INTERFACE TECNOLÓGICA

TECNOLOGIA EM PRODUÇÃO INDUSTRIAL
Interface Tecnológica · v. 23, n. 1, 2026 · p. 292–300
ISSN on-line 2447-0864 · ISSN impresso 1807-3980
https://doi.org/10.31510/infa.v23i1.2416

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA AO PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO: interfaces com a Indústria 4.0 e o Lean Manufacturing

Artificial intelligence applied to production planning and scheduling: interfaces between Industry 4.0, Lean Manufacturing, and operational optimization

Simone de Lourdes de Almeida[1], **Luís Fernando Terazzi**[2]

AUTORIA

[1] **Simone de Lourdes de Almeida**
Fatec Taquaritinga – SP – Brasil
sisa-almeida@hotmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7022-2043

[2] **Luís Fernando Terazzi**
Fatec Taquaritinga – SP – Brasil
luis.terazzi@cps.sp.gov.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4251-7326

HISTÓRICO

Recebido	11/04/2026
Aceito	08/06/2026
Publicado	30/06/2026

COMO CITAR

ALMEIDA, S. L. de; TERAZZI, L. F. Inteligência artificial aplicada ao planejamento e programação da produção: interfaces com a Indústria 4.0 e o Lean Manufacturing. **Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 23, n. 1, p. 292-300, 2026. DOI: 10.31510/infa.v23i1.2416.

LICENÇA

Artigo de acesso aberto distribuído sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

cc BY 4.0

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas produtivos e o avanço da transformação digital têm ampliado a necessidade de métodos mais eficientes de planejamento e decisões nas organizações industriais. Nesse cenário, as tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 e à Inteligência Artificial têm se destacado por permitir uma maior integração, automação e análise de dados nos ambientes de produção. Ao mesmo tempo, práticas de excelência operacional, como o Lean Manufacturing, permanecem essenciais para a eliminação de desperdícios e aprimoramento dos processos. Metodologicamente, é um estudo baseado em pesquisa bibliográfica de artigos científicos e publicações acadêmicas. Os resultados sugerem que a combinação dessas metodologias favorece a criação de sistemas produtivos mais inteligentes e baseados em dados, fortalecendo o apoio à tomada de decisões. Pode-se concluir que essa integração tem o potencial de aumentar a eficiência operacional e a competitividade da indústria.

Palavras-chave: Manufatura inteligente. Otimização de processos. Transformação digital.

ABSTRACT

The increasing complexity of production systems and the advancement of digital transformation have amplified the need for more efficient planning and decision-making methods in industrial organizations. In this scenario, technologies related to Industry 4.0 and Artificial Intelligence have stood out for enabling greater integration, automation, and data analysis in production environments. At the same time, operational excellence practices, such as Lean Manufacturing, remain essential for eliminating waste and improving processes. Methodologically, this is a study based on bibliographic research of scientific articles and academic publications. The results suggest that the combination of these methodologies favors the creation of smarter, data-driven production systems, strengthening support for decision-making. It can be concluded that this integration has the potential to increase operational efficiency and the competitiveness of the industry.

Keywords: Smart manufacturing. Process optimization. Digital transformation.

1 INTRODUÇÃO

Bueno *et al*. (2025) destacam que a crescente complexidade dos sistemas produtivos e a intensificação da competitividade global têm exigido das organizações industriais níveis cada vez mais elevados de eficiência, flexibilidade e capacidade de resposta. Em ambientes industriais marcados por mercados voláteis, ciclos de vida de produtos cada vez menores e elevada variabilidade da demanda, as organizações precisam adaptar constantemente suas estratégias produtivas e operacionais para se manterem atualizadas e competitivas (CAIADO *et al*., 2021). Conforme Slack *et al*. (2020), a tomada de decisão em ambientes produtivos exige mecanismos mais ágeis, preditivos e adaptativos.

