

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA E NA INDÚSTRIA 4.0: FUNDAMENTOS, APLICAÇÕES E DESAFIOS CONTEMPORÂNEOS

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENGINEERING AND INDUSTRY 4.0: FOUNDATIONS, APPLICATIONS, AND CONTEMPORARY CHALLENGES

 <https://doi.org/10.63330/armv2n3-006>

Submetido em: 18/03/2026 e Publicado em: 20/03/2026

Joelson Lopes da Paixão

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

RESUMO

A consolidação da Indústria 4.0 redefine os paradigmas produtivos ao integrar sistemas ciberfísicos, internet das coisas (IoT), big data e computação em nuvem aos processos industriais. Nesse cenário, a inteligência artificial (IA) emerge como tecnologia estruturante, capaz de otimizar operações, ampliar a eficiência produtiva e promover a tomada de decisão fundamentada em dados em tempo real. O presente estudo analisa criticamente o papel da IA na engenharia e na Indústria 4.0, discutindo suas aplicações em manufatura inteligente, manutenção preditiva, controle de qualidade automatizado, robótica colaborativa e gestão de cadeias de suprimentos. Parte-se da premissa de que a IA não atua de forma isolada, mas integrada a arquiteturas digitais complexas que conectam sensores, máquinas e sistemas analíticos. Argumenta-se que a adoção da IA promove ganhos expressivos de produtividade, redução de custos operacionais e aumento da precisão nos processos industriais, ao mesmo tempo em que impõe desafios relacionados à qualificação profissional, segurança cibernética e governança de dados. A análise evidencia que a engenharia contemporânea exige novas competências técnicas e estratégicas, articulando conhecimento em automação, ciência de dados e sistemas inteligentes. Conclui-se que a inteligência artificial constitui eixo central da Indústria 4.0, impulsionando transformações estruturais nos modelos produtivos e demandando integração entre inovação tecnológica, gestão estratégica e responsabilidade ética no ambiente industrial.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Indústria 4.0; Engenharia; Manufatura inteligente; Sistemas ciberfísicos.



ABSTRACT

The consolidation of Industry 4.0 redefines productive paradigms by integrating cyber-physical systems, the Internet of Things (IoT), big data, and cloud computing into industrial processes. In this scenario, artificial intelligence (AI) emerges as a structuring technology, capable of optimizing operations, expanding productive efficiency, and promoting real-time data-driven decision-making. This study critically examines the role of AI in engineering and Industry 4.0, discussing its applications in smart manufacturing, predictive maintenance, automated quality control, collaborative robotics, and supply chain management. It departs from the premise that AI does not operate in isolation but rather as an integrated component of complex digital architectures connecting sensors, machines, and analytical systems. The analysis argues that AI adoption delivers significant productivity gains, operational cost reduction, and increased precision in industrial processes, while simultaneously posing challenges related to professional qualification, cybersecurity, and data governance. The findings indicate that contemporary engineering demands new technical and strategic competencies, articulating knowledge in automation, data science, and intelligent systems. The study concludes that artificial intelligence constitutes a central axis of Industry 4.0, driving structural transformation in productive models and requiring integration among technological innovation, strategic management, and ethical responsibility within industrial settings.

Keywords: Artificial Intelligence; Industry 4.0; Engineering; Smart manufacturing; Cyber-physical systems.

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica das últimas décadas culminou na consolidação da chamada Indústria 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas aos sistemas produtivos. Diferentemente das revoluções industriais anteriores, marcadas pela mecanização, eletrificação e automação convencional, a quarta revolução industrial distingue-se pela convergência entre sistemas físicos e digitais, formando ecossistemas produtivos inteligentes e interconectados. Nesse contexto, a inteligência artificial (IA) assume papel central como tecnologia capaz de transformar dados em decisões estratégicas, promovendo eficiência operacional e inovação contínua nos ambientes de produção.

