

INDÚSTRIA 4.0: DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

INDUSTRY 4.0: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN PRODUCTION ENGINEERING

INDUSTRIA 4.0: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN LA INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN

Ana Beatriz da Silva Batista¹
Francimar Regina Silva do Nascimento²
Renata da Silva Dantas³

RESUMO: Este artigo explora os desafios e as oportunidades apresentados pela inserção da Indústria 4.0 na engenharia de produção e estende a discussão à Sociedade 5.0. Por meio de uma revisão literária, qualitativa, analisando os efeitos das inovações como a Internet das Coisas, Inteligência Artificial, Big Data e Manufatura Aditiva nas operações de produção e logística. Os resultados mostram que, embora a transformação digital ofereça maneiras de melhorar o desempenho, sua implantação é dificultada por desafios cruciais: o alto custo da implementação; desigualdade tecnológica; escassez de mão de obra qualificada, harmonização entre automação e a sustentabilidade socioambiental. O sucesso da indústria 4.0 não depende apenas das tecnologias, mas também da capacidade da organização de promover uma mudança cultural e educacional que respeite o ser humano. Além disso destaca-se que um planejamento estratégico, com foco implementação escalável e voltado ao bem-estar de um todo, será indispensável para ampliar o acesso às tecnologias da indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Engenharia de Produção. Transformação Digital. Desafios Tecnológicos. Inovação.

1

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, está mudando os próprios paradigmas por trás dos processos de produção mundiais. Esta revolução é impulsionada pela fusão de tecnologias nas esferas física, digital e biológica, com efeito direto na Engenharia de Produção (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHWAB, 2016).

De acordo com Duarte et al. (2025), a trajetória das revoluções industriais conduziu a um cenário caracterizado pela conectividade global, pela integração de tecnologias digitais e pelo avanço de sistemas inteligentes capazes de promover maior autonomia e descentralização dos

¹ Pós-graduação em Engenharia de Produção, Controle e Qualidade nos Processos. Fametro – Faculdade Metropolitana de Manaus.

² Pós-graduação em Engenharia de Produção, Controle e Qualidade nos Processos. Fametro – Faculdade Metropolitana de Manaus.

³ Pós-graduação em Engenharia de Produção, Controle e Qualidade nos Processos. Fametro – Faculdade Metropolitana de Manaus.

processos produtivos. Nesse contexto, os sistemas ciberfísicos interagem entre si e com as pessoas em tempo real, tornando os processos mais integrados, dinâmicos e eficiente.

A transformação digital que impactou a Engenharia de Produção neste contexto é um conjunto de tempos desafiadores, com muito espaço para otimizar e inovar em várias frentes. A integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial, Big Data Analytics, Computação em Nuvem e similares precisa ser acompanhada por uma grande reestruturação empresarial (LASI et al., 2014; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Segundo Almeida e Pinheiro (2022), a consolidação da Indústria 4.0 no Brasil depende da superação de desafios tecnológicos, econômicos e estruturais, incluindo investimentos em infraestrutura e condições adequadas para a implementação das novas tecnologias industriais. Com seu lugar como foco principal na Engenharia de Produção, a logística é um dos campos das cadeias de suprimentos significativamente afetados por essas mudanças. Com a Logística 4.0 emergindo cada vez mais como uma das estratégias logísticas preparadas para o futuro, pode-se esperar cadeias de suprimentos mais ágeis, transparentes e responsivas. Segundo Longo, Nicoletti e Padovano (2021), a adoção de tecnologias digitais nas organizações requer profissionais preparados para lidar com novos sistemas, além de mudanças culturais que favoreçam a integração entre pessoas e tecnologias.

2

Com base nesse panorama, o presente artigo tem como objetivo geral analisar de forma abrangente as oportunidades e os desafios inerentes à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 na Engenharia de Produção. Lista-se o objetivo deste artigo é explorar as oportunidades e desafios embutidos na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 na Engenharia de Produção usando este panorama. Alguns objetivos específicos são os seguintes: (a) Identificar e analisar as principais inovações tecnológicas da Indústria 4.0, incluindo IoT, IA e Big Data, relevantes para o setor de Engenharia de Produção; (b) Mapear as barreiras e desafios estruturais, financeiros e culturais que restringem a implantação dessas tecnologias no contexto industrial brasileiro; (c) Compreender a relação entre as novas demandas tecnológicas da Indústria 4.0 e a necessidade de requalificação do capital humano e das matrizes curriculares na formação de engenheiros; (d) A viabilidade estratégica de transição para o modelo Sociedade 5.0, alinhando eficiência produtiva com princípios de sustentabilidade socioambiental.

A pesquisa foi criada para servir como uma referência contemporânea que ajudará melhor os profissionais da indústria e da transformação digital. O estudo visa estabelecer como

as inovações tecnológicas dentro da Indústria 4.0 afetam a eficiência operacional e as barreiras para realizá-las dentro dos processos de produção.

Além da eficiência técnica, o uso dessas tecnologias pode impor outra dimensão à sustentabilidade e responsabilidade social corporativa através da nova orientação. A transição também diz respeito a um ecossistema onde a inovação deve também funcionar em um nível para eliminar desperdícios e otimizar a utilização de recursos naturais, consistente com a Produção Limpa (DO VALE et al., 2024).

