

TRAJETÓRIAS E DESAFIOS DA ADOÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 EM PEQUENAS EMPRESAS DO SETOR CALÇADISTA

TRAJECTORIES AND CHALLENGES OF INDUSTRY 4.0
ADOPTION IN SMALL FOOTWEAR COMPANIES

JEFERSON MACHADO DE MOURA
jeferson.mooura@gmail.com
Universidade Feevale

DUSAN SCHREIBER
dusan@feevale.br
Universidade Feevale
<https://orcid.org/0000-0003-4258-4780>

LUCIANE PEREIRA VIANA
viana.luciane.lu@gmail.com
Faculdade Novo Hamburgo
<https://orcid.org/0000-0002-9577-728X>

RESUMO

Objetivo: Compreender as trajetórias e os principais desafios que influenciam a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 em pequenas empresas do setor calçadista brasileiro, classificando a maturidade digital de cada organização em relação à sua capacidade de enfrentamento dos obstáculos de implementação.

Proposta: Delinear uma matriz de maturidade digital e correlacionar os estágios de adoção tecnológica com a natureza das barreiras, propondo *insights* para entender a transição da I4.0 em setores tradicionais.

Abordagem Teórica: Fundamenta-se na interseção entre benefícios e barreiras na adoção de tecnologias da Indústria 4.0.

Provocação: Demonstrar que a transição para a I4.0 nas pequenas empresas não é determinada prioritariamente pela tecnologia, mas pela capacidade de superação da insegurança estratégica e dos desafios de competências e culturais, sendo o investimento necessário apenas um sintoma de uma imaturidade sistêmica.

Métodos: Abordagem qualitativa e descritiva com estudo de caso múltiplo em quatro pequenas empresas calçadistas brasileiras. A coleta de dados envolveu entrevistas semiestruturadas, observação sistemática e análise documental.

Resultados: Identificou-se uma adoção desigual: desde o estágio inicial (produção manual e barreiras financeiras/estruturais - Alfa) até a maturidade avançada (visão computacional e CPS - Delta). As barreiras evoluem de limitações orçamentárias e falta de equipe qualificada nas fases iniciais, para desafios de integração de sistemas legados e adaptação cultural nas fases progressivas.

Conclusões: A contribuição reside na evidência de que a I4.0 exige uma transformação sistêmica e não apenas tecnológica. A implicação prática é a necessidade de focar em formação contínua para aumentar a competitividade em setores tradicionais.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Transformação Digital. Transformação Organizacional; Maturidade Digital. Setor Calçadista.

ABSTRACT

Objective: *To understand the trajectories and main challenges that influence the adoption of Industry 4.0 technologies in small companies in the Brazilian footwear sector, classifying the digital maturity of each organization in relation to its capacity to overcome implementation obstacles.*

Proposal: *To outline a digital maturity matrix and correlate the stages of technological adoption with the nature of the barriers, proposing insights to understand the transition to Industry 4.0 in traditional sectors.*

Theoretical Approach: *Based on the intersection between benefits and barriers in the adoption of Industry 4.0 technologies.*

Provocation: *To demonstrate that the transition to Industry 4.0 in small companies is not primarily determined by technology, but by the ability to overcome strategic insecurity and competency and cultural challenges, with cost being only a symptom of systemic immaturity.*

Methods: *Qualitative and descriptive approach with a multiple case study in four small Brazilian footwear companies. Data collection involved semi-structured interviews, systematic observation, and document analysis.*

Results: *Uneven adoption was identified: from the initial stage (manual production and financial/structural barriers - Alpha) to advanced maturity (computer vision and CPS - Delta). The barriers evolve from budgetary limitations and lack of qualified staff in the initial phases, to challenges of integrating legacy systems and cultural adaptation in the progressive phases.*

Conclusions: *The contribution lies in the evidence that Industry 4.0 requires a systemic transformation and not just a technological one. The practical implication is the need to focus on continuous training to increase competitiveness in traditional sectors.*

Keywords: *Industry 4.0. Digital Transformation. Organizational Transformation. Digital Maturity. Footwear Sector.*

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 (I4.0 representa a quarta fase industrial, caracterizada pela convergência entre sistemas físicos e digitais, que integra tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, *big data* e sistemas ciberfísicos, em processos produtivos automatizados e digitais (Bibby & Dehe, 2018; Frank, Dalenogare, & Ayala, 2019). Essa fase oferece oportunidades transformadoras para o setor manufatureiro ao permitir a integração e a comunicação em tempo real entre pessoas, máquinas e produtos (Silva et al., 2019; Pacchini et al., 2019; Pagliosa et al., 2019), o que resulta em fábricas inteligentes, otimização de operações e aumento da competitividade global (Arcidiacono et al., 2022; Elnadi & Abdallah, 2024).

Autores como Gilchrist (2016) apontam princípios fundamentais, como virtualização e interoperabilidade, enquanto Cavalcante e Almeida (2017) categorizam suas tecnologias-chave. O sucesso na adoção e na implementação dessas tecnologias, que variam desde sistemas de corte a laser até o uso de sensores para coleta de dados (Ghobakhloo & Iranmanesh, 2018;

Singh et al., 2023), depende essencialmente da superação de desafios técnicos e estruturais, e da integração de fatores humanos e capacitação (Neumann et al., 2021; Cucculelli et al., 2021), exigindo estratégias que alinhem operações, cultura e competências organizacionais (Elnadi & Abdallah, 2024; Al-Khatib et al., 2024).

Apesar da discussão sobre os benefícios e os desafios inerentes à I4.0, a literatura acadêmica ainda demonstra uma lacuna no que tange à segmentos tradicionais e de baixa intensidade tecnológica da manufatura. Uma busca recente na base de dados Web of Science (outubro de 2025) confirmou essa carência ao combinar os termos "industry 4.0" e "footwear", foram encontrados somente dois artigos. A pesquisa de Agolli et al. (2025) no setor de calçados da Albânia, revela uma discrepância entre a "intenção" e a "realização" da I4.0, sublinhando a falta de estudos que investiguem os fatores impeditivos que limitam a completude da transição digital em contextos específicos.

Adicionalmente, o artigo de Jimeno-Morenilla et al. (2021) sobre habilitadores tecnológicos em setores tradicionais reforça a carência de estudos empiricamente robustos que testem ou validem modelos teóricos de adoção da I4.0 fora de setores de alta tecnologia. Essa lacuna sinaliza a necessidade de investigação sobre as trajetórias de adoção e os desafios reais de implementação da I4.0 em indústrias que, como a calçadista, possuem recursos limitados.