A Indústria 4.0 estrutura-se a partir de pilares tecnológicos como internet das coisas (IoT), big data, computação em nuvem, sistemas ciberfísicos e manufatura aditiva. A inteligência artificial atua como elemento integrador desses pilares, viabilizando análise preditiva, reconhecimento de padrões, aprendizado contínuo e automação avançada. Ao processar grandes volumes de dados provenientes de sensores industriais, a IA possibilita monitoramento em tempo real, identificação de falhas iminentes e otimização de processos produtivos. Nessa direção, Paixão (2026) discute como a transformação digital em setores de



infraestrutura crítica, como o elétrico, depende da articulação de tecnologias emergentes, entre as quais IoT e sistemas inteligentes ocupam posição central, o que evidencia a transversalidade dessas tecnologias para o conjunto dos ambientes industriais.

No campo da engenharia, essas transformações demandam revisão profunda das competências profissionais. O engenheiro contemporâneo já não atua apenas no dimensionamento estrutural ou na supervisão operacional, mas também na integração de sistemas inteligentes e na análise de dados complexos. A convergência entre engenharia tradicional e ciência de dados amplia consideravelmente o escopo de atuação profissional, exigindo domínio de algoritmos de aprendizado de máquina, modelagem computacional e gestão de sistemas automatizados.

A aplicação da IA na indústria abrange múltiplas frentes. Na manutenção preditiva, algoritmos analisam padrões de vibração, temperatura e consumo energético para antecipar falhas, reduzindo tempo de inatividade e custos operacionais. No controle de qualidade, sistemas de visão computacional identificam defeitos com precisão superior à inspeção manual. Em cadeias de suprimentos, modelos preditivos otimizam estoques e logística, respondendo dinamicamente a variações de demanda. Além dessas aplicações, a IoT desempenha papel estratégico ao prover a infraestrutura de comunicação entre dispositivos, conforme discutido por Paixão (2025a), que examina conceitos, desafios e aplicações da internet das coisas no contexto das redes elétricas inteligentes, evidenciando a transversalidade dessa tecnologia para múltiplos domínios industriais.

Entretanto, a adoção da IA também impõe desafios significativos. Questões relacionadas à segurança cibernética tornam-se críticas em ambientes industriais conectados, nos quais vulnerabilidades podem comprometer sistemas inteiros de produção. A automação inteligente, por sua vez, gera debates sobre o impacto no mercado de trabalho e a necessidade de requalificação profissional. A governança de dados e a ética na tomada de decisão automatizada constituem dimensões adicionais que precisam ser incorporadas à reflexão sobre a Indústria 4.0, conforme ressaltam diferentes estudos no campo das engenharias e das ciências sociais aplicadas.

Diante desse cenário, formula-se a seguinte questão norteadora: de que maneira a inteligência artificial está redefinindo práticas de engenharia e processos produtivos no contexto da Indústria 4.0?

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar criticamente o papel da IA na engenharia e na Indústria 4.0. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) examinar fundamentos conceituais da Indústria 4.0; (ii) discutir aplicações da IA em processos industriais; (iii) analisar impactos na formação e atuação do engenheiro contemporâneo; e (iv) problematizar desafios éticos e estratégicos associados à adoção dessas tecnologias.

A relevância da temática reside na centralidade da transformação digital para a competitividade industrial e o desenvolvimento econômico. A integração entre IA e engenharia redefine modelos produtivos,



exigindo abordagem estratégica que articule inovação tecnológica, qualificação profissional e responsabilidade socioeconômica. A compreensão crítica dessas transformações é essencial para orientar políticas industriais e práticas organizacionais sustentáveis na era digital.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão do papel da inteligência artificial (IA) na engenharia e na Indústria 4.0 exige análise integrada dos fundamentos conceituais da quarta revolução industrial e das transformações estruturais nos sistemas produtivos contemporâneos. O termo Indústria 4.0 foi inicialmente sistematizado na Alemanha, em 2011, no âmbito da estratégia de modernização industrial baseada em sistemas ciberfísicos e integração digital da manufatura (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013). Segundo esses autores, a Indústria 4.0 caracteriza-se pela interconexão de máquinas, dispositivos e sistemas, permitindo produção descentralizada, flexível e orientada por dados.