Por outro lado, o nascimento do conceito de Sociedade 5.0 (inovação tecnológica social) também contribuirá para complicar ainda mais as questões na discussão da Indústria 4.0, colocando os humanos no centro das soluções tecnológicas para o contexto da Indústria 4.0, ao colocar a atenção na sociedade centrada no ser humano no núcleo. Diferente das revoluções passadas, este é um momento em que precisamos de uma interação em que IA e sistemas autônomos funcionem como habilitadores da capacidade humana, não substitutos. Esta visão integrada é fundamental para compreender por que o sucesso da transformação digital é, em última análise, o sucesso de uma solução adaptada culturalmente e à humanidade (DO VALE et al., 2024).

É importante entender que as diferenças na velocidade de implementação tecnológica das empresas de diferentes tamanhos representam desigualdade competitiva.

3

2 MÉTODOS

A abordagem adotada para realizar este artigo de pesquisa foi composta por uma revisão de literatura qualitativa e exploratória da literatura tradicional relevante sobre a Indústria 4.0, bem como as publicações mais recentes sobre uso prático. Escolhemos artigos científicos, dissertações e teses em bases de dados acadêmicas reconhecidas para focar nos temas principais: Indústria 4.0, Engenharia de Produção, Logística 4.0 e Transformação Digital.

Os documentos foram incluídos com base em critérios de inclusão rigorosos, enfatizando estudos que relataram análises empíricas, revisões sistemáticas ou estudos de caso sobre a implantação de novas tecnologias no ambiente de produção. Para a análise de dados, foi aplicada a leitura crítica juntamente com a síntese das principais contribuições de cada autor, para desenvolver resultados temáticos através de uma análise dos dados, resultando em um quadro conceitual em termos de oportunidades potenciais e desafios nas novas tecnologias.

Termos como "Indústria 4.0", "Engenharia de Produção", "Transformação Digital" e "Logística 4.0" foram priorizados, garantindo amplitude suficiente no desenvolvimento de um quadro teórico abrangente. Esta etapa garantiu que apenas estudos baseados em validade científica demonstrada e aplicabilidade acadêmica fossem refletidos na síntese da revisão atual. Primeiro, títulos e resumos foram lidos para validar a adesão temática inicial. A fase seguinte incluiu a leitura completa dos trabalhos que passaram por esta primeira etapa, na qual a qualidade metodológica e a aplicabilidade das descobertas dos autores à engenharia de produção brasileira foram avaliadas. Em resposta, a categorização dos dados foi determinada de acordo com uma matriz de síntese. Nesta etapa, as contribuições foram organizadas em eixos temáticos que separaram oportunidades para tecnologias como IoT e IA dos desafios de implementação, incluindo preocupações financeiras, estruturais e de gestão.

O procedimento de análise qualitativa permitiu uma reflexão crítica sobre a interação de diferentes perspectivas apresentadas pelos autores selecionados. Ao explorar e negociar visões opostas sobre maturidade digital corporativa e capital humano, o que emerge agora é um panorama consistente sobre o qual se baseia a discussão deste artigo. Esses requisitos de rigor metodológico foram necessários para construir a confiança na validade das inferências que fizemos e confirmar a relevância de nossas descobertas no nível de exploração de pesquisa exigido em qualidade.

3 RESULTADOS

A revisão da literatura observa que a Indústria 4.0 apresenta uma variedade de possibilidades para a Engenharia de Produção, enfatizando a melhoria de processos e a flexibilidade industrial. Conforme afirmado por Da Cunha, Barreto e Da Silva Pereira (2025), a demanda da Indústria 4.0 tem contribuído para a transformação da profissão do engenheiro de produção, exigindo o desenvolvimento de novas competências analíticas, domínio de tecnologias digitais e capacidade de atuação em sistemas produtivos cada vez mais integrados e complexos.

Uma das bases dessa jornada é a Internet das Coisas (IoT). Piccirillo et al. (2024) destacam que a implementação de projetos de Internet das Coisas (IoT) na manufatura amplia a capacidade de monitoramento e coleta de dados em tempo real, fornecendo informações que subsidiam uma tomada de decisão mais assertiva, ágil e preditiva. Essas interconexões entre

máquinas e sistemas também levam a uma redução significativa do tempo de inatividade e à otimização da utilização de recursos.

As implantações de sensores IoT também garantem uma gestão inteligente de energia com implicações diretas na sustentabilidade dos processos; permitem a otimização do consumo de energia. Monitorar o consumo de energia e os picos de desperdício em cada unidade de produção garante a otimização dos regimes de economia e alinha a manufatura com os critérios ESG (Ambiental, Social e Governança). Essa integração tecnológica também permite a realização de metas de descarbonização industrial, tornando-a mais competitiva no mercado (PICCIRILLO et al., 2024).

As inovações também são revolucionárias na logística. Boldin, Francisco e De Campos (2026) destacam que a automação da logística não só leva ao fluxo pontual de material, mas também garante a minimização de erros humanos e despesas operacionais. O uso de plataformas digitais na cadeia de suprimentos proporciona um ecossistema mais resiliente para uma mudança no mercado. Em conexão com essa transformação, Souza et al. (2025) destacam que a Logística 4.0 e a Cadeia de Suprimentos 4.0 representam pilares fundamentais da digitalização das operações produtivas, sendo impulsionadas por tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e Blockchain, que ampliam a conectividade, a automação e a capacidade de análise de informações em tempo real..