Diante desse cenário, esta pesquisa se propõe a responder à seguinte pergunta: Quais são os principais estágios e desafios de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 observados nas pequenas empresas do setor calçadista? O objetivo é compreender as trajetórias e os principais desafios que influenciam a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 em pequenas empresas do setor calçadista brasileiro, classificando a maturidade digital de cada organização em relação à sua capacidade de enfrentamento dos obstáculos de implementação.

A relevância do tema justifica-se pela representatividade do segmento de pequenas empresas na indústria calçadista nacional, conforme evidenciado pelo Relatório Setorial da Abicalçados (2024), que contabiliza 1.015 Empresas de Pequeno Porte (EPP) e mais de 48,4 mil postos de trabalho em 2023. Deste modo, estudar as barreiras e os caminhos da I4.0 nesse segmento é crucial para subsidiar estratégias gerenciais que visem aumentar a eficiência, a competitividade e a sustentabilidade de uma parte vital da economia. Metodologicamente, este estudo adota uma abordagem qualitativa e descritiva, utilizando um estudo de caso múltiplo em quatro pequenas empresas do Vale do Rio dos Sinos/RS. Os dados foram triangulados por entrevistas, observação sistemática e análise documental.

O artigo está estruturado em cinco seções: após esta introdução, é apresentado o referencial teórico, que discute os principais conceitos, benefícios e desafios da I4.0; a terceira seção detalha a metodologia de pesquisa; a quarta seção apresenta os resultados e discussões, que analisam a adoção tecnológica e os desafios enfrentados; a quinta seção lista as considerações finais, resumindo as contribuições, incluindo limitações e sugestões de novos estudos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A Indústria 4.0 (I4.0) representa a quarta grande transformação industrial, caracterizada pela integração entre sistemas físicos e digitais e pela convergência de tecnologias avançadas que redefinem a lógica produtiva (Soliani et al., 2025; Ribeiro et al., 2022). Historicamente, as revoluções industriais transformaram os sistemas de produção: a Indústria 1.0 introduziu a mecanização a vapor; a 2.0 ampliou a capacidade produtiva por meio da eletrificação e da produção em massa; e a 3.0 consolidou a automação e a microeletrônica. Esses avanços constituíram a base para a I4.0 (Xu, Xu & Li, 2018; Javaid et al., 2020).

A essência da I4.0 reside na combinação de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, inteligência artificial (IA), manufatura aditiva, sistemas ciberfísicos (CPS), entre outros (Soliani et al., 2025; Ribeiro et al., 2022). De forma integrada, essas tecnologias ampliam os níveis de automação, conectividade e tomada de decisão baseada em dados em tempo real, remodelando processos produtivos, modelos de gestão e capacidades organizacionais (Hanauer, Schreiber, & Viana, 2025; Soliani et al., 2025; Pagliosa et al., 2019). A transformação, portanto, vai além da adoção de ferramentas tecnológicas, pois redefine fronteiras operacionais e sistêmicas (Marum et al., 2022) e consolida-se como movimento de renovação gerencial (Mahmood & Mubarik, 2020; Gadre, 2020).

Embora o conceito de I4.0 esteja amplamente difundido, permanece heterogêneo devido à sua amplitude e complexidade. A definição inicial que enfatiza a digitalização dos ativos físicos para criar uma infraestrutura conectada ao longo da cadeia de valor destaca o caráter integrador do modelo (Bibby & Dehe, 2018). Em direção complementar, a visão da I4.0 como um conjunto de tecnologias que oferece novos serviços a clientes e organizações (Pacchini et al., 2019) ressalta sua capacidade de transformação orientada ao valor. Já Caldeira et al. (2020) reforçam que a digitalização industrial não apenas aprimora eficiência, mas também impulsiona novos arranjos organizacionais capazes de gerar respostas mais rápidas e inteligentes às demandas do mercado.

As tendências tecnológicas que compõem a I4.0 são amplas e incluem tecnologias de informação, digitais, operacionais e de manufatura avançada (Zheng et al., 2021). Frank, Dalenogare e Ayala (2019) classificam essas tendências em tecnologias facilitadoras (*softwares* e redes legadas) e tecnologias principais (CPS, IoT, IA e computação em nuvem). Estas últimas são consideradas responsáveis pela maior flexibilidade, automação e profundidade transformacional (Muscio & Ciffolilli, 2020). Singh et al. (2023) reforçam que o sucesso da I4.0 depende da integração eficaz entre essas diferentes tecnologias.

Frank, Dalenogare e Ayala (2019) diferenciam a adoção em tecnologias de *front-end*, (manufatura inteligente, produtos inteligentes, cadeia de suprimentos inteligente e trabalho inteligente) e tecnologias de base (IoT, *big data*, nuvem e análises avançadas). Em estudo com 92 empresas, os autores concluíram que a manufatura inteligente tende a liderar as iniciativas de adoção, mas a transformação plena depende da consolidação das tecnologias de base.

A implementação da I4.0 também é orientada por princípios estruturantes, tais como interoperabilidade, virtualização, capacidade em tempo real, orientação a serviços, modularidade, descentralização e integração sistêmica (Ghobakhloo & Iranmanesh, 2018; Elnadi & Abdallah, 2024). Esses princípios permitem a construção de ambientes industriais conectados e adaptativos, nos quais decisões e fluxos produtivos tornam-se mais ágeis e inteligentes.

Há relativo consenso na literatura sobre os benefícios gerados pela I4.0, incluindo maior eficiência produtiva, otimização de custos e melhor aproveitamento de recursos por meio de sistemas autônomos como CPS, IoT e *big data* (Culot et al., 2020; Elnadi & Abdallah, 2024; 2025; Ghobakhloo, 2018; Wang et al., 2020). Além disso, há concordância de que a I4.0 promove um aumento na conectividade entre empresas manufatureiras, demandando uma gestão inteligente focada na cadeia de suprimentos e nas estratégias empresariais (Cheng, 2016; Hanauer, Schreiber, & Viana, 2025; Soliani et al., 2025; Ribeiro et al., 2022). Os autores também convergem quanto ao potencial da I4.0 de promover ganhos ambientais, como redução de resíduos e emissões; e sociais, incluindo melhorias de segurança e bem-estar no trabalho (Amin et al., 2024; Elnadi & Abdallah, 2024).