Nesse cenário, o avanço da Indústria 4.0 tem promovido transformações significativas na forma como os sistemas produtivos são estruturados e gerenciados. Alqudhaibi *et al*. (2025) afirmam que a Indústria 4.0 se caracteriza pela integração de tecnologias digitais avançadas aos processos industriais, ampliando os níveis de automação, conectividade e análise de dados. De maneira complementar, tecnologias como Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e análise de dados possibilitam maior monitoramento e otimização dos processos produtivos, contribuindo para sistemas industriais mais inteligentes e integrados (CAIADO *et al*., 2021). Nesse contexto, a digitalização tem ampliado o potencial de melhoria na tomada de decisão e na eficiência operacional da produção (STRAZZULLO, 2024).

Paralelamente, práticas consolidadas de excelência operacional, como o *Lean Manufacturing*, ou Manufatura Enxuta, continuam desempenhando papel fundamental na busca por eficiência e eliminação de desperdícios nos sistemas produtivos. Shahin, Maghanaki e Chen (2026) destacam que, ao longo das últimas décadas, a manufatura enxuta tem se consolidado como uma das principais abordagens para a promoção da excelência operacional, permitindo melhorias significativas por meio da eliminação de desperdícios e da otimização dos processos produtivos. Entretanto, o avanço de tecnologias digitais e o surgimento de aplicações baseadas em Inteligência Artificial (IA), como algoritmos de manutenção preditiva e robôs colaborativos, têm introduzido novas dinâmicas produtivas que ampliam e desafiam as ferramentas tradicionais da manufatura enxuta (SHAHIN; MAGHANAKI; CHEN, 2026).

Nesse contexto, Russell e Norvig (2021) destacam que a transformação digital, por meio da IA, tem se destacado como uma tecnologia capaz de ampliar as capacidades analíticas e decisórias dos sistemas produtivos, permitindo identificar padrões complexos e apoiar processos de tomada de decisão com base em grandes volumes de dados. De forma complementar, técnicas de aprendizado de máquina têm contribuído para avanços na previsão de demanda, no sequenciamento da produção e na alocação eficiente de recursos produtivos (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Além disso, a IA apresenta elevado potencial para aplicações na produção, especialmente no fortalecimento da colaboração entre humanos e sistemas inteligentes, cujas habilidades complementares podem gerar vantagens significativas para as organizações industriais (GABRIEL; KÜHN; DUMITRESCU, 2023).

Diante desse contexto, torna-se relevante compreender de que maneira a IA pode contribuir para o aprimoramento do planejamento e da programação da produção nas organizações industriais. Assim, este estudo se justifica pela necessidade de aprofundar a compreensão sobre as interfaces entre *Lean Manufacturing*, Indústria 4.0 e IA, considerando o potencial dessas abordagens para promover melhorias na eficiência operacional e na tomada de decisão.

Portanto, este artigo tem como objetivo analisar, por meio de pesquisa bibliográfica, as aplicações da IA no planejamento e na programação da produção, evidenciando suas interfaces com a Indústria 4.0 e o *Lean Manufacturing* no contexto dos sistemas produtivos industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias digitais tem transformado significativamente os sistemas produtivos e a forma como as organizações planejam e controlam suas operações. Nesse contexto, conceitos como Indústria 4.0, *Lean Manufacturing* e IA passaram a ocupar posição central nos debates sobre eficiência operacional e competitividade industrial (SHAHIN; MAGHANAKI; CHEN, 2026). Essas abordagens, quando integradas, possibilitam o desenvolvimento de sistemas produtivos mais inteligentes, flexíveis e capazes de responder rapidamente às demandas do mercado.

Dessa forma, a fundamentação teórica apresenta os principais conceitos relacionados à transformação digital da manufatura, aos princípios do *Lean Manufacturing* e às aplicações da IA no planejamento e programação da produção, evidenciando como essas abordagens podem contribuir para a otimização dos sistemas produtivos.

