

**INDÚSTRIA INTELIGENTE INTEGRADA:
ANÁLISE DA TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A 5.0 E SEUS
IMPACTOS NOS PROCESSOS PRODUTIVOS E NO TRABALHO
HUMANO**

**INTELLIGENT INTEGRATED INDUSTRY:
ANALYSIS OF THE TRANSITION FROM INDUSTRY 4.0 TO 5.0 AND ITS
IMPACTS ON PRODUCTION PROCESSES AND HUMAN LABOR**

**INDUSTRIA INTELIGENTE INTEGRADA:
ANÁLISIS DE LA TRANSICIÓN DE LA INDUSTRIA 4.0 A LA 5.0 Y SUS IMPACTOS
EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS Y EN EL TRABAJO HUMANO**

Fábio Belemer Pereira¹, Renato Ribeiro dos Santos², Rodrigo Oliveira Miranda³, Rubens Savaris Leal⁴, Claudio Augusto Kelly⁵, Edywin Gabriel Carvalho de Oliveira⁶, Rodrigo Bicalho Mendes⁷, Deividson Sá Fernandes de Souza⁸, Luiz Francisco Martins Bentes⁹, Messias Kennedy da Conceição¹⁰, Alan Marques de Sousa¹¹, Antonio Pereira da Costa Filho¹², Lucas Felipe Santos Maia¹³, Anderson Philip de Almeida Castro¹⁴, Thalita Mayan Esquerdo Andrade¹⁵, Felipe Barreto

¹ Especialista em Indústria 4.0, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Fortaleza, Ceará, Brasil.
E-mail: fbelemer@outlook.com

² Doutor em Administração, Faculdade de Princípios Militares (FPM), Goiânia, Goiás, Brasil.
E-mail: renato.ribeiro@faculadepm.edu.br

³ Doutor em Administração de Empresas, Universidade Estadual do Ceará (UECE), Fortaleza, Ceará, Brasil.
E-mail: ro.miranda87@hotmail.com

⁴ Doutor em Recursos Naturais, Universidade Federal de Roraima (UFRR), Boa Vista, Roraima, Brasil.
E-mail: savaris@outlook.com

⁵ Doutor em Engenharia de Materiais, Centro Universitário FUNVIC (UNIFUNVIC), Pindamonhangaba, São Paulo, Brasil. E-mail: prof.claudiokelly.pinda@unifunvic.edu.br

⁶ Doutorando em Energia, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: edywin.gabriel@ufpe.br

⁷ Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Ubá, Minas Gerais, Brasil.
E-mail: rodrigo.mendes@uemg.br

⁸ Mestre em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas, Brasil.
E-mail: deividson.souza@delmiro.ufal.br

⁹ Mestre em Engenharia de Software, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: luiz.bentes@eldorado.org.br

¹⁰ Graduado em Engenharia de Produção, Universidade La Salle (UNILASALLE), Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: srkenedydc@gmail.com

¹¹ Especialista em Administração Pública, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Picos, Piauí, Brasil.
E-mail: alanmarques.ms@hotmail.com

¹² Especialista em Ciência de Dados e Big Data Analytics, Faculdade Metropolitana, Pimenteiras, Piauí, Brasil.
E-mail: adoradorpop@hotmail.com

¹³ Graduado em Engenharia Química, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil. E-mail: lucasfelipe31@yahoo.com.br

¹⁴ Especialista em Segurança da Informação, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: aphilip@sti.ufpb.br

¹⁵ Graduada em Serviço Social, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil.
E-mail: thalitaamayan@gmail.com

Druzian¹⁶, Ana Bárbara Nunes Ost¹⁷, Rayne Santiago Elford¹⁸

DOI: 10.54899/dcs.v23i90.5481

Recibido: 07/04/2026 | **Aceptado:** 30/04/2026 | **Publicación en línea:** 08/05/2026.

RESUMO

A chamada Indústria 4.0 tem promovido uma profunda digitalização dos processos produtivos, baseada em automação, inteligência artificial e sistemas ciberfísicos. Mais recentemente, emerge o paradigma da Indústria 5.0, que reposiciona o ser humano no centro da produção, enfatizando colaboração entre humanos e máquinas, sustentabilidade e personalização. Essa transição redefine não apenas a lógica produtiva, mas também as formas de trabalho, qualificação profissional e organização das empresas. O presente estudo tem como objeto de análise a transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, com foco nos seus impactos sobre os processos produtivos e o trabalho humano. Diante disso, estabelece-se como pergunta de partida: de que maneira a transição para a Indústria 5.0 reconfigura os processos produtivos e quais são seus efeitos sobre o papel, as condições e a centralidade do trabalho humano na indústria contemporânea? Teoricamente, fizemos uso dos trabalhos de Taylor (1911), Ford (1922), Fayol (1949), Drucker (1954; 1993), Ohno (1988), Shingo (1989), Deming (1986), Juran (1990), Porter (1985), Senge (1990), Nonaka e Takeuchi (1995), Maier e Rechtin (2000), Feenberg (2002; 2010), Rifkin (2011; 2014), Floridi (2014), Floridi e Taddeo (2014), Brynjolfsson e McAfee (2014), Schwab (2016), McAfee e Brynjolfsson (2017), Daugherty e Wilson (2018), Zuboff (2019), Antunes (2006; 2009; 2018), Sennett (1998; 2008), Srnicek (2016), Taleb (2007; 2012; 2018), Verbeek (2005; 2011), Harari (2016; 2019), Davenport (2018), Casilli (2019), Kahneman (2020), Nayyar e Kumar (2020), Molina et al. (2021), Deepak et al. (2023), Machado e Davim (2023), Leong (2024), Kumar, Kumar e Pandey (2026), Anderson (1983), Haimés e Sage (2015), Minsky (1988), entre outros. A pesquisa é qualitativa a partir de Minayo (2007), descritiva e bibliográfica conforme Gil (2008) e com o viés analítico compreensivo a partir de Weber (1949). Os achados da pesquisa demonstraram que a transição da Indústria 4.0 para a 5.0 reorganiza profundamente os processos produtivos por meio da integração entre inteligência artificial, automação avançada, análise de dados e sistemas inteligentes conectados. Constatou-se também que, embora a automação amplie eficiência, flexibilidade e capacidade produtiva, ela intensifica exigências relacionadas à qualificação contínua, hiperadaptabilidade profissional e saúde mental dos trabalhadores. Verificou-se, ainda, que a Indústria 5.0 procura reposicionar o ser humano como elemento estratégico da inovação, da criatividade, da sustentabilidade e da tomada de decisões em ambientes produtivos altamente digitalizados.

Palavras-chave: Indústria 5.0. Automação Industrial. Trabalho Humano. Inteligência Artificial.

¹⁶ Graduando em Engenharia da Computação, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: felipebdruzian@gmail.com

¹⁷ MBA em Gestão Tributária, Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, São Paulo, Brasil. E-mail: anabarbaraost@gmail.com

¹⁸ Tecnólogo em Logística, Faculdade Joaquim Nabuco (UNINABUCO), Tampa, Estados Unidos. E-mail: rayneselford@gmail.com

ABSTRACT

The so-called Industry 4.0 has promoted a profound digitalization of production processes based on automation, artificial intelligence, and cyber-physical systems. More recently, the paradigm of Industry 5.0 has emerged, repositioning human beings at the center of production by emphasizing collaboration between humans and machines, sustainability, and personalization. This transition redefines not only production logic, but also forms of work, professional qualification, and business organization. The present study analyzes the transition from Industry 4.0 to Industry 5.0, focusing on its impacts on production processes and human labor. Thus, the following guiding question was established: in what ways does the transition to Industry 5.0 reconfigure production processes, and what are its effects on the role, conditions, and centrality of human labor in contemporary industry? Theoretically, the study draws upon the works of Taylor (1911), Ford (1922), Fayol (1949), Drucker (1954; 1993), Ohno (1988), Shingo (1989), Deming (1986), Juran (1990), Porter (1985), Senge (1990), Nonaka and Takeuchi (1995), Maier and Rechtin (2000), Feenberg (2002; 2010), Rifkin (2011; 2014), Floridi (2014), Floridi and Taddeo (2014), Brynjolfsson and McAfee (2014), Schwab (2016), McAfee and Brynjolfsson (2017), Daugherty and Wilson (2018), Zuboff (2019), Antunes (2006; 2009; 2018), Sennett (1998; 2008), Srnicek (2016), Taleb (2007; 2012; 2018), Verbeek (2005; 2011), Harari (2016; 2019), Davenport (2018), Casilli (2019), Kahneman (2020), Nayyar and Kumar (2020), Molina et al. (2021), Deepak et al. (2023), Machado and Davim (2023), Leong (2024), Kumar, Kumar and Pandey (2026), Anderson (1983), Haimés and Sage (2015), Minsky (1988), among others. The research is qualitative based on Minayo (2007), descriptive and bibliographic according to Gil (2008), and guided by the analytical-comprehensive perspective derived from Weber (1949). The findings demonstrated that the transition from Industry 4.0 to 5.0 deeply reorganizes production processes through the integration of artificial intelligence, advanced automation, data analysis, and connected intelligent systems. It was also found that, although automation expands efficiency, flexibility, and productive capacity, it intensifies demands related to continuous qualification, professional hyperadaptability, and workers' mental health. Furthermore, Industry 5.0 seeks to reposition human beings as strategic elements of innovation, creativity, sustainability, and decision-making within highly digitalized production environments.

Keywords: Industry 5.0. Industrial Automation. Human Labor. Artificial Intelligence.

RESUMEN

La denominada Industria 4.0 ha promovido una profunda digitalización de los procesos productivos basada en automatización, inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos. Más recientemente, surge el paradigma de la Industria 5.0, que reposiciona al ser humano en el centro de la producción, enfatizando la colaboración entre humanos y máquinas, la sostenibilidad y la personalización. Esta transición redefine no solo la lógica productiva, sino también las formas de trabajo, la cualificación profesional y la organización de las empresas. El presente estudio tiene como objeto de análisis la transición de la Industria 4.0 a la Industria 5.0, con énfasis en sus impactos sobre los procesos productivos y el trabajo humano. A partir de ello, se establece como pregunta de investigación: ¿de qué manera la transición hacia la Industria 5.0 reconfigura los procesos productivos y cuáles son sus efectos sobre el papel, las condiciones y la centralidad del trabajo humano en la industria contemporánea? Teóricamente, el estudio se fundamenta en los trabajos de Taylor (1911), Ford (1922), Fayol (1949), Drucker (1954; 1993), Ohno (1988), Shingo (1989), Deming (1986), Juran (1990), Porter (1985), Senge (1990), Nonaka y Takeuchi

(1995), Maier y Rechtin (2000), Feenberg (2002; 2010), Rifkin (2011; 2014), Floridi (2014), Floridi y Taddeo (2014), Brynjolfsson y McAfee (2014), Schwab (2016), McAfee y Brynjolfsson (2017), Daugherty y Wilson (2018), Zuboff (2019), Antunes (2006; 2009; 2018), Sennett (1998; 2008), Srnicek (2016), Taleb (2007; 2012; 2018), Verbeek (2005; 2011), Harari (2016; 2019), Davenport (2018), Casilli (2019), Kahneman (2020), Nayyar y Kumar (2020), Molina et al. (2021), Deepak et al. (2023), Machado y Davim (2023), Leong (2024), Kumar, Kumar y Pandey (2026), Anderson (1983), Haimés y Sage (2015), Minsky (1988), entre otros. La investigación es cualitativa a partir de Minayo (2007), descriptiva y bibliográfica conforme Gil (2008), y con un enfoque analítico-comprensivo basado en Weber (1949). Los hallazgos demostraron que la transición de la Industria 4.0 a la 5.0 reorganiza profundamente los procesos productivos mediante la integración de inteligencia artificial, automatización avanzada, análisis de datos y sistemas inteligentes conectados. También se constató que, aunque la automatización amplía la eficiencia, la flexibilidad y la capacidad productiva, intensifica las exigencias relacionadas con la cualificación continua, la hiperadaptabilidad profesional y la salud mental de los trabajadores. Asimismo, se verificó que la Industria 5.0 busca reposicionar al ser humano como elemento estratégico de la innovación, la creatividad, la sostenibilidad y la toma de decisiones en ambientes productivos altamente digitalizados.

