

BARREIRAS À INDÚSTRIA 4.0: PROPOSTA DE CATEGORIZAÇÃO

BARRIERS TO INDUSTRY 4.0: A PROPOSAL FOR CATEGORIZATION

EDILSON DOS SANTOS JUNIOR

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS (PUC MINAS)

RODRIGO BARONI DE CARVALHO

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS (PUC MINAS)

Comunicação:

O XII SINGEP foi realizado em conjunto com a 12th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com o Casablanca Climate Leadership Forum (CCLF 2024), em formato híbrido, com sede presencial na ESCA Ecole de Management, no Marrocos.

BARREIRAS À INDÚSTRIA 4.0: PROPOSTA DE CATEGORIZAÇÃO

Objetivo do estudo

O objetivo deste ensaio teórico é identificar e categorizar as principais barreiras à adoção da Indústria 4.0, propondo um agrupamento dessas barreiras que possa orientar estratégias para superar os desafios e facilitar a transformação digital nas indústrias.

Relevância/originalidade

Ao contrário de trabalhos que adotam uma perspectiva fascinada com as possibilidades da Indústria 4.0, o trabalho segue uma abordagem mais pragmática de destacar as barreiras mais críticas. A originalidade reside na proposta de categorização das barreiras, permitindo uma análise estruturada.

Metodologia/abordagem

Foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente nas bases de dados Web of Science e Scopus, seguida de uma análise qualitativa dos estudos selecionados. O enfoque metodológico permitiu identificar, conceituar e agrupar as barreiras em quatro categorias: estratégicas, tecnológicas, humanas e financeiras/regulatórias.

Principais resultados

O estudo identificou que as barreiras humanas e tecnológicas são as mais prevalentes e interdependentes, exigindo uma abordagem integrada para superá-las. A falta de infraestrutura tecnológica adequada e o gap de competências dos funcionários foram destacados como os principais obstáculos.

Contribuições teóricas/metodológicas

A principal contribuição teórica do estudo é a categorização das barreiras, que facilita uma compreensão mais clara dos desafios enfrentados na adoção da Indústria 4.0. Metodologicamente, o estudo oferece uma estrutura para futuras pesquisas sobre a superação dessas barreiras.

Contribuições sociais/para a gestão

O estudo proporciona insights valiosos para gestores, destacando a importância de investir tanto em infraestrutura tecnológica quanto no desenvolvimento de competências humanas. Essas ações são essenciais para assegurar uma transição eficaz para a Indústria 4.0.

Palavras-chave: Barreiras à Indústria 4.0, Transformação Digital, Inovação, Cultura Organizacional, Gestão de Mudança

BARRIERS TO INDUSTRY 4.0: A PROPOSAL FOR CATEGORIZATION

Study purpose

The objective of this theoretical essay is to identify and categorize the main barriers to the adoption of Industry 4.0, proposing a grouping of these barriers that can guide strategies to overcome challenges and facilitate digital transformation in industries.

Relevance / originality

Unlike works that take a fascinated perspective on the possibilities of Industry 4.0, this study adopts a more pragmatic approach by highlighting the most critical barriers. The originality lies in the proposed categorization of barriers, allowing for a structured and targeted

Methodology / approach

A comprehensive literature review was conducted using the Web of Science and Scopus databases, followed by a qualitative analysis of the selected studies. The methodological approach enabled the identification, conceptualization, and grouping of barriers into four categories: strategic, technological, human, and financial/regulatory.

Main results

The study found that human and technological barriers are the most prevalent and interdependent, requiring an integrated approach to overcome them. The lack of adequate technological infrastructure and the skills gap among employees were highlighted as the main obstacles.

Theoretical / methodological contributions

The main theoretical contribution of the study is the categorization of barriers, which facilitates a clearer understanding of the challenges faced in the adoption of Industry 4.0. Methodologically, the study provides a framework for future research on overcoming these barriers.

Social / management contributions

The study offers valuable insights for managers, emphasizing the importance of investing in both technological infrastructure and human skills development. These actions are essential to ensuring an effective transition to Industry 4.0.

Keywords: Barriers to Industry 4.0, Digital Transformation, Innovation, Organizational Culture, Change Management

BARREIRAS À INDÚSTRIA 4.0: PROPOSTA DE CATEGORIZAÇÃO

1. Introdução

A Indústria 4.0 atua como um catalisador de inovação tecnológica, promovendo potencialmente o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias que transformam processos de produção e modelos de negócios. A adoção de tecnologias como Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT) possibilita a criação de sistemas de manufatura inteligentes e conectados, capazes de auto-monitoramento, auto-otimização e tomada de decisões autônomas, resultando em maior eficiência, flexibilidade e capacidade de resposta às demandas do mercado (Raj et al., 2020).

No entanto, a implementação da Indústria 4.0 apresenta desafios significativos, sendo a compreensão dessas barreiras crucial para garantir a implementação bem-sucedida das tecnologias avançadas que caracterizam esta quarta revolução industrial. Identificar e analisar tais barreiras permite que as organizações desenvolvam estratégias eficazes para superá-las, maximizando os benefícios das inovações tecnológicas. Entre as principais barreiras estão a falta de alinhamento estratégico entre os objetivos organizacionais e as iniciativas tecnológicas, a deficiência em competências técnicas essenciais, a ausência de padrões claros para a integração de sistemas heterogêneos, questões regulatórias e de segurança, e os altos custos iniciais de implementação (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022; Govindan & Arampatzis, 2023).