2.1 Indústria 4.0 e transformação digital na produção

A Indústria 4.0 é definida pela combinação de sistemas ciberfísicos, conectividade e automação inteligente, representando um novo estágio na manufatura. Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) indicam que essa mudança implica na digitalização total dos processos de produção, o que possibilita uma comunicação constante entre máquinas, sensores e sistemas empresariais. Essa infraestrutura permite operações mais transparentes e o uso intensivo de dados para tomada de decisões em tempo real.

Alqudhaibi *et al.* (2025) e Lasi *et al.* (2014) destacam que a Indústria 4.0 não representa apenas a adoção de tecnologias avançadas, mas uma mudança estratégica na forma de organizar e controlar a produção. A conectividade proporcionada pela Internet das Coisas Industrial (IIoT) amplia a visibilidade dos processos e fortalece a integração entre planejamento, execução e controle. Para Schwab (2016), essa digitalização favorece ambientes produtivos mais flexíveis e autônomos, capazes de responder rapidamente a oscilações do mercado.

Nesse cenário, Lee, Bagheri e Kao (2015) enfatizam o papel dos sistemas ciberfísicos como alicerce dessa nova fase. Esses sistemas combinam elementos físicos e digitais para monitorar máquinas, antecipar falhas e ajustar parâmetros de operação de forma inteligente. Assim, segundo Alqudhaibi *et al.* (2025), a Indústria 4.0 cria condições ideais para a adoção de tecnologias de IA, que se beneficiam do grande volume de dados gerados nas operações industriais.

2.2 Lean Manufacturing e excelência operacional

De acordo com Shahin, Maghanaki e Chen (2026), o *Lean Manufacturing* é amplamente reconhecido como uma abordagem voltada à melhoria da eficiência operacional por meio da eliminação sistemática de desperdícios e da otimização dos fluxos produtivos. Nesse contexto, a aplicação de práticas enxutas contribui para a redução de variabilidades, melhoria da utilização dos recursos e aumento da competitividade das organizações industriais (CAIADO *et al.*, 2021).

Com o progresso das tecnologias digitais e a complexidade crescente dos sistemas produtivos, Ghazali *et al*. (2025) apontam que o *Lean* começou a ser examinado de maneira integrada com novas metodologias tecnológicas. Bueno *et al*. (2025) ressaltam que a integração de ferramentas digitais e sistemas inteligentes aos fundamentos da manufatura enxuta permite expandir as oportunidades de aprimoramento contínuo, tornando os processos de produção mais flexíveis, transparentes e baseados em dados.

Nesse cenário, a convergência entre *Lean Manufacturing* e tecnologias da Indústria 4.0 tem sido apontada como um fator relevante para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais eficientes e resilientes. A integração entre práticas enxutas e tecnologias digitais permite melhorar a visibilidade dos processos, apoiar decisões operacionais e fortalecer a capacidade de adaptação das organizações frente às mudanças do ambiente produtivo (CAIADO *et al*., 2021).

Mais recentemente, o progresso da inteligência artificial tem expandido ainda mais as oportunidades para o desenvolvimento da manufatura enxuta. Shahin, Maghanaki e Chen (2026) defendem que o Lean tem sido empregado por décadas para aprimorar o desempenho dos operadores humanos e otimizar processos de produção. No entanto, com o nascimento de tecnologias avançadas de IA, como algoritmos de manutenção preditiva e robôs colaborativos, emerge uma nova dinâmica produtiva fundamentada na cooperação entre humanos e sistemas inteligentes, expandindo as possibilidades de aprimoramento contínuo e otimização operacional.

Ghazali *et al*. (2025) preconizam que, além dos aspectos técnicos relacionados à redução de desperdícios e à melhoria dos fluxos produtivos, a efetividade das práticas de manufatura enxuta também está associada a fatores organizacionais e humanos presentes nas empresas. Elementos como comprometimento da liderança, participação dos colaboradores, capacitação profissional e sistemas estruturados de melhoria contínua contribuem para fortalecer o desempenho organizacional e ampliar os resultados das iniciativas *Lean*, promovendo maior eficiência operacional e melhor utilização dos recursos produtivos (GHAZALI *et al*., 2025).

