecting lean and green with sustainability towards a conceptual model. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, p. 129047, 2021.

TIAN, M. *et al.* The role of digital transformation practices in the operations improvement in manufacturing firms: A practice-based view. **International Journal of Production Economics**, v. 262, p. 108929, 2023.

VEILE, J. W. *et al.* Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 977–997, 18 nov. 2020.

WEF (WORLD ECONOMIC FORUM). **How “open innovation” can promote sustainable economic growth and development**. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2024/07/open-innovation-promote-sustainable-economic-growth-development/>>. Acesso em: 24 ago. 2024.