Palabras clave: Industria 5.0. Automatización Industrial. Trabajo Humano. Inteligencia Artificial.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO: TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DA PRODUÇÃO, RECONFIGURAÇÃO DOS PROCESSOS INDUSTRIAIS E CENTRALIDADE DO TRABALHO HUMANO NA TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A 5.0

A própria trajetória das revoluções industriais demonstra que as transformações tecnológicas nunca estiveram restritas apenas ao aumento da capacidade produtiva, pois, de maneira simultânea, elas alteraram formas de organização econômica, relações sociais, modelos de trabalho e até mesmo os modos pelos quais os indivíduos passaram a interagir com a técnica dentro e fora dos ambientes produtivos. Logo, a mecanização impulsionada pela Primeira Revolução Industrial¹⁹ deslocou o eixo da produção artesanal para o sistema fabril, reorganizando

¹⁹ A Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra durante a segunda metade do século XVIII, representou uma profunda transformação nos modos de produção, nas relações de trabalho e na organização econômica das sociedades modernas. Sua emergência esteve diretamente relacionada à introdução da máquina a vapor, à mecanização da indústria têxtil, à ampliação da mineração de carvão e ferro e à consolidação do sistema fabril, fatores que alteraram radicalmente o ritmo da produção e deslocaram o trabalho artesanal para formas industriais centralizadas. Além disso, esse processo inaugurou novas dinâmicas urbanas, intensificou o êxodo rural e consolidou o capitalismo industrial como modelo dominante de organização econômica. Hobsbawm afirma que a Revolução

o tempo de trabalho e subordinando o ritmo humano à lógica das máquinas. Posteriormente, a eletrificação e a produção em massa ampliaram a capacidade industrial e consolidaram modelos produtivos fundamentados na padronização e na racionalização operacional, sobretudo a partir das contribuições do fordismo e do taylorismo para a administração científica da produção. Nesse movimento histórico, a tecnologia deixou de atuar apenas como instrumento auxiliar e passou a estruturar diretamente os modos de organização social, econômica e produtiva. De forma complementar, a incorporação da microeletrônica, da informática e das telecomunicações durante a Terceira Revolução Industrial²⁰ intensificou processos de automação e integração global das cadeias produtivas, permitindo que a informação se tornasse um ativo estratégico para a competitividade industrial. Schwab afirma que “[...] a quarta revolução industrial não diz respeito apenas a sistemas e máquinas inteligentes e conectadas” (2016, p. 16), porque seu avanço também envolve alterações profundas nas formas de produção, circulação econômica e interação social mediadas por tecnologias digitais. Ao mesmo tempo, a ampliação da capacidade computacional, associada ao desenvolvimento da internet industrial, da inteligência artificial e dos sistemas ciberfísicos, consolidou as bases estruturais da chamada Indústria 4.0²¹, caracterizada pela

Industrial “[...] assinala a mais radical transformação da vida humana já registrada em documentos escritos” (1982, p. 45), evidenciando que as mudanças ocorridas não foram apenas técnicas, mas também sociais, culturais e políticas. Paralelamente, Thompson (1998) demonstra que a industrialização produziu novas formas de disciplina do tempo e do trabalho, reorganizando a vida cotidiana segundo a lógica da produtividade e da racionalização fabril. Nesse horizonte, a Primeira Revolução Industrial não pode ser compreendida apenas como avanço tecnológico, pois ela também estruturou desigualdades sociais, redefiniu a divisão internacional do trabalho e lançou as bases históricas das transformações produtivas que mais tarde culminariam nas revoluções industriais subsequentes. Ver: Hobsbawm, Eric J. Da revolução industrial inglesa ao imperialismo. 4. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1982. Thompson, Edward P. A formação da classe operária inglesa: a árvore da liberdade. 3. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1998.

²⁰ A Terceira Revolução Industrial, também conhecida como Revolução Técnico-Científica-Informacional, consolidou-se a partir da segunda metade do século XX e foi marcada pela integração entre informática, automação, microeletrônica, telecomunicações, robótica e tecnologias digitais aplicadas aos processos produtivos. Diferentemente das revoluções industriais anteriores, centradas predominantemente na mecanização e na produção em massa, essa nova etapa passou a operar com base na informação, na velocidade dos fluxos comunicacionais e na automação inteligente das cadeias produtivas. A introdução dos computadores, da internet, dos sistemas digitais de controle e da produção flexível modificou profundamente as relações de trabalho, a logística global, o setor financeiro e a dinâmica organizacional das empresas. Castells (1999, p. 68) afirma que “[...] a tecnologia da informação é para esta revolução o que as novas fontes de energia foram para as revoluções industriais sucessivas”, demonstrando que o conhecimento e a informação passaram a ocupar posição estratégica no capitalismo contemporâneo. Paralelamente, Harvey destaca que a acumulação flexível rompeu com os modelos rígidos do fordismo, promovendo maior fragmentação produtiva, terceirização e reorganização global da produção (2008). Nesse cenário, a Terceira Revolução Industrial não apenas intensificou a capacidade tecnológica das indústrias, mas também ampliou processos de globalização econômica, flexibilização do trabalho e dependência crescente das tecnologias digitais nas atividades humanas e produtivas. Ver: Castells, Manuel. A sociedade em rede. 6. ed. São Paulo: Paz e Terra, 1999. Harvey, David. Condição pós-moderna: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural. 17. ed. São Paulo: Loyola, 2008.

²¹ A chamada Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração entre sistemas ciberfísicos, inteligência artificial, internet das coisas (IoT), big data, computação em nuvem, aprendizado de máquina e automação avançada, configurando uma nova etapa da transformação industrial baseada na conectividade inteligente e na digitalização dos processos

integração contínua entre automação, conectividade e análise inteligente de dados em tempo real. Em outras palavras, não se trata apenas de substituir trabalho manual por sistemas automatizados, mas de reorganizar integralmente os fluxos produtivos a partir de infraestruturas digitais capazes de interligar máquinas, sensores, softwares e plataformas decisórias dentro de um mesmo ecossistema operacional. Anderson (1983, p. 35) pontua que “[...] cada nova tecnologia produtiva altera não apenas os métodos de fabricação, mas também as formas de organização do trabalho e da vida social”, aspecto que ajuda a interpretar por que a emergência da Indústria 4.0 ultrapassa o campo estritamente técnico e alcança dimensões econômicas, organizacionais e humanas bastante amplas. Dessa forma, a digitalização produtiva contemporânea representa uma continuidade histórica das revoluções industriais anteriores, embora apresente uma diferença estrutural importante relacionada à velocidade das transformações, à conectividade permanente dos sistemas e à capacidade das tecnologias inteligentes tomarem decisões operacionais de maneira parcialmente autônoma. A própria ideia de fábrica passa, então, a assumir novas configurações, nas quais produção, dados, logística e gestão deixam de funcionar de maneira isolada e passam a operar em redes integradas de informação, modificando progressivamente o papel do trabalhador, das empresas e da própria dinâmica industrial global.

Essas tecnologias emergentes não constituem apenas avanços incrementais das tecnologias digitais atuais. As tecnologias da Quarta Revolução Industrial são verdadeiramente disruptivas – elas alteram profundamente as formas existentes de perceber, calcular, organizar, agir e produzir. Representam maneiras inteiramente novas de criar valor para organizações e cidadãos. Com o tempo, transformarão todos os sistemas que hoje consideramos naturais – desde a forma como produzimos e transportamos bens e serviços até os modos pelos quais nos comunicamos, colaboramos e experienciamos o mundo ao nosso redor (Schwab; Nadella; Davis, 2018, p. 8-9, tradução nossa).

produtivos. Diferentemente das fases anteriores da industrialização, a Indústria 4.0 opera por meio da comunicação contínua entre máquinas, sensores, softwares e plataformas digitais, permitindo monitoramento em tempo real, produção descentralizada, manutenção preditiva e maior flexibilidade produtiva. Esse modelo amplia significativamente a capacidade de coleta e análise de dados, tornando os sistemas produtivos mais autônomos, eficientes e integrados globalmente. Schwab afirma que a Quarta Revolução Industrial “[...] é caracterizada por uma fusão de tecnologias que está confundindo as linhas entre as esferas física, digital e biológica” (2016, p. 16, tradução nossa), evidenciando que suas transformações extrapolam o espaço industrial e alcançam diferentes dimensões da vida social e econômica. Ao mesmo tempo, Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) destacam que a digitalização inteligente das fábricas redefine as formas de gestão, logística e tomada de decisão, promovendo cadeias produtivas cada vez mais automatizadas e interconectadas. Nesse contexto, a Indústria 4.0 não representa apenas um avanço tecnológico, mas uma reestruturação profunda do capitalismo contemporâneo, marcada pela centralidade dos dados, pela automação cognitiva e pela reorganização global do trabalho e da produção. Ver: Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt: National Academy of Science and Engineering, 2013; Schwab, Klaus. A quarta revolução industrial. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