5

Embora essas grandes vantagens sejam evidentes, o estudo também aborda os desafios complexos associados à implementação dessas tecnologias, o que o torna categórico ao destacá-los. De acordo com Silveira et al. (2025), os impactos da Indústria 4.0 variam conforme o porte das empresas e o setor de atuação, uma vez que a capacidade de investimento, a maturidade tecnológica e a disponibilidade de recursos influenciam diretamente o processo de adoção das novas tecnologias digitais. Nesse contexto, a escala organizacional exerce influência significativa sobre a implementação e os efeitos das tecnologias associadas à Indústria 4.0.

De acordo com Dos Santos, Dos Santos e De Oliveira Moraes (2025), pequenas empresas de serviços logísticos enfrentam grandes restrições financeiras e dificuldades no uso de crédito para financiar a atualização de seus serviços.

A interseção entre as metodologias consolidadas da Engenharia de Produção e as novas tecnologias constitui outro aspecto crítico abordado na pesquisa. A integração da Produção Enxuta (Lean Production) com a Indústria 4.0 apresenta tanto sinergias quanto atritos. Ditzel

et al. (2024, p. 65) analisaram essa dinâmica no setor da construção civil, revelando que a falta de compreensão dos riscos associados pode comprometer os resultados de ambas as abordagens:

Entretanto, a implementação da produção enxuta e da Indústria 4.0 não está isenta de desafios. Ela gera riscos e impactos nas organizações, que são decorrentes de inserção de novas tecnologias no gerenciamento e na produção, mudança de capital humano e benefícios como menor desperdício, eficiência de máquinas e recursos. Existem seis macro áreas que resumem os impactos identificados na indústria 4.0, sendo elas: impacto tecnológico, impacto na relação com clientes, impactos ambientais, impactos econômicos, impacto no capital humano e impacto na gestão. Da mesma forma, a implementação da produção enxuta também enfrenta fatores de risco significativos. Os riscos associados à adoção de práticas enxutas podem incluir a falta de conhecimento técnico, resistência à mudança e a aplicação de práticas isoladas sem uma análise sistêmica (WOMACK; JONES; ROOS, 1992; LIKER, 2005).

No entanto, além da dificuldade operacional e financeira, a transformação digital exige uma mudança radical na gestão. David e Barbosa (2025) pontuam que, para as empresas prosperarem na era da Indústria 4.0, elas terão que desenvolver novas maneiras. A competitividade e a sustentabilidade a longo prazo também dependem desses novos métodos.

No campo específico do Big Data, Da Silva e Franco (2026) ressaltam que sua aplicação integrada ao marketing, à engenharia de produção e à logística exige profissionais capazes não apenas de utilizar ferramentas analíticas, mas também de interpretar grandes volumes de dados e transformá-los em informações estratégicas para a tomada de decisão.

A integração do Big Data Analytics, para além da manutenção preditiva, permite uma visão analítica profunda sobre o comportamento dos consumidores e a demanda de mercado. Conforme Da Silva e Franco (2026), a aplicação do Big Data Analytics na Engenharia de Produção e na Logística permite às empresas analisar grandes volumes de dados em tempo real, favorecendo a adoção de estratégias de precificação dinâmica mais precisas e alinhadas às variações do mercado. Essa capacidade adaptativa é um reflexo direto da maturidade digital que as organizações buscam atingir na era 4.0.

Segundo Rocha (2025), a transformação digital tornou-se um fator estratégico para a competitividade das empresas de manufatura, exigindo níveis adequados de prontidão organizacional para a adoção de tecnologias digitais. O estudo reforça que, para além da tecnologia, a transformação demanda uma reengenharia dos processos produtivos locais para que o polo se mantenha relevante no mercado nacional e internacional.

De acordo com Do Vale et al. (2024), alinhar os princípios da Indústria 4.0 aos objetivos da Sociedade 5.0 é fundamental para transformar a Zona Franca de Manaus em um modelo de desenvolvimento sustentável, inovação tecnológica e competitividade industrial. Não se trata apenas de eficiência técnica, mas de um compromisso com o desenvolvimento sustentável que a engenharia de produção moderna deve incorporar às suas práticas cotidianas.

A gestão do conhecimento nas organizações também emerge como um fator determinante.

Conforme Longo, Nicoletti e Padovano (2021), a transformação digital depende não apenas da adoção de novas tecnologias, mas também da preparação dos trabalhadores, da gestão do conhecimento e do desenvolvimento de competências adequadas para operar sistemas inteligentes. A democratização desse conhecimento é fundamental para evitar que a tecnologia se torne um ativo isolado e sem utilidade prática no dia a dia operacional.

A instabilidade da rede é mencionada por diferentes autores regionais como uma razão para a limitação do potencial das aplicações de IoT e IA. Sem a forte presença de redes, integrar sistemas ciberfísicos a esse ponto é bastante improvável a longo prazo em grande escala e baseia-se em muitos investimentos (ROCHA; SANTIAGO, 2025).