Ao contrário de trabalhos que adotam uma perspectiva fascinada com as possibilidades da Indústria 4.0, o presente trabalho segue uma abordagem mais pragmática de destacar as barreiras mais críticas. Zhang et al. (2021) destacam que a implementação da Indústria 4.0 traz alguns desafios relevantes, sejam estes culturais, estratégicos ou conhecimento. A compreensão e a integração dessas dimensões são essenciais para que as organizações aproveitem plenamente as oportunidades oferecidas pela Indústria 4.0, promovendo eficiência, competitividade e sustentabilidade no mercado global (Raj et al., 2020; Zhang et al., 2021).

O aspecto multifacetado da adoção da Indústria 4.0 é também destacado por Xu, Xu e Li (2018) que argumentam que a Indústria 4.0 é concebida como uma abordagem tecnológica que integra pessoas, processos, produtos e serviços em níveis intra e interorganizacionais. Este processo histórico fundamenta-se no uso profundo de tecnologia de ponta, aprimorando os processos de fabricação inteligentes e impulsionando a produção e o capital (Varela et al., 2019; Rakic et al., 2021). Diversas tecnologias têm sido vinculadas à Indústria 4.0, incluindo manufatura aditiva, Inteligência Artificial, *big data*, cibersegurança, IoT, robótica, realidade virtual e aumentada, computação em nuvem, *blockchain*, modelagem e simulação computacional, e integração de sistemas (Pour et al., 2023; Laskurain et al., 2021). Estudos anteriores associaram a Indústria 4.0 a uma série de conceitos e inovações fundamentais alinhados à transformação tecnológica e socioeconômica da indústria transformadora e da fábrica do futuro (Liao et al., 2017; Xu et al., 2018; Guo et al., 2021).

Govindan & Arampatzis (2023) salientam que a cultura desempenha um papel fundamental na avaliação das plataformas da Indústria 4.0 e reforçam ainda que a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 demanda profissionais com habilidades específicas em uma organização. A escassez de mão de obra qualificada em tecnologias de vanguarda é um obstáculo significativo para a adoção da Indústria 4.0 em muitas empresas. Compreender essas barreiras é essencial para o desenvolvimento de uma modelagem estratégica e avanço na implementação de ferramentas da Indústria 4.0, promovendo a eficiência, competitividade e sustentabilidade no cenário industrial global (Govindan & Arampatzis, 2023).

O objetivo deste ensaio teórico é identificar as principais barreiras à evolução e implementação de tecnologias da Indústria 4.0 para em seguida propor uma categorização das barreiras. Por meio de uma pesquisa teórica, o estudo visa relacionar essas barreiras e provocar reflexões que direcionem ações para incrementar o nível de maturidade sobre as interrelações entre inovação, Indústria 4.0 e o ambiente de manufatura. Para além desta introdução, o ensaio está organizado da seguinte forma: uma seção com o referencial teórico sobre a Indústria 4.0 e suas barreiras; uma seção que detalha a metodologia empregada na revisão da literatura; em seguida, os resultados são discutidos gerando uma proposição de agrupamento de barreiras; por fim, apresentam-se as conclusões com propostas de trabalhos futuros.

2. Referencial Teórico

Esta seção traz a fundamentação teórica sobre os conceitos sobre indústria 4.0 e suas principais barreiras identificadas a partir da literatura.

2.1. Indústria 4.0

Marcos importantes na narrativa histórica manifestam-se por meio das revoluções industriais, conforme exposto por Belvedere, Grando e Bielli (2013). Esses eventos são caracterizados pela transição para novos métodos de produção, impulsionados pelos avanços em ciência e tecnologia, resultando em alterações significativas nos processos, organização e recursos. A Primeira Revolução Industrial, inaugurada por volta de 1760, foi catalisada por instalações de produção mecânica movidas a água e vapor, viabilizando a produção em larga escala de bens, notadamente têxteis (Allen, 2009).

Na virada do século XIX, emergiu a Segunda Revolução Industrial, introduzindo tecnologias de produção em massa alimentadas por eletricidade, o que resultou na divisão do trabalho e em um crescimento econômico acelerado (Horn, Rosenband e Smith, 2010). No final da década de 1960, teve início a Terceira Revolução Industrial com a ampliação do uso da eletrônica e tecnologia da informação na produção. Essa fase se caracterizou pela automação e pela incorporação de computadores na gestão da produção (Yin, Stecke e Li, 2018).

Na Feira de Hannover (Alemanha) em 2011, surgiu o conceito de Indústria 4.0, marcando o advento da Quarta Revolução Industrial (Liao et al., 2017; Tortorella e Fettermann, 2018; Rossit, Tohmé e Frutos, 2019). A Indústria 4.0 abarca uma gama de componentes complexos aplicados em diversas indústrias, representando a atual tendência de automação e digitalização. Ela evoluiu de sistemas embarcados para sistemas ciberfísicos, resultando em maior modularidade e flexibilidade para contextos de produção personalizados em massa (Landscheidt e Kans, 2016; Tortorella et al., 2021; Ciano et al., 2021). Pour et al. (2023) associam o termo Indústria 4.0 ao uso de sistemas ciber-físicos em sistemas de produção industrial.

Diversas tecnologias têm sido vinculadas à Indústria 4.0. O Quadro 1 compila em ordem alfabética e conceitua as tecnologias mais referenciadas na literatura sobre Indústria 4.0.

Quadro 1 – Tecnologias da Indústria 4.0

Tecnologia	Descrição	Referências
Big Data e Análise Avançada	Por meio de bancos de dados, os dados coletados são constantemente atualizados e analisados com alta capacidade analítica de algoritmos avançados, e os processos de tomada de decisão são aprimorados.	Rüßmann et al. (2015); Strange e Zucchella (2017) Laskurain et al. (2021); Gomaa et al. (2023).