Nesse contexto, a integração entre *Lean Manufacturing*, tecnologias digitais e IA tem sido apontada como um caminho promissor para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais inteligentes e adaptáveis. A incorporação dessas tecnologias permite ampliar o potencial das práticas de melhoria contínua, ao combinar eficiência operacional com capacidades analíticas avançadas e suporte à tomada de decisão nos ambientes produtivos contemporâneos (GABRIEL; KÜHN; DUMITRESCU, 2023).

2.3 Inteligência artificial e suas aplicações industriais

A IA pode ser descrita como a área que cria sistemas capazes de aprender, pensar e fazer escolhas com base em informações. Russell e Norvig (2021) descrevem a IA como a criação de agentes inteligentes que podem perceber o ambiente e agir para otimizar seu desempenho.

Técnicas como *Machine Learning*, ou Aprendizado de Máquina, e *Deep Learning*, ou Aprendizado Profundo, permitem identificar padrões complexos em grandes volumes de dados, possibilitando previsões e análises avançadas em diferentes contextos industriais (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

No ambiente industrial, essas tecnologias têm sido aplicadas em atividades como controle de qualidade, previsão de demanda, manutenção preditiva e análise de falhas. Wuest *et al.* (2016) destacam que a combinação entre sensores, dados históricos e algoritmos de aprendizado permite melhorar significativamente a tomada de decisão nos sistemas produtivos.

A IA tem ganhado crescente relevância no contexto industrial, especialmente com o avanço das tecnologias associadas à Indústria 4.0 (SHAHIN; MAGHANAKI; CHEN, 2026). Nos sistemas produtivos, para Gabriel, Kühn e Dumitrescu (2023), a IA permite a análise de grandes volumes de dados, a automação de processos decisórios e a melhoria do desempenho operacional por meio de aplicações como manutenção preditiva, otimização de processos e utilização de robôs colaborativos. Essas tecnologias possibilitam maior eficiência, flexibilidade e capacidade de adaptação dos sistemas produtivos frente às demandas cada vez mais dinâmicas dos mercados industriais (GABRIEL; KÜHN; DUMITRESCU, 2023).

2.4 IA aplicada ao planejamento e programação da produção

A aplicação da IA no planejamento e programação da produção tem ganhado destaque devido à sua capacidade de lidar com múltiplas variáveis, restrições operacionais e cenários dinâmicos, assim, Gao, Yao e Yan (2024) demonstram que algoritmos de aprendizado podem ser utilizados para prever tempos de ciclo, estimar atrasos e propor sequenciamentos mais eficientes nas linhas de produção.

Plathottam *et al*. (2023) destacam que técnicas de aprendizado profundo têm sido aplicadas para otimizar o sequenciamento de tarefas e a alocação de recursos em ambientes industriais complexos. De forma semelhante, Gao, Yao e Yan (2024) apontam que algoritmos de aprendizado por reforço permitem que sistemas inteligentes ajustem continuamente suas decisões conforme mudanças nas condições do ambiente produtivo.

Outro aspecto relevante nesse contexto é a crescente colaboração entre humanos e sistemas baseados em IA. Gabriel, Kühn e Dumitrescu (2023) ressaltam que a integração entre conhecimento humano e capacidades analíticas da IA pode contribuir para decisões mais eficientes no planejamento da produção, permitindo que sistemas produtivos combinem experiência operacional e análise avançada de dados.

Além disso, Mourtzis (2020) argumenta que a integração entre dados em tempo real e princípios do *Lean Manufacturing* fortalece a resiliência operacional e reduz desperdícios nos sistemas produtivos. Dessa forma, a aplicação da IA representa uma evolução importante na gestão da produção, contribuindo para operações mais inteligentes, adaptáveis e alinhadas às exigências da Indústria 4.0.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa é classificada como um estudo bibliográfico. Esse tipo de abordagem possibilita a análise e a organização de conhecimentos previamente estabelecidos na literatura científica, auxiliando na compreensão de conceitos, metodologias e aplicações ligadas ao tema em estudo (GIL, 2017).