Aqui, a análise se cruza para ver que a transformação digital não é o fim, mas sim um processo contínuo. As mudanças técnicas em andamento são tão significativas que a Engenharia de Produção precisa ter uma perspectiva analítica clara de seus métodos para atualizações contínuas. A capacidade de aprender novas formas de trabalhar e de trabalhar de forma mais eficaz e suave para se adaptar à economia digital continuará sendo crítica em como conduzimos nossa indústria nos próximos anos (LONGO; NICOLETTI; PADOVANO, 2021).

A análise mostra uma clara maturação das estratégias da Indústria 4.0 por meio da coleta de dados; no entanto, as diferenças regionais persistem no Brasil – o que é um desafio. Estados que têm mais desenvolvimento industrial tendem a se concentrar em projetos de alta complexidade e estados em desenvolvimento encontram dificuldades para fornecer suporte tecnológico básico, tornando o ritmo de transformação em direção à digitalização desigual. A conectividade é essencialmente o catalisador para a eficiência produtiva quando otimizada por redes de alto desempenho (ROCHA; SANTIAGO, 2025).

Em termos de capital humano, a literatura também encontrou uma desconexão preocupante entre a disponibilidade de novas tecnologias e a prontidão técnica da força de trabalho. Pessoas fluentes e habilidosas na operação da interface homem-máquina dentro de um

mundo ciberfísico são agora um ativo escasso para as empresas, que precisam investir fortemente em esquemas internos de requalificação profissional para manter tudo funcionando sem problemas (LONGO; NICOLETTI; PADOVANO, 2021).

3.1 A integração de tecnologias emergentes na Engenharia de Produção

O surgimento de tecnologias emergentes como parte da Indústria 4.0 redefiniu os limites da Engenharia de Produção de uma forma que é utilizada para inovação. A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é um exemplo disso. Conforme Volpato (2017), a manufatura aditiva amplia as possibilidades de projeto ao permitir a produção de peças com elevada complexidade geométrica, reduzindo limitações impostas pelos processos convencionais.

Essa característica para adaptação em massa a um custo baixo em comparação com a linha de montagem tradicional é uma grande vantagem competitiva para a indústria.

Nesse aspecto, Colares, Carvalho e Lola (2025) destacam que a impressão 3D, quando integrada a sistemas digitais de informação, amplia as possibilidades de planejamento, controle e gestão dos processos produtivos, contribuindo para a transformação dos modelos tradicionais de manufatura no contexto da Indústria 4.0. Ter peças prontas sob demanda elimina a necessidade de estoques intermediários, uma aplicação ideal na teoria da produção enxuta. Mas fazer a transição para esse modelo pode ser um investimento caro para tudo, desde equipamentos caros até o treinamento das equipes envolvidas.

A Inteligência Artificial (IA) complementada pela manufatura aditiva é um facilitador chave para otimizar o processo de produção. Algoritmos de aprendizado de máquina estão se tornando cada vez mais populares para prever falhas de equipamentos antes que aconteçam — definido aqui como manutenção preditiva. Essa abordagem proativa reduz o tempo de inatividade dos equipamentos, prolonga sua vida útil e contribui diretamente para o aumento da eficiência operacional e a redução dos custos de manutenção e produção (MARCATTI et al., 2024).

Sistemas de visão computacional digitalizaram processos de controle e qualidade que são um salto qualitativo em direção à precisão da fabricação. Ao contrário dos sensores convencionais, a visão computacional que acompanha a IA pode identificar anomalias imperceptíveis ao olho humano ou sensores lineares, reduzindo assim a taxa de retrabalho. Esse grau de precisão nunca é fácil de estabelecer, no entanto, com grandes conjuntos de dados e

modelos algorítmicos, indicando a necessidade de uma infraestrutura adequada e suporte contínuo de engenharia de software no nível de produção (MARCATTI et al., 2024).

Essa combinação de tecnologias estabelece um ambiente de trabalho construtivo para decisões em tempo real. A IA e a automação de sistemas transformam o chão de fábrica em um ambiente incrivelmente mais ágil. Embora essa transformação tecnológica, por mais difícil que seja, estabelece as bases para sistemas ciberfísicos, que definem a fase atual da engenharia de produção, com foco em ser mais adaptável aos processos industriais.

3.2 A evolução da logística e gestão da cadeia de suprimentos

Com a Indústria 4.0, o escopo da gestão da cadeia de suprimentos (SCM) mudou drasticamente. As cadeias tradicionais lineares e fragmentadas foram agora substituídas por redes de valor interligadas e dinâmicas. Logística 4.0, fundada na digitalização intensiva, está permitindo uma visibilidade de ponta a ponta nunca antes vista. Com sensores IoT e tecnologias de identificação por radiofrequência (RFID) integradas aos sistemas digitais, torna-se possível realizar o rastreamento em tempo real de mercadorias, monitorar condições operacionais e acompanhar a localização dos produtos ao longo da cadeia de suprimentos (WANG et al., 2016).

9

Além disso, a integração de sistemas digitais de gerenciamento de armazéns com tecnologias de automação, como robôs móveis autônomos, tem contribuído para maior flexibilidade dos centros de distribuição, otimização da movimentação de materiais e aumento da eficiência operacional (SOUZA et al., 2025). Isso também permite o fluxo de materiais que antes exigiria atualizações arquitetônicas caras para responder de forma rápida e dinâmica às mudanças de demanda. A combinação de inteligência de software e a agilidade física da robótica minimiza o tempo gasto na coleta de mercadorias, melhora a densidade de armazenamento e transforma a logística em uma indústria altamente técnica.