Blockchain	É um banco de dados distribuído que mantém uma lista de registros completamente crescente, distribuída e sem adulteração, usando nova tecnologia de criptografia e autenticação e mecanismo de consenso em toda a rede.	Bai et al. (2020)
Cibersegurança	Em um mundo hiperconectado, é crucial assegurar comunicações seguras entre sistemas para proteger contra roubo de informações, danos à fabricação e defeitos de qualidade, bem como prevenir desligamentos causados por ataques cibernéticos.	Thames e Schaefer (2017) ; Laskurain et al. (2021)
Computação em Nuvem	A integração da Computação em Nuvem nas empresas oferece benefícios como a promoção da cooperação global e relacionamentos interorganizacionais, além de fornecer espaço de armazenamento adicional para dados importantes de empresas de manufatura.	Pour et al. (2023)
Integração de Sistemas	Integrar tecnologias de informação (como IoT, sistemas ciberfísicos, computação em nuvem, IA,) e automação (robôs, <i>cobots</i> , veículos guiados automaticamente, etc.) em todos os setores de uma empresa, tanto vertical quanto horizontalmente, visa aprimorar o desempenho global.	Abdulnour et al. (2022)
Inteligência Artificial	É uma ciência cognitiva para melhorar as decisões com importantes atividades de pesquisa em muitas áreas, como processamento de imagem, processamento de linguagem natural, robótica ou aprendizado de máquina.	Lee et al., (2018); Laskurain et al. (2021); Gomaa et al. (2023).
Internet das Coisas (IoT)	IoT visa resolver problemas de comunicação entre todos os objetos e sistemas em uma fábrica. A IoT combina máquinas inteligentes e autônomas, análise preditiva avançada e colaboração homem-máquina para melhorar a produtividade, eficiência e confiabilidade.	Wong e Kim (2017); Thramboulidis e Christoulakis (2016); Frank et al. (2019) Laskurain et al. (2021); Gomaa et al. (2023).
Manufatura Aditiva	É um processo industrial controlado por computador que envolve a impressão 3D. A manufatura aditiva cria objetos tridimensionais depositando materiais, geralmente em camadas.	Oesterreich e Teuteberg, (2016) ; Laskurain et al. (2021); Gomaa et al. (2023).
Modelagem e simulação computacional	Simulações prévias à produção permitem obter resultados próximos à realidade, possibilitando às indústrias identificarem defeitos e problemas antes do início efetivo da produção, resultando em economia de tempo e recursos financeiros.	Pour et al. (2023)

Realidade Virtual e Aumentada	Permite simular situações reais para treinar trabalhadores, evitar situações perigosas, melhorar a tomada de decisões.	Laskurain et al. (2021); Gomaa et al. (2023).
Robótica	Os robôs estão se tornando mais autônomos, flexíveis e cooperativos, e em breve poderão interagir uns com os outros e trabalhar com segurança com humanos, e até mesmo aprender com eles.	Kamble et al. (2018) Laskurain et al. (2021)

Fonte: Elaborado pelos autores

Pour et al. (2023) propõem que a Indústria 4.0, reconhecida por sua resiliência, conectividade e capacidades de processamento de dados em tempo real, destaca-se como o principal catalisador da transformação digital contemporânea. A identificação apropriada e implementação de tecnologias específicas da Indústria 4.0 é de suma importância para as instalações de produção, as quais devem alinhar tais tecnologias com seus esquemas operacionais e metas de produção. Diante desse desafio, diversas estruturas de seleção de tecnologia foram propostas, embora muitas delas apresentem complexidade ou exijam dados históricos de instalações de produção, os quais podem não estar prontamente disponíveis.

Nesse contexto, Pour et al. (2023) sugerem que as tecnologias vinculadas à Indústria 4.0 desempenham papel significativo na otimização de diversos aspectos industriais, incluindo o *design* e modelagem de produtos, metodologias de produção, rastreabilidade de matérias-primas e entregas de produtos. Tal implementação é crucial para aprimorar o desempenho global da empresa.

2.2. Barreiras à Indústria 4.0

A compreensão das barreiras na adoção da Indústria 4.0 é crucial para garantir a implementação bem-sucedida das tecnologias avançadas que caracterizam esta quarta revolução industrial. Identificar e analisar essas barreiras permite que as empresas desenvolvam estratégias eficazes para superá-las, maximizando os benefícios das inovações tecnológicas. O Quadro 2 compila em ordem alfabética e descreve as principais barreiras e seus impactos, conforme literatura pesquisada.

Quadro 2 – Barreiras à Indústria 4.0

Barreira	Descrição da barreira	Referências
Baixa Gestão de Fraquezas e Liderança	A falha em identificar fraquezas internas, a falta de visão estratégica e liderança incapaz de motivar e engajar são barreiras significativas. Falta de capacitação, resiliência, governança eficaz e suporte comprometem a coordenação.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)
Falta de Alinhamento Estratégico	A falta de alinhamento estratégico entre objetivos organizacionais e iniciativas tecnológicas fragmenta projetos, gera resistência às mudanças e dificulta a integração de novas tecnologias, comprometendo o retorno sobre o investimento.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)
Falta de Arquitetura de Padrão de	A ausência de padrões claros dificulta a integração de sistemas, resultando em incompatibilidades e silos de informação. A interoperabilidade limitada entre soluções proprietárias aumenta a complexidade e os	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al.

