PRODUÇÃO ONLINE
REVISTA CIENTÍFICA ELETRÔNICA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ISSN 1676-1901

DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR METALMECÂNICO BRASILEIRO: ANÁLISE DE BARREIRAS DE ENTRADA

CHALLENGES IN IMPLEMENTING INDUSTRY 4.0 IN THE BRAZILIAN METAL-MECHANICS INDUSTRY: ANALYSIS OF ENTRY BARRIERS

Júlia Possebon Spellmeier* E-mail: julia.possebon4@acad.ufsm.br
Luisa Zanuzo Kuntz* E-mail: luisa.kuntz@acad.ufsm.br
Carmen Brum Rosa* E-mail: carmen.b.rosa@ufsm.br
Arthur Martins Valentim* E-mail: arthurmartinsvalentim@gmail.com
Gabriela Michelon Baldessarelli* E-mail: gabriela.baldessarelli@acad.ufsm.br
Graciele Rediske* E-mail: graredisk e@gmail.com
*Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil.

Resumo: O processo de implementação da indústria 4.0 no setor metal mecânico brasileiro é complexo e multifacetado, envolvendo questões tecnológicas, organizacionais, culturais e regulatórias. A falta de infraestrutura tecnológica adequada, a resistência à mudança por parte dos colaboradores, a escassez de profissionais qualificados e os desafios regulatórios são apenas alguns dos obstáculos que as empresas enfrentam. Além disso, a subexploração tecnológica do setor metal mecânico retrai a entrada dos ideais 4.0 e, em determinadas condições, impede a inovação competitiva. Diante desse cenário, o presente artigo busca fornecer aos interessados, por meio de uma revisão sistemática de literatura no setor metal mecânico no Brasil, uma ampla análise sobre o rompimento do status quo para aplicação de tecnologias emergentes, com vistas a compreender a complexidade das propriedades mecânicas e comportamento dos materiais, o custo de implementação de tecnologias flexíveis, as barreiras tecnológicas e a complexidade na coleta e integração de dados. Além de apresentar também, um questionário elaborado a partir de um instrumento de coleta de dados sobre a existência ou não da indústria 4.0 dentro das indústrias brasileiras e suas perspectivas sobre o assunto.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Barreiras. Metal mecânico. Manufatura. Desafios.

Abstract: Implementing industry 4.0 in the Brazilian metal-mechanics industry involves technological, organizational, cultural, and regulatory issues. The lack of adequate technological infrastructure, resistance to change by employees, the shortage of qualified professionals, and regulatory challenges are just some of the obstacles that companies face. In addition, the technological underexploitation of the metal-mechanics industry hinders the entry of 4.0 ideals and, under certain conditions, impedes competitive innovation. Given this scenario, this article seeks to provide interested parties, through a systematic literature review on the metal-mechanics industry in Brazil, with a broad analysis of the breaking of the status quo for the application of emerging technologies to understand the complexity of the mechanical properties and behavior of materials, the cost of implementing flexible technologies, technological barriers and the complexity in data collection and integration. In addition, it also presents a questionnaire prepared from a data

collection instrument on the existence or not of industry 4.0 within Brazilian industries and their perspectives on the subject.

Keywords: Industry 4.0. Barriers. Metal-mechanics. Manufacturing. Challenges.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de indústria 4.0 (I4.0) surgiu no século XXI, com o intuito de abranger e classificar o avanço na integração de ferramentas de automação e tecnologias existentes, como a inteligência artificial (IA), internet das coisas (IoT), robótica e a computação em nuvem, em prol da interconectividade de máquinas para um fluxo contínuo de informações (Matenga; Mpofu, 2022). Também conhecida por revolução industrial 4.0, essa nova forma de pensar os sistemas produtivos tem por objetivos aprimorar a automação industrial, promover a integração entre diferentes sistemas e equipamentos, e facilitar a tomada de decisão baseada em dados. Segundo Huang (Huang *et al.*, 2022), tornar os processos produtivos cada vez mais interligados, eficientes e econômicos, é o principal fator que revolucionou a manufatura. Esse objetivo pode ser alcançado através da mistura de tecnologias diferentes e complementares, como a computação gráfica, a visão computacional, a interação homem-máquina e as tecnologias multimodal e multimídia (Moreno *et al.*, 2017). Essas ferramentas possibilitam o monitoramento em tempo real dos sistemas, de qualquer local, o que permite o acompanhamento contínuo de indicadores de desempenho de controle dos processos, podendo proporcionar a melhor utilização da mão de obra e redução de desperdícios (Huang *et al.*, 2022).

A I4.0 tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, com destaque para o conceito do gêmeo digital, que consiste em uma réplica virtual de determinado sistema real (Durão *et al.*, 2018). Uma característica fundamental do gêmeo digital é sua capacidade de estabelecer uma conexão entre a versão real e a digital do sistema, permitindo a troca instantânea de dados. Embora a modelagem por elementos finitos seja uma tecnologia estabelecida e amplamente utilizada na indústria de manufatura, as simulações ainda enfrentam desafios significativos em relação à sua complexidade e tempo necessário para execução, o que limita sua aplicação em tempo real e a geração de conjuntos de dados extensos. Essa limitação representa um obstáculo para o desenvolvimento de tecnologias como os

gêmeos digitais, que demandam um volume de simulações para o treinamento de ferramentas de análise de dados (ABIO *et al.*, 2022).

Ademais, é possível fortalecer ainda mais esses conceitos por meio da aplicação de inteligência artificial e aprendizado de máquina na indústria. Uma vez que há evidências sugerindo que os benefícios da I4.0 podem ser mais perceptíveis para empresas estabelecidas e de grande porte, deixando de fora os empreendimentos de pequeno e médio porte (Zambrano *et al.*, 2022). Isso também ocorre por conta da mudança de foco de grandes empresas, que migram da produção em massa para produção com maior personalização, fator este que representa um desafio para empresas menores em razão da oscilação em estabilidade e eficiência (Huang *et al.*, 2022).

A adoção da tecnologia no setor metal mecânico enfrenta necessidades de modernização dos processos de fabricação para que seja possível atender as demandas do mercado contemporâneo, visto que muitas empresas ainda operam com métodos tradicionais, tal como estabelecidos anos atrás (Zambrano *et al.*, 2022). Na adoção da I4.0 por empresas de manufatura, nota-se a convergência da produção com a logística entre os ambientes físico e virtual, simplificando a integração vertical e horizontal dos sistemas para operações de negócios alinhadas (Matenga; Mpofu, 2022). Sabe-se que a I4.0 é objeto de estudo em todo o mundo, no entanto, já em 2016, o Japão estava adotando a primeira fase da indústria 5.0. Enquanto a I4.0 se concentra no avanço dos sistemas ciberfísicos cognitivos, a I5.0 vai além, integrando metadados e inteligência artificial para identificar cadeias de valor sustentáveis e circulares, influenciando as decisões industriais.

O processo de implementação no setor metal mecânico brasileiro é complexo e multifacetado, envolvendo questões tecnológicas, organizacionais, culturais e regulatórias. A falta de infraestrutura tecnológica adequada, a resistência à mudança por parte dos colaboradores, a escassez de profissionais qualificados e os desafios regulatórios são apenas alguns dos obstáculos que as empresas enfrentam. Conforme afirmado por (Junior; Saltorato, 2018) a I4.0 tem que provar seus benefícios para a sociedade brasileira e somente quando suas tecnologias, regulamentos e mudanças revelarem-se melhores para as pessoas, é que se deve reconhecer todo o seu potencial. Diante desse contexto, busca-se compreender quais são as barreiras da implementação e amadurecimento da I4.0 no setor metal

mecânico através de uma revisão sistemática de literatura (RSL) combinada com uma pesquisa com empresas da área para integrar o ponto de vista acadêmico com o contexto real de empresas do setor e avaliar possíveis divergências e oportunidades ao comparar as duas óticas.

2 ESTADO DA ARTE: DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA 4.0

Ao longo da história da industrialização, novos produtos, materiais, fontes de energia, métodos de produção, conceitos de gestão e tecnologias aplicadas surgiram e possibilitaram mudanças disruptivas que foram consideradas revoluções industriais (Mario, 2017). As três primeiras revoluções industriais, desde o uso de máquinas a vapor no século XVIII até as recentes aplicações da internet e da robótica, foram responsáveis por enormes transformações nas sociedades, na competição industrial, na geopolítica e no crescimento urbano (Gleeson; Davidson, 2013).

Após essas grandes mudanças, surgiram tecnologias inovadoras por meio da quarta revolução industrial, também conhecida na literatura como “indústria 4.0”, “internet industrial das coisas”, “manufatura avançada”, “manufatura inteligente”, “fábricas inteligentes”, “fábricas do futuro” (Santos; Martinho, 2020). A qual compreende as evoluções da microeletrônica, robótica, aplicações de internet, expansão do processamento e armazenamento de dados, computação em nuvem, tecnologias de informação e comunicação (TIC), sistemas ciberfísicos (CPS), internet das coisas e serviços (IoTS), inteligência artificial (IA), equipamentos autônomos, manufatura aditiva (impressão 3D) e outras tecnologias.

Estudos sobre esta temática estão em ascensão na literatura, sob diferentes perspectivas. No estudo de (Mejía *et al.*, 2022) foco está no retrabalho em sistemas de manufatura job shop com recursos I4.0, propondo uma abordagem integrada de modelagem e otimização capaz de lidar com a reprogramação em tempo real, considerando uma lógica orientada a eventos. O artigo de (Grobler-Dębska; Kucharska; Baranowski, 2022) propõe uma abordagem formal para resolver problemas de programação com eventos inesperados como extensão de estruturas gerais para a estratégia de Manufatura Zero-Defeito (ZDM), visando melhorar a

eficiência do processo e a qualidade do produto, eliminando defeitos e minimizando erros de processo.