Para mitigação de riscos e resposta rápida a interrupções na cadeia de suprimentos, essa transparência operacional é fundamental. Além disso, o Blockchain fornece mais um nível de proteção de segurança e práticas comerciais mais confiáveis. Contratos inteligentes poderiam automatizar o processo de faturamento e liberação de pagamentos assim que certas condições logísticas fossem atendidas, minimizando substancialmente obstáculos burocráticos e atrasos administrativos (SOUZA et al., 2025).

No entanto, essas arquiteturas complexas enfrentam desafios pragmáticos para serem implementadas. A interoperabilidade entre os sistemas de parceiros de negócios distintos é um desafio técnico significativo. A Logística 4.0 muitas vezes não fornece padrões globais unificados para troca de dados, frequentemente exigindo o desenvolvimento de soluções de integração personalizadas, levando a custos excessivos e complexidade de projetos. Portanto, as organizações devem investir no fortalecimento do ensino e treinamento de seus fornecedores e parceiros estratégicos para facilitar o funcionamento da rede de valor (LONGO; NICOLETTI; PADOVANO, 2021).

3.3 Capital humano na engenharia: formação e requalificação do engenheiro 4.0

A convergência da Indústria 4.0 impõe novas demandas ao perfil do engenheiro de produção. Acontece que o currículo tradicional em torno do design determinístico e da pesquisa operacional clássica será inadequado para preparar os profissionais para os desafios da manufatura avançada. Com o novo contexto, são necessárias habilidades multidisciplinares, como ciência de dados, programação e arquitetura de sistemas em especialização (DA CUNHA; BARRETO; PEREIRA, 2025).

A literatura também se refere ao aumento da dependência de habilidades comportamentais e socioemocionais (soft skills), além das habilidades técnicas (hard skills). A capacidade de construir equipes multidisciplinares, a adaptabilidade em circunstâncias extremas e a disposição para aprender continuamente (aprendizado ao longo da vida) são características-chave para o engenheiro 4.0 que pode construir resiliência, e a resiliência garantirá que um engenheiro prospere. Essa interação colaborativa de pessoas com sistemas de IA exige que um profissional seja capaz de interpretar análises algorítmicas com mais complexidade e aplicar o pensamento crítico na tomada de decisões estratégicas (LONGO; NICOLETTI; PADOVANO, 2021).

O ensino superior é um fator importante nessa transição. Novos projetos pedagógicos em Cursos de Engenharia de Produção, relações universidade-empresa e a promoção de aplicações de pesquisa são abordagens essenciais que devem alinhar a educação acadêmica com os crescentes requisitos do mercado de trabalho. A digitalização bem-sucedida no Brasil será, em última análise, devido à capacidade do sistema educacional de educar pessoal treinando a indústria em inovação tecnológica (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHWAB, 2016).

É importante mencionar, nesse processo de atualização pedagógica, que os princípios do aprendizado ao longo da vida precisam ser apoiados por plataformas de ensino adaptativas baseadas na tecnologia da Indústria 4.0 para adaptar diretamente o treinamento do engenheiro. Estudantes acadêmicos se familiarizam com ambientes de fábrica complexos usando Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR), reduzindo a curva de aprendizado, pois estão sendo colocados na vida real de uma experiência de resolução de problemas mesmo antes de ingressar no mercado de trabalho (DA CUNHA; BARRETO; PEREIRA, 2025).

3.4 Impactos setoriais e desafios específicos

A implementação das tecnologias da Indústria 4.0 não ocorre de maneira uniforme em todos os setores econômicos. A literatura revela que as características intrínsecas de cada indústria influenciam diretamente o ritmo e a profundidade da transformação digital. Segundo Pietrasik, Wilbik e Grefen (2024), a transformação digital na indústria de processos químicos apresenta desafios relacionados à complexidade operacional, à integração de tecnologias digitais e à necessidade de utilização de dados em tempo real para otimização e controle dos processos.

No setor de eletroeletrônicos do Polo Industrial de Manaus (PIM), Rocha e Santiago (2025) verificaram que as oportunidades proporcionadas pela adoção da Indústria 4.0 são acompanhadas por desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, aos investimentos necessários, à qualificação da mão de obra e à integração de tecnologias digitais, fatores que influenciam a competitividade das empresas. A dependência de redes de comunicação estáveis e de alta velocidade é um pré-requisito fundamental para a operação de sistemas ciberfísicos, o que evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas para a modernização da infraestrutura tecnológica nacional.

Do Vale et al. (2024) ampliam essa discussão ao analisar a evolução da inovação tecnológica na Zona Franca de Manaus sob a perspectiva da transição da Indústria 4.0 para a Sociedade 5.0, destacando que essa transformação depende da integração entre tecnologias digitais, qualificação profissional, inovação e sustentabilidade para fortalecer a competitividade do Polo Industrial de Manaus. "A tecnologia deve ser integrada ao bem-estar social e à proteção ambiental", escrevem os autores. Essa perspectiva integrada fortalece a noção de que a Engenharia de Produção hoje não pode se preocupar apenas com a busca da eficiência econômica, mas deve também considerar fatores socioambientais em sua tomada de decisão.