Referência na Indústria 4.0	custos, dificultando a escalabilidade e a conformidade com normas, elevando os riscos operacionais.	(2022), Jankowska et al. (2022)
Falta de Compreensão sobre os Benefícios da Indústria 4.0	O desconhecimento de tecnologias e a subestimação dos benefícios a longo prazo dificultam a adoção da Indústria 4.0. A falta de visão estratégica, comunicação ineficaz e ausência de exemplos práticos aumentam o ceticismo.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)
Falta de Conhecimento e Habilidades dos Funcionários	A deficiência em competências técnicas, como IoT, IA, <i>big data</i> e automação, é uma barreira significativa. A falta de formação contínua, resistência ao aprendizado, escassez de especialistas e a integração insuficiente entre conhecimento técnico e processos de negócio dificultam a adaptação.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023)
Falta de Cultura Organizacional	A resistência cultural e organizacional à adoção de novas tecnologias é causada pela dificuldade de mudar práticas estabelecidas, falta de entendimento, medo do desconhecido e perda de empregos, além da falta de habilidades e suporte gerencial. Envolver os funcionários é essencial para reduzir essa resistência.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)
Falta de Infraestrutura Tecnológica	Deficiências em redes, equipamentos obsoletos, falta de padrões e interoperabilidade criam silos de dados e dificultam a comunicação. Infraestruturas de TI inadequadas limitam a coleta, análise de dados e segurança cibernética, prejudicando a análise em tempo real e a digitalização.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)
Falta de Regras e Regulamentos na Indústria 4.0	A falta de normas de segurança e privacidade desestimula investimentos. A regulamentação é crucial para interoperabilidade e evitar silos de dados. A harmonização regulatória internacional e incentivos governamentais são necessários. Diretrizes sobre responsabilidade e ética são essenciais.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023)
Má qualidade do gerenciamento de dados existente	Discrepâncias, falta de padronização, dados incompletos e obsoletos prejudicam a eficiência e a análise. A integração difícil cria silos, e a segurança e governança são cruciais para qualidade e conformidade.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)
Problemas de Segurança e Privacidade	A interconexão de dispositivos aumenta a vulnerabilidade a ciberataques e ameaças internas. Proteger dados sensíveis é crucial para evitar perdas e cumprir regulamentos como GDPR e LGPD. A computação em nuvem traz riscos adicionais. Gestão adequada de identidade e acesso é essencial para a segurança dos sistemas.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023)
Resistência à Mudança	A resistência à mudança é influenciada pela falta de apoio da liderança, ausência de investimentos em capacitação, comunicação ineficaz, falta de transparência e não envolvimento dos funcionários. A ausência de uma mentalidade de inovação também contribui para essa resistência.	Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022)

Restrição Financeira

Os altos custos iniciais e a incerteza sobre o ROI são barreiras significativas. O acesso limitado a financiamento e prioridades conflitantes de investimento complicam a alocação de recursos. Custos contínuos de manutenção e falta de modelos de negócio sustentáveis também dificultam a adoção de novas tecnologias.

Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023)

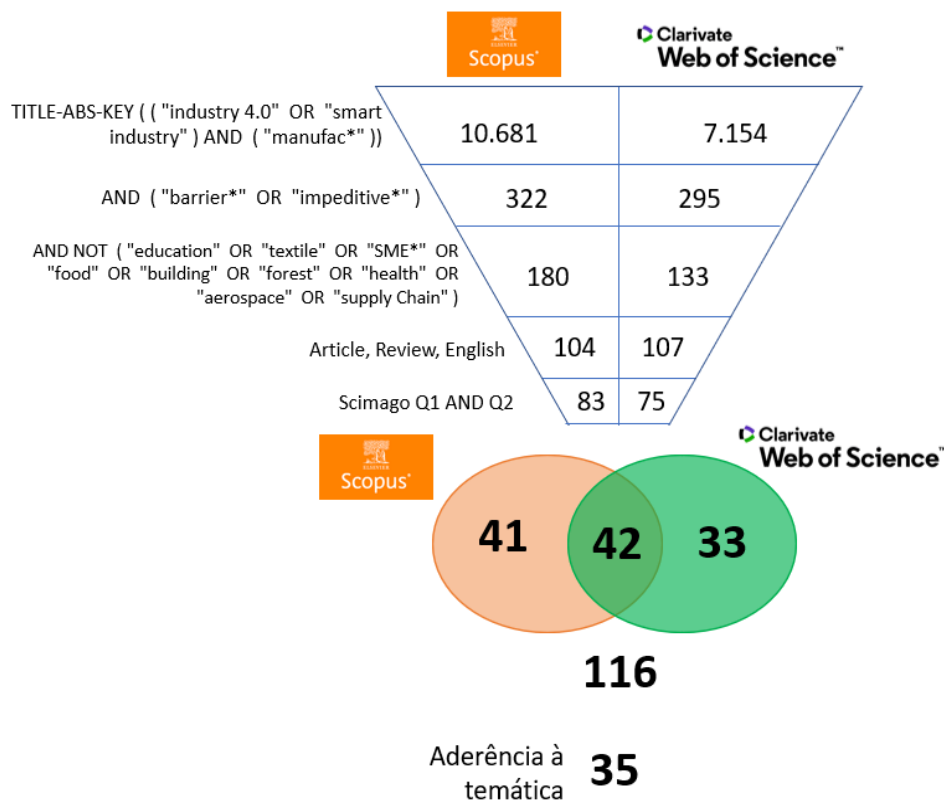
Fonte: Elaborado pelos autores

3. Metodologia

A metodologia adotada neste ensaio teórico sobre as barreiras à adoção da Indústria 4.0 seguiu uma abordagem rigorosa para assegurar a robustez e a relevância dos resultados. O desenvolvimento da pesquisa iniciou-se com um levantamento bibliográfico abrangente, conforme recomendado por Yin (2016), Stake (2016) e Gil (2017), com o objetivo de conceituar os principais constructos utilizados na pesquisa e mostrar a evolução do tema Indústria 4.0. Este levantamento também teve como propósito identificar as principais barreiras à sua adoção.