A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir da consulta a artigos científicos, livros e publicações acadêmicas que abordam temas relacionados à IA, Indústria 4.0, *Lean Manufacturing* e planejamento da produção. Foram priorizadas publicações recentes e relevantes, disponíveis em bases de dados científicas reconhecidas, como Google Acadêmico, *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*.

O processo de análise consistiu na leitura, seleção e interpretação crítica das fontes identificadas, buscando identificar contribuições teóricas e evidências presentes na literatura sobre a

aplicação da IA nos sistemas produtivos. A partir dessa análise, foi possível organizar e discutir os principais conceitos e perspectivas apresentadas pelos autores, permitindo compreender as relações entre IA, Indústria 4.0 e *Lean Manufacturing* no contexto da gestão da produção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão da literatura mostra que a implementação da IA nos sistemas de produção tem progredido consideravelmente, particularmente em ambientes industriais marcados por alta complexidade operacional e grande volume de dados. Nesse contexto, algoritmos de aprendizado de máquina e métodos avançados de análise de dados são empregados para melhorar os processos de previsão, otimização e tomada de decisões, possibilitando que as indústrias operem de forma mais eficaz e ágil frente às mudanças no ambiente de produção (GAO; YAO; YAN, 2024).

Esse movimento está vinculado às mudanças impulsionadas pela Indústria 4.0, que aumentou a disponibilidade de dados e a interconexão entre sistemas de produção. Lee, Bagheri e Kao (2015) ressaltam que a combinação de sensores, sistemas ciberfísicos e plataformas digitais possibilita o monitoramento de operações em tempo real e a criação de bases de dados que podem alimentar modelos inteligentes de tomada de decisão. Nesse cenário, a inteligência artificial assume um papel estratégico ao converter dados operacionais em informações significativas para a gestão da produção.

No entanto, a literatura indica que a adoção de soluções baseadas em IA requer condições estruturais apropriadas dentro das organizações. Schwab (2016) destaca que a desintegração dos sistemas produtivos, a falta de padronização e as restrições na infraestrutura digital podem ser obstáculos à implementação dessas tecnologias. Assim, para usar a IA de forma eficaz, é necessário ter ambientes organizados, processos estáveis e fluxos bem estruturados.

Neste contexto, observa-se uma forte convergência entre os princípios da IA e os fundamentos do *Lean Manufacturing*. Enquanto o *Lean* busca reduzir desperdícios, estabilizar processos e melhorar o fluxo produtivo, a IA atua como um mecanismo de análise avançada e suporte à tomada de decisão baseada em dados. Assim, ambientes produtivos estruturados a partir de práticas enxutas tendem a oferecer melhores condições para a aplicação de tecnologias inteligentes, potencializando os resultados operacionais (SHAHIN; MAGHANAKI; CHEN, 2026).

Além disso, estudos recentes indicam que a integração entre tecnologias digitais e princípios enxutos amplia as possibilidades de melhoria contínua nas organizações industriais. Bueno *et al.* (2025) destacam que a utilização de sistemas inteligentes, aliada à digitalização dos processos produtivos, contribui para maior visibilidade operacional, melhoria na alocação de recursos e maior capacidade de adaptação frente às mudanças do ambiente competitivo.

Nesse contexto, observa-se que a convergência entre IA, *Lean Manufacturing* e Indústria 4.0 constitui um dos principais pontos de transformação dos sistemas produtivos. Para facilitar a compreensão dessa relação, o Quadro 1 apresenta as principais contribuições dessas abordagens no contexto da gestão da produção.