O artigo (Chen *et al.*, [s. d.]) explora as aplicações de blockchain no gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM) para manufatura inteligente. Na pesquisa (Maluf; Sagawa; Borges, 2022) foi analisado modelos dinâmicos baseados no método bond graph e aplicados à manufatura. Comparando com outras abordagens utilizadas na modelagem de sistemas de produção, a abordagem bond graphs se destaca pela modularidade, que permite a integração de diferentes sistemas, subsistemas e componentes, permitindo a representação de diferentes configurações de sistemas de produção (por exemplo, flow shop, job shop).

Estudos de RSL são essenciais para explorar o panorama geral de um determinado assunto. No contexto brasileiro, uma importante pesquisa foi realizada para explorar os modelos de maturidade para a I4.0 através de uma RSL (Medeiros, 2024). Em relação a I4.0 são encontrados na literatura revisões em diferentes áreas, evidenciando a importância e contribuição para o desenvolvimento do assunto em questão. Em relação à I4.0, o estudo (Zutin *et al.*, 2022) discute as lacunas encontradas na literatura relacionadas às tecnologias I4.0 aplicadas à fabricação de aeronaves e suas principais implicações úteis não apenas do ponto de vista acadêmico, mas também de aspectos competitivos de negócios, fornecendo recomendações para gerentes industriais, engenheiros e stakeholders. Já no estudo (Feddoul *et al.*, 2023), foi desenvolvida uma RSL apresentando os últimos avanços e insights sobre a tecnologia de gêmeos digitais e robótica interligada com realidade estendida no contexto da I4.0. A manufatura em nuvem (CMfg) foi explorada no estudo (Gharibvand *et al.*, 2024), apresentando as vantagens, desafios e deficiências associados às aplicações das tecnologias mais recentes para impulsionar a transição para a CMfg. Esta pesquisa também examinou tecnologias de nuvem propostas para implementação de CMfg, como arquiteturas, modelos, estruturas, infraestrutura, interoperabilidade, virtualização, seleção ideal de serviços, etc.

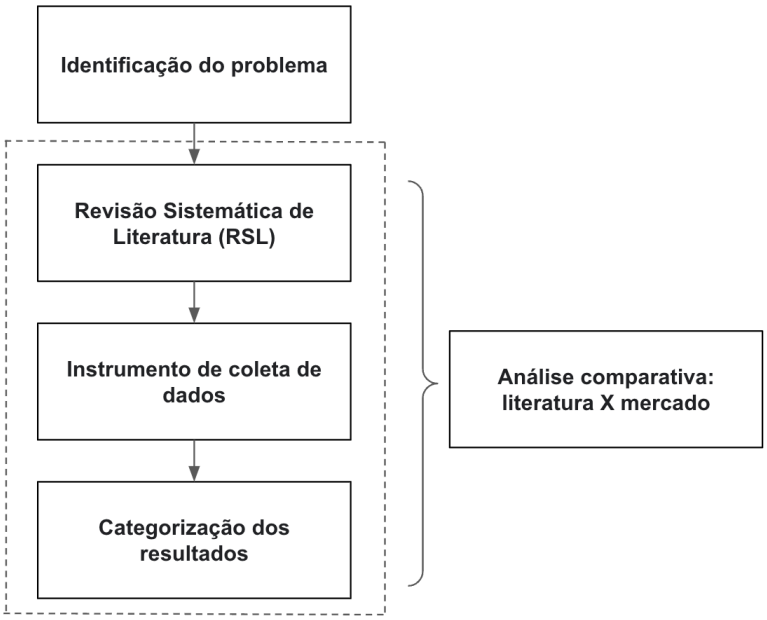
O setor metal mecânico brasileiro, em sua grande maioria, opera de maneira tradicional e conservadora em relação aos seus processos de manufatura (Humphrey, 1995). Porém, este setor tem um considerável potencial para explorar e implementar os conceitos da I4.0 a fim de modernizar e automatizar seus processos

industriais (Tortorella; Fettermann, 2018) . Sob essa perspectiva, a pesquisa tem como objetivo, portanto, explorar através de uma RSL, as barreiras para implementação da I4.0 no setor metal mecânico brasileiro, bem como conduzir um instrumento de coleta de dados com empresas desse setor no país para validar as barreiras encontradas na literatura, bem como entender o atual cenário dessas empresas em relação ao seu conhecimento sobre os conceitos da I4.0. A presente pesquisa busca contribuir com o setor metal mecânico brasileiro sob dois aspectos: acadêmico e mercadológico. A contribuição acadêmica dar-se-á através da exploração de uma *string* de busca por palavras-chave em duas bases de dados acadêmicos para a elaboração da RSL. Do ponto de vista mercadológico, a contribuição desta pesquisa dar-se-á através da condução do instrumento de coleta de dados com seis empresas do setor no Brasil, contribuindo para o conhecimento, aplicação e difusão da I4.0 neste setor.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Para compreender os principais aspectos abordados e alcançar o objetivo proposto, o procedimento metodológico foi conduzido em três etapas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Etapas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores.

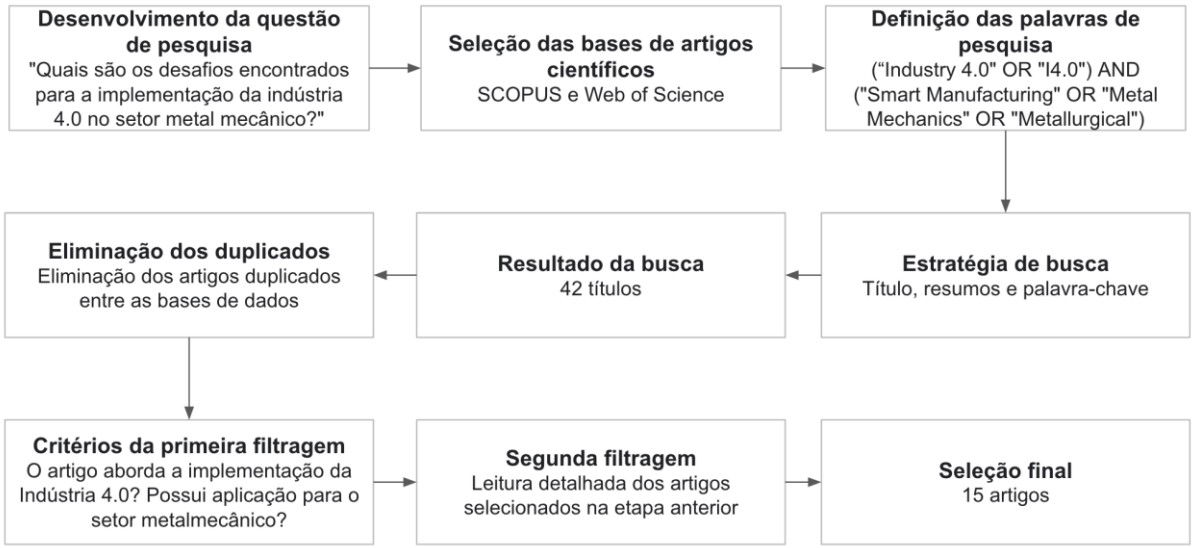
A primeira etapa da pesquisa foi constituída pela identificação do problema e elaboração do estado da arte. A identificação do problema se deu pela leitura de artigos através dos periódicos CAPES, consulta em livros sobre a temática e vivência dos autores na indústria metal mecânica. A construção do estado da arte foi realizada através de leituras de artigos científicos para explorar as suas atuais contribuições na I4.0 sob os diferentes aspectos dos artigos citados, bem como identificar a lacuna de pesquisa na qual esse artigo está inserido.

Para a realização da segunda etapa, o protocolo de RSL compreendeu a exploração de estudos científicos sobre a I4.0 no setor metal mecânico ao redor do mundo. O ponto de partida da RSL foi o desenvolvimento da questão de pesquisa: Quais são os desafios encontrados para a implementação da I4.0 no setor metal mecânico? Para isso, duas bases de artigos científicos foram selecionadas: *SCOPUS* e *Web of Science*. A escolha das bases de dados SCOPUS e Web of Science para a condução da RSL foi fundamentada na abrangência e na relevância acadêmica que essas plataformas oferecem. Ambas as bases são reconhecidas internacionalmente pela qualidade e diversidade de suas publicações, cobrindo um amplo espectro de áreas do conhecimento, incluindo tecnologias emergentes e manufatura avançada — tópicos centrais para a I4.0. Essas bases permitem o acesso a artigos revisados por pares e com alto fator de impacto, garantindo a robustez e a confiabilidade das fontes utilizadas.

As leituras iniciais permitiram selecionar as palavras-chave que resultaram na seguinte frase de pesquisa: TITLE-ABS-KEY (("Industry 4.0" OR "I4.0") AND ("Smart Manufacturing" OR "Metal Mechanics" OR "Metallurgical")). A estratégia de busca empregada nas bases de dados compreendeu os metadados “Título”, “Resumo” e “Palavras-chave”, com a restrição de tipo de idioma, o qual foi selecionado apenas artigos em inglês. Esses critérios foram definidos para assegurar que apenas os estudos mais relevantes e alinhados aos objetivos da pesquisa fossem incluídos. A escolha pelo idioma inglês ampliou o alcance da revisão, uma vez que grande parte da literatura relevante sobre o tema é publicada nesse idioma. Além disso, a utilização de metadados como título, resumo e palavras-chave permitiu a identificação de estudos com foco direto nos desafios da implementação da I4.0 no setor metal mecânico.

A frase de pesquisa submetida nas duas bases de artigos resultou em 42 títulos, dos quais foram removidos os duplicados. Assim, foi aplicado um filtro, o qual consistiu na leitura dos títulos e resumos de todos os artigos para separar os que tinham potencial para apresentar alguma lacuna ou barreira na consolidação da I4.0 no setor metal mecânico, para isso, respondeu-se às seguintes questões de filtragem: O artigo aborda a implementação da indústria 4.0? Possui aplicação para o setor metalmecânico? (sim/não). Se, pelo menos, uma das respostas a essas questões foi "Não", o artigo foi excluído da amostra. Este processo resultou em 34 artigos. Deste modo, a segunda filtragem foi realizada, os artigos oriundos do filtro foram analisados com o intuito de extrair as principais barreiras para a implementação da I4.0 no setor metal mecânico brasileiro, resultando em 15 artigos potenciais. A Figura 2 apresenta o protocolo completo da RSL.