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus* no período de fevereiro a abril de 2024, garantindo a inclusão de estudos relevantes e atualizados. O processo de seleção dos artigos seguiu critérios rigorosos para assegurar a qualidade e a pertinência das fontes. Inicialmente, foram considerados aproximadamente 10.000 artigos utilizando os termos de busca "industry 4.0" OR "smart industry" AND "manufacturing" Em seguida, aplicou-se um segundo filtro com as palavras "barrier" AND "impeditive" para refinar os resultados e focar nas barreiras específicas à adoção da Indústria 4.0. Após esses filtros, a pesquisa foi reduzida a 35 artigos que apresentavam uma aderência à temática (Figura 1).

Figura 1 – Pesquisa das palavras-chave nas bases dados



Fonte: Elaborado pelos autores

Os artigos selecionados foram analisados qualitativamente para identificar e categorizar as barreiras à adoção da Indústria 4.0. A análise concentrou-se em identificar as barreiras mais frequentemente mencionadas na literatura. As barreiras identificadas foram estruturadas em categorias, conforme descrito por Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) e Govindan e Arampatzis (2023).

4. Análise dos Resultados e Discussões

A implementação da Indústria 4.0 apresenta um conjunto complexo de barreiras que impedem a plena realização de seu potencial. Conforme destacado por Ghobakhloo (2020), a digitalização e a adoção de tecnologias avançadas oferecem oportunidades substanciais para a sustentabilidade e a competitividade industrial. No entanto, a superação dessas barreiras é essencial para que essas oportunidades sejam aproveitadas de maneira eficaz. Esta seção consolida estas barreiras em categorias e propõe ações para mitigá-las com base na literatura.

A falta de alinhamento estratégico entre os objetivos organizacionais e as iniciativas tecnológicas representa um desafio fundamental. A desconexão entre a visão de longo prazo e as ações táticas pode fragmentar projetos e resultar em recursos inadequados, além de resistência às mudanças, como apontado por Raj et al. (2020). Esta barreira pode ser mitigada por meio de um planejamento estratégico robusto que alinha claramente os objetivos tecnológicos com a missão e visão da organização, garantindo que todos os níveis da empresa estejam comprometidos com as metas de transformação digital.

Além disso, a cultura organizacional desempenha um papel crucial na adoção bem-sucedida da Indústria 4.0. Govindan & Arampatzis (2023) enfatizam que a resistência cultural pode ser superada por meio do apoio da liderança, investimentos em capacitação e uma comunicação clara e transparente. Envolver os funcionários no processo de mudança é vital para superar a resistência e facilitar a adaptação às novas tecnologias, promovendo uma mentalidade de inovação e proporcionando formação contínua.

A infraestrutura tecnológica inadequada também se destaca como uma barreira significativa. A falta de redes robustas e equipamentos atualizados limita a capacidade das empresas de coletar e analisar grandes volumes de dados em tempo real. Cugno et al. (2021) sugerem que investimentos em infraestrutura tecnológica são essenciais para suportar a digitalização e garantir a interoperabilidade entre diferentes sistemas. Desenvolver uma infraestrutura tecnológica sólida não só facilita a implementação da Indústria 4.0, mas também melhora a eficiência e a produtividade operacional.

A carência de conhecimento e habilidades específicas entre os funcionários é outra barreira crítica. Conforme destacado por Stentoft e Rajkumar (2020), a formação contínua e o desenvolvimento de competências em áreas emergentes como IoT, IA, *big data* e automação são essenciais para a adaptação bem-sucedida às novas tecnologias. Programas de capacitação e treinamento especializados podem ajudar a suprir essa lacuna, garantindo que os funcionários estejam preparados para lidar com as demandas tecnológicas da Indústria 4.0.

Questões de segurança e privacidade também são destacadas por Calabrese et al. (2022) como barreiras importantes, pois a interconexão de dispositivos e a troca de grandes volumes de dados aumentam a vulnerabilidade a ciberataques. Para mitigar esses riscos, é fundamental adotar práticas robustas de cibersegurança e garantir a conformidade com regulamentações de proteção de dados. A implementação de medidas de segurança eficazes não só protege os dados sensíveis, mas também fortalece a confiança nas tecnologias da Indústria 4.0.

A restrição financeira, especialmente para pequenas e médias empresas, é uma barreira significativa que dificulta a adoção das tecnologias da Indústria 4.0. Singh e Bhanot (2020) destacam a importância de modelos de financiamento acessíveis e sustentáveis que possam

apoiar as empresas na implementação dessas tecnologias. Estratégias de financiamento inovadoras, como parcerias público-privadas e incentivos fiscais, podem facilitar o acesso aos recursos necessários para a transformação digital.

As barreiras à adoção da Indústria 4.0 podem ser classificadas em diferentes categorias conforme sua natureza, refletindo os desafios enfrentados em múltiplas dimensões organizacionais e tecnológicas. Esta categorização permite uma análise mais precisa dos obstáculos, facilitando o direcionamento de ações específicas para cada tipo de barreira. A seguir, as barreiras foram agrupadas em quatro grandes categorias: estratégicas; tecnológicas; humanas; e financeiras e regulatórias. Cada uma dessas categorias abrange um conjunto de desafios inter-relacionados, cuja superação é crucial para que as organizações possam efetivamente navegar na transformação digital imposta pela Indústria 4.0.