Na base dessas transformações, à medida que os sistemas industriais passaram a operar sob fluxos contínuos de informação digital, os ambientes fabris deixaram de depender exclusivamente de estruturas mecânicas isoladas e passaram a funcionar como redes integradas de comunicação operacional, nas quais máquinas, sensores, softwares e plataformas analíticas interagem de maneira permanente dentro do processo produtivo. Essa transformação alterou profundamente o modo como as empresas organizam produção, logística, armazenamento e monitoramento técnico, porque a circulação instantânea de dados passou a permitir respostas operacionais muito mais rápidas diante de oscilações de demanda, falhas técnicas e alterações nas cadeias de suprimento. Além disso, a incorporação da internet industrial das coisas ampliou significativamente a capacidade de rastreamento e supervisão das operações produtivas, uma vez que equipamentos industriais passaram a transmitir informações em tempo real sobre desempenho, consumo energético, temperatura, desgaste mecânico e produtividade. Essa dinâmica redefine o próprio conceito de “eficiência industrial”, já que o desempenho produtivo deixa de depender apenas da capacidade física das máquinas e passa a envolver velocidade de processamento informacional, integração sistêmica e capacidade analítica baseada em dados contínuos. Daugherty e Wilson afirmam que “[...] os sistemas inteligentes estão transformando organizações em estruturas capazes de aprender continuamente com seus próprios processos” (2018, p. 42), aspecto que ajuda a analisar por que as fábricas inteligentes operam cada vez mais por meio de mecanismos autônomos de ajuste operacional e previsão de falhas. Em consequência disso, atividades anteriormente realizadas a partir de verificações humanas periódicas passaram a ser executadas automaticamente por plataformas digitais capazes de detectar anomalias antes mesmo da interrupção do sistema produtivo. Em muitos setores industriais, por exemplo, sensores inteligentes já conseguem identificar vibrações incomuns em motores, variações térmicas em linhas automatizadas e alterações no desempenho energético de equipamentos, permitindo intervenções preventivas que reduzem perdas produtivas e minimizam paralisações operacionais. Sob essa lógica, a conectividade permanente não atua apenas como ferramenta auxiliar da produção, mas como elemento estruturante da própria organização industrial contemporânea. Kumar, Kumar e Pandey (2026, p. 77) pontuam que “[...] a fábrica inteligente depende da capacidade de integração total entre dispositivos físicos, análise de dados e comunicação digital em tempo real”, condição que evidencia a crescente centralidade dos sistemas informacionais dentro das estratégias industriais contemporâneas. Enquanto isso, o processamento massivo de dados industriais também amplia a capacidade de coordenação logística entre fornecedores,

centros de distribuição e unidades produtivas localizadas em diferentes regiões do mundo, permitindo sincronização operacional em escalas anteriormente inviáveis. Não apenas a produção interna é reorganizada, mas também os fluxos externos relacionados ao transporte, armazenamento e reposição de componentes passam a operar mediante plataformas digitais integradas, reduzindo estoques ociosos e acelerando ciclos produtivos. Paralelamente, a consolidação das fábricas inteligentes introduz novos padrões de controle operacional, nos quais produtividade, desempenho técnico e tomada de decisão tornam-se crescentemente orientados por sistemas automatizados de monitoramento contínuo. Isso modifica o papel da supervisão humana dentro da indústria, pois decisões que antes dependiam exclusivamente da experiência operacional dos trabalhadores passam a ser parcialmente mediadas por algoritmos analíticos e plataformas preditivas, ampliando tanto a eficiência produtiva quanto a dependência tecnológica das organizações industriais diante das infraestruturas digitais que sustentam essa nova configuração produtiva.

Logo, dentro da configuração produtiva associada à Indústria 4.0, a inteligência artificial passou a ocupar uma posição estratégica na coordenação de operações industriais, porque os sistemas produtivos deixaram de atuar apenas mediante comandos previamente programados e passaram a operar a partir da interpretação contínua de dados, reconhecimento de padrões operacionais e capacidade de adaptação automatizada diante de alterações produtivas. A expansão dos algoritmos de aprendizado de máquina introduziu uma mudança significativa na maneira como decisões industriais são realizadas, visto que plataformas inteligentes conseguem processar volumes massivos de informações em velocidades superiores à capacidade humana de análise, identificando tendências, falhas e variações produtivas em tempo real. Em razão desse processo, processos industriais anteriormente dependentes de supervisão constante passaram a incorporar sistemas autônomos capazes de ajustar parâmetros operacionais sem necessidade de intervenção direta dos trabalhadores. Floridi (2014, p. 13) afirma que “[...] estamos entrando em uma era na qual decisões e ações passam a ser compartilhadas com agentes artificiais inteligentes”, perspectiva que ajuda a perceber a crescente presença da inteligência algorítmica dentro dos ambientes industriais contemporâneos. Dito isso, essa reorganização não se limita ao interior das fábricas, pois cadeias logísticas globais também passaram a funcionar mediante sistemas automatizados de previsão de demanda, roteirização dinâmica de transporte e gerenciamento inteligente de estoques. Empresas industriais de grande porte, por exemplo, já utilizam algoritmos capazes de recalcular rotas logísticas instantaneamente diante de alterações

climáticas, interrupções portuárias ou oscilações de mercado, reduzindo atrasos e minimizando custos operacionais. Simultaneamente, softwares analíticos passaram a integrar setores antes fragmentados, conectando produção, armazenamento, distribuição e consumo dentro de plataformas digitais unificadas. Isto é, “[...] a inteligência artificial redefine a natureza da vantagem competitiva ao transformar dados em capacidade decisória automatizada”, afirmam Brynjolfsson e McAfee (2014, p. 89), aspecto que evidencia a centralidade dos sistemas inteligentes na reorganização das estratégias industriais contemporâneas. Com isso, a automação industrial deixa de representar apenas substituição de tarefas repetitivas e passa a envolver processamento cognitivo aplicado à tomada de decisão operacional. Há, portanto, uma ampliação qualitativa da automação, já que os sistemas inteligentes conseguem interpretar informações, antecipar cenários e executar respostas operacionais com relativa autonomia. Em linhas produtivas altamente digitalizadas, algoritmos já conseguem reorganizar fluxos de produção conforme oscilações de demanda, redistribuir cargas operacionais entre máquinas e ajustar ritmos produtivos de acordo com níveis de consumo energético e disponibilidade logística. Essa capacidade de adaptação contínua altera profundamente as relações entre humanos e máquinas dentro da indústria, porque os trabalhadores passam a atuar em ambientes nos quais decisões relevantes são parcialmente compartilhadas com sistemas algorítmicos. A interação homem máquina assume, então, uma configuração mais complexa, marcada pela coexistência entre conhecimento técnico humano e inteligência operacional automatizada.

No entanto, embora a digitalização industrial tenha ampliado eficiência operacional, capacidade analítica e integração produtiva, o avanço acelerado da automação também passou a produzir tensões sociais e laborais cada vez mais perceptíveis dentro das estruturas industriais contemporâneas. A incorporação intensiva de sistemas inteligentes alterou profundamente o modo como o trabalho é organizado, supervisionado e avaliado, principalmente porque atividades anteriormente executadas por trabalhadores passaram a ser absorvidas por softwares, algoritmos e equipamentos autônomos capazes de operar continuamente sob padrões elevados de produtividade. Esse quadro introduz uma mudança importante no equilíbrio histórico entre tecnologia e trabalho humano, pois a automação deixa de funcionar apenas como instrumento de apoio operacional e passa a disputar diretamente espaços ocupacionais em diferentes níveis da cadeia produtiva. Antunes (2018, p. 41) afirma que “[...] o capital informacional digital amplia formas de trabalho precarizadas ao mesmo tempo em que intensifica mecanismos de controle e exploração”, aspecto que ajuda reconhecer por que a hiperautomatização industrial não produz

somente ganhos de eficiência, mas também insegurança profissional e reorganização desigual das relações laborais. A substituição de funções repetitivas por sistemas automatizados atinge especialmente trabalhadores vinculados a tarefas operacionais padronizadas, reduzindo a necessidade de determinadas ocupações industriais e ampliando a exigência por qualificação tecnológica contínua. Em diversas plantas produtivas altamente automatizadas, linhas de montagem que anteriormente exigiam centenas de operadores passaram a funcionar mediante células robotizadas supervisionadas por equipes reduzidas, responsáveis principalmente pela programação, manutenção e monitoramento digital dos sistemas. Ao lado disso, a ampliação da conectividade industrial fortaleceu novas formas de vigilância laboral baseadas em coleta contínua de dados sobre desempenho, produtividade e comportamento dos trabalhadores. Desse jeito, “[...] tecnologias digitais permitem um monitoramento contínuo que transforma comportamento humano em fonte permanente de dados econômicos”, afirma Zuboff (2019, p. 112), discussão que evidencia como a lógica informacional da Indústria 4.0 amplia a capacidade empresarial de controle sobre o ambiente produtivo. Em decorrência disso, a pressão por desempenho tende a crescer de maneira significativa, sobretudo em organizações industriais que operam mediante métricas automatizadas de produtividade e eficiência operacional. A aceleração dos fluxos produtivos também contribui para ampliar desgaste físico e cognitivo dos trabalhadores, já que a velocidade de processamento dos sistemas inteligentes frequentemente redefine ritmos laborais de maneira incompatível com limites humanos de atenção contínua e adaptação permanente. Em ambientes produtivos altamente conectados, trabalhadores precisam lidar simultaneamente com múltiplas interfaces digitais, atualizações operacionais constantes e exigências crescentes de resposta imediata diante de falhas ou oscilações produtivas. Há, portanto, uma mudança importante na natureza do trabalho industrial contemporâneo, marcada pela transição de atividades predominantemente físicas para funções caracterizadas por supervisão tecnológica contínua, pressão informacional e necessidade permanente de adaptação cognitiva. Esse contexto também contribui para o enfraquecimento progressivo da centralidade humana nos sistemas produtivos, uma vez que decisões operacionais passam a ser crescentemente orientadas por parâmetros algorítmicos associados à produtividade, eficiência e desempenho técnico, deslocando parte significativa da autonomia decisória anteriormente concentrada na experiência prática dos trabalhadores industriais.

Trabalhadores inseridos em ‘ambientes simbolicamente mediados’ possuem necessidades muito diferentes daqueles situados em ambientes mecânicos. Descrevendo

uma fábrica automatizada de celulose, Hirschhorn escreve: ‘os operadores estavam envolvidos em um trabalho de segunda ordem, isto é, na gestão da novidade, mesmo à medida que a maquinaria da produção se tornava mais automatizada e o processo mais contínuo’ (Hirschhorn, 1984, p. 100). Esse tipo de atividade exige uma redefinição do trabalho como processo que mobiliza tanto as capacidades do trabalhador quanto a própria maquinaria da produção. Aprendizagem e trabalho passam a se fundir nesse novo ambiente técnico. Zuboff argumenta que a herança do taylorismo constitui o principal obstáculo para essa redefinição do trabalho. A nova abordagem do trabalho não se ajusta facilmente à lógica gerencial, cuja própria existência está enraizada na expropriação das habilidades (Feenberg, 2002, p. 94-95, tradução nossa).