Figura 2 - Protocolo da revisão sistemática de literatura

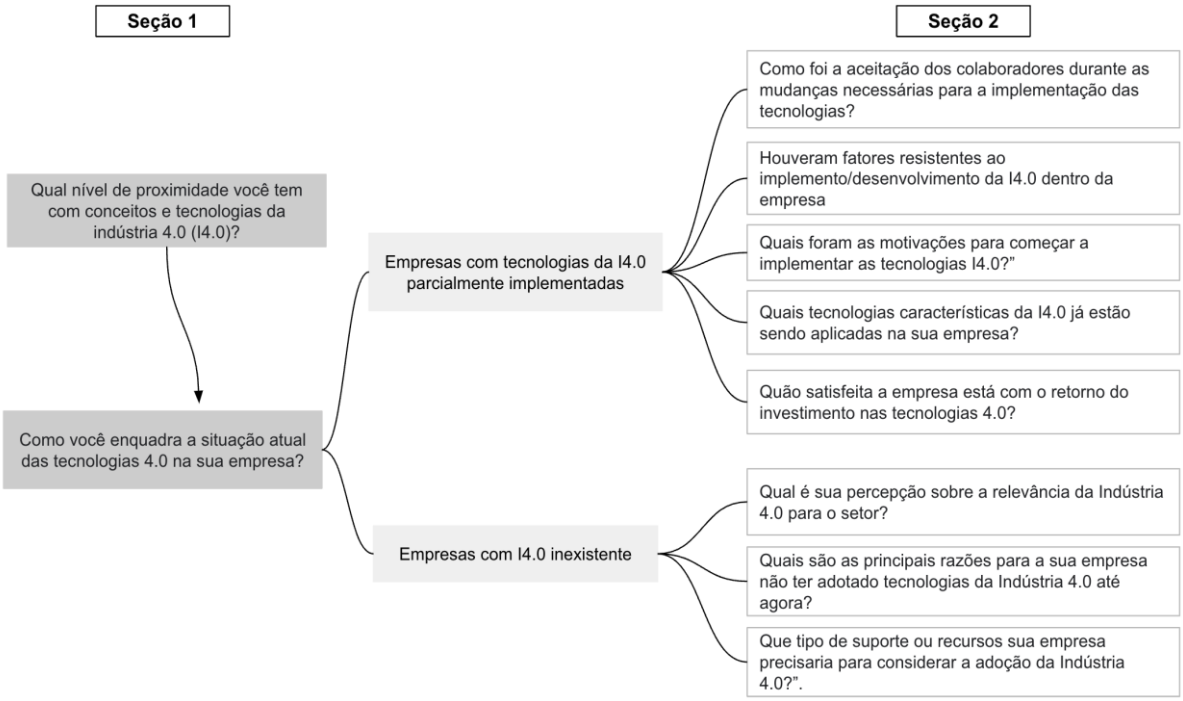


Fonte: Elaborado pelos autores.

A terceira etapa do procedimento metodológico concebeu a construção e aplicação de um instrumento de coleta de dados através do *Google Forms* com seis empresas brasileiras do setor metal mecânico. O principal objetivo desse instrumento de coleta de dados é validar as barreiras encontradas na literatura com as empresas do setor, bem como entender o atual cenário da aplicação dos conceitos da I4.0 nas empresas respondentes. Através desse instrumento, também

se buscou a difusão do conhecimento da I4.0. A divisão de seções e suas respectivas perguntas estão apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Apresentação das seções do instrumento de coleta de dados



Fonte: Elaborado pelos autores.

Todos os participantes foram devidamente informados sobre os objetivos, métodos, potenciais riscos e benefícios do estudo, sendo garantido o consentimento informado por meio de um termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE). A confidencialidade dos dados coletados foi rigorosamente mantida, e medidas foram adotadas para proteger a privacidade dos participantes e das organizações envolvidas. A seleção das empresas e dos participantes foi conduzida com transparência e critérios previamente estabelecidos. Os resultados da pesquisa serão divulgados de forma agregada e com o devido cuidado para não expor informações sensíveis, garantindo a proteção dos interesses e direitos de todos os envolvidos.

O instrumento de coleta de dados foi conduzido em duas seções. A primeira seção foi composta por duas perguntas objetivas, a partir da resposta desta primeira seção, o respondente foi conduzido para segunda seção. A segunda seção é subdividida em duas áreas, a qual divide as empresas respondentes em dois

grupos: 1) Empresas com I4.0 consolidada ou parcialmente implementadas ou 2) Empresas com I4.0 inexistente. Essa seção foi construída com perguntas objetivas e dissertativas, as quais, buscam entender os principais pontos para a consolidação da I4.0 nas empresas, bem como para a não existência da I4.0 nas empresas respondentes.

Após a participação das empresas no instrumento de coleta de dados, foi possível analisar as suas percepções acerca das barreiras de entrada da I4.0 no setor metal mecânico encontradas na literatura. Assim, as respostas do instrumento de coleta de dados foram categorizadas de forma a compilar os resultados obtidos e apresentar uma interface gráfica para fornecer a visualização rápida dos dados relevantes extraídos. Desse modo, a sequência se dará por uma análise comparativa sobre os resultados obtidos na literatura e as percepções analisadas através do instrumento de coleta de dados.

Para garantir uma análise estruturada dos dados coletados, foram adotadas metodologias distintas para tratar as informações qualitativas e quantitativas provenientes do questionário. Os dados quantitativos foram organizados em tabelas e gráficos. Essa abordagem permitiu comparar diretamente variáveis como o nível de implementação da I4.0 e a satisfação com o retorno do investimento, possibilitando uma análise comparativa clara entre as empresas respondentes. Por sua vez, os dados qualitativos, obtidos por meio de respostas discursivas, foram analisados por meio de análise de conteúdo, uma técnica que permite identificar e categorizar temas recorrentes nas percepções das empresas. O processo incluiu a leitura detalhada das respostas, codificação das informações em categorias previamente definidas, como "resistência cultural", "custo de implementação" e "barreiras tecnológicas", e a identificação de novas categorias emergentes durante a análise. Essa triangulação entre categorias preestabelecidas e emergentes garantiu uma visão mais abrangente e aprofundada dos desafios enfrentados pelas empresas.

4 RESULTADOS

4.1 Revisão sistemática de literatura

Ralph *et al.*, 2022 discute em sua pesquisa que as barreiras que dificultam a implementação da I4.0 nas empresas metal mecânicas são divididas em dois pilares: investimento e sociocultural. O primeiro pilar aborda os desafios econômicos enfrentados pelas empresas, tal como os altos investimentos em equipamentos, software e infraestrutura que as indústrias devem adquirir, incluindo também, a aquisição de máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC), sensores e sistemas de análises de dados.

Já o segundo, busca explorar os aspectos relacionados à gestão e a psicologia organizacional, onde a implementação de I4.0 requer uma mudança significativa na cultura e processos organizacionais, já que os funcionários podem desenvolver uma resistência à mudança, oriunda, dentre outras causas, do medo de demissões pelas máquinas automatizadas. No entanto, diversos autores abordam assuntos que ultrapassam os dois pilares estabelecidos por Ralph B. J. Nesse estudo, serão elaboradas novas barreiras para melhor representar o que os demais artigos oriundos da RSL apresentam em seus estudos. Os principais artigos analisados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Artigos oriundos da RSL

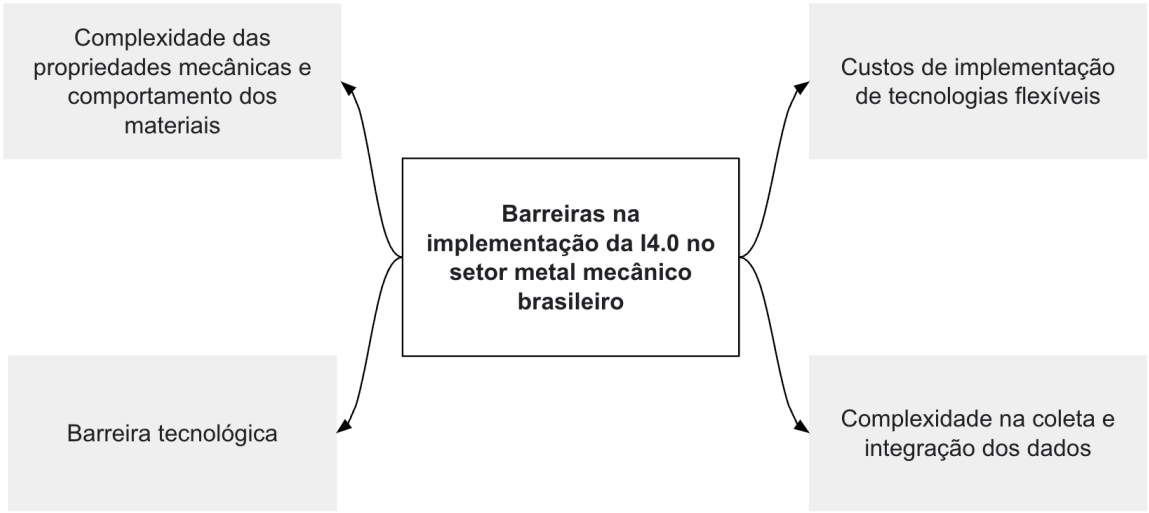
Artigos
1) Tsai, S. Y., & Chang, J. Y. (2021). Regression Approach to a Novel Lateral Flatness Leveling System for Smart Manufacturing. Applied Sciences, 11(14), 6645. (Tsai; Chang, 2021)
2) Simeone, A., Deng, B. & Caggiano, A. Resource efficiency enhancement in sheet metal cutting industrial networks through cloud manufacturing. Int J Adv Manuf Technol 107, 1345–1365 (2020). (Simeone; Deng; Caggiano, 2020)
3) Papavasileiou, A., Aivaliotis, P., Aivaliotis, S., & Makris, S. (2021). An optical system for identifying and classifying defects of metal parts. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 35(3), 326–340. (Papavasileiou *et al.*, 2022)
4) Abio, A., Bonada, F., Pujante, J., Grané, M., Nievas, N., Lange, D., & Pujol, O. (2022). Machine learning-based surrogate model for press hardening process of 22MnB5 sheet steel simulation in industry 4.0. Materials, 15(10), 3647. (Abio *et al.*, 2022b)
5) Selicati, V., Mazzarisi, M., Lovecchio, F. S., Guerra, M. G., Campanelli, S. L., & Dassisti, M. (2022). A monitoring framework based on exergetic analysis for sustainability assessment of direct laser metal deposition process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118(11), 3641-3656. (Selicati *et al.*, 2022)
6) Matenga, A. E., & Mpofu, K. (2022). Blockchain-based cloud manufacturing SCM system for collaborative enterprise manufacturing: a case study of transport manufacturing. Applied Sciences, 12(17), 8664. (Matenga; Mpofu, 2022c)
7) Groche, P., Storbeck, M., & Wang, T. (2019). Continuous forming of height-variable profiles by flexible roller beading. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,