Quadro 1 – Relação entre IA, *Lean Manufacturing* e Indústria 4.0 nos sistemas produtivos

Abordagem	Principais contribuições para os sistemas produtivos	Autores
Lean Manufacturing	Eliminação de desperdícios, melhoria do fluxo produtivo, redução de variabilidade e aumento da eficiência operacional.	Shahin, Maghanaki e Chen (2026); Ghazali *et al*. (2025)
Indústria 4.0	Digitalização da manufatura, integração entre sistemas, conectividade e monitoramento em tempo real.	Lee, Bagheri e Kao (2015); Schwab (2016); Alqudhaibi *et al*. (2025)
Inteligência Artificial	Análise de grandes volumes de dados, suporte à tomada de decisão, previsão de falhas e otimização de processos produtivos.	Gao, Yao e Yan (2024); Gabriel, Kühn e Dumitrescu (2023)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Shahin, Maghanaki e Chen (2026), Ghazali et al. (2025), Lee, Bagheri e Kao (2015), Schwab (2016), Alqudhaibi et al. (2025), Gao, Yao e Yan (2024) e Gabriel, Kühn e Dumitrescu (2023).

É evidente que a análise mostrada no Quadro 1 demonstra que essas três abordagens têm características diferentes, mas complementares. Ao passo que o *Lean Manufacturing* cria fundamentos organizacionais e operacionais focados na eficiência e estabilidade dos processos, a Indústria 4.0 oferece a infraestrutura tecnológica indispensável para a digitalização e integração das operações. Por outro lado, a IA desempenha o papel de um elemento analítico e decisório, possibilitando a conversão dos dados produzidos pelos sistemas de produção em informações estratégicas para a gestão da produção.

Outro ponto importante identificado diz respeito à importância da cooperação entre humanos e sistemas inteligentes nos ambientes industriais atuais. Gabriel, Kühn e Dumitrescu (2023) ressaltam que a integração do conhecimento humano com as habilidades analíticas da IA pode levar a decisões mais eficazes, pois operadores e gestores ainda desempenham um papel crucial na interpretação dos resultados e na confirmação das soluções sugeridas pelos sistemas inteligentes. Mourtzis (2020) também defende que a combinação de dados em tempo real com tecnologias digitais ajuda a criar sistemas de produção mais adaptáveis e resilientes. Nesse cenário, as decisões operacionais podem ser constantemente ajustadas com base em dados atualizados, o que possibilita uma resposta mais ágil a problemas, atrasos ou alterações na demanda.

Embora tenham sido feitos progressos, a literatura também destaca desafios significativos para a implementação generalizada da IA nos sistemas de produção. A qualidade e a disponibilidade de dados, além da demanda por uma infraestrutura tecnológica que suporte ambientes fortemente conectados e orientados por dados, são alguns dos principais desafios.

Ademais, a capacitação de profissionais para compreender modelos analíticos e incorporar soluções de IA aos processos operacionais continua sendo um obstáculo considerável para diversas empresas. Nesse cenário, Plathottam *et al.* (2023) enfatizam que a maturidade digital das empresas afeta diretamente a habilidade de implementar essas tecnologias. Por outro lado, Gao, Yao e Yan (2024) apontam que a combinação de dados, sistemas e habilidades humanas é um elemento fundamental para que os benefícios da IA sejam realmente obtidos nos ambientes de produção.

De forma geral, os resultados da literatura indicam que a aplicação da IA, quando integrada aos princípios do *Lean Manufacturing* e às tecnologias da Indústria 4.0, pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais inteligentes, flexíveis e orientados por dados. Essa convergência tecnológica e organizacional representa um passo importante para a evolução da gestão da produção e para o fortalecimento da competitividade das organizações industriais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão da literatura revelou que a combinação de IA, *Lean Manufacturing* e Indústria 4.0 constitui uma das transformações mais significativas nos sistemas de produção contemporâneos. A conexão entre essas abordagens permite aumentar a eficácia operacional, reforçar a capacidade analítica dos processos de produção e aprimorar a tomada de decisões nas empresas. Nesse cenário, o uso de tecnologias inteligentes em conjunto com práticas de gestão consolidadas ajuda a criar sistemas produtivos mais flexíveis, conectados e baseados em dados.