Contudo, a consolidação da I4.0 ainda é marcada por divergências conceituais, especialmente entre abordagens centradas na tecnologia e perspectivas que destacam dimensões humanas e socioorganizacionais (Parra Llanos & Campos, 2025; Ribeiro et al., 2022). Estas últimas enfatizam o papel das capacidades humanas, da cultura organizacional (Letto et al., 2022; Elnadi & Abdallah, 2024; Neumann et al., 2021) e das práticas de sustentabilidade (Parra Llanos & Campos, 2025; Ribeiro et al., 2022; Messeni Petruzzelli et al., 2022) como elementos fundamentais do modelo digital. Em outras palavras, há divergência no quanto a transformação demanda uma abordagem centrada nas pessoas (Letto et al., 2022) e no desenvolvimento de capacidades dinâmicas para adaptação cultural (Al-Khatib et al., 2024).

Outro ponto de divergência refere-se ao ritmo de implementação. Por exemplo, para alguns autores a adoção é desigual, sobretudo em Pequenas e Médias Empresas (PMEs), devido a restrições financeiras, desconhecimento tecnológico e dificuldades de integração com estruturas legadas (Hanauer, Schreiber, & Viana, 2025). Afinal, a decisão de incorporar tecnologias exige análises estruturadas, considerando custo, impacto operacional e capacidade interna de absorção, fatores que adicionam complexidade ao processo decisório (Silva et al., 2022).

A literatura também destaca barreiras que dificultam a transição para a I4.0, incluindo resistência gerencial devido ao alto custo de investimento (Hanauer, Schreiber, & Viana, 2025; Ghobakhloo, 2018; Elnadi & Abdallah, 2024), necessidade de compromissos organizacionais sólidos e planejamento estratégico adequado (Elnadi & Abdallah, 2024). As lacunas de competências emergem como obstáculos centrais, dada a necessidade de habilidades específicas relacionadas às tecnologias digitais (Soliani et al., 2025; Cucculelli et al., 2021; Letto et al., 2022).

A resistência cultural, muitas vezes associada ao receio de substituição pela automação, reforça a importância de programas de capacitação e da promoção de culturas de inovação (Elnadi & Abdallah, 2024). Além disso, questões de segurança cibernética ampliam os desafios, em razão do maior volume de dados e da crescente conectividade (Elnadi & Abdallah, 2024). Contudo, Ribeiro et al. (2022) salientam que a literatura ainda é fragmentada, apontando a necessidade de modelos mais robustos que expliquem como a I4.0 influencia processos de criação e uso do conhecimento.

Estudos recentes buscam oferecer diretrizes práticas para superar as barreiras de implementação. Destacam-se *frameworks* estruturados de adoção, como o modelo em camadas para tecnologias de *front-end* e de base (Frank, Dalenogare & Ayala, 2019). Paralelamente, pesquisas têm explorado o potencial da I4.0 para sustentabilidade e economia circular, enfatizando a otimização de recursos (Parra Llanos & Campos, 2025). A tomada de decisão tecnológica também tem sido investigada, reforçando a importância de critérios claros de priorização (Silva et al., 2022).

Para PMEs, capacidades dinâmicas, cooperação interna e externa e uso estratégico de dados são apontados como essenciais para ampliar competitividade no ambiente digital (Al-Khatib et al., 2024).

Em síntese, a I4.0, fundamentada em princípios como interoperabilidade e virtualização (Ghobakhloo & Iranmanesh, 2018; Elnadi & Abdallah, 2024), configura-se como um sistema integrado de criação de valor que vai além da simples automação. Embora suas tecnologias ampliem produtividade, reduzam gargalos e promovam integração dos processos (Hanauer, Schreiber & Viana, 2025), a adoção permanece condicionada a desafios organizacionais, culturais e financeiros. A desigualdade no ritmo de implementação evidencia que o processo não é linear, variando entre mercados e regiões e exigindo estratégias organizacionais adaptáveis (Hanauer, Schreiber & Viana, 2025).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo faz parte de uma pesquisa mais ampla que analisa de que forma o processo de transformação digital em pequenas empresas do setor calçadista influencia a assimilação de tecnologias da I4.0. No entanto, a ênfase analítica deste manuscrito recai primordialmente sobre as tecnologias e os desafios da implementação da I4.0. Adotou-se uma abordagem qualitativa e descritiva, tal delineamento é justificado pela necessidade de apreender os significados subjetivos e as dinâmicas sociais que emergem da I4.0 (Gil, 2019; Demo, 2022). A perspectiva qualitativa permite uma investigação detalhada do como e porquê das ações organizacionais e das percepções dos atores envolvidos, superando a mera quantificação de eventos.

A estratégia de investigação empregada foi o estudo de caso múltiplo (Yin, 2015). A amostra foi delimitada a quatro empresas de pequeno porte pertencentes ao setor de calçados. A escolha do contexto geográfico recaiu sobre o Vale do Rio dos Sinos/RS, uma região reconhecida nacionalmente como um polo industrial calçadista. A seleção das empresas foi orientada por critérios de conveniência e acessibilidade (Yin, 2015), mas também pela relevância estratégica dessas organizações no polo calçadista. Embora pequenas em termos de número de colaboradores, as empresas Alfa, Beta, Delta e Gama possuem trajetórias consolidadas, com tempos de existência que variam entre 10 e 25 anos, e desempenham papéis importantes em segmentos específicos da cadeia de suprimentos do calçado.

As quatro organizações selecionadas concentram suas atividades na etapa de produção de serviços pré-fabricados para calçados (incluindo solados, palmilhas, entressolas, entre outros). Esse conjunto de características justificou sua escolha como casos representativos. As características essenciais de cada empresa estão detalhadas a seguir:

- Empresa Alfa: Fundada há 15 anos, tem foco no corte e na preparação de insumos sintéticos para o segmento esportivo. Opera com 50 colaboradores e possui uma capacidade produtiva de 1.200 pares/dia.
- Empresa Beta: Com 12 anos de atuação, é especializada na modelagem e montagem de palmilhas destinadas a calçados femininos. Emprega 68 colaboradores e apresenta uma capacidade produtiva de 1.800 pares/dia.

- Empresa Gama: Há 25 anos no mercado, concentra-se na fabricação de solados, utilizando borracha e TPU, para calçados casuais e de segurança. Conta com um quadro de 76 empregados e uma produção diária de 2.000 pares.
- Empresa Delta: Com cerca de 10 anos de existência, dedica-se ao corte e à preparação de couro para calçados de alto padrão. Opera com 65 colaboradores e uma produção de 2.300 pares/dia, exigindo mão de obra altamente qualificada e rigor técnico.