103, 2649-2663. (Groche; Storbeck; Wang, 2019) 8) Zhao, S., Ku, S., & Dilyard, J. (2023). Global waste crisis and the role of innovations by global corporations. In Creating a sustainable competitive position: ethical challenges for international firms (pp. 59-74). Emerald Publishing Limited. (Ghauri; Elg; Melén Hånell, [s. d.]) 9) Ralph, B. J., Sorger, M., Hartl, K., Schwarz-Gsaxner, A., Messner, F., & Stockinger, M. (2022). Transformation of a rolling mill aggregate to a cyber physical production system: from sensor retrofitting to machine learning. Journal of Intelligent Manufacturing, 33(2), 493-518. (Ralph *et al.*, 2022b) 10) Bonnard, R., Arantes, M. D. S., Lorbieski, R., Vieira, K. M. M., & Nunes, M. C. (2021). Big data/analytics platform for Industry 4.0 implementation in advanced manufacturing context. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 117(5), 1959-1973. (Bonnard *et al.*, [s. d.]) 11) Beauchemin, M., Ménard, M. A., Gaudreault, J., Lehoux, N., Agnard, S., & Quimper, C. G. (2023). Dynamic allocation of human resources: case study in the metal 4.0 manufacturing industry. International Journal of Production Research, 61(20), 6891-6907. (Beauchemin *et al.*, 2023) 12) Li, Y., Carabelli, S., Fadda, E., Manerba, D., Tadei, R., & Terzo, O. (2020). Machine learning and optimization for production rescheduling in Industry 4.0. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 110(9), 2445-2463. (Li *et al.*, 2020)
13) Shahin, M., Chen, F. F., Bouzary, H., & Krishnaiyer, K. (2020). Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107, 2927-2936. (Shahin *et al.*, 2020) 14) Tatipala, S., Wall, J., Johansson, C., & Larsson, T. (2020). A hybrid data-based and model-based approach to process monitoring and control in sheet metal forming. Processes, 8(1), 89. (Tatipala *et al.*, 2020a) 15) Zambrano, V., Mueller-Roemer, J., Sandberg, M., Talasila, P., Zanin, D., Larsen, P. G., ... & Stork, A. (2022). Industrial digitalization in the industry 4.0 era: Classification, reuse and authoring of digital models on Digital Twin platforms. Array, 14, 100176. (Zambrano *et al.*, 2022)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Através da análise dos artigos apresentados na tabela, foram identificadas barreiras organizadas em quatro categorias para discutir os tópicos abordados pelos autores, conforme disposto na Figura 4. Em cada uma dessas categorias, foram analisadas as contribuições e perspectivas apresentadas por diferentes pesquisadores sobre o assunto. Essa abordagem permitiu uma compreensão detalhada das barreiras e desafios na implementação da I4.0 no setor metal mecânico.

Figura 4 - Barreiras de entrada da I4.0 no setor metal mecânico brasileiro



Fonte: Elaborado pelos autores.

A discussão de cada uma das barreiras apresentadas acima, será discutida na sequência, justificadas pelos principais autores encontrados na literatura.

4.1.1 Complexidade das propriedades mecânicas e comportamento dos materiais

As chapas metálicas utilizadas na manufatura apresentam condições não estacionárias, fenômenos como não linearidade, variação de temperatura, flutuações das propriedades entre lotes de matéria e geometrias complexas de produtos. Esses parâmetros aumentam a complexidade envolvida no controle da qualidade dos produtos manufaturados e na conformidade com as especificações, e também na garantia de um bom desempenho do processo (Tatipala *et al.*, 2020b). Trazendo ao encontro com a ideia que Groche (Groche; Storbeck; Wang, 2019) apresenta sobre os desafios da personalização em massa, onde máquinas devem possuir sistemas com maior flexibilidade para uma produção de diversas famílias de peças, mas que também encontram desafios na garantia da qualidade das partes manufaturadas, visto que um sistema eficaz e flexível deve ser bem estruturado para evitar falhas.

Segundo Yang *et al.*, 2018, flexibilidade é a expansão das possibilidades que busca aumentar as categorias de produtos moldados para atender diversas demandas de lotes, formatos e demais requisitos físicos. Enquanto a produção

convencional não permite a fabricação de chapas metálicas com dimensões variáveis, máquinas adaptadas para produção flexível permitem isso, porém apresentam maior custo de aquisição de instalação, apresentado a seguir (Groche; Storbeck; Wang, 2019).

4.1.2 Custo de implementação de tecnologias flexíveis

Pesquisas indicam que muitas empresas do setor metalúrgico enfrentam desafios com métodos de produção tradicionais, levando a baixa produtividade, desperdício e problemas de qualidade em produtos personalizados. Estudos mostraram que essas empresas frequentemente lutam com longas distâncias de máquinas, falta de controle de qualidade e processos não padronizados (Diaz *et al.*, 2022; Huamán Jonathanand Llontop, 2020). A implementação de tecnologias da I4.0, como IoT e IA pode ajudar a superar essas dificuldades, porém, sua implementação exige altos investimentos em capacitação e infraestrutura (Zambrano *et al.*, 2022).

Huang (2022) apresenta a necessidade de automatizar o sistema de manufatura, uma vez que o chão de fábrica normalmente conta com diversas máquinas antigas que são confiáveis, porém não incluem os recursos de interconexão necessários para comunicação com outros equipamentos. A demanda atual por tecnologias de máquinas flexíveis é um desafio na indústria. Esses artifícios permitem a produção personalizada e ágil, reduzindo o tempo de setup. No entanto, uma desvantagem dessa abordagem são as competências necessárias para manter essas tecnologias nas empresas, o que eleva os custos de implementação e manutenção (Ralph *et al.*, 2022b).

Enquanto as grandes empresas possuem recursos para investir na digitalização, as pequenas e médias empresas (PMEs) sofrem um entrave por conta dos obstáculos financeiros, tanto na parte do desenvolvimento do conhecimento, quanto na infraestrutura para adotar as tecnologias da I4.0. Esse pilar é capaz, então, de causar uma divisão digital entre empresas de diferentes dimensões, visto que as PMEs com baixos recursos possuem barreiras ao depender de equipamentos interconectados, impactando negativamente sua sustentabilidade a longo prazo (Huang *et al.*, 2022; Tatipala *et al.*, 2020).

4.1.3 Barreira tecnológica

A barreira tecnológica relaciona a necessidade de atualizar e integrar tecnologias em um ambiente de manufatura que já possui máquinas antigas, mas que carecem de recursos de interconexão e comunicação com outros equipamentos. Essa transição pode ser custosa e complexa, especialmente quando se trata de sistemas confiáveis, mas não adaptados às demandas da I4.0. Matenga (Matenga; Mpofu, 2022c) reforça essa barreira afirmando que a interconectividade das máquinas, sistemas de produção e sistemas de TI, demandam muito de desenvolvimento de software, que é apontado pelos autores como o principal impedimento à adoção da I4.0. Além disso, a utilização de máquinas antigas com tecnologias inteligentes dentro da indústria, possibilita sua integração às redes IoT, permitindo o compartilhamento e troca de informações. Entretanto, o chão de fábrica contém várias máquinas antigas que, mesmo operando de forma confiável, não estão configuradas para atuar digitalmente (Huang *et al.*, 2022; Matenga; Mpofu, 2022).

Os autores justificam ao explicar que o gerenciamento da cadeia de suprimentos (SCM) é uma operação de negócios central que resiste à transformação digital, pois ainda depende de planilhas, sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP) e sistemas de execução de manufatura (MES), que são tradicionais e não escaláveis, dessa forma não acompanham sua tecnologia.

4.1.4 Complexidade na coleta e integração de dados

Ao conectar as máquinas em uma rede, suas informações podem ser mescladas no sistema para facilitar o fluxo de valor (Huang *et al.*, 2022). A I4.0 busca novas oportunidades nesse contexto, facilitando a coleta, transmissão e exploração de dados para melhorar processos fabris. Em geral, o monitoramento e controle de dados torna-se difícil devido às barreiras já citadas anteriormente. Para uma coleta de dados eficaz é necessário máquinas interconectadas e em bom estado para proporcionar informações confiáveis, visto que muitas vezes, a integração de dados nos processos deve ser manual, correndo risco da inserção de algum dado equivocado, afetando tanto a qualidade do produto, quanto a veracidade

do processo. Segundo Tatipala (Tatipala *et al.*, 2020a), o acúmulo de dados em diferentes partes da produção resulta em insegurança na veracidade dos mesmos, dificultando a estimativa precisa da amostra. Além de que, a presença de dados incompletos em larga escala pode levar a cálculos imprecisos e requer pesquisas extras sobre o tratamento de dados incompletos.