Dessa forma, considera-se que o objetivo deste estudo foi atingido, uma vez que a pesquisa bibliográfica permitiu analisar as principais aplicações da IA no planejamento e na gestão da produção, evidenciando suas interfaces com a Indústria 4.0 e com os princípios do *Lean Manufacturing*. Os resultados demonstram que a integração dessas abordagens pode contribuir significativamente para a evolução dos sistemas produtivos e para o fortalecimento da competitividade das empresas.

Uma limitação a ser observada é que a pesquisa se fundamenta unicamente em revisão bibliográfica, sem incluir análises em contextos industriais específicos. Portanto, recomenda-se que pesquisas futuras realizem estudos de caso ou aplicações práticas que explorem a implementação da IA em sistemas produtivos reais, o que permitirá uma compreensão mais aprofundada sobre seus efeitos operacionais, organizacionais e tecnológicos.

REFERÊNCIAS

ALQUDHAIBI, A.; ALBARRAK, M.; JAGTAP, S.; WILLIAMS, N.; SALONITIS, K. Securing Industry 4.0: assessing cybersecurity challenges and proposing strategies for manufacturing management. **Cyber Security and Applications**, v. 3, 2025.

BUENO, A.; GODINHO FILHO, M.; CECCONELLO, M.; SANTA-EULÁLIA, L. A. de; GUSMÃO CAIADO, R. G.; GANGA, G. M. D.; CARVALHO, J. V. Advancing towards Industry 4.0: a maturity model for smart shop floor control. **International Journal of Production Economics**, v. 282, 2025.

CAIADO, R. G. G.; SCAVARDA, L. F.; GAVIÃO, L. O.; IVSON, P.; NASCIMENTO, D. L. de M.; GARZA-REYES, J. A. A fuzzy rule-based Industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. **International Journal of Production Economics**, v. 231, 2021.

GABRIEL, S.; KÜHN, A.; DUMITRESCU, R. Strategic planning of the collaboration between humans and artificial intelligence in production. **Procedia CIRP**, v. 120, p. 1309-1314, 2023.

GAO, R. X.; YAO, X.; YAN, R. Artificial intelligence in smart manufacturing: state of the art and perspectives. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 70, p. 1-15, 2024.

GHAZALI, I. *et al*. Cultural influences on lean manufacturing and productivity: evidence from Malaysia. **Results in Engineering**, v. 28, 2025.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. [*S. l.*]: National Academy of Science and Engineering, 2013.

LASI, H. *et al*. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, p. 239-242, 2014.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.

MOURTZIS, D. Simulation in the design and planning of manufacturing systems: state of the art and new trends. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 7, p. 1927-1949, 2020.

PLATHOTTAM, S. J. *et al*. A review of artificial intelligence applications in manufacturing. **Expert Systems with Applications**, v. 225, p. 120-139, 2023.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence**: a modern approach. 4. ed. Boston: Pearson, 2021.

SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SHAHIN, M.; MAGHANAKI, M.; CHEN, F. F. The symbiotic factory: a comprehensive framework for extending lean manufacturing to human-AI collaboration. **Expert Systems with Applications**, v. 314, 2026.

SLACK, N. *et al*. **Operations management**. 10. ed. Harlow: Pearson, 2020.

STRAZZULLO, S. Fostering digital trust in manufacturing companies: exploring the impact of Industry 4.0 technologies. **Journal of Innovation & Knowledge**, v. 9, n. 4, 2024.

WUEST, T. *et al*. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. **Production & Manufacturing Research**, v. 4, n. 1, p. 23-45, 2016.

Os conceitos e as opiniões expressos neste artigo são de responsabilidade exclusiva de seus autores.