Para assegurar a triangulação dos dados, foram mobilizadas três técnicas de coleta: entrevistas semiestruturadas, observação sistemática não participante e análise documental (Yin, 2015; Marconi & Lakatos, 2017). Foram realizadas oito entrevistas presenciais durante os meses de março e abril de 2025. Os participantes foram selecionados com base em sua experiência no setor calçadista e um tempo de atuação na respectiva empresa. Este critério visou garantir a obtenção de uma visão abrangente, que abarcasse tanto a perspectiva estratégica quanto a operacional dos processos investigados. Após a obtenção do devido consentimento, todas as entrevistas foram gravadas em áudio e integralmente transcritas.

O perfil sociodemográfico detalhado dos entrevistados (incluindo cargo, idade, tempo de empresa, escolaridade e experiência na área) pode ser consultado na Tabela 1.

Tabela 1 - Perfil dos Entrevistados

Entrevistado	Cargo	Empresa	Tempo na Empresa (anos)	Escolaridade	Experiência na Área (anos)
1	Diretor Geral	Alfa	10	Ensino Médio Completo	20
2	Gerente de Produção	Alfa	7	Ensino Fundamental Completo	15
3	Diretor Geral	Beta	12	Ensino Superior Incompleto (Administração)	22
4	Gerente de Produção	Beta	10	Ensino Médio Incompleto	17
5	Diretor Geral	Gama	9	Ensino Fundamental Completo	18
6	Gerente de Produção	Gama	6	Ensino Médio Completo	16
7	Diretor Geral	Delta	15	Ensino Superior Completo (Administração)	25
8	Gerente de Produção	Delta	10	Ensino Médio Completo	19

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

O roteiro de perguntas foi estruturado de forma semiestruturada, elaborado com base nas categorias teóricas predefinidas (Figura 1). Este formato facilitou a exploração dos tópicos centrais da pesquisa, ao mesmo tempo em que conferiu a flexibilidade necessária para que os entrevistados detalhassem suas percepções e experiências.

Figura 1 - Categorias Teóricas Centrais



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A observação sistemática foi realizada na modalidade não participante. Um dos pesquisadores acompanhou o ambiente empresarial sem intervir nas atividades rotineiras das organizações. O registro de práticas, interações e comportamentos organizacionais ocorreu durante as visitas in loco (Alfa: 11 a 14/03/2025; Beta: 24 a 27/03/2025; Delta: 07 a 10/04/2025; Gama: 21 a 24/04/2025). Um *check-list* seguindo as mesmas categorias teóricas (Figura 1) foi empregado como ferramenta de suporte para orientar os aspectos observados. A análise documental consistiu no exame de documentos e registros internos os quais subsidiaram a contextualização das práticas observadas e complementaram as informações obtidas nas entrevistas. A coleta destes materiais ocorreu em paralelo às datas das observações presenciais.

A análise dos dados empíricos foi conduzida por meio da Análise de Conteúdo, seguindo o protocolo de três fases proposto por Bardin (2016):

1. Pré-análise: Esta etapa envolveu a organização e o preparo do *corpus* da pesquisa, que englobou as entrevistas transcritas, anotações de observação e documentos coletados. As atividades incluíram a leitura flutuante, a seleção e delimitação do material de análise, a definição dos eixos temáticos a serem explorados, a referenciação de trechos que evidenciavam as práticas e percepções sobre a I4.0.
2. Exploração do Material: Consistiu na codificação, classificação e categorização dos dados, com o propósito de realizar a descrição analítica do conteúdo e identificar padrões recorrentes. O *software* NVivo foi utilizado para a codificação sistemática, garantindo a

organização e a classificação dos segmentos das entrevistas e definindo as duas categorias temáticas: Tecnologias da I4.0 Implementadas e Desafios na Implementação da I4.0. Cada segmento transcrito foi associado à sua respectiva categoria, estabelecendo as unidades de registro. O uso do NVivo assegurou a eficiência da categorização e a rastreabilidade entre os dados brutos e as categorias analíticas.

3. Tratamento dos Resultados e Inferência: Esta fase compreendeu o tratamento qualitativo dos resultados obtidos. A análise interpretativa e as inferências buscaram responder ao objetivo da pesquisa, estabelecendo uma conexão entre os dados empíricos e os fundamentos teóricos que balizaram o estudo.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados empíricos obtidos a partir da pesquisa de campo realizada em quatro pequenas empresas do setor calçadista no Vale do Rio dos Sinos/RS. Ao final, uma figura síntese facilita a visualização das informações.

4.1 Tecnologias da Indústria 4.0 Implementadas

A I4.0 caracteriza-se por um conjunto de tecnologias avançadas que permitem a criação de ambientes produtivos altamente conectados, flexíveis e autônomos (Ghobakhloo & Iranmanesh, 2018; Singh et al., 2023). No entanto, a aplicação prática destas tecnologias nas empresas estudadas revela variações no nível de adoção, refletindo uma implementação desigual, um aspecto debatido na literatura sobre PMEs (Hanauer, Schreiber & Viana, 2025).

Empresa Alfa: as tecnologias da I4.0 ainda não foram implementadas. Segundo E1, “não ocorreu nenhuma tecnologia da Indústria 4.0 por aqui, nós estamos começando, em certa medida tateando”. E2 reforça que “a produção continua 100% manual” e existem apenas intenções futuras de buscar alguma automação. A observação sistemática na empresa Alfa corrobora o cenário, constatando-se um ambiente produtivo inteiramente manual, sem o uso de sensores, automação, conectividade em tempo real ou qualquer sistema de análise de dados. As tarefas operacionais seguem processos tradicionais, e não há evidências de integração digital ou tecnologias típicas da I4.0. As ferramentas tecnológicas presentes estão restritas a planilhas eletrônicas e a um software financeiro básico, como apontado no quadro de uso de softwares fornecido pela empresa. Nenhum sistema de controle de produção foi identificado. Esse cenário caracteriza um estágio inicial de maturidade digital, em que a consciência sobre a I4.0 é incipiente, mas as limitações técnicas, culturais e financeiras ainda impedem avanços práticos, espelhando os obstáculos iniciais descritos por Ghobakhloo e Iranmanesh (2018) e Elnadi e Abdallah (2024).