4.2 Percepção sobre a implementação da I4.0 no setor metal mecânico

A percepção sobre a implementação da I4.0 no setor metal mecânico foi orientada pela aplicação de um instrumento de pesquisa em formato de questionário aberto. O instrumento de coletas de dados, um formulário online no *Google Forms*, foi estruturado de forma a obter um panorama geral da implementação da I4.0 no setor metal mecânico em seis empresas do setor. Essencialmente, o instrumento de coleta de dados possui duas seções. A primeira seção, por sua vez, possui duas perguntas: "*Qual nível de proximidade você tem com conceitos e tecnologias da indústria 4.0 (I4.0)*?" e *"Como você enquadra a situação atual das tecnologias 4.0 na sua empresa?*".

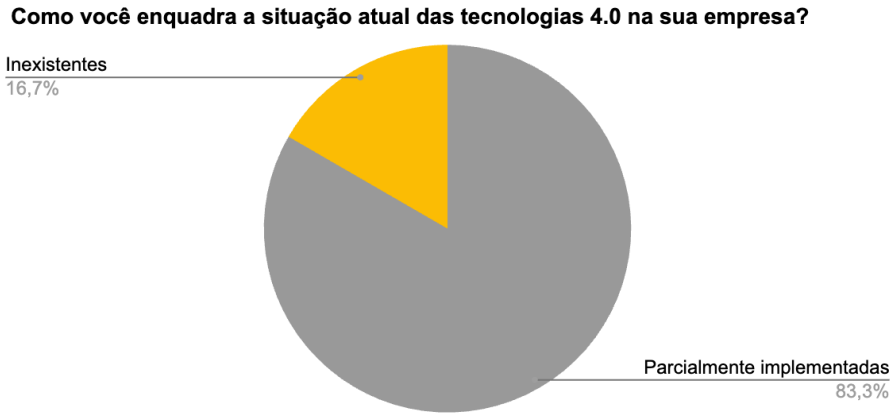
Como resposta da primeira pergunta, duas empresas afirmam alto nível de proximidade; duas empresas afirmam baixo nível de proximidade; uma empresa afirma ter um nível de proximidade intermediário, duas empresas afirmam ter um nível de proximidade alto e por fim, uma empresa afirma ter um nível de proximidade muito alto. A Figura 5 apresenta o gráfico com as respostas dessa pergunta.

Figura 5 - Respostas da primeira pergunta da seção 1

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação à segunda e última pergunta da primeira seção, investigou-se o nível de implementação das tecnologias da I4.0 nas empresas respondentes. Cinco das empresas respondentes possuem as tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas e uma empresa não possui nenhum tipo de tecnologia da I4.0 implementada. Nenhuma das empresas respondentes possui as tecnologias da I4.0 majoritariamente implementadas. A Figura 6 expõem as respostas da pergunta discutida. Nessa última pergunta da primeira seção, as empresas foram divididas em dois grupos: empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas e uma empresa com tecnologias da I4.0 inexistente.

Figura 6 - Respostas da segunda pergunta da seção 1



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na segunda seção, as empresas foram classificadas em duas categorias de acordo com a resposta da segunda pergunta da primeira seção. As duas categorias são: Empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas, constituída por cinco empresas, e empresas com I4.0 inexistente, contando com apenas uma empresa.

Em relação às empresas com I4.0 parcialmente implementadas, as quais totalizam cinco das empresas participantes da pesquisa, foram realizadas seis perguntas: "*Como foi a aceitação dos colaboradores durante as mudanças necessárias para a implementação das tecnologias?*"; "*Houveram fatores resistentes ao implemento/desenvolvimento da I4.0 dentro da empresa?*"; "*Quais foram as motivações para começar a implementar as tecnologias I4.0?*"; "*Quais tecnologias características da I4.0 já estão sendo aplicadas na sua empresa?*" e por fim, "*Quão*

satisfeita a empresa está com o retorno do investimento nas tecnologias 4.0?". As figuras abaixo apresentam os gráficos com as respostas.

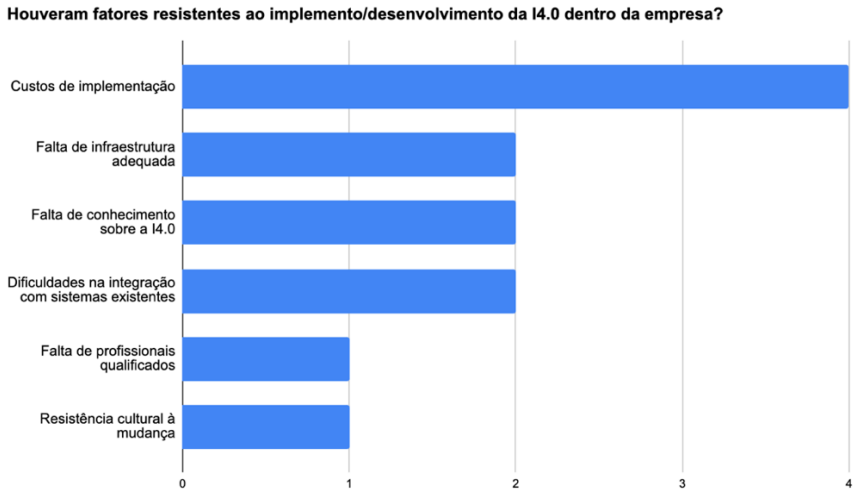
Na primeira pergunta da segunda seção, buscou-se compreender se os colaboradores que passaram pelo momento de mudança na implementação das tecnologias 4.0 enxergaram sentido ou tiveram resistência a essa mudança. Apenas duas empresas das respondentes afirmam que seus colaboradores não enxergaram sentido nessa mudança e quatro empresas afirmam que seus colaboradores aceitaram a mudança.

Figura 7 - Respostas da primeira pergunta da seção 2 – Empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação a segunda pergunta dessa seção, foi questionado sobre os fatores de resistência ao implemento da I4.0 nas empresas, podendo optar pela resposta de mais de um fator. Essa pergunta tem como objetivo realizar uma análise comparativa sobre as barreiras encontradas na literatura e os fatores enfrentados pelas empresas do mercado. O gráfico com a frequência de respostas para cada um dos fatores pode ser visualizado na figura abaixo.

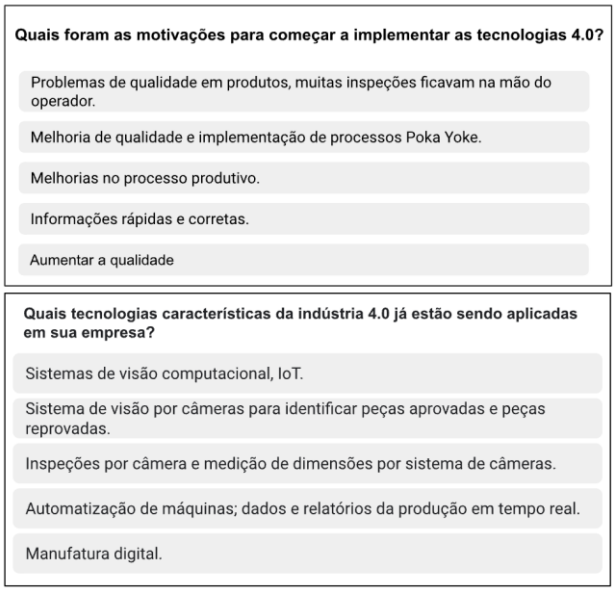
Figura 8 - Respostas da segunda pergunta da seção 2 – Empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na sequência das perguntas realizadas às empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas, a terceira e quarta perguntas foram discursivas e suas respostas estão apresentadas na Figura 9. Na terceira pergunta, foi questionado as motivações para implementar as tecnologias 4.0 nas empresas. Por sua vez, na quarta pergunta, foi levantado quais tecnologias da já estão sendo aplicadas nas empresas.

Figura 9 - Respostas da terceira e quarta pergunta da seção 2 – Empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por fim, a quinta e última pergunta da segunda seção tem como objetivo examinar o nível de satisfação com o retorno do investimento realizado em tecnologias da I4.0, momento em que se constata que todas as empresas estão satisfeitas, dentre elas, três empresas afirmam estarem satisfeitas e duas empresas afirmam estarem muito satisfeitas. O gráfico com a pergunta e resposta está exposto na figura abaixo.

Figura 10 - Respostas da última pergunta da seção 2 – Empresas com tecnologias da I4.0 parcialmente implementadas

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação à empresa com tecnologias da I4.0 inexistentes, foram realizadas três perguntas: "*Qual é sua percepção sobre a relevância da indústria 4.0 para o setor?*"; "*Quais são as principais razões para a sua empresa não ter adotado tecnologias da indústria 4.0 até agora?*" e "*Que tipo de suporte ou recursos sua empresa precisaria para considerar a adoção da indústria 4.0?*".

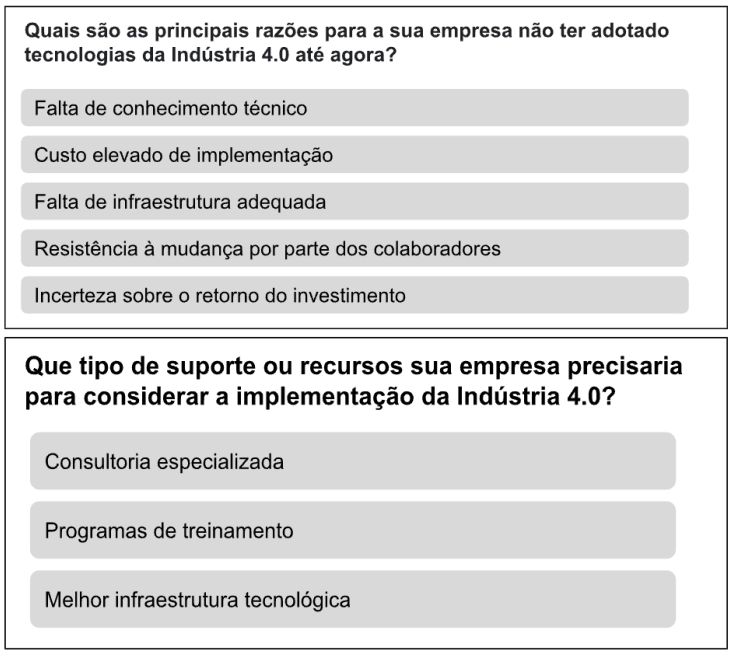
A primeira pergunta feita à empresa com tecnologias da I4.0 inexistente teve como objetivo entender o nível de percepção da relevância da I4.0 para o setor metalmecânico, sendo o número um pouco relevante e o número cinco muito relevante. Constata-se que a empresa se manteve neutra em relação a sua resposta, marcando o número três. O gráfico com essa pergunta e resposta está exposto na Figura 11.