A categoria de barreiras estratégicas recai sobre o chamado *C-level* e compreende as seguintes barreiras:

- Falta de Alinhamento Estratégico: A desconexão entre objetivos organizacionais e iniciativas tecnológicas fragmenta projetos e compromete o retorno sobre o investimento (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).
- Baixa Gestão de Fraquezas e Liderança: A ausência de visão estratégica e liderança eficaz impede a coordenação adequada e a superação de desafios internos (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).

Sob responsabilidade do setor de TI, as barreiras tecnológicas são as seguintes:

- Falta de Infraestrutura Tecnológica: Deficiências em redes e equipamentos obsoletos limitam a coleta e análise de dados, prejudicando a digitalização (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).
- Falta de Arquitetura de Padrão de Referência: A ausência de padrões claros dificulta a integração de sistemas, aumentando a complexidade e os custos operacionais (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).
- Problemas de Segurança e Privacidade: A interconexão de dispositivos aumenta a vulnerabilidade a ciberataques, exigindo práticas robustas de cibersegurança (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022; Govindan & Arampatzis, 2023).
- Má Qualidade do Gerenciamento de Dados Existente: Discrepâncias, falta de padronização e dados incompletos ou obsoletos prejudicam a eficiência e a análise, criando silos de dados e complicando a comunicação entre sistemas (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).

A exemplo da categoria anterior, as barreiras de natureza humana cuja responsabilidade é de todos, mas principalmente do RH (Recursos Humanos), também são várias, como detalhado na sequência:

- Falta de Conhecimento e Habilidades dos Funcionários: A deficiência em competências técnicas como IoT e IA dificulta a adaptação às novas tecnologias (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022; Govindan & Arampatzis, 2023).
- Falta de Compreensão sobre os Benefícios da Indústria 4.0: O desconhecimento das tecnologias e seus benefícios a longo prazo aumenta o ceticismo e dificulta a adoção (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).

- Falta de Cultura Organizacional: A resistência cultural às mudanças tecnológicas é um obstáculo significativo, exigindo suporte gerencial e envolvimento dos funcionários (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).
- Resistência à Mudança: Influenciada pela falta de apoio da liderança e comunicação ineficaz, a resistência cultural dificulta a adoção de novas tecnologias (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).

A última categoria compreende as barreiras financeiras e regulatórias cuja responsabilidade usualmente recai sobre as áreas corporativas de *compliance*, controladoria e finanças.

- Restrição Financeira: Os altos custos iniciais e a incerteza sobre o retorno do investimento são barreiras significativas para a adoção da Indústria 4.0 (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022; Govindan & Arampatzis, 2023).
- Falta de Regras e Regulamentos: A ausência de normas de segurança e privacidade impede o investimento, sendo a regulamentação crucial para a interoperabilidade (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020; Cugno et al., 2021; Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022; Govindan & Arampatzis, 2023).

Em suma, a superação das barreiras à adoção da Indústria 4.0 no Brasil exige uma abordagem estratégica integrada que envolve alinhamento organizacional, desenvolvimento cultural, investimento em infraestrutura tecnológica, capacitação contínua dos funcionários, medidas robustas de cibersegurança e soluções financeiras inovadoras. Com essas estratégias, as empresas podem aproveitar plenamente as oportunidades oferecidas pela Indústria 4.0, promovendo a eficiência, competitividade e sustentabilidade no cenário industrial brasileiro.

No agrupamento realizado, constatou-se que as categorias humanas e tecnológicas compreenderam o maior número de barreiras. Convém ressaltar que é arriscado estabelecer um juízo de valor de quais são as maiores barreiras, pois isto depende fortemente do contexto organizacional. Por exemplo, em uma organização de pequeno porte, as restrições financeiras podem ser a maior barreira, ao passo em que outra organização de maior porte, a falta de alinhamento estratégico pode constituir o maior empecilho. Por outro lado, o trabalho conclui que pelo menos em número, e não necessariamente em intensidade, há mais barreiras de natureza humana e tecnológica.

Diante do acelerado avanço tecnológico, torna-se imperativo que as empresas realizem investimentos estratégicos em suas infraestruturas tecnológicas. Entretanto, não se deve limitar o foco exclusivamente à tecnologia, sendo igualmente crucial investir no desenvolvimento do capital humano. A rápida evolução das tecnologias demanda a implementação de novas infraestruturas e evidencia um déficit significativo na qualificação dos profissionais.

Adicionalmente, as barreiras humanas e tecnológicas são frequentemente interdependentes. Por exemplo, a falta de habilidades técnicas entre os funcionários pode não apenas limitar a capacidade de uma organização de utilizar plenamente novas tecnologias, mas também gerar frustração e resistência entre os trabalhadores, que se sentem inadequados ou ameaçados pelas mudanças. Não são raros os casos de subutilização de tecnologias no meio corporativo. Ao mesmo tempo, problemas tecnológicos, como falhas na infraestrutura ou falta de integração entre sistemas, podem aumentar essa resistência, pois os funcionários se deparam com ferramentas que são difíceis de usar ou não funcionam conforme o esperado. Em particular, a recente *hype* em torno do potencial da IA generativa ilustra muito bem este cenário que mistura ao mesmo tempo perplexidade, entusiasmo, receio, desconhecimento e ceticismo.