Isso se torna ainda mais evidente quando, frente às tensões produzidas pela hiperautomatização industrial, começou a ganhar força uma perspectiva produtiva orientada pela tentativa de reequilibrar eficiência tecnológica e valorização humana dentro dos ambientes industriais contemporâneos. A formulação da chamada Indústria 5.0²² surge justamente nesse cenário de críticas relacionadas à intensificação da automação, ao aumento da dependência algorítmica e à ampliação de impactos sociais associados à reorganização digital da produção. Diferentemente da lógica predominante na Indústria 4.0, centrada, sobretudo, em conectividade, velocidade operacional e integração automatizada, a Indústria 5.0 procura incorporar elementos ligados à colaboração entre humanos e máquinas inteligentes, à sustentabilidade produtiva e à construção de sistemas industriais mais adaptáveis às necessidades sociais e ambientais. Schwab, Nadella e Davis afirmam que “[...] o futuro da indústria dependerá da capacidade de combinar tecnologia avançada com valores humanos” (2018, p. 58), discussão que ajuda a examinar por que o debate industrial contemporâneo passou a incluir temas relacionados à ética tecnológica, responsabilidade social e centralidade do trabalhador. Esse reposicionamento não implica abandono da automação avançada, da inteligência artificial ou dos sistemas digitais integrados, mas propõe que essas tecnologias sejam reorganizadas dentro de estruturas produtivas mais

²² A Indústria 5.0 representa uma nova etapa do desenvolvimento industrial caracterizada pela integração entre tecnologias avançadas e centralidade humana nos processos produtivos. Diferentemente da Indústria 4.0, cuja ênfase esteve concentrada na automação, na conectividade digital, na inteligência artificial e nos sistemas ciberfísicos voltados à maximização da eficiência produtiva, a Indústria 5.0 busca reposicionar o ser humano como elemento estratégico da produção, valorizando colaboração entre trabalhadores e máquinas inteligentes, sustentabilidade ambiental, personalização produtiva e responsabilidade social. Nesse modelo, tecnologias como robótica colaborativa, inteligência artificial, internet das coisas e análise de dados continuam presentes, porém articuladas a princípios voltados ao bem-estar humano, à resiliência industrial e à produção sustentável. Além disso, enquanto a Indústria 4.0 priorizou produtividade, velocidade operacional e integração digital das fábricas, a Indústria 5.0 amplia essa lógica ao incorporar preocupações éticas, sociais e ambientais dentro da dinâmica industrial contemporânea. De acordo com a Comissão Europeia, a Indústria 5.0 “[...] fornece uma visão da indústria que visa além da eficiência e produtividade como os únicos objetivos, reforçando o papel e a contribuição da indústria para a sociedade” (European Commission, 2021, p. 14, tradução nossa), aspecto que evidencia a tentativa de equilibrar inovação tecnológica, desenvolvimento econômico e valorização humana no ambiente produtivo. Ver: European commission. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

colaborativas e menos orientadas exclusivamente pela substituição da atividade humana. Com base nisso, “[...] a Indústria 5.0 busca devolver ao trabalhador um papel criativo e estratégico nos sistemas produtivos inteligentes”, afirmam Nayyar e Kumar (2020, p. 94), aspecto que evidencia a tentativa de redefinir as relações entre automação e trabalho humano em ambientes industriais altamente digitalizados. Dito isso, grandes empresas do setor manufatureiro, por exemplo, já vêm incorporando sistemas produtivos orientados pela redução de desperdícios, reaproveitamento energético e customização produtiva baseada em demandas específicas dos consumidores, integrando inteligência artificial e sustentabilidade operacional dentro de um mesmo processo organizacional. Fora isso, cresce a percepção de que sistemas industriais extremamente automatizados continuam dependendo de capacidades humanas relacionadas à criatividade, interpretação contextual, tomada de decisão complexa e resolução de situações imprevistas que ainda apresentam elevada dificuldade de automatização integral. Essa compreensão fortalece a ideia de cooperação entre trabalhadores e sistemas inteligentes, substituindo parcialmente a lógica anterior fundamentada na eliminação progressiva da intervenção humana. A partir dessa perspectiva, robôs colaborativos, plataformas analíticas e sistemas autônomos passam a funcionar como ferramentas de apoio operacional integradas à capacidade cognitiva humana, e não apenas como instrumentos de substituição ocupacional. Nesse ambiente produtivo mais complexo, flexibilidade operacional, adaptação humana e inteligência colaborativa passam a ser incorporadas como componentes estratégicos da competitividade industrial contemporânea.

Ao invés de apreender o trabalhador apenas como operador subordinado às rotinas automatizadas da produção, a Indústria 5.0 passa a enfatizar a importância das capacidades humanas que continuam apresentando elevada relevância diante dos limites operacionais dos sistemas artificiais. A reorganização industrial contemporânea começa, então, a valorizar competências associadas à criatividade, interpretação contextual, tomada de decisão em cenários imprevisíveis e resolução de problemas complexos que exigem articulação entre experiência prática, análise crítica e adaptação contínua. Essa mudança decorre, em parte, do reconhecimento de que ambientes produtivos altamente digitalizados continuam dependendo da intervenção humana para lidar com situações que ultrapassam padrões previamente programados pelos sistemas automatizados. Daugherty e Wilson (2018) afirmam que “[...] as máquinas não substituem completamente as capacidades humanas, mas ampliam possibilidades de colaboração cognitiva” (p. 103), discussão que ajuda a entender por que a centralidade do trabalho humano permanece relevante mesmo em sistemas industriais intensamente automatizados. A partir dessa

reorganização produtiva, o trabalhador deixa de ser percebido apenas como executor operacional e passa a assumir funções relacionadas à supervisão estratégica, coordenação tecnológica e interpretação de informações produzidas pelos sistemas inteligentes. Em linhas produtivas conectadas digitalmente, por exemplo, profissionais precisam analisar dados operacionais em tempo real, interpretar alertas gerados por plataformas analíticas e tomar decisões rápidas diante de oscilações produtivas que exigem respostas não previstas integralmente pelos algoritmos industriais. Esse reposicionamento também amplia a valorização de competências associadas à comunicação interpessoal, cooperação técnica e inteligência emocional, sobretudo porque ambientes industriais integrados demandam crescente articulação entre equipes multidisciplinares responsáveis por programação, engenharia, análise de dados e gestão operacional. Sob esse entendimento, “[...] o trabalho do futuro dependerá cada vez mais de habilidades humanas difíceis de replicar artificialmente”, afirma Harari (2019, p. 56), aspecto que evidencia a importância estratégica das capacidades cognitivas e relacionais dentro das novas configurações produtivas. Em paralelo a isso, cresce a necessidade de profissionais capazes de interagir continuamente com sistemas inteligentes sem perder autonomia analítica diante das decisões automatizadas. Essa condição altera significativamente a natureza do trabalho industrial, já que os trabalhadores passam a atuar em ambientes nos quais a interpretação crítica das informações se torna tão relevante quanto o domínio técnico das ferramentas digitais. Por consequência, a capacidade de identificar inconsistências operacionais, questionar resultados automatizados e adaptar processos produtivos diante de cenários imprevistos passa a ocupar posição estratégica dentro das organizações industriais contemporâneas. Em plantas industriais que utilizam robôs colaborativos, por exemplo, operadores precisam ajustar continuamente parâmetros produtivos conforme características específicas de cada processo, estabelecendo relações de cooperação operacional entre inteligência humana e sistemas automatizados. Essa interação colaborativa redefine o significado da produtividade industrial, pois eficiência deixa de depender exclusivamente da velocidade operacional das máquinas e passa a envolver também capacidade humana de coordenação, adaptação e tomada de decisão em ambientes produtivos altamente complexos. O trabalhador, portanto, não desaparece dentro da lógica da automação avançada, mas passa a ocupar funções progressivamente vinculadas à interpretação estratégica, supervisão tecnológica e mediação entre inteligência artificial e dinâmica organizacional das fábricas inteligentes.

Em meio à consolidação das fábricas inteligentes e dos sistemas produtivos orientados por dados, o perfil profissional exigido pelas organizações industriais passou por mudanças profundas, principalmente porque o domínio técnico tradicional deixou de ser suficiente diante da crescente integração entre inteligência artificial, automação avançada e plataformas digitais de gestão operacional. A indústria contemporânea demanda trabalhadores capazes de interpretar informações complexas, operar tecnologias conectadas e adaptar rapidamente suas competências às constantes mudanças introduzidas pelos sistemas inteligentes de produção. Esse processo altera significativamente a relação entre formação profissional e atividade industrial, pois o conhecimento técnico passa a exigir atualização contínua em razão da velocidade com que softwares, plataformas analíticas e ferramentas digitais são incorporados aos ambientes produtivos. Segundo Davenport (2018), “[...] organizações orientadas por inteligência artificial dependem de trabalhadores capazes de aprender continuamente e interpretar dados de maneira estratégica” (p. 71), condição que evidencia a crescente valorização de competências cognitivas e analíticas dentro da indústria digitalizada. Nesse cenário produtivo, habilidades ligadas exclusivamente à repetição operacional tendem a perder relevância relativa, enquanto capacidades relacionadas à resolução de problemas, interpretação de sistemas automatizados e integração interdisciplinar passam a ocupar papel central nas estratégias empresariais. A formação profissional, portanto, deixa de ser compreendida como processo concluído antes da inserção no mercado de trabalho e passa a funcionar como dinâmica permanente de atualização tecnológica e adaptação cognitiva. Essa situação, por sua vez, afeta tanto trabalhadores operacionais quanto profissionais ligados à engenharia, gestão, logística e planejamento industrial, já que todos precisam interagir continuamente com plataformas digitais, sistemas inteligentes e fluxos automatizados de informação. Frente a isso, “[...] o futuro do trabalho industrial dependerá da capacidade humana de combinar conhecimento técnico com adaptação intelectual contínua”, afirmam Machado e Davim (2023, p. 118), discussão que ajuda a assimilar a crescente demanda por perfis profissionais flexíveis e multidisciplinares. A ampliação dessa exigência também produz impactos importantes sobre instituições educacionais e programas de capacitação técnica, uma vez que modelos tradicionais de formação baseados em conteúdos estáticos passam a apresentar dificuldades diante da velocidade das transformações tecnológicas contemporâneas. Essa configuração amplia a necessidade de formação interdisciplinar orientada não apenas ao domínio tecnológico, mas também à capacidade humana de adaptação diante de ambientes produtivos marcados por mudanças contínuas. O aprendizado permanente passa,

então, a integrar a própria lógica de funcionamento da indústria inteligente, já que a competitividade organizacional depende cada vez mais da rapidez com que trabalhadores e empresas conseguem absorver novos conhecimentos tecnológicos. Essa reorganização da qualificação profissional também evidencia que o avanço da automação não elimina a necessidade de intervenção humana qualificada, mas desloca progressivamente a relevância do trabalho para atividades associadas à interpretação, supervisão, adaptação cognitiva e integração estratégica entre inteligência humana e sistemas produtivos digitais.

A Indústria 5.0, introduzida pela Comissão Europeia em 2021, marca a ‘Quinta Revolução Industrial’. Ela representa um novo conceito industrial que enfatiza a colaboração entre humanos e máquinas, a sustentabilidade e a produção personalizada. Ao integrar a criatividade humana aos sistemas inteligentes, busca promover uma modernização abrangente da manufatura, remodelando seu futuro e influenciando profundamente a economia global. Da Indústria 1.0 à Indústria 5.0, o setor industrial transformou mecanização, eletrificação e automação em inteligência e colaboração humano-máquina. Cada revolução impulsionou melhorias na eficiência produtiva e na flexibilidade, direcionando gradualmente a atenção para a sustentabilidade ambiental (Leong et al., 2024, p. 417, tradução nossa).