Empresa Beta: há planos iniciais e estudos exploratórios, mas a implementação concreta ainda não ocorreu. E3 comenta que pensam em “começar com sensores para ajudar no controle da produção e, quem sabe, depois partir pra um software de gestão mais completo”. E4 relata visitas a parceiros e estudo de soluções de corte automatizado. Durante a observação, não foram identificadas tecnologias da I4.0 em funcionamento, porém notou-se um interesse por inovação, evidenciado por visitas técnicas, testes e discussões recorrentes sobre modernização. A empresa

encontra-se em uma fase de prospecção, analisando possibilidades como sensores, máquinas de corte automatizadas e a adoção de um sistema ERP, conforme registrado na Ata de Reunião Interna (fevereiro/2025). Essa postura de planejamento e análise prévia é crucial para mitigar o risco de decisões tecnológicas equivocadas, como sugerido por Silva et al. (2022).

Empresa Delta: apresenta o nível mais avançado de aplicação tecnológica. E5 relata que o “sistema de corte a laser com visão computacional revolucionou o processo”, os cortes são otimizados automaticamente e as alterações de modelo são realizadas diretamente no software, eliminando moldes físicos. E6 complementa, destacando o ganho de velocidade e redução de desperdício. A observação evidenciou que o sistema de corte a laser com visão computacional está plenamente incorporado ao núcleo produtivo, promovendo cortes mais precisos e ágeis, com rápida alternância entre modelos sem necessidade de moldes físicos. Essa tecnologia, integrada ao software de produção, permitiu ganhos em eficiência e flexibilidade, estabelecendo as bases para a expansão da automação em outras etapas. Além disso, sensores instalados em prensas monitoram variáveis em tempo real, otimizando o controle de qualidade. O Relatório de Implementação de Tecnologias confirma a consolidação desse ambiente digital. Esse cenário reflete a manufatura inteligente descrita por Pacchini et al. (2019), com uso efetivo de sistemas ciberfísicos, automação avançada e integração digital em tempo real. A capacidade de utilizar dados em tempo real para otimização e assertividade é um dos principais benefícios da I4.0 (Hanauer, Schreiber & Viana, 2025).

Empresa Gama: observa-se um estágio intermediário com adoção inicial de tecnologias da I4.0. E7 relata o uso de sensores nas prensas para monitorar temperatura e pressão, garantindo qualidade no molde dos solados. E8 complementa informando o uso de softwares capturam dados das máquinas (ciclos, falhas, paradas), além de testes com sistemas de planejamento de produção. A observação revelou o uso ativo de sensores (IoT) e de um software que coleta e exibe esses dados em tempo real, permitindo ajustes rápidos e mais controle sobre o processo. Também foram identificados testes com sistemas de planejamento da produção, utilizados para organizar etapas e aumentar a previsibilidade das operações. A documentação analisada, especialmente o Inventário de Equipamentos e Softwares, lista os sensores em funcionamento e os programas em teste, com registros de avaliações preliminares positivas quanto à eficiência e usabilidade. Esse cenário caracteriza uma adoção progressiva das tecnologias facilitadoras da I4.0, com ênfase inicial em IoT, coleta de dados e softwares básicos de gestão, alinhando-se ao modelo de incorporação tecnológica defendido por Singh et al. (2023). Essa integração de sistemas de acompanhamento em tempo real e de big data visa otimizar o tempo e aumentar a produtividade, redirecionando o patamar produtivo (Hanauer, Schreiber, & Viana, 2025; Pagliosa et al., 2019).

4.2 Desafios na Implementação da Indústria 4.0

A implementação da I4.0 envolve não apenas adoção tecnológica, mas também uma reestruturação profunda de processos, da cultura organizacional e das competências humanas (Parra Llanos & Campos, 2025; Soliani et al., 2025). Ghobakhloo e Iranmanesh (2018), Elnadi e Abdallah, (2024) apontam que o processo é desafiador, sobretudo para pequenas e médias empresas, que enfrentam restrições orçamentárias e de conhecimento. Os dados empíricos analisados refletem essas dificuldades em níveis distintos.

Empresa Alfa: os desafios enfrentados são estruturais e amplamente reconhecidos internamente. Segundo E1, “o mais pesado mesmo é o custo dessas tecnologias e, claro, a falta de mão de obra qualificada”. E2 acrescenta que, além dos altos custos de aquisição, seria necessário contratar e treinar profissionais, tornando o processo inviável. A observação revelou uma postura cautelosa. Em reuniões e conversas informais, gestores demonstraram preocupação com os custos envolvidos e com a falta de mão de obra qualificada para operar novas ferramentas. Essa cautela reflete as limitações financeiras e técnicas que dificultam a estruturação de qualquer plano de implementação. A análise documental reforça esse cenário, uma vez que não foram encontrados registros de projetos, cronogramas ou ações formais voltadas à transformação digital. Esse contexto reflete as barreiras clássicas enfrentadas por PMEs, como restrições orçamentárias, escassez de conhecimento técnico e resistência cultural à mudança, conforme apontado por Elnadi e Abdallah (2024) e Ghobakhloo e Iranmanesh (2018).

Empresa Beta: os desafios são relacionados à insegurança estratégica e à falta de clareza sobre como iniciar o processo de implementação. E3 afirma: “O maior desafio é aquele clássico: ‘Por onde começar?’”. E4 complementa que há medo de investir em tecnologias inadequadas, levando a escolhas erradas. Durante as reuniões observadas, ficou evidente a preocupação dos gestores com a ausência de orientação especializada adequada à realidade das pequenas empresas. A principal dificuldade relatada foi a incerteza sobre como iniciar o processo de transformação digital de forma segura e sustentável. A busca por apoio externo é constante, mas esbarra na escassez de consultorias acessíveis e alinhadas ao contexto das PMEs. A Ata de Reunião (fevereiro/2025) registra esses obstáculos, destacando o orçamento insuficiente para propostas de fornecedores e a dificuldade em encontrar suporte técnico qualificado. Esse cenário exemplifica o que Elnadi e Abdallah (2024) classificam como insegurança estratégica e falta de um roteiro tecnológico claro, fatores que comprometem o avanço das organizações rumo à I4.0. Também sobre a importância de métodos sistemáticos para a incorporação tecnológica (Silva et al., 2022).