Com a utilização de Gêmeos Digitais, torna-se possível obter maior transparência sobre o ciclo de vida dos produtos, permitindo o acompanhamento de dados relacionados a componentes, materiais e processos. Essa capacidade favorece estratégias de economia circular, incluindo ações de recuperação, reutilização, remanufatura e logística reversa mais eficiente (MÜGGE et al., 2024). Ao entender precisamente os componentes e sua condição de conservação, a empresa pode agendar a remanufatura ou reciclagem de forma otimizada, reduzindo o ciclo de produção e minimizando a dependência de materiais virgens. Esses achados setoriais na Discussão mostram que o ritmo de aceitação tecnológica não depende apenas do setor de atividade, mas também da escala da empresa.

4 DISCUSSÃO

A integração tecnológica na Engenharia de Produção vai além da implementação prática de dispositivos. A verdadeira vantagem está na análise para converter os dados dos sensores IoT em táticas operacionais que reduzem o desperdício e melhoram a sustentabilidade da produção (PICCIRILLO et al., 2024).

No contexto da Logística 4.0, discute-se ainda que os benefícios de transparência apresentados pela tecnologia Blockchain não residem apenas na qualidade do Blockchain, mas também na maturidade digital dos parceiros da cadeia; sem a harmonização de dados entre fornecedores, em particular, distribuidores, juntamente com operadores logísticos, os benefícios da rastreabilidade em tempo real tendem a se limitar aos elos de nível superior da rede e apoiar as desigualdades competitivas da cadeia de suprimentos como um todo (SOUZA et al., 2025).

Entretanto, as limitações deste estudo apontam que, em empresas de menor porte, a adoção destas tecnologias enfrenta barreiras financeiras intrínsecas. Como evidenciam Dos Santos, Dos Santos e De Oliveira Moraes (2025), pequenas empresas prestadoras de serviços logísticos enfrentam, além do custo elevado dos sistemas ciberfísicos, dificuldades concretas de acesso a crédito para financiar sua modernização, o que reforça a necessidade de modelos de implementação escaláveis e economicamente viáveis, apoiados em serviços de nuvem e aluguel de infraestrutura tecnológica, capazes de democratizar o acesso às tecnologias da Indústria 4.0 para todo o tecido produtivo nacional, e não apenas para as grandes corporações.

A transição para a Sociedade 5.0, como sugerido pelos autores, requer que o engenheiro de produção atue como um gestor de ecossistema. Isso requer competência em ética, liderando

a interface entre sistemas automatizados e a necessidade humana de um ambiente de trabalho mais ergonômico e menos repetitivo (DO VALE et al., 2024).

A análise da literatura sugere que a resistência à mudança é, por vezes, um obstáculo maior do que a própria barreira tecnológica. A cultura organizacional que prioriza métodos tradicionais de gestão sem considerar a flexibilidade inerente à Indústria 4.0 tende a subutilizar os ativos tecnológicos, gerando projetos com baixo retorno sobre o investimento (DAVID; BARBOSA, 2025).

A cibersegurança é uma variável constante na conversa em torno da Indústria 4.0. Segundo Nunes, Silva e Oliveira (2024), a crescente conectividade dos ambientes industriais proporcionada pela Indústria 4.0 amplia a exposição a ameaças cibernéticas, colocando em risco não apenas informações estratégicas e propriedade intelectual, mas também a continuidade operacional dos sistemas produtivos. Ao projetar ecossistemas digitais, a engenharia de produção deve ter protocolos de segurança desde a concepção do projeto (segurança por design), onde a proteção de dados é considerada um ativo de gestão de qualidade equivalente ao produto entregue.

Em relação ao lugar onde a educação desempenha um papel tão importante: As instituições acadêmicas no Brasil continuam atrasadas em relação ao ritmo dos avanços industriais. A rápida expansão de laboratórios de manufatura aditiva e simulação de sistemas sendo incorporados ao ambiente universitário na forma de laboratórios do ambiente universitário é uma solução emergente para remediar a escassez de habilidades da força de trabalho moderna, conforme identificado no mercado de trabalho (DA CUNHA; BARRETO; PEREIRA, 2025).

Quanto aos aspectos setoriais, nota-se que os setores químico e eletrônico em si têm condições diferentes, e a digitalização da indústria com adaptações especiais também precisa ser abordada. O monitoramento de processos químicos contínuos exige uma estrutura de IA diferente da montagem em série para componentes eletrônicos.

Embora a sustentabilidade como objetivo receba muitos elogios, ela permanece secundária aos olhos de muitas iniciativas de automação. Estudos futuros são necessários para quantificar como os benefícios ambientais da Indústria 4.0 serão realizados, mostrando que um elemento responsável por minimizar a pegada de carbono industrial é a eficiência energética dos sistemas inteligentes. Assim, pode-se dizer que a Indústria 4.0 é um processo de evolução contínua (DO VALE et al., 2024).

Para os pesquisadores da área, a abertura para novos estudos sobre modelos de implementação escaláveis e parcerias público-privadas é o método mais promissor de democratizar o acesso às tecnologias digitais em todo o tecido produtivo brasileiro (DOS SANTOS; DOS SANTOS; DE OLIVEIRA MORAIS, 2025).