Nesta linha, considerando os impactos ambientais associados aos modelos industriais altamente intensivos em consumo energético e exploração de recursos naturais, a Indústria 5.0 passou a incorporar preocupações relacionadas à sustentabilidade produtiva como parte estratégica da reorganização tecnológica contemporânea. A discussão industrial deixa, gradualmente, de concentrar-se exclusivamente em produtividade e eficiência operacional e passa a incluir questões ligadas à redução de desperdícios, racionalização energética, reutilização de materiais e diminuição dos impactos ambientais provocados pelas cadeias produtivas globais. Esse reposicionamento decorre também da crescente pressão econômica, regulatória e social sobre empresas industriais diante de problemas relacionados às mudanças climáticas, emissão de poluentes e degradação ambiental produzida por modelos produtivos historicamente orientados pela expansão contínua do consumo material. Verbeek (2011, p. 143) afirma que “[...] as tecnologias não são neutras, pois moldam práticas sociais, ambientais e formas de organização humana”, discussão que ajuda a verificar por que os sistemas industriais contemporâneos passaram a incorporar critérios ambientais dentro das estratégias tecnológicas e produtivas. Em razão disso, empresas industriais começaram a investir em sistemas inteligentes voltados ao monitoramento energético, reaproveitamento de resíduos e otimização automatizada do consumo de recursos naturais. Plataformas digitais integradas já conseguem, por exemplo, recalcular padrões de produção com base no gasto energético de máquinas, reduzir desperdícios de matéria-

prima e reorganizar fluxos operacionais visando menor impacto ambiental ao longo das cadeias produtivas. A incorporação da inteligência artificial nesse processo também amplia a capacidade das organizações de prever consumo energético, monitorar emissões e ajustar operações industriais conforme parâmetros ambientais previamente definidos. Rifkin afirma que “[...] a próxima fase da indústria dependerá da capacidade de integrar inovação tecnológica e sustentabilidade econômica” (2014, p. 221), aspecto que evidencia a crescente articulação entre competitividade industrial e responsabilidade ambiental dentro dos sistemas produtivos inteligentes. Em associação a isso, a responsabilidade social corporativa passa a ocupar posição mais relevante dentro das estratégias empresariais, sobretudo porque a automação intensiva e a reorganização digital do trabalho produziram debates relacionados à exclusão ocupacional, desigualdade tecnológica e precarização laboral. Em articulação com esse processo, cresce também a valorização da produção personalizada, característica fortemente associada às capacidades tecnológicas da Indústria 5.0; sistemas produtivos inteligentes permitem fabricação flexível e adaptação rápida às demandas específicas dos consumidores, reduzindo estoques excessivos e diminuindo desperdícios associados à produção padronizada em larga escala. Em fábricas digitalmente integradas, algoritmos e plataformas automatizadas conseguem ajustar parâmetros produtivos conforme características individuais dos pedidos, ampliando customização sem comprometer eficiência operacional. Essa capacidade de personalização altera significativamente a lógica tradicional da produção industrial, historicamente baseada em grandes escalas padronizadas e baixa flexibilidade produtiva. A reorganização promovida pela Indústria 5.0 passa, então, a associar inovação tecnológica, sustentabilidade operacional e adaptação produtiva dentro de um mesmo modelo industrial, no qual eficiência econômica deixa de ser analisada de maneira isolada e passa a envolver também impactos ambientais, relações sociais e capacidade de resposta às novas exigências associadas à dinâmica produtiva contemporânea.

Diante da ampliação dos sistemas produtivos inteligentes e da crescente integração entre automação avançada, inteligência artificial e conectividade industrial, o presente estudo tem como objeto de análise a transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, concentrando-se especialmente nos impactos produzidos sobre os processos produtivos e sobre o trabalho humano nas organizações industriais contemporâneas. A escolha desse objeto decorre da percepção de que as mudanças tecnológicas atualmente em curso não alteram apenas ferramentas operacionais ou métodos de fabricação, mas reconfiguram profundamente formas de gestão, relações laborais, exigências profissionais e critérios utilizados para definir eficiência industrial. O avanço das

fábricas inteligentes, dos sistemas autônomos e das plataformas digitais integradas passou a produzir alterações relevantes tanto na estrutura técnica da produção quanto na maneira pela qual trabalhadores se inserem dentro dos ambientes industriais altamente automatizados. Em meio a esse cenário, esse processo envolve mudanças relacionadas à tomada de decisão operacional, reorganização logística, controle digital da produtividade, adaptação profissional contínua e redefinição das interações entre humanos e sistemas inteligentes. Nessa direção, o problema central que orienta esta pesquisa está relacionado à seguinte questão: de que maneira a transição para a Indústria 5.0 reconfigura os processos produtivos e quais são seus efeitos sobre o papel, as condições e a centralidade do trabalho humano na indústria contemporânea? A formulação dessa problemática torna-se particularmente relevante porque a literatura sobre automação industrial frequentemente concentra suas análises nos ganhos de produtividade e eficiência tecnológica, deixando em segundo plano os impactos sociais, organizacionais e humanos associados à reorganização digital da produção. Schwab (2016) pontua que “[...] a velocidade das transformações atuais não possui precedentes históricos e está modificando sistemas inteiros de produção, gestão e trabalho” (p. 12), perspectiva que evidencia a necessidade de análises capazes de avaliar a complexidade das mudanças industriais contemporâneas para além de interpretações estritamente técnicas. A relevância desta pesquisa também está associada ao fato de que a Indústria 5.0 começa a introduzir novas preocupações relacionadas à sustentabilidade produtiva, responsabilidade social corporativa e valorização das capacidades humanas dentro dos sistemas industriais inteligentes. Essa reconfiguração produtiva amplia debates relacionados à permanência do trabalho humano em ambientes automatizados, às exigências de qualificação contínua e às formas pelas quais trabalhadores passam a interagir com algoritmos, robôs colaborativos e sistemas autônomos de decisão operacional. Daugherty e Wilson (2018, p. 184) afirmam que “[...] a próxima etapa da evolução industrial dependerá da capacidade de harmonizar automação e potencial humano”, discussão que reforça a importância de investigar como a inteligência artificial e os sistemas digitais reorganizam simultaneamente produção, gestão e relações laborais. A pesquisa também se justifica pela necessidade de compreender os impactos da digitalização industrial sobre países e organizações inseridos em contextos econômicos marcados por desigualdades tecnológicas e desafios relacionados à qualificação profissional. A análise dessa transição industrial permite explicar não apenas mudanças operacionais associadas às fábricas inteligentes, mas também os efeitos mais amplos da automação sobre a centralidade

do trabalho humano, a reorganização das relações produtivas e os novos critérios que passam a orientar competitividade, inovação e sustentabilidade na indústria contemporânea.

METODOLOGIA: CAMINHOS ANALÍTICO-COMPREENSIVOS PARA A INTERPRETAÇÃO DA TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A 5.0

A pesquisa assumiu natureza qualitativa, pois buscou elucidar os impactos da transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0 sobre os processos produtivos, as relações de trabalho e as novas racionalidades organizacionais emergentes no capitalismo digital contemporâneo. Dessa forma, o objetivo do estudo não esteve voltado para a mensuração estatística dos fenômenos industriais, mas, sobretudo, para a interpretação dos sentidos econômicos, sociais, tecnológicos e subjetivos envolvidos na incorporação da inteligência artificial, da automação avançada e dos sistemas inteligentes conectados no interior das cadeias produtivas. Dito isso, procurou-se desvendar como a digitalização industrial reorganizou as formas de trabalho, redefiniu competências profissionais e intensificou mecanismos de monitoramento e adaptação contínua dos trabalhadores. Nessa direção, Minayo (2007) afirma que “[...] a pesquisa qualitativa responde a questões muito particulares” (p. 21), evidenciando que esse tipo de abordagem se dedica à compreensão de fenômenos humanos, sociais e simbólicos que não podem ser reduzidos apenas à quantificação numérica. Stake (2011, p. 11) ressalta que a pesquisa “[...] qualitativa significa que seu raciocínio se baseia principalmente na percepção e na compreensão humana”, aspecto que dialogou diretamente com a proposta desta investigação, uma vez que o estudo buscou interpretar compreensivamente os efeitos da automação inteligente sobre a experiência laboral, os modelos produtivos e os processos decisórios contemporâneos. Minayo (2007, p. 57) afirma que:

[...] a abordagem qualitativa se aprofunda no mundo dos significados das ações e relações humanas, um lado não perceptível e não captável em equações, médias e estatísticas. O universo da produção humana pode ser resumido no mundo das relações, das representações e da intencionalidade e é objeto da pesquisa qualitativa dificilmente traduzido em números e indicadores quantitativos.

Além disso, o estudo caracterizou-se como pesquisa bibliográfica e descritiva, tendo sido desenvolvido a partir da análise sistemática de livros clássico e contemporâneos relacionadas à Indústria 4.0, Indústria 5.0, inteligência artificial, automação industrial, trabalho digitalizado, sustentabilidade produtiva e reorganização tecnológica das cadeias industriais contemporâneas.

Assim, foram mobilizados autores clássicos da administração e da racionalização produtiva, como Taylor, Ford, Fayol, Weber, Drucker, Ohno e Deming, bem como pesquisadores contemporâneos que discutem inteligência artificial, capitalismo de plataforma, automação cognitiva e ética tecnológica. Do mesmo modo, a dimensão descritiva da pesquisa permitiu examinar características, transformações e impactos associados à digitalização industrial contemporânea, especialmente no que se refere à flexibilização produtiva, hiperadaptabilidade profissional e centralidade dos dados nos processos decisórios empresariais. Gil (2008) argumenta que “[...] as pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno” (p. 28), aspecto que orientou a construção analítica deste trabalho ao descrever os principais elementos estruturais da transição industrial contemporânea. Em outra direção metodológica, Prodanov e Freitas (2013, p. 51) afirmam que “[...] a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de material já publicado”, permitindo explorar que a articulação entre diferentes obras e referenciais teóricos constituiu o núcleo metodológico desta investigação.

Convém observar que o estudo adotou, ainda, um viés analítico-compreensivo inspirado na análise interpretativa de Weber, especialmente porque a pesquisa procurou interpretar os sentidos das transformações tecnológicas e suas repercussões sobre a racionalidade produtiva contemporânea. Nesse horizonte, não se analisou a automação apenas como avanço técnico, mas também como fenômeno social capaz de reorganizar subjetividades, formas de gestão, relações de poder e mecanismos de controle no interior das organizações industriais. Assim sendo, buscou-se evidenciar os efeitos da integração entre inteligência artificial, sistemas ciberfísicos e plataformas digitais sobre a centralidade do trabalho humano, as novas exigências de qualificação contínua e os processos de intensificação laboral característicos da economia digital. Weber (1949, p. 88) afirmou que “[...] a sociologia é uma ciência que pretende compreender interpretativamente a ação social”, perspectiva que fundamentou a interpretação das transformações produtivas investigadas neste artigo. Em diálogo com essa abordagem, Flick (2013) destacou que “[...] a pesquisa qualitativa estuda o conhecimento e as práticas dos participantes” (p. 23), permitindo delinear que os fenômenos tecnológicos contemporâneos precisam ser analisados também a partir de seus impactos simbólicos, organizacionais e humanos, e não apenas sob critérios operacionais ou econômicos.