Figura 11 - Respostas da primeira pergunta da seção 2 – Empresas com tecnologias da I4.0 inexistentes

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na segunda e terceira pergunta realizada para a empresa, de caráter discursiva, buscou-se explorar as razões para a empresa não ter adotado tecnologias da I4.0 até agora e que tipos de suporte ou recursos seriam necessários para a sua implementação, respectivamente. A Figura 12 apresenta as respostas obtidas nessas perguntas.

Figura 12 - Respostas da segunda e terceira pergunta da seção 2 – Empresas com tecnologias da I4.0 inexistentes



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados obtidos mostram que ainda falta conhecimento dentro das indústrias metal mecânicas, visto que dos respondentes, 16,7% afirmam a inexistência de tecnologias 4.0 nas empresas, e o conhecimento alto/muito alto se encontra em apenas 50% dos respondentes, sendo os outros 50% com um conhecimento intermediário ou baixo. Embora algumas empresas tenham implementado novas tecnologias com sucesso, ainda há falta de conhecimento e preparação entre muitas empresas. O setor metal mecânico mostra potencial de melhoria por meio da digitalização e integração de processos. No entanto, barreiras como altos custos e falta de profissionais qualificados dificultam a adoção generalizada. Por outro lado, a implementação de tecnologias da I4.0 pode contribuir para a sustentabilidade, reduzindo o consumo de recursos e os impactos ambientais.

Através de uma análise comparativa entre as barreiras identificadas na literatura e aquelas percebidas pelas empresas, é revelado uma concordância substancial entre elas, destacando que os desafios teóricos e práticos estão alinhados. No entanto, algumas diferenças sutis refletem especificidades do contexto brasileiro, as quais incluem a falta de qualificação e treinamento especializado da força de trabalho, a resistência cultural à mudança, as limitações financeiras para investimentos em novas tecnologias, a carência de infraestrutura adequada e a falta de integração entre sistemas legados e novas soluções tecnológicas. Adicionalmente, questões relacionadas à segurança de dados e à ausência de padrões industriais consolidados também emergiram como desafios críticos. Esses obstáculos convergem com os resultados obtidos através da RSL, sendo os principais entraves no mercado, mostrando assim que a literatura está em sintonia com o mercado sobre essa temática.

A partir dos dados coletados junto às empresas, ficou evidente que não são todas as empresas que reconheçam a importância da I4.0, por isso, há uma necessidade urgente de políticas e estratégias que facilitem a transição tecnológica. Isso inclui programas de capacitação contínua, incentivos financeiros e fiscais, além de iniciativas governamentais e setoriais que promovam a padronização e a integração tecnológica. As barreiras à implementação da I4.0 no setor metal mecânico brasileiro, conforme identificadas na literatura e percebidas pelas empresas, evidenciam uma convergência nas principais dificuldades enfrentadas.

No entanto, as nuances específicas ao contexto brasileiro sublinham a necessidade de abordagens personalizadas para superar esses desafios. Políticas públicas direcionadas, programas de capacitação adequados, e iniciativas colaborativas entre governo, indústria e academia são cruciais para mitigar essas barreiras e promover uma transição bem-sucedida para a I4.0 no Brasil.

Constata-se que, para superar essas barreiras e aproveitar plenamente os benefícios da I4.0, é essencial uma abordagem colaborativa entre empresas, instituições de ensino e governo. Somente através de esforços coordenados será possível criar um ambiente propício à inovação e ao desenvolvimento sustentável do setor metal mecânico. Futuras pesquisas podem explorar estratégias específicas de mitigação dessas barreiras e estudar casos de sucesso que possam servir como referência para outras empresas do setor. A continuidade no monitoramento e avaliação das iniciativas de implementação também será importante para ajustar e aperfeiçoar as práticas adotadas, garantindo que a I4.0 cumpra seu papel transformador no setor metal mecânico.

4.3 Análise comparativa

Os resultados obtidos com a coleta de dados em seis empresas do setor metal mecânico confirmam e ampliam as barreiras identificadas na literatura sobre a implementação da I4.0. As quatro principais categorias de barreiras destacadas — custo de implementação, resistência cultural, barreiras tecnológicas e complexidade na coleta e integração de dados — foram corroboradas pelos relatos das empresas pesquisadas, revelando nuances específicas do contexto brasileiro.

De acordo com os dados coletados, as empresas com menor proximidade às tecnologias da I4.0 apontaram a falta de recursos financeiros como o principal entrave para a modernização tecnológica. Isso está alinhado com os achados de Ralph *et al.* (2022), que destacam os altos investimentos necessários em infraestrutura e equipamentos, como sensores, sistemas de análise e máquinas de controle numérico computadorizado (CNC). A pesquisa identificou que estratégias como a adoção de soluções híbridas, que combinam máquinas com sensores IoT, permitem uma transição gradual e menos onerosa, conforme sugerido também por Huang *et al.* (2022).

Os resultados da pesquisa evidenciam que a resistência dos colaboradores à mudança continua sendo uma barreira significativa, principalmente em empresas com processos mais tradicionais. Essa resistência, relatada em estudos como o de Tatipala *et al.* (2020), está associada ao medo de perda de emprego e à falta de compreensão sobre os benefícios das tecnologias digitais. As empresas que realizaram workshops e treinamentos para engajar os colaboradores relataram maior aceitação das mudanças, reforçando que práticas de gestão da mudança podem mitigar essa barreira, conforme apontado por Ralph *et al.* (2022).

A dificuldade de integrar sistemas com novas tecnologias foi uma barreira recorrente entre as empresas participantes. Esse desafio reflete o apontado por Matenga e Mpofu (2022), que destacam a falta de interconectividade e a necessidade de desenvolver softwares personalizados para superar as limitações dos sistemas antigos. Entre as soluções relatadas, a implementação de sensores e softwares de interoperabilidade teve destaque, possibilitando melhorias incrementais na coleta e análise de dados, sem a necessidade de substituições completas de equipamentos.

A dificuldade em consolidar dados de diferentes fontes e garantir a qualidade das informações foi outra barreira destacada pelos respondentes. Conforme apontado por Tatipala *et al.* (2020), a integração manual de dados pode gerar inconsistências e imprecisões, impactando negativamente os processos decisórios. Empresas com maior maturidade tecnológica relataram avanços significativos com o uso de sistemas automatizados de monitoramento, alinhando-se à literatura ao demonstrar que a digitalização das operações reduz a ocorrência de falhas humanas e aumenta a confiabilidade dos dados coletados.

Os resultados reforçam que, para superar as barreiras mapeadas, é essencial promover estratégias direcionadas. Em relação aos altos custos, políticas públicas de incentivo fiscal e linhas de crédito específicas para tecnologias digitais podem reduzir as barreiras de entrada, como já proposto por Tortorella e Fettermann (2018). Além disso, iniciativas setoriais que promovam o compartilhamento de recursos, como laboratórios de testes e capacitação coletiva, podem beneficiar principalmente pequenas e médias empresas.

As ações de capacitação contínua também emergem como fundamentais para superar a resistência cultural e tecnológica. A formação de redes colaborativas entre

empresas mais avançadas e aquelas em estágios iniciais de adoção tecnológica pode acelerar o processo de aprendizado e compartilhamento de boas práticas, conforme discutido por Zambrano *et al.* (2022).

Dessa forma, a pesquisa confirma a necessidade de uma abordagem incremental para a transição tecnológica, priorizando soluções que combinem baixo custo com alto impacto imediato. A implementação de sistemas de monitoramento em tempo real, por exemplo, tem se mostrado eficaz para empresas que enfrentam desafios na coleta e integração de dados, permitindo avanços gradativos rumo à consolidação da I4.0.

Em síntese, as respostas coletadas evidenciam um alinhamento significativo com as teorias e modelos amplamente discutidos na literatura sobre a adoção da Indústria 4.0. Por exemplo, os desafios enfrentados pelas empresas com resistência cultural à mudança podem ser analisados à luz da Teoria de Gestão da Mudança de Lewin, que enfatiza a necessidade de descongelar hábitos organizacionais antes de implementar novas práticas. Além disso, a barreira do alto custo de implementação se relaciona com o modelo de adoção tecnológica de Rogers, no qual o fator econômico é identificado como um elemento crítico para a difusão de inovações. A integração de sistemas com novas tecnologias, outro ponto recorrente nas respostas, pode ser interpretada dentro do framework de maturidade tecnológica, que descreve estágios progressivos para a transformação digital. Ao cruzar os achados empíricos com essas perspectivas teóricas, a análise não apenas valida os resultados, mas também destaca como as empresas respondentes estão, mesmo que parcialmente, trilhando caminhos previstos pelos modelos estabelecidos, reforçando a relevância dessas teorias no contexto do setor metal mecânico brasileiro.

4.4 Considerações finais

Os resultados obtidos a partir da coleta de dados em seis empresas do setor metal mecânico evidenciaram diferenças marcantes entre organizações com níveis distintos de implementação da I4.0. Empresas com maior proximidade às tecnologias apresentaram menores resistências internas, maior retorno sobre o investimento e melhores resultados em produtividade, enquanto aquelas com pouca

ou nenhuma implementação enfrentaram desafios relacionados à falta de infraestrutura tecnológica, resistência cultural e escassez de profissionais qualificados.