Empresa Delta: avançou substancialmente, mas enfrentou desafios técnicos significativos. E5 destaca o esforço para compatibilizar sistemas antigos com novos, demandando substituição de máquinas e forte investimento em capacitação. E6 relata a necessidade de redesenhar fluxos de trabalho e adaptar o layout fabril para acomodar os novos processos. A observação revelou que a implementação das novas tecnologias na empresa exigiu uma reestruturação dos processos, incluindo a reorganização do layout e a revisão dos fluxos de trabalho para viabilizar a integração entre sistemas novos e maquinário antigo. Também foi constatada a necessidade contínua de capacitação dos colaboradores, especialmente daqueles com pouca familiaridade com recursos digitais. A documentação analisada, em especial o Relatório de Avaliação Pós-Implementação, detalha os principais desafios enfrentados, como os altos custos iniciais, as dificuldades técnicas de integração com sistemas legados e a exigência de treinamentos recorrentes. Esse cenário confirma o estágio avançado de adoção tecnológica, caracterizado por uma transformação sistêmica complexa, como descrito por Pacchini et al. (2019).

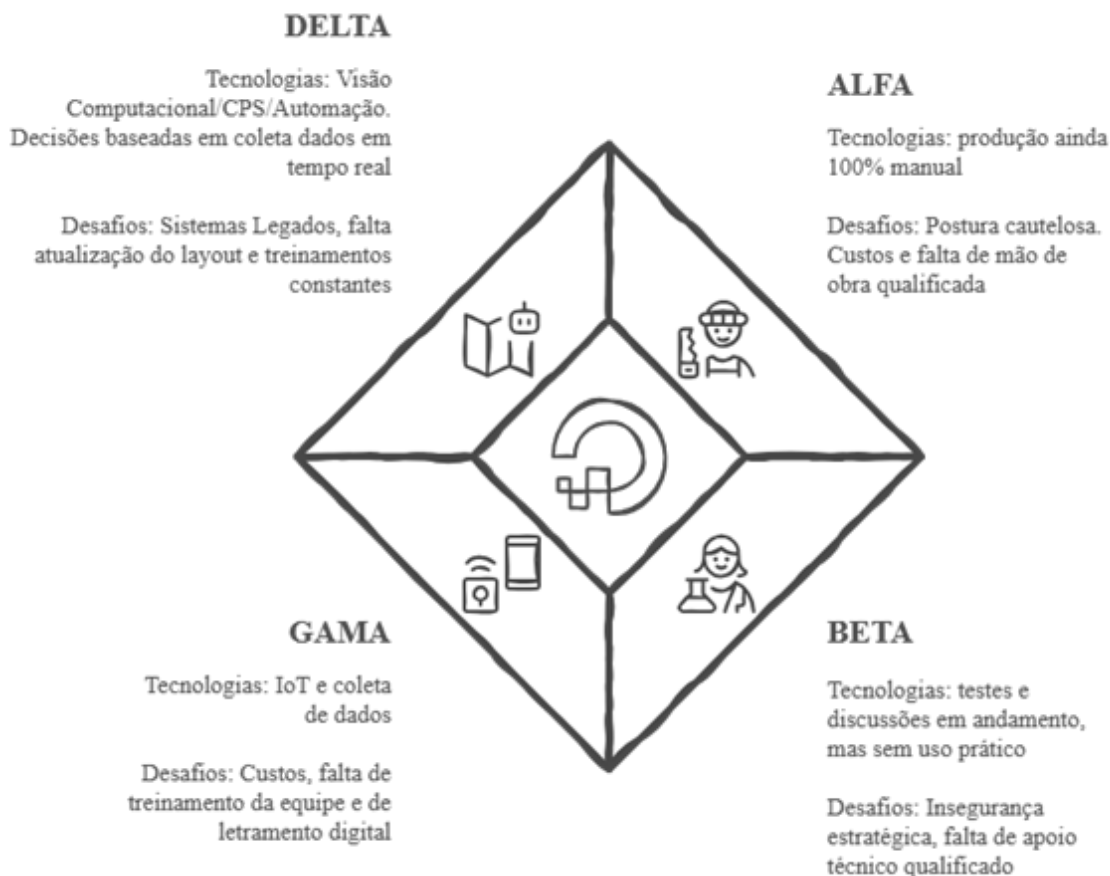
Empresa Gama: a implementação progressiva veio acompanhada de forte demanda por adaptação cultural e capacitação. E7 cita dificuldades com o custo dos equipamentos e com a capacitação dos colaboradores. E8 complementa que foi preciso “começar do básico” na formação da equipe para familiarizá-los com sensores, softwares e painéis digitais. A observação das rotinas produtivas e administrativas revelou que a empresa enfrentou desafios concretos no processo de digitalização, especialmente no que diz respeito à capacitação dos colaboradores.

Foram identificadas situações em que operadores mais antigos demonstravam insegurança ao utilizar novos sistemas, necessitando de acompanhamento constante por supervisores. Também foram observadas sessões internas de treinamento básico em informática e no uso de softwares de gestão de produção, muitas vezes adaptadas ao nível de familiaridade digital da equipe. Em paralelo, notou-se a dificuldade operacional gerada pela convivência entre planilhas manuais e os novos sistemas digitais, o que exigia retrabalho para compatibilização de dados. Essas dificuldades são confirmadas no Relatório de Avaliação Pós-Implementação, que detalha entraves como o alto custo de aquisição de equipamentos, a carência de habilidades digitais e os problemas técnicos para integrar os sistemas antigos aos novos. Esse cenário reforça os desafios culturais e de competências humanas destacados por Cucculelli et al. (2021), letto et al. (2022) e Soliani et al. (2025) evidenciando que a I4.0 exige uma gestão ativa da mudança, formação contínua e o desenvolvimento de capacidades de tecnologia e de gestão.

4.3 Síntese da Adoção Tecnológica e Desafios

Visando sistematizar os resultados empíricos e proporcionar uma compreensão comparativa das trajetórias investigadas, a Figura 2 apresenta a Matriz de Adoção Tecnológica e Desafios. Esta representação visual organiza as quatro empresas em um *continuum* de maturidade digital, correlacionando o nível de complexidade tecnológica implementado com as barreiras específicas enfrentadas em cada estágio.

Figura 2 - Adoção Tecnológica e Desafios



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A análise da matriz evidencia distintos níveis de adoção das tecnologias da I4.0, confirmando que a transição não é um processo linear. A Empresa Alfa encontra-se ainda em produção manual e ausência de tecnologias digitais. Conforme apontam Ghobakhloo e Iranmanesh (2018) e Elnadi e Abdallah (2024), este cenário representa uma fase delimitada por fatores técnicos e culturais. A Empresa Beta demonstra um cenário de prospecção e planejamento, evidenciado por testes exploratórios e uma intenção de adoção futura, embora sem implementação efetiva.