Schwab (2016) amplia essa perspectiva ao argumentar que a quarta revolução industrial não representa apenas evolução tecnológica incremental, mas sim transformação sistêmica que integra dimensões físicas, digitais e biológicas. No contexto industrial, essa integração materializa-se por meio de tecnologias habilitadoras como internet das coisas (IoT), big data, computação em nuvem, manufatura aditiva e inteligência artificial. A IA emerge como tecnologia estruturante nessa configuração, pois viabiliza análise avançada de dados e tomada de decisão autônoma em ambientes operacionais complexos.

Lee, Bagheri e Kao (2015) definem sistemas ciberfísicos como arquiteturas que conectam sensores, atuadores e plataformas computacionais, possibilitando monitoramento e controle em tempo real. A IA potencializa tais sistemas ao incorporar algoritmos de aprendizado de máquina capazes de identificar padrões e prever comportamentos operacionais. Na manutenção preditiva, por exemplo, modelos de machine learning analisam dados históricos e operacionais para antecipar falhas, reduzindo custos e ampliando a disponibilidade dos ativos industriais. Essa capacidade de processamento inteligente de informações constitui elemento diferenciador da Indústria 4.0 em relação aos modelos de automação industrial precedentes.

A respeito da IoT como habilitadora dos sistemas inteligentes, Paixão (2025a) discute seus conceitos, desafios e aplicações no contexto de redes elétricas inteligentes, demonstrando que os protocolos de comunicação entre dispositivos e a coleta distribuída de dados configuram a base sobre a qual operam os algoritmos de IA nos ambientes de produção. Essa perspectiva reforça a compreensão de que a IoT fornece a camada de conectividade sem a qual as soluções de inteligência artificial teriam alcance limitado nos sistemas industriais.

No campo da engenharia, a incorporação da IA redefine competências profissionais. Segundo Lasi et al. (2014), a Indústria 4.0 exige integração entre conhecimento técnico tradicional e habilidades em



análise de dados, programação e automação inteligente. O engenheiro contemporâneo precisa compreender arquiteturas digitais complexas e participar ativamente da modelagem de sistemas inteligentes. Essa transformação do perfil profissional é convergente com as análises de Paixão (2025b), que, ao abordar a estrutura e a modelagem matemática de redes neurais artificiais, evidencia a necessidade de o engenheiro dominar técnicas computacionais avançadas para a resolução de problemas em sistemas de alta complexidade.

A aplicação da IA no controle de qualidade industrial constitui outro eixo relevante da literatura. Sistemas de visão computacional, baseados em redes neurais convolucionais, apresentam precisão superior à inspeção humana em ambientes de alta repetitividade (Zhou et al., 2019). Essa automação avançada amplia a eficiência e reduz a variabilidade nos processos, embora exija robusta infraestrutura de dados e mecanismos adequados de segurança cibernética para sua operação confiável.

A segurança cibernética, aliás, emerge como desafio crítico na literatura consultada. Sistemas industriais conectados tornam-se suscetíveis a ataques que podem comprometer operações estratégicas. Xu, Xu e Li (2018) destacam que a integração digital amplia a superfície de vulnerabilidade dos sistemas produtivos, exigindo protocolos de proteção e governança de dados estruturada.

Além disso, questões éticas e socioeconômicas não podem ser negligenciadas na análise da Indústria 4.0. Brynjolfsson e McAfee (2014) argumentam que a automação inteligente pode reconfigurar mercados de trabalho, demandando requalificação profissional e políticas públicas adequadas para mitigar efeitos disruptivos. A engenharia, nesse contexto, precisa incorporar reflexão ética sobre o impacto das decisões automatizadas nos sistemas produtivos e na sociedade como um todo.

Em síntese, o referencial teórico evidencia que a IA constitui eixo estruturante da Indústria 4.0, articulando análise de dados, automação avançada e integração sistêmica. A transformação industrial contemporânea demanda abordagem interdisciplinar que integre engenharia, ciência de dados, governança tecnológica e reflexão ética, configurando um campo de investigação em contínua expansão.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como estudo qualitativo de natureza aplicada, desenvolvido por meio de revisão sistemática da literatura com abordagem crítico-analítica. O objetivo foi examinar fundamentos teóricos, aplicações e desafios da inteligência artificial na engenharia e na Indústria 4.0, integrando contribuições científicas recentes e referenciais estruturantes do campo.