Posteriormente, os procedimentos metodológicos envolveram leitura exploratória, leitura analítica, seleção temática do corpus teórico, categorização dos conteúdos e articulação

comparativa entre autores clássicos e contemporâneos que discutem indústria, tecnologia, automação e trabalho. Dessa maneira, o corpus investigativo foi organizado a partir de categorias analíticas como automação inteligente, sistemas ciberfísicos, inteligência artificial aplicada à indústria, trabalho digitalizado, hiperadaptabilidade profissional, monitoramento algorítmico, sustentabilidade produtiva, criatividade humana, cooperação homem-máquina e ética tecnológica. Além disso, a pesquisa buscou identificar convergências, tensões e contradições presentes nos modelos produtivos digitais contemporâneos, sobretudo naquilo que diz respeito à coexistência entre eficiência tecnológica e precarização subjetiva do trabalho. Minayo, Deslandes e Gomes (2007) afirmam que “[...] teoria, método e criatividade são os três ingredientes ótimos” (p. 16) para a construção do conhecimento científico, aspecto que orientou a articulação metodológica desta investigação. Já Flick (2013, p. 47) ressaltou que “[...] a pesquisa qualitativa parte da ideia de estudar os fenômenos em seu contexto natural”, permitindo inferir que os processos industriais contemporâneos precisaram ser analisados em articulação com seus contextos econômicos, sociais e organizacionais mais amplos.

Cabe ressaltar que o recorte epistemológico do estudo não compreendeu a tecnologia apenas como ferramenta técnica ou mecanismo operacional neutro, mas como fenômeno social, econômico, político, organizacional e subjetivo que interfere diretamente nas formas contemporâneas de trabalho e produção. Por isso, o artigo articulou contribuições de autores como Feenberg, Zuboff, Antunes, Sennett, Floridi e Verbeek para interpretar criticamente os impactos sociais da automação inteligente e da digitalização industrial. Fora isso, foram estabelecidos diálogos entre autores clássicos da organização industrial e pesquisadores contemporâneos da inteligência artificial e da economia digital, permitindo observar permanências e rupturas entre os modelos fordistas de racionalização produtiva e os atuais sistemas inteligentes hiperconectados. Nessa perspectiva, buscou-se investigar a reorganização das cadeias produtivas, a integração entre automação e inteligência artificial, o monitoramento digital do trabalho, as novas exigências de qualificação e os impactos subjetivos do trabalho hiperconectado. Segundo Minayo (2007), “[...] o objeto das Ciências Sociais é essencialmente qualitativo” (p. 57), aspecto que reforçou a necessidade de interpretar compreensivamente os sentidos humanos e sociais envolvidos nas transformações industriais contemporâneas. De maneira complementar, Stake (2011, p. 19) observou que “[...] a percepção e a interpretação são partes essenciais da pesquisa qualitativa”, fundamento que sustentou a leitura realizada sobre os processos de automação e reorganização produtiva analisados neste estudo. Flick (2013, p. 23)

destaca que:

[...] a pesquisa qualitativa dirige-se à análise de casos concretos em suas peculiaridades locais e temporais, partindo das expressões e atividades das pessoas em seus contextos locais. Portanto, a pesquisa qualitativa está interessada nas perspectivas dos participantes, em suas práticas do dia a dia e em seu conhecimento cotidiano relativo à questão em estudo.

Desse modo, é importante destacar que a análise do material ocorreu de maneira interpretativa, compreensiva, comparativa e interdisciplinar, permitindo examinar os limites, as possibilidades e as contradições presentes na transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0. Ainda assim, o estudo apresentou limitações inerentes à sua natureza bibliográfica, uma vez que não realizou pesquisa de campo, entrevistas ou coleta empírica direta com trabalhadores e organizações industriais. Logo, os resultados concentraram-se na interpretação compreensiva da literatura especializada e na articulação teórica entre diferentes correntes analíticas sobre tecnologia, trabalho e automação. Mesmo assim, a investigação buscou contribuir para os debates contemporâneos acerca do futuro do trabalho, sustentabilidade industrial, inteligência artificial e reorganização produtiva, interpretando a transição da Indústria 4.0 para a 5.0 não apenas como mudança tecnológica, mas como transformação estrutural das relações entre técnica, produção, subjetividade e sociedade. Nessa direção, Minayo e Deslandes (2002) afirmam que “[...] o método é o caminho do pensamento” (p. 14), evidenciando que as escolhas metodológicas orientam a própria construção do conhecimento científico. Em consonância com essa perspectiva, Gil (2008, p. 8) destacou que “[...] a pesquisa social requer procedimentos sistemáticos”, aspecto que fundamentou a organização analítica e interpretativa adotada ao longo desta investigação.

ANÁLISE DA TRANSIÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A 5.0 E SEUS IMPACTOS NOS PROCESSOS PRODUTIVOS E NO TRABALHO HUMANO

A reorganização tecnológica da produção industrial passou a depender de arquiteturas capazes de integrar processamento computacional, comunicação digital e tomada de decisão automatizada dentro de um mesmo ambiente operacional, modificando profundamente a lógica clássica das fábricas mecanizadas e dos sistemas produtivos rigidamente segmentados. Dessa forma, a chamada manufatura inteligente não pode ser compreendida apenas como incorporação de máquinas mais avançadas, porque sua estrutura repousa na criação de “ecossistemas industriais conectados”, nos quais sensores, softwares analíticos, dispositivos autônomos, bancos de dados

e sistemas físicos operam de maneira sincronizada e continuamente retroalimentada por fluxos de informação em tempo real. Isso altera não apenas a velocidade da produção, mas também a própria racionalidade organizacional da indústria, já que decisões operacionais deixam de depender exclusivamente da intervenção humana direta e passam a ocorrer mediante integração entre capacidades computacionais, monitoramento contínuo e análise automatizada de variáveis produtivas. Em outras palavras, os sistemas ciberfísicos constituem a base estrutural da Indústria 4.0 justamente porque articulam elementos materiais e digitais dentro de uma lógica operacional integrada, permitindo que equipamentos industriais “interpretem” dados do ambiente produtivo, ajustem parâmetros automaticamente e comuniquem informações entre diferentes setores da cadeia industrial. Daugherty e Wilson afirmam que “[...] os processos de trabalho tornam-se mais adaptáveis quando humanos e máquinas inteligentes passam a colaborar continuamente” (2018, p. 27), o que demonstra que a automação contemporânea não opera apenas pela substituição mecânica do trabalho humano, mas também pela reorganização inteligente das relações entre informação, produção e coordenação técnica. Além disso, essa arquitetura tecnológica cria condições para reduzir falhas operacionais, ampliar rastreabilidade e reorganizar fluxos industriais com maior capacidade de adaptação às oscilações da demanda, sobretudo em setores dependentes de elevada precisão logística e integração sistêmica, como indústrias automotivas, farmacêuticas, aeroespaciais e de semicondutores. Nesse cenário, sensores distribuídos ao longo das linhas produtivas capturam continuamente temperatura, vibração, consumo energético, desgaste mecânico, velocidade operacional e desempenho dos equipamentos, enquanto softwares analíticos processam esses dados quase instantaneamente para corrigir desvios e reconfigurar parâmetros produtivos. Isso permite que a fábrica deixe de funcionar como um conjunto fragmentado de setores isolados e passe a operar como uma rede dinâmica de comunicação técnica permanente. De igual maneira, a presença de sistemas ciberfísicos altera a própria noção de controle industrial, pois o monitoramento deixa de ocorrer apenas após a ocorrência do problema e passa a atuar preventivamente mediante identificação antecipada de padrões anormais de funcionamento. Maier e Rechtin explicam que “[...] arquiteturas de sistemas complexos dependem da capacidade de integrar múltiplos subsistemas em estruturas coordenadas e adaptativas” (2000, p. 14), aspecto fundamental para mapear por que a Indústria 4.0 exige integração contínua entre infraestrutura computacional, engenharia de sistemas e inteligência operacional. Dito isso, a produção industrial passa a depender de ambientes altamente conectados, nos quais a comunicação entre máquinas, softwares e operadores humanos ocorre de maneira

distribuída, simultânea e permanentemente atualizada. Isso produz impactos relevantes sobre planejamento da produção, gestão logística, manutenção industrial e organização do trabalho técnico, porque decisões antes tomadas de maneira hierárquica e linear passam a ser mediadas por sistemas automatizados capazes de responder rapidamente às mudanças operacionais. Enquanto isso, a expansão dessas arquiteturas tecnológicas exige novas competências profissionais relacionadas à interpretação de dados industriais, engenharia computacional, integração de sistemas e supervisão de processos automatizados complexos. Não se trata, portanto, apenas de modernização técnica da fábrica, mas de uma transformação estrutural da lógica produtiva, na qual informação, conectividade e capacidade analítica tornam-se elementos centrais da eficiência industrial contemporânea. É justamente nesse ponto que, a fábrica inteligente passa a operar sob uma lógica muito mais flexível, dinâmica e responsiva, aproximando engenharia de produção, ciência de dados e automação avançada dentro de um mesmo sistema operacional integrado.

Na Alemanha, há discussões sobre a ‘Indústria 4.0’, termo criado na Feira de Hannover em 2011 para descrever como isso revolucionará a organização das cadeias globais de valor. Ao possibilitar ‘fábricas inteligentes’, a quarta revolução industrial cria um mundo no qual sistemas virtuais e físicos de manufatura cooperam globalmente entre si de maneira flexível. Isso permite a customização absoluta dos produtos e a criação de novos modelos operacionais. Contudo, a quarta revolução industrial não se refere apenas a máquinas e sistemas inteligentes e conectados. Seu alcance é muito mais amplo. Ocorrem simultaneamente novas ondas de avanços em áreas que vão do sequenciamento genético à nanotecnologia, das energias renováveis à computação quântica (Schwab, 2016, p. 12-13, tradução nossa).