Essa relação simbiótica entre barreiras humanas e tecnológicas reforça a necessidade de uma abordagem coordenada e integrada para superá-las. As organizações precisam investir tanto no desenvolvimento de competências e na mudança cultural quanto na atualização e

manutenção da infraestrutura tecnológica. Por meio dessa abordagem equilibrada é que as barreiras podem ser efetivamente mitigadas, permitindo uma adoção mais suave e bem-sucedida das inovações trazidas pela Indústria 4.0

5. Conclusão

A adoção da Indústria 4.0 é uma jornada complexa que envolve múltiplas dimensões tecnológicas, organizacionais e culturais. Este estudo teórico identificou e discutiu as principais barreiras que impedem a plena implementação das tecnologias associadas à quarta revolução industrial. Entre as barreiras destacadas, incluem-se a falta de alinhamento estratégico, a resistência cultural, a deficiência em infraestrutura tecnológica, a escassez de conhecimento e habilidades específicas, questões de segurança e privacidade, e restrições financeiras (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020; Stentoft & Rajkumar, 2020).

A falta de alinhamento estratégico emerge como uma barreira significativa, fragmentando iniciativas tecnológicas e resultando em recursos inadequados (Raj et al., 2020). Para superar essa barreira, é essencial que as organizações desenvolvam planos estratégicos robustos que alinhem suas metas tecnológicas com a visão e missão corporativa. A cultura organizacional resistente à mudança pode ser mitigada por meio do apoio da liderança, investimentos em capacitação contínua e uma comunicação clara e transparente (Govindan & Arampatzis, 2023).

A deficiência em infraestrutura tecnológica é um obstáculo que exige investimentos significativos para atualizar redes e equipamentos, garantindo a interoperabilidade e a capacidade de análise em tempo real (Cugno et al., 2021). A escassez de conhecimento e habilidades específicas entre os funcionários pode ser abordada através de programas de formação contínua e desenvolvimento de competências em áreas emergentes como IoT, IA, big data e automação (Stentoft & Rajkumar, 2020).

Questões de segurança e privacidade representam barreiras críticas que necessitam de práticas robustas de cibersegurança e conformidade com regulamentações de proteção de dados, fortalecendo a confiança nas tecnologias da Indústria 4.0 (Calabrese et al., 2022). As restrições financeiras, especialmente para pequenas e médias empresas, podem ser superadas por meio de modelos de financiamento inovadores, como parcerias público-privadas e incentivos fiscais (Singh & Bhanot, 2020).

Essas barreiras foram agrupadas em quatro grandes categorias: estratégicas; tecnológicas; humanas; e financeiras e regulatórias. Esse agrupamento permite uma análise mais precisa dos desafios enfrentados pelas organizações, facilitando o desenvolvimento de ações específicas para cada tipo de barreira.

Entendida como a principal contribuição deste ensaio teórico, a categorização das barreiras não apenas organiza o entendimento sobre os obstáculos à implementação da Indústria 4.0, mas também serve como um guia para a priorização de investimentos e esforços de transformação digital. Dessa forma, as empresas podem adotar uma abordagem mais focada e integrada, que considere as especificidades de cada barreira e a interdependência entre elas.

Em síntese, a superação das barreiras à adoção da Indústria 4.0 requer uma abordagem estratégica integrada que englobe alinhamento organizacional, desenvolvimento cultural, investimentos em infraestrutura tecnológica, capacitação contínua, medidas robustas de cibersegurança e soluções financeiras inovadoras. Ao implementar essas estratégias, as empresas brasileiras estarão mais bem preparadas para aproveitar plenamente as oportunidades oferecidas pela Indústria 4.0, promovendo a eficiência, competitividade e sustentabilidade no cenário industrial global. A continuidade desta pesquisa, através de estudos empíricos que investiguem a aplicação prática das estratégias propostas, contribuirá para um entendimento mais profundo das dinâmicas envolvidas e fornecerá diretrizes valiosas para a implementação eficaz da Indústria 4.0. Estudos futuros podem se concentrar em desenvolver proposições

concretas para transpor as barreiras identificadas, avaliando a eficácia de diferentes abordagens e adaptando-as às necessidades específicas das indústrias brasileiras (Govindan & Arampatzis, 2023).

As limitações desta pesquisa incluem sua natureza teórica e exploratória, baseada em revisão bibliográfica e sem dados empíricos (Yin, 2016; Gil, 2017). Além disso, as conclusões podem não ser aplicáveis a todas as indústrias devido à diversidade de setores e níveis de maturidade tecnológica (Tortorella & Fettermann, 2018). A falta de dados empíricos e a possível desatualização das fontes bibliográficas utilizadas também limitam a robustez das conclusões (Laskurain et al., 2021).

Referências

Abdulnour, S., Baril, C., Abdulnour, G., & Gamache, S. (2022). Implementation of Industry 4.0 Principles and Tools: Simulation and Case Study in a Manufacturing SME. *Sustainability*, 14(10), 6336.

Allen, R. C. (2009). *The British industrial revolution in global perspective*. Cambridge University Press.

Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776.

Belvedere, V., Grando, A., & Bielli, P. (2013). A quantitative investigation of the role of information and communication technologies in the implementation of a product-service system. *International Journal of Production Research*, 51(2), 410-426.

Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C. M. T., & Campos, L. M. (2016). Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 182-197.

Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790.

Calabrese, A., Dora, M., Levialdi Ghiron, N., & Tiburzi, L. (2022). Industry's 4.0 transformation process: how to start, where to aim, what to be aware of. *Production Planning & Control*, 33(5), 492-512.

Ciano, M. P., Dallasega, P., Orzes, G., & Rossi, T. (2021). One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. *International Journal of Production Research*, 59(5), 1386-1410.

Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2013). *Pesquisa de Métodos Mistos - Série Métodos de Pesquisa*. Penso Editora.