A análise comparativa da literatura explorada com a pesquisa realizada com indústrias brasileiras revelou que as empresas que já possuem a I4.0 parcialmente implementada destacaram a necessidade de modernizar seus processos produtivos como um fator decisivo para iniciar a transição tecnológica. No entanto, mesmo entre essas empresas, as dificuldades relacionadas à capacitação técnica de seus colaboradores e à integração de sistemas legados ainda são barreiras críticas. Por outro lado, a única empresa com ausência total de implementação tecnológica identificou como principal entrave a falta de conhecimento sobre os benefícios da I4.0 e as dificuldades financeiras para investimentos iniciais.

Ao cruzar os dados coletados, observou-se que empresas com maior retorno percebido tendem a adotar tecnologias flexíveis e soluções modulares que permitem adaptações graduais às suas operações. Isso sugere que estratégias de transição escalonada, aliadas a investimentos direcionados em tecnologias específicas, podem ser mais eficazes no contexto do setor metal mecânico brasileiro, especialmente para pequenas e médias empresas.

Os dados também permitiram mapear as principais implicações práticas para as empresas do setor. Um dos pontos mais relevantes é a necessidade de iniciativas de capacitação contínua para superar as resistências internas. Empresas que investiram em treinamentos específicos sobre I4.0 relataram maior aceitação por parte dos colaboradores, reforçando a importância da educação corporativa como um facilitador para a transformação digital.

Além disso, a integração de sistemas legados com novas tecnologias foi identificada como um dos desafios mais citados. Nesse contexto, empresas que adotaram soluções de interoperabilidade — como a implementação gradual de sensores IoT em máquinas antigas — conseguiram melhorar a coleta de dados e aumentar a eficiência operacional sem necessidade de grandes substituições de equipamentos. Essa abordagem prática destaca a relevância de soluções híbridas no processo de modernização tecnológica.

A análise dos resultados também evidenciou que a resistência cultural pode ser mitigada por meio de ações estratégicas de comunicação e gestão da mudança.

Entre as práticas relatadas pelas empresas participantes, destacam-se workshops internos e a criação de comitês de inovação com participação ativa de colaboradores, iniciativas que fomentaram um ambiente mais colaborativo e receptivo às novas tecnologias.

Destarte, foi possível identificar uma relação direta entre o retorno percebido e o nível de implementação tecnológica. Essa premissa sugere que, para alcançar resultados tangíveis, as empresas precisam direcionar esforços para tecnologias que tenham impacto direto na produtividade e na redução de custos. Por exemplo, empresas que implementaram sistemas de monitoramento em tempo real relataram melhorias significativas na eficiência de processos, enquanto aquelas que investiram exclusivamente em automação sem conectividade entre sistemas enfrentaram maiores dificuldades para justificar os investimentos.

Uma integração mais profunda dos dados coletados revelou ainda que as empresas mais avançadas na adoção da I4.0 tendem a atuar como difusoras do conhecimento para outras organizações do setor. Isso reforça o papel das parcerias entre empresas e a importância de criar redes de cooperação que permitam a troca de boas práticas e o acesso a soluções tecnológicas.

Por fim, as percepções dos respondentes indicam que políticas públicas voltadas para o financiamento de tecnologias digitais e incentivos fiscais podem desempenhar um papel crucial na redução das barreiras de entrada. Esses dados são fundamentais para orientar a formulação de estratégias governamentais e setoriais que promovam uma transição mais inclusiva e eficiente para a Indústria 4.0 no Brasil.

5 CONCLUSÃO

A subexploração tecnológica no setor fabril metal mecânico atrai a entrada das ideias da I4.0, no entanto, as propriedades dos metais carecem de recursos de controle e monitoramento. É evidente que a I4.0 tem um potencial significativo para transformar esse setor, porém, o custo de implementação dessas tecnologias mostra-se um tanto elevado, sendo a principal barreira destacada pelos autores acima. Além dos altos custos, a complexidade de materiais apresenta um desafio significativo, visto que durante a produção de chapas, cada peça possui suas

características únicas, e quando trabalhado em grande demanda, há uma grande probabilidade de queda na qualidade.

Para que um processo de implementação da I4.0 seja feito, são necessários grandes investimentos, configurando-se como inviável para muitas empresas que já possuem maquinário e precisam passar pelo processo de digitalização ou adquirirem novos equipamentos. Mesmo quem já se encontra nesse processo, possui dificuldades com a catalogação dos dados, sendo muitas vezes de forma manual, gerando falhas e resultados inesperados.

A implementação da I4.0 no Brasil é um fator potencial, visto que as empresas estão interessadas em adaptar-se ao mundo moderno, tal como apresentado nos dados fornecidos pelos respondentes do instrumento de coleta de dados. A convergência das barreiras teóricas e práticas sublinha a complexidade do processo de implementação da I4.0 e a necessidade de estratégias integradas para superá-las. Destarte, é possível analisar que algumas empresas ainda não possuem conhecimento ou se encontram a par com as barreiras evidenciadas. Superar esses desafios exigirá um esforço conjunto da indústria, governos e instituições de pesquisa para investir em capacitação, infraestrutura e desenvolvimento de soluções tecnológicas adaptadas às necessidades específicas do setor. Somente através de uma abordagem colaborativa e estratégica, será possível aproveitar plenamente o potencial da I4.0 e impulsionar a competitividade e a sustentabilidade do setor metalmecânico no cenário global.

Algumas soluções podem ser propostas para mitigar as barreiras enfrentadas pelas empresas do setor metal mecânico. Uma abordagem inovadora seria a criação de hubs tecnológicos colaborativos, onde pequenas e médias empresas possam compartilhar infraestrutura, como sensores IoT e equipamentos de análise, reduzindo custos e aumentando o acesso a tecnologias avançadas. Além disso, programas de mentoria conduzidos por empresas que já avançaram na adoção da Indústria 4.0 poderiam acelerar a curva de aprendizado e a implementação de boas práticas entre as organizações menos maduras tecnologicamente. A criação de incentivos financeiros, como subsídios para aquisição de equipamentos e linhas de crédito direcionadas para inovação, é outra ação crítica que pode ser impulsionada por políticas públicas. Além disso, a implementação gradual de tecnologias, começando por soluções de baixo custo e impacto imediato, como sensores IoT e

sistemas básicos de monitoramento, pode reduzir a resistência organizacional e facilitar a transição tecnológica.

Outra solução viável seria a integração de plataformas digitais customizadas para o setor, que facilitem a interoperabilidade entre sistemas legados e novas tecnologias, diminuindo a complexidade da transição tecnológica. Para superar a resistência cultural, gamificação de treinamentos e a criação de “embaixadores da inovação” dentro das empresas podem engajar os colaboradores de maneira mais interativa e eficaz. Essas intervenções, além de abordar os desafios identificados, criam oportunidades para que as empresas evoluam de maneira mais sustentável e conectada ao ecossistema industrial contemporâneo.

Futuras pesquisas devem explorar estratégias específicas para superar essas barreiras e estudar casos de sucesso que possam servir como referência. Além disso, é importante o monitoramento contínuo das iniciativas de implementação para ajustar e aperfeiçoar as práticas adotadas, garantindo que a I4.0 possa cumprir seu papel transformador no setor metal mecânico brasileiro. Em suma, a implementação da I4.0 no setor metal mecânico no Brasil enfrenta desafios significativos, mas também oferece oportunidades únicas de inovação e otimização. Com esforços coordenados e estratégias bem delineadas, é possível transformar essas barreiras em trampolins para o desenvolvimento sustentável e competitivo do setor.

REFERÊNCIAS

ABIO, Albert *et al*. Machine Learning-Based Surrogate Model for Press Hardening Process of 22MnB5 Sheet Steel Simulation in Industry 4.0. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 10, p. 3603, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/10/3603. Acesso em: 22 maio 2024.

BEAUCHEMIN, Maude *et al.* Dynamic allocation of human resources: case study in the metal 4.0 manufacturing industry. **International Journal of Production Research**, [*s. l.*], v. 61, n. 20, p. 6891–6907, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2139002. Acesso em: 22 maio 2024.

BONNARD, Renan *et al.* Big data/analytics platform for Industry 4.0 implementation in advanced manufacturing context. [*s. l.*], Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-021-07834-5. Acesso em: 22 maio 2024.

CHEN, Shikang *et al.* Blockchain applications in PLM towards smart manufacturing. [*s. l.*], Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-021-07802-z. Acesso em: 22 maio 2024.

DIAZ, David Enrique Apaza *et al*. Optimization Model to Increase the Productive Flow, Applying SLP, 5s and Kanban-Conwip Hybrid System in Companies of the Metalworking Sector. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION MANAGEMENT (ICIM), 8., 2022, Cambridge. **Proceedings** [...]. Cambridge: IEEE, 2022. p. 186–190. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9904944. Acesso em: 22 maio 2024.

DURÃO, Luiz Fernando C. S. *et al*. Digital twin requirements in the context of industry 4.0. *In*: AMARAL, A.; D'ORAZIO, A.; GOMES, J. (ed.). **Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things**. Cham: Springer, 2018. p. 204–214. (IFIP Advances in Information and Communication Technology, v. 540). Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99707-0_20. Acesso em: 22 maio 2024.

FEDDOUL, Yassine *et al*. Exploring human-machine collaboration in industry: a systematic literature review of digital twin and robotics interfaced with extended reality technologies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 128, n. 1-2, p. 15-46, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11883-7. Acesso em: 22 maio 2024.

GHARIBVAND, Vahid *et al*. Cloud based manufacturing: A review of recent developments in architectures, technologies, infrastructures, platforms and associated challenges. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 130, n. 9-10, p. 4119-4158, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12795-6. Acesso em: 22 maio 2024.

GHAURI, Pervez N.; ELG, Ulf; MELÉN HÅNELL, Sara. **Achieving a Sustainable Competitive Advantage**: A Holistic Approach. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2021. Disponível em: https://www.elgaronline.com/view/book/9781800378069/9781800378069.xml. Acesso em: 22 maio 2024.