Enquanto os sistemas ciberfísicos estruturam a automação integrada das fábricas inteligentes, a Internet das Coisas Industrial²³ amplia a capacidade de comunicação contínua entre

²³ A Internet das Coisas Industrial, conhecida como Industrial Internet of Things (IIoT), corresponde à aplicação de dispositivos inteligentes, sensores, sistemas conectados e plataformas digitais nos ambientes industriais, permitindo comunicação em tempo real entre máquinas, equipamentos, softwares e cadeias produtivas. Esse modelo tecnológico possibilita monitoramento contínuo das operações, coleta massiva de dados, manutenção preditiva, automação inteligente e otimização dos processos produtivos, ampliando a eficiência operacional e reduzindo falhas industriais. Na prática, a IIoT integra sensores instalados em máquinas, sistemas de computação em nuvem, inteligência artificial e análise de dados para criar ambientes produtivos altamente conectados e responsivos. Além disso, a Internet das Coisas Industrial transforma significativamente a lógica da produção contemporânea, pois permite que equipamentos “conversem” entre si sem intervenção humana constante, favorecendo tomadas de decisão automatizadas e respostas rápidas diante de alterações produtivas. Segundo Boyes et al. (2018, p. 2), “[...] a Internet das Coisas Industrial conecta sensores, instrumentos e outros dispositivos industriais em rede com computadores e aplicações industriais”, permitindo maior integração entre tecnologia digital e manufatura avançada. Dessa forma, a IIoT tornou-se um dos principais pilares da Indústria 4.0 e das fábricas inteligentes contemporâneas. Ver: Boyes, Hugh; Hallqvist, Stefan; Ståhlbröst, Anna; Joyce, Joe. The industrial internet of things (IIoT): an analysis framework. Computers in Industry, Amsterdam, v. 101, p. 1-12, 2018.

equipamentos, sensores, plataformas computacionais e centros de gerenciamento distribuídos, produzindo um ambiente produtivo no qual praticamente todas as etapas operacionais passam a gerar, transmitir e interpretar informações em tempo real. Com isso, a produção industrial deixa de depender apenas de comandos centralizados e passa a operar por meio de redes técnicas altamente conectadas, capazes de sincronizar atividades produtivas, identificar variações operacionais instantaneamente e reorganizar fluxos de trabalho sem necessidade de longos intervalos de supervisão humana direta. A conectividade contínua promovida pela IIoT modifica profundamente a maneira como máquinas “interagem” dentro da planta industrial, porque equipamentos passam a compartilhar dados sobre desempenho, consumo energético, desgaste mecânico, temperatura, produtividade e falhas operacionais de maneira simultânea e integrada. Em face disso, a dinâmica fortalece não apenas o monitoramento produtivo, mas também a rastreabilidade completa da cadeia industrial, aspecto particularmente relevante em setores que exigem controle rigoroso de qualidade e segurança operacional, como indústrias farmacêuticas, alimentícias, químicas e aeroespaciais. Nayyar e Kumar escrevem que “[...] a Internet das Coisas Industrial cria ecossistemas produtivos nos quais dispositivos inteligentes operam continuamente conectados e coordenados” (2020, p. 88). A partir dessa lógica, os ambientes industriais passam a funcionar sob uma infraestrutura comunicacional permanente, na qual sensores instalados em linhas de produção, esteiras automatizadas, braços robóticos e sistemas logísticos alimentam plataformas digitais capazes de reorganizar operações quase instantaneamente diante de qualquer oscilação produtiva. Em fábricas altamente digitalizadas, por exemplo, sensores distribuídos em motores industriais conseguem detectar alterações mínimas de vibração ou temperatura e transmitir imediatamente essas informações para softwares centrais de monitoramento, permitindo intervenções preventivas antes que ocorra a interrupção da produção. Isso reduz perdas financeiras, diminui desperdícios operacionais e amplia significativamente a estabilidade dos processos industriais. Paralelamente, a conectividade contínua entre equipamentos permite sincronizar etapas produtivas que anteriormente funcionavam de maneira relativamente independente, aproximando produção, armazenamento, logística e distribuição dentro de uma mesma infraestrutura informacional. Kumar, Kumar e Pandey afirmam que “[...] sistemas industriais inteligentes dependem da comunicação constante entre máquinas, sensores e plataformas analíticas para garantir integração operacional eficiente” (2026, p. 81). Esse processo altera, inclusive, a forma como cadeias produtivas globais são coordenadas, já que empresas multinacionais conseguem monitorar operações localizadas em diferentes países a partir de

plataformas digitais unificadas, acompanhando desempenho produtivo, fluxo logístico e disponibilidade operacional em tempo real. Sob esse aspecto, a IIoT fortalece uma racionalidade produtiva baseada em conectividade permanente, velocidade informacional e capacidade analítica distribuída. Cabe ressaltar que a expansão dessa infraestrutura digital não produz efeitos apenas no nível técnico da automação, porque ela também reorganiza práticas gerenciais, redefinindo mecanismos de controle industrial, planejamento produtivo e coordenação do trabalho humano. Operadores industriais passam a atuar em ambientes fortemente mediados por dashboards analíticos, plataformas preditivas e sistemas automatizados de acompanhamento operacional, nos quais decisões produtivas dependem cada vez mais da interpretação contínua de fluxos massivos de dados industriais. Em linhas automatizadas de montagem automotiva, por exemplo, a comunicação entre robôs, sensores ópticos e sistemas logísticos inteligentes permite reorganizar ritmos produtivos conforme disponibilidade de peças, falhas mecânicas ou alterações na demanda, reduzindo interrupções e ampliando eficiência operacional. Sob outra perspectiva, a rastreabilidade proporcionada pela IIoT também fortalece mecanismos de auditoria industrial e controle regulatório, pois produtos, componentes e processos passam a possuir registros digitais contínuos ao longo de toda a cadeia produtiva. Como desdobramento, isso adquire enorme relevância em mercados altamente regulados, nos quais falhas operacionais podem gerar prejuízos financeiros, danos ambientais ou riscos sanitários. Ainda assim, a dependência crescente dessas redes conectadas amplia a complexidade da infraestrutura industrial contemporânea, exigindo sistemas robustos de armazenamento, processamento e segurança da informação para evitar interrupções sistêmicas e vulnerabilidades operacionais.

À medida que a digitalização industrial ampliou exponencialmente a capacidade de coleta e armazenamento de informações operacionais, os ambientes produtivos passaram a depender de estruturas analíticas capazes de interpretar volumes massivos de dados provenientes de sensores, máquinas inteligentes, plataformas logísticas, softwares corporativos e sistemas automatizados de supervisão industrial. A consolidação do Big Data²⁴ na indústria contemporânea modificou

²⁴ O Big Data refere-se ao conjunto de tecnologias, métodos e infraestruturas voltados ao armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de dados produzidos em alta velocidade e provenientes de múltiplas fontes digitais. No contexto contemporâneo, empresas, governos, plataformas digitais, dispositivos inteligentes e sistemas industriais produzem continuamente quantidades massivas de informações que ultrapassam a capacidade dos sistemas tradicionais de gerenciamento de dados. Por isso, o Big Data tornou-se estratégico para processos de tomada de decisão, previsões operacionais, identificação de padrões comportamentais e desenvolvimento de soluções automatizadas baseadas em análise algorítmica. Suas principais características costumam ser associadas aos chamados “5 Vs”: volume, velocidade, variedade, veracidade e valor, elementos que expressam tanto a dimensão quantitativa quanto a complexidade analítica dos dados contemporâneos. Além disso, o Big Data possui forte impacto sobre setores como saúde, indústria, finanças, educação e logística, especialmente em ambientes orientados por

profundamente os critérios utilizados para planejamento produtivo, gestão de ativos, controle de desempenho e tomada de decisão estratégica, pois decisões anteriormente baseadas predominantemente em experiência técnica acumulada ou análises retrospectivas passaram a incorporar modelos preditivos alimentados continuamente por dados operacionais em tempo real. Essa transformação desloca parte significativa da inteligência industrial para plataformas analíticas capazes de identificar padrões de comportamento produtivo, prever falhas mecânicas, detectar oscilações de desempenho e antecipar riscos operacionais antes mesmo que os problemas se materializem concretamente no ambiente fabril. Brynjolfsson e McAfee (2014) afirmam que “[...] os dados tornam-se uma fonte decisiva de vantagem competitiva quando processados por sistemas capazes de aprender continuamente” (p. 128). A relevância dessa mudança torna-se ainda mais evidente em setores industriais de alta complexidade operacional, nos quais pequenas interrupções podem provocar perdas financeiras extremamente elevadas, atrasos logísticos e comprometimento da qualidade final dos produtos. Em refinarias petroquímicas, por exemplo, sensores distribuídos ao longo da infraestrutura produtiva geram continuamente informações sobre pressão, temperatura, vazão, desgaste estrutural e consumo energético, enquanto algoritmos analíticos processam esses dados para prever “anomalias operacionais” e recomendar intervenções preventivas antes que ocorram falhas críticas. À vista disso, a manutenção industrial deixa, portanto, de funcionar predominantemente sob uma lógica corretiva ou periódica e passa a operar por meio de modelos preditivos capazes de calcular probabilidades de falha com base em padrões históricos e variáveis operacionais dinâmicas. Daugherty e Wilson escrevem que “[...] sistemas inteligentes conseguem identificar padrões invisíveis à análise humana convencional e transformá-los em capacidade operacional estratégica” (2018, p. 76). A análise preditiva também reconfigura os mecanismos de controle de qualidade industrial, porque algoritmos treinados por grandes bases de dados conseguem detectar microvariações produtivas praticamente imperceptíveis aos métodos tradicionais de inspeção. Em indústrias de semicondutores, farmacêuticas e automotivas, plataformas baseadas em aprendizado de máquina monitoram continuamente desvios dimensionais, alterações de composição química, falhas microscópicas e

inteligência artificial e aprendizagem de máquina. Segundo Mayer-Schönberger e Cukier (2013, p. 6), “[...] o Big Data refere-se a coisas que podem ser feitas em grande escala e que não podem ser feitas em menor escala para extrair novas percepções ou criar novas formas de valor”, evidenciando que o diferencial não está apenas na quantidade de dados, mas na capacidade analítica de produzir conhecimento estratégico a partir deles. Ver: Mayer-schönberger, Viktor; Cukier, Kenneth. Big data: a revolution that will transform how we live, work, and think. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013. Ver referências.

irregularidades de montagem, reduzindo desperdícios produtivos e ampliando significativamente a precisão operacional. Junto disso, o Big Data fortalece a capacidade de sincronização entre produção, logística e gestão de estoque, permitindo que organizações industriais reorganizem rapidamente fluxos operacionais conforme oscilações da demanda, disponibilidade de insumos ou alterações nas cadeias globais de fornecimento. Tal capacidade analítica torna-se particularmente relevante em cadeias produtivas internacionalizadas, nas quais atrasos logísticos, interrupções energéticas ou instabilidades geopolíticas podem impactar diretamente a continuidade operacional das fábricas. Dentro dessa racionalidade orientada por dados, plataformas industriais deixam de atuar apenas como ferramentas auxiliares de gerenciamento e passam a ocupar posição central na coordenação das decisões organizacionais. A própria cultura gerencial da indústria sofre modificações importantes, porque decisões estratégicas relacionadas à produtividade, eficiência energética, gestão de custos e desempenho operacional passam a depender intensamente da capacidade de interpretação analítica de dados industriais complexos. Davenport afirma que “[...] organizações guiadas por análise de dados desenvolvem maior capacidade de adaptação operacional e resposta estratégica” (2018, p. 54). Contudo, convém observar também que a ampliação dessas estruturas analíticas exige novas competências profissionais relacionadas à ciência de dados, engenharia computacional, modelagem estatística e inteligência artificial aplicada à produção. Técnicos e engenheiros passam a atuar em ambientes produtivos fortemente mediados por plataformas digitais, dashboards analíticos e sistemas automatizados de monitoramento contínuo, nos quais a interpretação correta dos dados torna-se elemento decisivo para estabilidade operacional e competitividade industrial. O avanço do Big Data industrial não representa apenas aumento quantitativo de informações disponíveis, mas a consolidação de uma nova lógica produtiva baseada em capacidade preditiva, coordenação algorítmica e inteligência operacional permanentemente alimentada por fluxos contínuos de dados industriais.