5 CONCLUSÃO

A transição para a Indústria 4.0 representa um marco irreversível para a Engenharia de Produção, trazendo consigo um paradigma focado na conectividade, automação inteligente e análise de dados em larga escala. A revisão da literatura recente coopera que as oportunidades oferecidas por essa transformação digital são vastas, englobando desde a otimização de processos logísticos até a personalização em massa e a redução significativa de desperdícios.

No entanto, é a realização desses benefícios que está condicionada ao enfrentamento de desafios substanciais que o estudo encoraja. Barreiras econômicas, os desafios técnicos de integrar sistemas legados com novas plataformas, e particularmente a adaptação cultural e a qualificação do capital humano são os principais obstáculos que as organizações enfrentam.

O artigo conclui que a adoção bem-sucedida das tecnologias da Indústria 4.0 não se trata apenas de adquirir equipamentos ou softwares avançados. É fundamentalmente uma mudança sistêmica que exige planejamento cuidadoso, gestão eficaz de riscos e um compromisso verdadeiramente genuíno com o desenvolvimento das pessoas ao longo do tempo. Em pesquisas futuras, considera-se que é necessário realizar trabalhos empíricos sobre modelos de implementação gradual e financeiramente viáveis com ênfase especial aplicada particularmente a pequenas e médias empresas, que representam uma parcela notável da base produtiva nacional.

14

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Elton da Silva; PINHEIRO, Ricardo Rodrigues Gonçalves. A relevância da Indústria 4.0 para desenvolvimento do polo industrial brasileiro frente aos desafios. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 8, n. 9, p. 65090-65106, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n9-289.

SOUZA, Hertiquitefania J. dos Santos; ROSA, Jordan Lavanholle; CARDOZO, Noamy Lima; SOUZA, Noele Bissoli Perini; SERVARE JUNIOR, Marcos Wagner Jesus. Logística 4.0 e cadeia de suprimentos na engenharia de produção: avanços tecnológicos e desafios na era digital. *Brazilian Journal of Production Engineering*, Vitória, v. 11, n. 3, p. 181-190, 2025. DOI: 10.47456/bjpe.viii3.48533.

DA CUNHA, Júlio César; BARRETO, Maiara Couto; PEREIRA, Rafael da Silva. Requisitos da Indústria 4.0 na carreira do engenheiro de produção: habilidades e tendências por análise bibliométrica. *Ciência Dinâmica*, v. 16, e262501, 2025. DOI: 10.70406/2176-6509.2025.312.

DUARTE, Clayton Aparecido; SANTOS, André da Silva Rosa; ANTUNES NETO, Joaquim M. F.; LIMA, Rodrigo Franco de. *Percurso histórico das revoluções industriais: o estágio da Indústria 4.0. Prospectus: Gestão e Tecnologia*, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17644379.

Vicente, G. G.. (2024, November 21). *Transformação Digital na Engenharia Química: Explorando os avanços e desafios na indústria 4.0*. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/4459>

Silva, L. B.. (2024, December 31). *A importância da modelagem 3D e manufatura aditiva na Indústria 4.0 : inovações e aplicações na engenharia de produção*. <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/8254>

Franco, E. Á., & Silva, L. N.. (2026, June 17). *BIG DATA ANALYTICS NO MARKETING, ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E LOGÍSTICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ESTRATÉGIAS DE PRECIFICAÇÃO DINÂMICA NA INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL*. <https://revistatopicos.com.br/artigos/big-data-analytics-no-marketing-engenharia-de-producao-e-logistica-uma-revisao-bibliografica-sobre-estrategias-de-precificacao-dinamica-na-industria-4-o-no-brasil>

Boldin, L., Campos, R. R., & Francisco, S. L.. (2025, December 31). *Automação na Logística: Tecnologias, Desafios e Aplicações na Engenharia de Produção*. <https://doi.org/10.29327/2800502.2.1-7>

BARROS, Ítalo Renan da Costa; NASCIMENTO, Tiago Pereira. *Robotic Mobile Fulfillment Systems: A survey on recent developments and research opportunities*. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 137, 2021. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103729.

Cordeiro, I. d., Ditzel, L. F., Seleme, R., & Detto, S. P.. (2023, December 31). *Produção Enxuta e Indústria 4.0: Riscos e Desafios na Construção Civil*. https://aprepro.org.br/combrep/anaais/2024/arquivos/10282024_121040_671fafi015b67.pdf

David, M., & Barbosa, R. A.. (2025, October 29). *GESTÃO EMPRESARIAL NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0: ESTRATÉGIAS PARA COMPETITIVIDADE E SUSTENTABILIDADE*. <https://doi.org/10.56238/erroivion5-056>

DO VALE, Rosângela Victor; GUIMARÃES, Gil Eduardo; MARINELLI FILHO, Nelson; SALAZAR, Rodrigo Fernando dos Santos; CORREA, Geraldo Nunes. *Transformação digital e evolução tecnológica na Zona Franca de Manaus: caminhos e desafios entre a Indústria 4.0 e a Sociedade 5.0*. *ARACÊ*, v. 6, n. 4, p. 15327–15351, 2024. DOI: 10.56238/arev6n4-253.