Num estágio intermediário de adoção progressiva, situa-se a Empresa Gama, que já utiliza sensores e *softwares* em operações práticas, além de realizar testes com sistemas de planejamento. Esta postura alinha-se ao modelo gradual de incorporação tecnológica defendido por Singh et al. (2023). Por fim, a Empresa Delta apresenta o mais alto grau de maturidade tecnológica das empresas estudadas, operando com corte a laser via visão computacional, sensores integrados e sistemas ciberfísicos. A gestão de dados em tempo real aproxima a empresa do conceito de manufatura inteligente, conforme proposto por Pacchini et al. (2019) e Pagliosa et al. (2019).

Paralelamente à evolução tecnológica, a Figura 2 elucida os obstáculos enfrentados. Observa-se que, nos estágios iniciais (Alfa e Beta), os obstáculos são predominantemente estruturais e estratégicos (“por onde começar”), caracterizados por restrições orçamentárias, escassez de mão de obra qualificada e incertezas decisórias (Elnadi & Abdallah, 2024; Ghobakhloo & Iranmanesh, 2018). À medida que a maturidade digital avança para a implementação efetiva (Gama e Delta), a natureza dos desafios se transforma, tornando-se mais sistêmica e cultural. Nestas fases, as barreiras de entrada dão lugar a desafios de integração de sistemas legados, readequação de *layout* físico, a necessidade de letramento digital e adaptação das competências humanas (Cucculelli et al., 2021; letto et al., 2022; Pacchini et al., 2019).

Em suma, os resultados reforçam que a transição para a I4.0 demanda uma trajetória de preparação, testes, integração e transformação, exigindo alinhamento entre tecnologia, estratégia e cultura organizacional (Ribeiro et al., 2022). A matriz também evidencia que a superação das barreiras financeiras iniciais é apenas o primeiro passo de uma transformação sistêmica que exige gestão da mudança, formação contínua e desenvolvimento de capacidades organizacionais e humanas (Ribeiro et al., 2022; Soliani et al., 2025).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo compreender as trajetórias e os principais desafios que influenciam a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 em pequenas empresas do setor calçadista brasileiro, classificando a maturidade digital de cada organização em relação à sua capacidade de enfrentamento dos obstáculos de implementação. A investigação adotou uma abordagem qualitativa e descritiva, utilizando a estratégia de estudo de caso múltiplo em quatro empresas de pequeno porte no Vale do Rio dos Sinos/RS. A coleta de dados foi triangulada por meio de entrevistas semiestruturadas, observação sistemática não participante e análise documental.

A sistematização dos resultados demonstra uma implementação da I4.0 desigual e condicionada pela maturidade digital e capacidades organizacionais das empresas. Foram analisadas duas categorias: Tecnologias da I4.0 Implementadas e Desafios na Implementação da I4.0. Observou-se que a Empresa Alfa se encontra com produção manual e ausência de tecnologias I4.0, refletindo barreiras financeiras e técnicas clássicas. A Empresa Beta está em fase de prospecção e planejamento, com testes exploratórios e intenção de adoção futura, mas enfrenta insegurança sobre o “por onde começar”.

A Empresa Gama exhibe uma adoção progressiva e intermediária, com uso de sensores (IoT) e *softwares* básicos de coleta de dados. Por fim, a Empresa Delta demonstra o nível mais alto de maturidade tecnológica das empresas analisadas, com a implementação consolidada de sistemas de corte a laser com visão computacional, sensores integrados e gestão de dados em tempo real, aproximando-se do conceito de manufatura inteligente.

Os desafios confirmam a literatura. A Alfa e a Beta são limitadas por restrições orçamentárias, escassez de mão de obra qualificada e insegurança estratégica sobre o roteiro tecnológico. A Gama enfrenta a complexidade da adaptação cultural e a necessidade de capacitação básica da equipe para gerir os novos sistemas. A Delta superou as barreiras iniciais, mas enfrenta dificuldades na compatibilização de sistemas legados e na reestruturação física e organizacional, demandando investimentos elevados e treinamento contínuo.

No campo das contribuições acadêmicas, este estudo busca fornecer evidências empíricas detalhadas sobre as trajetórias de adoção da I4.0 em Pequenas e Médias Empresas (PMEs), em um segmento frequentemente negligenciado nas pesquisas sobre o tema. Ao utilizar o estudo de caso múltiplo, o estudo detalha desafios, desde o bloqueio estratégico e financeiro (Alfa/Beta) até os desafios sistêmicos de integração (Delta/Gama), confirmando a natureza não linear e desigual da I4.0. As categorias de desafios encontradas servem como *checklist* para futuros modelos teóricos que busquem mapear a maturidade digital em setores tradicionais.

Para as contribuições gerenciais e práticas, os resultados evidenciam que, para as PMEs do setor calçadista, a transição para a I4.0 exige um foco na superação de barreiras não tecnológicas, como a formação de competências digitais básicas (Gama), acesso a roteiros tecnológicos claros e de baixo custo que mitiguem a insegurança estratégica (Beta). A experiência da Delta demonstra que o sucesso da implementação passa por uma transformação sistêmica, exigindo investimentos em *hardware* e *software*, mas, fundamentalmente, na reestruturação de processos e na gestão da mudança cultural.

Apesar das contribuições, a pesquisa apresenta limitações. A principal é o uso de um estudo de caso múltiplo com apenas quatro empresas, o que limita a generalização estatística dos resultados para todo o setor calçadista, bem como, a questão geográfica. Além disso, o estudo focou na I4.0 sob a ótica dos gestores e colaboradores internos, sem incluir uma análise da pressão competitiva do mercado. Assim, para pesquisas futuras sugere-se: (1) realizar estudos quantitativos para elencar desafios e barreiras em uma amostra maior de PMEs do setor calçadista; (2) analisar a influência dos ecossistemas industriais e de *startups* no provimento de soluções I4.0 acessíveis e alinhadas à realidade orçamentária das PMEs; (3) comparar estas análises em outros setores econômicos.