GLEESON, Brendan; DAVIDSON, Kathryn. The urban revolution that isn't: The political ecology of the new "urbanology". **The Journal of Australian Political Economy**, Wentworth Building, University of Sydney, New South Wales, Australia, n. 72, p. 52–79, 2013. Disponível em: https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.846330743067917

GROBLER-DĘBSKA, Katarzyna; KUCHARSKA, Edyta; BARANOWSKI, Jerzy. Formal scheduling method for zero-defect manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 118, n. 11–12, p. 4139–4159,

2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-08149-z. Acesso em: 22 maio 2024.

GROCHE, Peter; STORBECK, Martin; WANG, Tianbo. Continuous forming of height-variable profiles by flexible roller beading. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 103, n. 5–8, p. 2649–2663, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03716-1. Acesso em: 22 maio 2024.

HUAMÁN, Jonathan *et al*. Production Management Model Based on Lean Manufacturing Focused on the Human Factor to Improve Productivity of Small Businesses in the Metalworking Sector. *In*: AHRAM, T. *et al*. (org.). **Human Systems Engineering and Design II**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 847–853. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27928-8_125. Acesso em: 22 maio 2024.

HUMPHREY, John. THE ADOPTION OF JAPANESE MANAGEMENT TECHNIQUES IN BRAZILIAN INDUSTRY. **Journal of Management Studies**, [*s. l.*], v. 32, n. 6, p. 767–787, 1995. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.1995.tb00151.x. Acesso em: 22 maio 2024.

LI, Yuanyuan *et al*. Machine learning and optimization for production rescheduling in Industry 4.0. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 110, n. 9–10, p. 2445–2463, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05973-5. Acesso em: 22 maio 2024.

MALUF, Arthur S.; SAGAWA, Juliana K.; BORGES, Roberto F. S. Toward the use of bond graphs for manufacturing control: comparison of existing models. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 121, n. 9-10, p. 6783-6804, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09673-x. Acesso em: 22 maio 2024.

MARIO, Coccia. Sources of disruptive technologies for industrial change. [*s. l.*], p. 97–120, 2017. Disponível em: https://www.rivisteweb.it/doi/10.1430/87140. Acesso em: 22 maio 2024.

MATENGA, Alice Elizabeth; MPOFU, Khumbulani. Blockchain-Based Cloud Manufacturing SCM System for Collaborative Enterprise Manufacturing: A Case Study of Transport Manufacturing. **Applied Sciences (Switzerland)**, [S. l.], v. 12, n. 17, p. 8769, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8769. Acesso em: 22 maio 2024.

MEDEIROS, Eveliny D.; SANTOS, Luciano C.; GOHR, Cláudia F. Modelos de maturidade para a indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Gestão & Tecnologia**, [S. l.], v. 24, n. 5, p. 154–181, 2024. Disponível em: https://revistagt.fpl.edu.br/get/article/view/2764. Acesso em: 22 maio 2024.

MEJÍA, Gonzalo *et al*. Job shop rescheduling with rework and reconditioning in Industry 4.0: an event-driven approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 119, n. 5–6, p. 3729–3745, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-08428-9. Acesso em: 22 maio 2024.

MORENO, Aitor *et al*. Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 365–373, 2017. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12008-016-0318-7. Acesso em: 22 maio 2024.

PAPAVASILEIOU, A. *et al*. An optical system for identifying and classifying defects of metal parts. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 326–340, 2022. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2021.2017830. Acesso em: 22 maio 2024.

RALPH, Benjamin James *et al*. Transformation of a rolling mill aggregate to a cyber physical production system: from sensor retrofitting to machine learning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 493–518, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-020-01662-7. Acesso em: 22 maio 2024.

SANTOS, Reginaldo Carreiro; MARTINHO, José Luís. An Industry 4.0 maturity model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 1023–1043, 2020. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JMTM-09-2018-0315/full/html. Acesso em: 22 maio 2024.

SELICATI, Valeria *et al*. A monitoring framework based on exergetic analysis for sustainability assessment of direct laser metal deposition process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 118, n. 11–12, p. 3641–3656, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-08110-0. Acesso em: 22 maio 2024.

SHAHIN, Mohammad *et al*. Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 107, n. 5–6, p. 2927–2936, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05051-8. Acesso em: 22 maio 2024.

SIMEONE, Alessandro; DENG, Bin; CAGGIANO, Alessandra. Resource efficiency enhancement in sheet metal cutting industrial networks through cloud manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 107, n. 3–4, p. 1345–1365, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05085-y. Acesso em: 22 maio 2024.

TATIPALA, Sravan *et al*. A hybrid data-based and model-based approach to process monitoring and control in sheet metal forming. **Processes**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 81, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/8/1/81. Acesso em: 22 maio 2024.

TESSARINI JUNIOR, Geraldo; SALTORATO, Patrícia. Impactos da Indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 18, n. 2, p. 743-768, 2018. Disponível em: https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/2838. Acesso em: 22 maio 2024.

TORTORELLA, Guilherme Luz; FETTERMANN, Diego. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, [*s. l.*], v. 56, n. 8, p. 2975–2987, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420. Acesso em: 22 maio 2024.

TSAI, Sung Yu; CHANG, Jen Yuan. Regression approach to a novel lateral flatness leveling system for smart manufacturing. **Applied Sciences (Switzerland)**, [S. l.], v. 11, n. 14, p. 6363, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/14/6363. Acesso em: 22 maio 2024.

YANG, D. Y. *et al*. Flexibility in metal forming. **CIRP Annals**, [S. l.], v. 67, n. 2, p. 743–765, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785061830154X. Acesso em: 22 maio 2024.

ZAMBRANO, Valentina *et al*. Industrial digitalization in the industry 4.0 era: Classification, reuse and authoring of digital models on Digital Twin platforms. **Array**, [S. l.], v. 14, p. 100175, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259000762200055X. Acesso em: 22 maio 2024.

ZUTIN, Gabriel Consoni *et al*. Readiness levels of Industry 4.0 technologies applied to aircraft manufacturing—a review, challenges and trends. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 120, n. 1–2, p. 927–943, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-08977-0. Acesso em: 22 maio 2024.

Biografia dos Autores

Júlia Possebon Spellmeier
Estudante de Mestrado em Inteligência Organizacional no PPGEP - Programa de Pós Graduação em Engenharia de produção na Universidade Federal de Santa Maria- UFSM e graduada em Engenharia de Produção Graduada na UFSM. Durante a gradução foi bolsista de Iniciação Científica no Núcleo de Inovação e Competitividade (NIC). Realizou período de mobilidade acadêmica na Universidade do Porto, estudando licenciatura na Faculdade de Engenharia no curso de Engenharia e Gestão Industrial e mestrado na Faculdade de Economia no curso de Gestão. Tem experiência nas

áreas de Engenharia de Produção e Gestão de Negócios em Energia. Possui publicação recente em periódico de alto impacto como Renewable Energy.

Luisa Zanuzo Kuntz
Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Carmen Brum Rosa
Doutora em Engenharia Elétrica, Mestre em Engenharia de Produção e Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Tem experiência profissional e acadêmica nas áreas de Engenharia de Produção, Gestão em Negócios de Energia e Inovação e Educação Empreendedora. As pesquisas possuem ênfase em Avaliação de Desempenho Organizacional, Modelagem Matemática para Mensuração da Competitividade Organizacional, Ferramentas de Apoio à Tomada de Decisão, Diagnóstico da Competitividade e Gerenciamento de Processos de Ambientes de Inovação. Professora Adjunta na Universidade Federal de Santa Maria no Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas e Professora Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP/UFSM), Professora pesquisadora do Núcleo de Inovação e Competitividade (NIC/UFSM) e do Grupo de Inovação, Transferência de Tecnologia, Educação e Empreendedorismo (GITEE/UFSM). Atualmente está Coordenadora de Educação Empreendedora da Pró-Reitoria de Inovação e Empreendedorismo (PROINOVA) da Universidade Federal de Santa Maria. Possui publicações recentes em periódicos de alto impacto como Energy for Sustainable Development, Energy Policy, Energy, Energies, Solar Energy, Renewable Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews e Journal of Cleaner Production e atuação em projetos de PD na área de Gestão em Negócios de Energia. Informação de cadastro de pesquisa: Bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora 2 (2024-2027); index-h SCOPUS = 11; index-h Scholar Google = 13.

Arthur Martins Valentim
Engenheiro Mecânico com mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com foco em Inteligência Organizacional e aplicação de tecnologias de manufatura inteligente para aumento da competitividade industrial. Possui mais de 10 anos de experiência na indústria metalmecânica e automotiva, atuando em desenvolvimento de produtos, engenharia de processos, gestão técnica e inovação industrial. Forte atuação em projetos de melhoria contínua, engenharia aplicada, e implementação de tecnologias digitais no chão de fábrica. Fluente em inglês, com histórico de participação em projetos internacionais.

Gabriela Michelon Baldessarelli
Graduanda em Engenharia de Produção UFSM.

Graciele Rediske
Doutora e Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), graduada em Engenharia de Produção pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) e especialista em Engenharia do Tráfego pela Faculdade Dom Alberto. Atualmente é Pós-doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSM (PPGEP/UFSM). Atuou como bolsista CAPES no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT GD) e como Professora Substituta no Campus Cachoeira do Sul da UFSM. Desenvolve pesquisas nas áreas de Engenharia Econômica, Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MCDM), Avaliação de Desempenho Organizacional e Modelagem Matemática da Competitividade, com aplicações integradas a

Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Possui publicações recentes em periódicos como Applied Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Energy, Solar Energy e Journal of Cleaner Production, entre outros. Atua em projetos de PD na área de Gestão de Energia e integra a equipe do projeto SolarMap, tecnologia licenciada pela UFSM. Índices h: Scopus = 10; Google Scholar = 11.

Artigo recebido em: 13/10/2024 e aceito para publicação em: 17/01/2025
DOI: https://doi.org/10.14488/1676-1901.v25i2.5436