Conforme Gil (2019), a revisão sistemática possibilita mapear o estado da arte de determinado campo do conhecimento, identificar tendências investigativas e construir síntese fundamentada a partir de evidências científicas. Nesse sentido, foram definidos critérios explícitos de busca, seleção e análise das fontes, assegurando o rigor metodológico necessário à investigação.



As buscas foram realizadas em bases de dados acadêmicas reconhecidas pela comunidade científica, incluindo IEEE Xplore, ACM Digital Library, Scopus, Web of Science e ScienceDirect. Utilizaram-se descritores em inglês e português, tais como "Artificial Intelligence in Industry 4.0", "AI in engineering", "cyber-physical systems", "predictive maintenance", "smart manufacturing" e "industrial automation". O recorte temporal priorizou publicações entre 2010 e 2024, considerando a consolidação do conceito de Indústria 4.0 nesse período, embora referências anteriores tenham sido mantidas quando fundamentais para a contextualização teórica.

Os critérios de inclusão contemplaram: (i) artigos revisados por pares e livros acadêmicos de reconhecido rigor; (ii) estudos que abordassem explicitamente aplicações de IA em contextos industriais e de engenharia; (iii) pesquisas com fundamentação metodológica clara e dados empíricos ou modelagens consistentes. Foram excluídos textos opinativos sem base científica, publicações redundantes e trabalhos que não apresentassem contribuição original ao campo investigado.

Após a triagem inicial, procedeu-se à leitura integral dos trabalhos selecionados e à elaboração de fichamentos analíticos estruturados, registrando objetivos, metodologias empregadas, tecnologias analisadas e os principais resultados de cada estudo. A organização sistemática dos dados permitiu identificar categorias temáticas recorrentes, a saber: (i) sistemas ciberfísicos e IoT; (ii) manutenção preditiva; (iii) controle de qualidade automatizado; (iv) segurança cibernética; e (v) impactos na formação profissional em engenharia.

A técnica de análise adotada foi a análise de conteúdo temática, conforme Bardin (2011), envolvendo categorização e interpretação crítica das evidências identificadas. A abordagem buscou articular dados técnicos com implicações estratégicas e éticas, promovendo compreensão abrangente das transformações analisadas. O delineamento metodológico adotado assegura coerência científica e fundamentação sólida à pesquisa, permitindo a construção de análise integrada sobre o papel da inteligência artificial na engenharia e na Indústria 4.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das publicações selecionadas evidencia que a inteligência artificial (IA) consolidou-se como elemento estruturante da Indústria 4.0, impactando diretamente a eficiência operacional, a tomada de decisão estratégica e a reconfiguração dos modelos produtivos. Os estudos convergem ao demonstrar que a integração entre sistemas ciberfísicos, internet das coisas (IoT) e algoritmos de aprendizado de máquina promove ganhos expressivos de produtividade e redução de custos operacionais nos mais diversos segmentos industriais.

No campo da manutenção preditiva, os resultados indicam que modelos baseados em machine learning são capazes de antecipar falhas com alto grau de precisão, reduzindo significativamente o tempo



de inatividade de equipamentos. Lee, Bagheri e Kao (2015) demonstram que a análise em tempo real de dados provenientes de sensores industriais permite identificar padrões anômalos antes da ocorrência de falhas críticas. Essa capacidade preditiva amplia a confiabilidade dos sistemas e otimiza o planejamento de manutenção, superando os modelos corretivos ou preventivos tradicionais. Entretanto, verificou-se que a eficácia desses sistemas depende da qualidade e do volume dos dados coletados, bem como da robustez dos algoritmos empregados na modelagem preditiva.

No controle de qualidade industrial, sistemas de visão computacional baseados em redes neurais profundas apresentam desempenho superior à inspeção humana em ambientes de alta repetitividade (Zhou et al., 2019). A automação inteligente reduz a variabilidade, aumenta a precisão e diminui o retrabalho nos processos fabris. Contudo, a implementação desses sistemas requer investimentos significativos em infraestrutura digital e integração com plataformas de gestão da produção. Observou-se, ademais, que em processos altamente customizados a supervisão humana continua sendo necessária para validação e ajustes finos, o que aponta para um modelo de colaboração entre inteligência humana e artificial.