Cugno, M., Castagnoli, R., & Büchi, G. (2021). Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120756.

Easterby-Smith, M., & Lyles, M. A. (2012). The evolving field of organizational learning and knowledge management. In *Handbook of Organizational Learning and Knowledge Management* (pp. 1-20).

Frank, A. G., Mendes, G. H., Ayala, N. F., & Ghezzi, A. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 341-351.

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869.

Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa* (6th ed.). São Paulo: Atlas.

Govindan, K., & Arampatzis, G. (2023). A framework to measure readiness and barriers for the implementation of Industry 4.0: A case approach. *Electronic Commerce Research and Applications*, 59, 101249.

Gomaa, E., Khan, M., Yang, Z., & Mo, Y. (2023). Digital transformation in the cement industry: Assessing the potential of Industry 4.0 technologies. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136732.

Guo, D., Li, M., Lyu, Z., Kang, K., Wu, W., Zhong, R. Y., & Huang, G. Q. (2021). Synchroperation in industry 4.0 manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 238, 108171.

Horn, J., Rosenband, L. N., & Smith, M. R. (Eds.). (2010). *Reconceptualizing the industrial revolution*. MIT Press.

Hung, S. W., Wang, A. P., & Chang, C. C. (2012, July). Exploring the evolution of nano technology. In *2012 Proceedings of PICMET'12: Technology Management for Emerging Technologies* (pp. 2598-2604). IEEE.

Jankowska, B., Mińska-Struzik, E., Bartosik-Purgat, M., Götz, M., & Olejnik, I. (2023). Industry 4.0 technologies adoption: barriers and their impact on Polish companies' innovation performance. *European Planning Studies*, 31(5), 1029-1049.

Javid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*.

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425.

Landscheidt, S., & Kans, M. (2016). Automation practices in wood product industries: Lessons learned, current practices and future perspectives. In *The 7th Swedish Production Symposium SPS 25-27 October 2016, Lund, Sweden*. Lund University.

Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B., & Uriarte-Gallastegi, N. (2021). Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128944.

Lassen, A., & Wæhrens, B. V. (2021). Labour 4.0: developing competences for smart production. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 14(4), 659-679.

Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20-23.

Macedo, A. R. O., Fonseca, J. M. S., Alves, R. D. P., Oliveira, J. A., Carvalho, M. S., & Pereira, G. (2018). The impact of Industry 4.0 on the environment in the cement industry supply chain.

Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629.

Liao, Y., Loures, E. R., Deschamps, F., Brezinski, G., & Venâncio, A. (2018). The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison. *Production*, 28.

Marconi, M. D. A., & Lakatos, E. M. (2003). *Fundamentos de metodologia científica* (5th ed.). São Paulo: Atlas.

Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.

Parthasarathi, V., & Thilagavathi, G. (2011). Synthesis and characterization of zinc oxide nanopartilce and its application on fabrics for microbe resistant defence clothing. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 392-398.

Pour, P. D., Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2023). An Industry 4.0 Technology Selection Framework for Manufacturing Systems and Firms Using Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods. *Systems, 11*(4), 192.

Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & 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.

Rakic, S., Pavlovic, M., & Marjanovic, U. (2021). A precondition of sustainability: Industry 4.0 readiness. *Sustainability, 13*(12), 6641.

Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research, 58*(6), 1644-1661.

Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2019). Industry 4.0: smart scheduling. *International Journal of Production Research, 57*(12), 3802-3813.

Rostow, W. (1988). *Essays on a half Century: Ideas, Politics and Action*. Westview Press.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group, 9*(1), 54-89.

Singh, R., & Bhanot, N. (2020). An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research, 58*(8), 2454-2476.

Stake, R. E. (2016). *Pesquisa qualitativa: estudando como as coisas funcionam*. Penso Editora.

Stentoft, J., & Rajkumar, C. (2020). The relevance of Industry 4.0 and its relationship with moving manufacturing out, back and staying at home. *International Journal of Production Research, 58*(10), 2953-2973.

Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review, 25*(3), 174-184.

Thames, L., & Schaefer, D. (2017). Industry 4.0: An overview of key benefits, technologies and challenges. In *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing* (pp. 1-33).

Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research, 56*(8), 2975-2987.

Tortorella, G., Sawhney, R., Jurburg, D., de Paula, I. C., Tlapa, D., & Thurer, M. (2021). Towards the proposition of a lean automation framework: Integrating industry 4.0 into lean production. *Journal of Manufacturing Technology Management, 32*(3), 593-620.

Thramboulidis, K., & Christoulakis, F. (2016). UML4IoT—A UML-based approach to exploit IoT in cyber-physical manufacturing systems. *Computers in Industry, 82*, 259-272.

Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019). Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability. *Sustainability, 11*(5), 1439.

Vimal, K. E. K., Churi, K., & Kandasamy, J. (2022). Analysing the drivers for adoption of Industry 4.0 technologies in a functional paper–cement–sugar circular sharing network. *Sustainable Production and Consumption, 31*, 459-477.

Wachnik, B., Kłodawski, M., & Kardas-Cinal, E. (2022). Reduction of the information gap problem in Industry 4.0 projects as a way to reduce energy consumption by the industrial sector. *Energies, 15*(3), 1108.

Wong, K. S., & Kim, M. H. (2017). Privacy protection for data-driven smart manufacturing systems. *International Journal of Web Services Research, 14*(3), 17-32.

- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
- Yin, R. K. (2016). *Pesquisa qualitativa do início ao fim*. Penso Editora.
- Zhang, C., Chen, Y., Chen, H., & Chong, D. (2021). Industry 4.0 and its implementation: A review. *Information Systems Frontiers*, 1-11.