COLARES, Enzo Ruas; CARVALHO, Luca Oliveira; LOLA, Victor Emanuel Lima; SOUZA, Marinho Soares de. *Aplicações da impressão 3D na Indústria 4.0: perspectivas para sistemas de informação*. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2025. DOI: 10.61164/48q5vq77.

Masulo, P., & Rocha. (2025, January 15). Oportunidades e desafios decorrentes da inserção da indústria 4.0: um estudo sobre a transformação digital no setor de eletroeletrônicos no PIM. <https://rii.ufam.edu.br/handle/prefix/8480>

Morais, M. d., Santos, R. A., & Santos, R. F.. (2025, August 28). DESAFIOS DA INDÚSTRIA 4.0 EM PEQUENAS EMPRESAS PRESTADORAS DE SERVIÇOS LOGÍSTICOS. <https://doi.org/10.56238/levv16n51-095>

MÜGGE, Janine; SEEGRÜN, Anne; HOYER, Tessa-Katharina; RIEDELSHEIMER, Theresa; LINDOW, Kai. Digital Twins within the Circular Economy: Literature Review and Concept Presentation. *Sustainability* 2024, 16(7), 2748; <https://doi.org/10.3390/su16072748>

SILVEIRA, Arthur Fernandes. Indústria 4.0: Tecnologias, Impactos e Desafios. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Socioeconômico, Florianópolis, 2025.

PIETRASIK, Marcin; WILBIK, Anna M.; GREFFEN, Paul W. P. J. The enabling technologies for digitalization in the chemical process industry. *Digital Chemical Engineering*, v. 12, 100161, 2024. DOI: 10.1016/j.dche.2024.100161.

VOLPATO, Neri (org.). *Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2017.

SOUZA, Hertiquitefania J. dos Santos; ROSA, Jordan Lavanholle; CARDOZO, Noamy Lima; SOUZA, Noele Bissoli Perini; SERVARE JUNIOR, Marcos Wagner Jesus. Logística 4.0 e cadeia de suprimentos na engenharia de produção: avanços tecnológicos e desafios na era digital. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 11, n. 3, p. 181–190, 2025. DOI: 10.47456/bjpe.v11i3.48533.

DA SILVA, Leiliane Nayara Alves; FRANCO, Eldelita Águida Porfírio. Big Data Analytics no Marketing, Engenharia de Produção e Logística: uma revisão bibliográfica sobre estratégias de precificação dinâmica na Indústria 4.0 no Brasil. *Revista Tópicos*, 18 jun. 2026. DOI: 10.70773/revistatopicos/781728278.

PICCIRILLO, Kátia Diniz da Silva; SILVA, Luciano Ferreira da; PICCIRILLO, Jefferson Augusto; CONTADOR, José Celso; SATYRO, Walter Cardoso. Indústria 4.0: projeto de implementação de IoT em máquinas injetoras. *Revista Científica Cintec*, v. 2, n. 1, p. 24–40, 2024. DOI: 10.23925/cintec.v2i1.64471.

ROCHA, Pollyana Massulo; SANTIAGO, Sandro Breval. A implementação da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus: análise de desafios e oportunidades nas empresas de eletroeletrônicos. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (SIMPEP), 31., 2025, Bauru. Anais... Bauru: UNESP, 2025. DOI: 10.29327/xxxi_simpep.887868.

ROCHA, Clarissa F. Digital transformation readiness in large manufacturing firms: a building block model proposition. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 36, n. 1, p. 45–68, 2025. DOI: 10.1108/JMTM-12-2023-0544.

NUNES, Matheus Henrique; SILVA, João Pedro; OLIVEIRA, Rafael Costa. Cibersegurança na Indústria 4.0: desafios e estratégias para proteção de sistemas industriais conectados. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, ano 9, v. 8, p. 45–63, 2024.

MARCATTI, Gabriel de Oliveira; MARTINS, Matheus dos Santos; GONÇALVES, Vinícius de Oliveira; SILVA, João Pedro Pereira da. Manutenção preditiva na Indústria 4.0: uma revisão sobre tecnologias e benefícios. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, ano 9, ed. 10, v. 3, p. 118–135, 2024.

WANG, Shiyong et al. Implementing smart factory of Industry 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 12, n. 1, 2016. DOI: 10.1155/2016/3159805.

Corrêa, G. N., Guimarães, G. E., Filho, N. M., Salazar, R. F., & Vale, R. V.. (2024, December 16). TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA ZONA FRANCA DE MANAUS: CAMINHOS E DESAFIOS ENTRE A INDÚSTRIA 4.0 E A SOCIEDADE 5.0. <https://doi.org/10.56238/arev6n4-253>

Fernandes, S. A.. (2025, July 8). Indústria 4.0: Tecnologias, Impactos e Desafios. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/266609>

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes (Org.). Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. München: Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.

LASI, Heiner; FETTKE, Peter; KEMPER, Hans-Georg; FELD, Thomas; HOFFMANN, Michael. *Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014. DOI: 10.1007/s12599-014-0334-4.

SCHWAB, Klaus. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.

WOMACK, James P.; JONES, Daniel T.; ROOS, Daniel. *A Máquina que Mudou o Mundo (The Machine That Changed the World)*. Rio de Janeiro: Campus, 1992.

LIKER, Jeffrey K. *O Modelo Toyota: 14 Princípios de Gestão do Maior Fabricante do Mundo*. Porto Alegre: Bookman, 2005.