No âmbito da gestão da cadeia de suprimentos, a IA possibilita modelagem preditiva de demanda, otimização de estoques e roteirização inteligente. Schwab (2016) argumenta que a capacidade analítica avançada transforma dados logísticos em decisões estratégicas dinâmicas, conferindo maior resiliência às operações. A literatura revisada confirma que empresas que incorporam IA na gestão logística apresentam maior capacidade de adaptação diante de oscilações de mercado e de perturbações nas cadeias produtivas. Entretanto, a dependência crescente de sistemas automatizados amplia vulnerabilidades relacionadas à segurança cibernética e à integridade dos dados.

A segurança digital emerge como ponto crítico na discussão sobre a Indústria 4.0. Xu, Xu e Li (2018) alertam que a interconectividade característica desse paradigma amplia a superfície de ataque, exigindo protocolos robustos de proteção e governança de dados. Os resultados indicam que falhas em segurança podem comprometer não apenas informações estratégicas, mas também a integridade física de sistemas industriais. Nesse sentido, a adoção de IA deve ser acompanhada de políticas rigorosas de cibersegurança e monitoramento contínuo.

No que concerne à formação profissional, verificou-se que a integração da IA redefine as competências requeridas na engenharia. Lasi et al. (2014) sustentam que o profissional da Indústria 4.0 deve dominar conhecimentos em automação, análise de dados e integração de sistemas digitais. A literatura aponta para a necessidade de currículos acadêmicos que articulem engenharia tradicional e ciência de dados, promovendo formação interdisciplinar. A ausência dessa atualização pode comprometer a competitividade industrial e a capacidade de inovação tecnológica das organizações.

Por fim, os resultados evidenciam uma tensão entre eficiência produtiva e impactos socioeconômicos da automação. Brynjolfsson e McAfee (2014) argumentam que a automação inteligente



pode substituir determinadas funções operacionais, exigindo políticas de requalificação profissional e adaptação do mercado de trabalho. A análise confirma que, embora a IA gere novas oportunidades de emprego altamente qualificado, também impõe desafios de transição laboral que precisam ser enfrentados por meio de políticas públicas e estratégias organizacionais adequadas.

Em síntese, a inteligência artificial consolida-se como núcleo estratégico da Indústria 4.0, promovendo ganhos operacionais significativos e redefinindo práticas de engenharia em diferentes setores. Contudo, sua implementação demanda abordagem sistêmica que integre infraestrutura tecnológica, segurança cibernética, qualificação profissional e governança ética. A transformação industrial contemporânea não se limita à adoção de algoritmos avançados, mas implica reconfiguração estrutural dos modelos produtivos e das competências humanas envolvidas nos processos de inovação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste estudo permitiu compreender que a inteligência artificial (IA) ocupa posição central na consolidação da Indústria 4.0, redefinindo práticas de engenharia, modelos produtivos e estratégias organizacionais. O objetivo central do trabalho, consistente em examinar criticamente o papel da IA na engenharia e nos sistemas industriais inteligentes, foi alcançado ao evidenciar que sua integração aos sistemas ciberfísicos amplia significativamente a eficiência operacional, a capacidade preditiva e a flexibilidade produtiva.

Os resultados demonstraram que aplicações como manutenção preditiva, controle de qualidade automatizado e otimização de cadeias de suprimentos geram ganhos mensuráveis em produtividade, redução de custos e confiabilidade dos processos industriais. A análise de grandes volumes de dados industriais, combinada a algoritmos de aprendizado de máquina, permite antecipar falhas, minimizar desperdícios e subsidiar decisões em tempo real. Entretanto, a eficácia dessas soluções depende de infraestrutura tecnológica robusta, governança de dados estruturada e integração adequada entre os diferentes sistemas digitais que compõem o ecossistema produtivo.

Constatou-se que a transformação promovida pela IA ultrapassa a dimensão estritamente técnica, impactando diretamente a formação e a atuação do engenheiro. A engenharia contemporânea exige competências híbridas, que articulam conhecimento técnico tradicional com domínio de ciência de dados, programação e automação inteligente. Essa reconfiguração demanda atualização curricular nas instituições de ensino e políticas de qualificação profissional contínua, sob o risco de comprometer a capacidade de inovação e a competitividade dos setores produtivos.