REFERÊNCIAS

- Abicalçados – Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. (2024). *Relatório setorial da indústria de calçados do Brasil 2024*. Abicalçados.
- Agolli, A., Kazani, I., Shehi, E., Spahiu, T., Hylli, M., Guxho, G., & Prence, E. (2025). Study on the application of digital technology in footwear industry in Albania. *Tehnički Vjesnik – Technical Gazette*, 32(3), 1204–1209. <https://doi.org/10.17559/TV-20241006002040>
- Al-Khatib, A. W., et al. (2024). Antecedents of Industry 4.0 capabilities and technological innovation: A dynamic capabilities perspective. *European Business Review*, 36(4), 566–587.
- Amin, A., Bhuiyan, M. R. I., Hossain, R., Molla, C., Poli, T., & Milon, M. N. (2024). The adoption of Industry 4.0 technologies using the technology–organizational–environment framework: The mediating role to manufacturing performance in a developing country. *Business Strategy & Development*, 7, e363. <https://doi.org/10.1002/bsd2.363>
- Arcidiacono, F., et al. (2022). The role of absorptive capacity in the adoption of smart manufacturing. *International Journal of Operations & Production Management*. Ahead-of-print.
- Bardin, L. (2016). *Análise de conteúdo*. Edições 70.
- Bibby, L., & Dehe, B. (2018). Defining and assessing Industry 4.0 maturity levels: Case of the defence sector. *Production Planning & Control*, 29(12), 1030–1043. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1503355>
- Caldeira, A. et al. (2020). Inovação e competitividade no setor têxtil: fatos e tendências. *Pretexto*, 21(2), 24-45. <https://doi.org/10.21714/pretexto.v21i2.4990>
- Cavalcante, C. G. S., & Almeida, T. D. (2017). Os benefícios da Indústria 4.0 no gerenciamento das empresas. *Journal of Lean Systems*, 3(1), 125–151.
- Cheng, G.-J., et al. (2016). Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. In *International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI)* (pp. 407–410).
- Cucculelli, M., Dileo, I., & Pini, M. (2021). Filling the void of family leadership: Institutional support to business model changes in the Italian Industry 4.0 experience. *Journal of Technology Transfer*, 47(1), 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10961-021-09847-4>
- Culot, G., et al. (2020). The future of manufacturing: A Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120092>
- Demo, P. (2022). *Avaliação qualitativa*. Autores Associados.
- Elnadi, M., & Abdallah, Y. O. (2024). Industry 4.0: Critical investigations and synthesis of key findings. *Management Review Quarterly*, 74(2), 711–744.
- 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>
- Gadre, M. (2020). Industry 4.0 – digital transformation, challenges and benefits. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 13, 139–149.
- Ghobakhloo, M., & Iranmanesh, M. (2018). Digital transformation success under Industry 4.0: A strategic guideline for manufacturing SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(8), 1533–1556.
- Gil, A. C. (2019). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (7. ed.). Atlas.
- Gilchrist, A. (2016). *Introducing Industry 4.0*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4_13
- Hanauer, G. O., Schreiber, D., & Viana, L. P. (2025). Tecnologias da Indústria 4.0 e seus impactos na operação sustentável das empresas. *Pretexto*, 25(4), 98–109. <https://revista.fumec.br/index.php/pretexto/article/view/10357>
- letto, B., et al. (2022). The role of external actors in SMEs' human-centered Industry 4.0 adoption: An empirical perspective on Italian competence centers. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1–16. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3144881>
- Javaid, M., et al. (2020). Industry 5.0: Potential applications in COVID-19. *Journal of Industrial Integration and Management*, 5(4), 507–530.

- Jimeno-Morenilla, A., et al. (2021). Technology enablers for the implementation of Industry 4.0 in traditional manufacturing sectors: A review. *Computers in Industry*, 125, 103390. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103390>
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2017). *Fundamentos de metodologia científica* (8. ed.). Atlas.
- Mahmood, T., & Mubarik, M. S. (2020). Balancing innovation and exploitation in the fourth industrial revolution: Role of intellectual capital and technology absorptive capacity. *Technological Forecasting and Social Change*, 160, 120248.
- Marum, A. M., et al. (2022). Mudanças trazidas pela Indústria 4.0 para a área da engenharia mecânica. *Revista Científica SENAI-SP – Educação, Tecnologia e Inovação*, 1(1), 106–124.
- Messeni Petruzzelli, A., Murgia, G., & Parmentola, A. (2022). How open innovation supports SMEs in the adoption of I4.0 technologies: An empirical analysis. *R&D Management*, 52, 615–632. <https://doi.org/10.1111/radm.12507>
- Muscio, A., & Ciffolilli, A. (2020). What drives the capacity to integrate Industry 4.0 technologies? Evidence from European R&D projects. *Economics of Innovation and New Technology*, 29(2), 169–183.
- Neumann, W. P., et al. (2021). Industry 4.0 and the human factor: A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233, 107992. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>
- Pacchini, A. P. T., et al. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113, 103125. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103125>
- Pagliosa, M., Tortorella, G., & Ferreira, J. C. E. (2019). Industry 4.0 and lean manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2018-0446>
- Parra Llanos, J. W., & Campos, L. M. S. (2025). Integration of circular practices and Industry 4.0 technologies: Barriers and a framework for climate change mitigation. *Gestão & Produção*, 32, e12324. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2025v32e12324>
- Ribeiro, V. B., Nakano, D., Muniz Jr., J., & Oliveira, R. B. (2022). Knowledge management and Industry 4.0: A critical analysis and future agenda. *Gestão & Produção*, 29, e5222. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e5222>
- Silva, F., Julião, J., & Gaspar, M. (2019). *Impact of Industry's 4.0 technologies in the Portuguese footwear industry* (Dissertação de Mestrado). Católica Porto Business School.
- Silva, J. F., Silva, F. L., Silva, D. O., Rocha, L. A. O., & Ritter, Á. M. (2022). Decision making in the process of choosing and deploying Industry 4.0 technologies. *Gestão & Produção*, 29, e163. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e163>
- Singh, A., et al. (2023). Smart manufacturing systems: A futuristics roadmap towards application of Industry 4.0 technologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(3), 411–428.
- Soliani, R. D., Oliveira, D. A., Pontes, J. C. N., & Drumond, T. D. R. (2025). Professional training in Industry 4.0: A competency-based educational model. *Gestão & Produção*, 32, e2225. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2025v32e2225>
- Wang, L., et al. (2020). What nurtures fourth industrial revolution? An investigation of economic and social determinants of technological innovation in advanced economies. *Technological Forecasting & Social Change*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120305>
- 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. (2015). *Estudo de caso* (5. ed.). Bookman.
- Zheng, T., et al. (2021). Applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1922–1954.