A segurança cibernética emerge como desafio crítico e inadiável. A interconectividade característica da Indústria 4.0 amplia vulnerabilidades e exige protocolos rigorosos de proteção digital. A implementação



da IA deve ser acompanhada de estratégias de mitigação de riscos, garantindo integridade operacional e proteção de informações estratégicas em ambientes industriais cada vez mais conectados.

Ademais, a adoção de sistemas inteligentes suscita reflexões éticas e socioeconômicas que não podem ser relegadas a segundo plano. Embora a IA gere novas oportunidades de inovação e empregos qualificados, também pode provocar deslocamento de funções tradicionais, exigindo políticas públicas de requalificação e adaptação laboral. A governança responsável da tecnologia torna-se elemento indispensável para que os benefícios da transformação digital sejam amplamente distribuídos na sociedade.

Reconhecem-se limitações inerentes à natureza teórica da pesquisa, fundamentada em revisão sistemática da literatura. Investigações empíricas futuras poderão aprofundar análises comparativas entre diferentes setores industriais, mensurando impactos específicos da IA sobre produtividade, sustentabilidade e qualidade dos processos. Estudos de caso em contextos industriais brasileiros seriam particularmente relevantes para compreender as singularidades da adoção de IA em economias em desenvolvimento.

Conclui-se que a inteligência artificial constitui eixo estruturante da Indústria 4.0, promovendo transformação sistêmica nos processos produtivos e na prática da engenharia. A integração entre inovação tecnológica, qualificação profissional, segurança digital e responsabilidade ética configura-se como condição essencial para consolidar modelos industriais sustentáveis, competitivos e socialmente responsáveis na era digital.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.

BRYNJOLFSSON, Erik; MCAFEE, Andrew. **The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies**. New York: W. W. Norton, 2014.

BUYYA, Rajkumar et al. A manifesto for future generation cloud computing. **ACM Computing Surveys**, v. 51, n. 5, 2019.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

IEA. **Digitalization and Energy**. Paris: IEA, 2017.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Frankfurt: Acatech, 2013.

LASI, Heiner et al. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.



OECD. **The future of productivity**. Paris: OECD Publishing, 2015.

PAIXÃO, Joelson Lopes da. Internet das Coisas (IoT): conceitos, desafios e aplicações no contexto das redes elétricas inteligentes. In: **Inovações Multidisciplinares na Engenharia**. 1. ed. Curitiba: Aurum Editora, 2025a. p. 1-11.

PAIXÃO, Joelson Lopes da. Redes neurais artificiais: estrutura, modelagem matemática e exemplo de aplicação. In: **Inovações Multidisciplinares na Engenharia**. 1. ed. Curitiba: Aurum Editora, 2025b. p. 12-22.

PAIXÃO, Joelson Lopes da. Transformação digital no setor elétrico: o papel central das redes inteligentes. **Revista Tópicos**, v. 4, p. 1-19, 2026.

PATTERSON, David et al. Carbon emissions and large neural network training. **arXiv preprint**, 2021.

PORTER, Michael E.; HEPPELMANN, James E. How smart, connected products are transforming competition. **Harvard Business Review**, v. 92, n. 11, p. 64-88, 2014.

RAJKUMAR, Buyya; BROBERG, James; GOSCINSKI, Andrzej (org.). **Cloud computing: principles and paradigms**. Hoboken: Wiley, 2011.

SANTOS, Boaventura de Sousa. **A crítica da razão indolente**. São Paulo: Cortez, 2000.

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

TAYLOR, Frederick W. **The principles of scientific management**. New York: Harper & Brothers, 1911.

WANG, Shiyong et al. Implementing smart factory of Industry 4.0: an outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, 2016.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Shaping the future of advanced manufacturing and production**. Geneva: WEF, 2018.

XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

ZHOU, Zhi-Hua et al. Deep learning in industrial automation. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 6, p. 3529-3538, 2019.

ZUBOFF, Shoshana. **The age of surveillance capitalism**. New York: PublicAffairs, 2019.