Minsky (1988, p. 102) afirma que “[...] a inteligência emerge da interação coordenada entre múltiplos processos especializados”, formulação particularmente relevante para situar a expansão contemporânea da inteligência artificial nos ambientes industriais automatizados. Diferentemente das formas tradicionais de automação rígida, nas quais máquinas executavam tarefas previamente programadas sem capacidade adaptativa significativa, os sistemas atuais de IA industrial operam por meio de estruturas computacionais capazes de reconhecer padrões operacionais complexos, interpretar grandes fluxos de dados produtivos, identificar anomalias

em tempo real e tomar decisões automatizadas conforme alterações contínuas do ambiente fabril. Isto é, essa capacidade modifica profundamente o funcionamento das cadeias produtivas contemporâneas, porque a inteligência artificial passa a atuar não apenas na execução mecânica das tarefas, mas também na coordenação dinâmica das decisões operacionais relacionadas à produtividade, qualidade, logística, consumo energético e desempenho industrial. A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina, redes neurais artificiais e sistemas cognitivos amplia significativamente a autonomia técnica das plataformas industriais inteligentes, permitindo que equipamentos ajustem parâmetros produtivos continuamente sem necessidade de reprogramação manual constante. Em setores industriais de elevada complexidade, como produção aeroespacial, mineração automatizada, indústrias farmacêuticas e fabricação avançada de semicondutores, algoritmos analíticos processam simultaneamente milhares de variáveis operacionais para calcular probabilidades de falha, prever “gargalos” produtivos e reorganizar fluxos de produção em tempo praticamente instantâneo. Isso faz com que a inteligência artificial se transforme em um componente central da governança operacional das fábricas inteligentes, deslocando parte importante das decisões industriais para sistemas computacionais capazes de responder rapidamente às oscilações produtivas. Em instalações petroquímicas, por exemplo, plataformas baseadas em IA conseguem correlacionar alterações mínimas de pressão, temperatura, vazão e consumo energético para prever instabilidades operacionais antes que elas provoquem acidentes ou interrupções produtivas de grande escala. Já em centros logísticos automatizados, algoritmos inteligentes reorganizam rotas internas de movimentação de materiais conforme demanda operacional, disponibilidade de estoque e variações no fluxo produtivo, aumentando velocidade operacional e reduzindo custos logísticos. Harari escreve que “[...] algoritmos podem rapidamente superar humanos em tarefas baseadas em reconhecimento de padrões e processamento de dados” (2019, p. 67). A presença crescente dessas tecnologias redefine inclusive os critérios tradicionais de eficiência industrial, pois produtividade passa a depender não apenas da capacidade física das máquinas, mas também da velocidade analítica com que sistemas inteligentes interpretam informações operacionais e reorganizam decisões produtivas. Isso repercute diretamente na estrutura organizacional das empresas industriais, que passam a depender cada vez mais de infraestrutura computacional robusta, integração entre engenharia e ciência de dados, além de equipes técnicas especializadas em inteligência artificial aplicada à produção. Em centros industriais conectados globalmente, plataformas de IA conseguem comparar desempenho de unidades produtivas localizadas em diferentes países, identificar

padrões de eficiência operacional e recomendar ajustes automáticos baseados em análise contínua de desempenho. Essa automação decisória também modifica a relação entre trabalhadores e sistemas produtivos, porque profissionais deixam de atuar apenas na operação direta das máquinas e passam a supervisionar ambientes produtivos mediados por plataformas cognitivas altamente automatizadas. Engenheiros, analistas industriais e especialistas em automação passam a interpretar relatórios algorítmicos, validar decisões computacionais e supervisionar sistemas capazes de aprender continuamente a partir dos próprios dados gerados pela produção.

A convergência entre dados, enorme capacidade de armazenamento computacional e poder cognitivo transformará a indústria e a sociedade em todos os níveis, criando oportunidades antes inimagináveis, desde saúde e educação até agricultura, manufatura e serviços. Minha empresa e outras estão apostando na convergência de importantes transformações tecnológicas – realidade mista, inteligência artificial e computação quântica. A inteligência artificial potencializará todas as experiências, ampliando as capacidades humanas por meio de percepções analíticas e poder preditivo impossíveis de serem alcançados isoladamente pelos seres humanos. Por fim, a computação quântica permitirá ultrapassar os limites da Lei de Moore ao modificar a própria física da computação como a conhecemos hoje, oferecendo capacidade computacional para resolver os maiores e mais complexos problemas do mundo (Nadella, 2018, p. 11-12, tradução nossa).

Em uma análise mais ampla, a expansão da robótica avançada nas organizações industriais contemporâneas vem modificando profundamente a estrutura operacional das fábricas, sobretudo porque os robôs atuais deixaram de executar apenas movimentos repetitivos rigidamente programados e passaram a operar por meio de sistemas adaptativos capazes de interagir continuamente com trabalhadores humanos, sensores inteligentes, plataformas analíticas e ambientes produtivos dinâmicos. Essa mudança reconfigura não apenas os níveis de automação industrial, mas também a própria divisão técnica do trabalho²⁵, já que a presença crescente dos

²⁵ As transformações introduzidas pelas revoluções industriais, especialmente pela Indústria 4.0 e pela Indústria 5.0, modificaram profundamente a forma como a divisão técnica do trabalho é organizada nas sociedades contemporâneas. Se, durante o modelo fordista e taylorista, a divisão do trabalho era marcada pela fragmentação rígida das tarefas, repetição mecânica e separação entre concepção e execução, os atuais sistemas produtivos passaram a exigir trabalhadores multifuncionais, capazes de operar tecnologias digitais, interpretar dados, interagir com sistemas automatizados e adaptar-se continuamente às mudanças tecnológicas. A incorporação de inteligência artificial, robótica colaborativa, internet das coisas industrial e plataformas digitais reorganizou não apenas os processos produtivos, mas também as competências profissionais valorizadas no mercado. Na Indústria 5.0, essa divisão técnica deixa de estar baseada exclusivamente na especialização mecânica e passa a combinar automação inteligente, colaboração humano-máquina, criatividade, resolução de problemas complexos e flexibilidade operacional. Além disso, o trabalho contemporâneo tende a ser cada vez mais integrado em redes digitais, plataformas conectadas e ambientes produtivos descentralizados, nos quais a fronteira entre atividade técnica, cognitiva e comunicacional torna-se menos rígida. Conforme Antunes (2020, p. 34), “[...] o trabalho digital, flexível e intermitente altera profundamente a morfologia da classe trabalhadora e as formas tradicionais de organização

chamados cobots, robôs colaborativos projetados para atuar lado a lado com operadores humanos, introduz novos modelos de coordenação produtiva baseados em interação contínua entre capacidades humanas e capacidades computacionais. Em vez de ambientes industriais totalmente segregados, nos quais máquinas automatizadas permaneciam isoladas por questões de segurança operacional, os sistemas robóticos contemporâneos passaram a incorporar sensores ópticos, visão computacional, inteligência artificial embarcada e mecanismos avançados de resposta adaptativa que permitem cooperação direta com trabalhadores em diferentes etapas da produção. Esse modelo colaborativo adquire importância crescente em setores dependentes de elevada precisão técnica e flexibilidade operacional, como montagem automotiva, fabricação eletrônica, produção biomédica e indústria aeroespacial, nos quais processos produtivos exigem simultaneamente velocidade automatizada e capacidade humana de supervisão, interpretação contextual e tomada de decisão complexa. A interação entre humanos e máquinas inteligentes também modifica significativamente os ritmos produtivos, porque os sistemas automatizados passam a reorganizar continuamente fluxos operacionais conforme comportamento da linha de produção, disponibilidade logística e desempenho dos trabalhadores envolvidos na operação. Em unidades industriais avançadas, cobots conseguem ajustar velocidade de execução, força mecânica e sequência operacional conforme movimentos humanos identificados por sensores em tempo real, reduzindo acidentes e ampliando estabilidade produtiva. Essa adaptação contínua faz com que os ambientes fabris se tornem mais flexíveis e responsivos, especialmente em linhas produtivas que trabalham com customização industrial, produção variável e demandas operacionais altamente oscilantes. No interior dessas transformações, a robótica deixa de representar apenas substituição mecânica da força de trabalho e passa a atuar como infraestrutura integrada de coordenação operacional inteligente. Daugherty e Wilson reforçam que “[...] humanos e máquinas inteligentes tornam-se mais valiosos quando suas capacidades passam a operar de maneira complementar” (2018, p. 65). Essa complementaridade reorganiza inclusive os perfis profissionais exigidos pela indústria contemporânea, porque trabalhadores deixam de executar exclusivamente tarefas repetitivas e passam a supervisionar sistemas automatizados, interpretar relatórios operacionais, validar respostas computacionais e interagir continuamente com plataformas robóticas inteligentes. Em consequência dessa mudança, conhecimentos relacionados à automação, análise

produtiva”, evidenciando que a divisão técnica do trabalho contemporânea está cada vez mais associada à digitalização, à conectividade e à reorganização permanente das funções produtivas. Ver: Antunes, Ricardo. O privilégio da servidão: o novo proletariado de serviços na era digital. 2. ed. São Paulo: Boitempo, 2020.

de dados, programação industrial e gestão de sistemas inteligentes tornam-se competências cada vez mais centrais para engenheiros, técnicos e operadores industriais. Outro aspecto relevante envolve a crescente incorporação de robôs móveis autônomos nos ambientes logísticos internos das fábricas. Em centros industriais conectados, esses equipamentos realizam transporte automatizado de peças, abastecimento de linhas produtivas e reorganização dinâmica de estoques sem necessidade de intervenção humana contínua, utilizando sensores de localização, algoritmos de navegação e comunicação em rede para ajustar trajetos conforme alterações operacionais instantâneas. Sendo assim, a capacidade amplia a velocidade operacional das cadeias produtivas e reduz interrupções causadas por falhas de coordenação logística. Simultaneamente, sistemas robóticos inteligentes vêm sendo utilizados em atividades industriais de elevada exposição ao risco, como mineração subterrânea, inspeção em ambientes contaminados, manutenção de estruturas offshore e operações metalúrgicas de alta temperatura, diminuindo exposição humana a condições perigosas de trabalho. Entretanto, a expansão da robótica colaborativa também produz efeitos importantes sobre organização laboral, relações de trabalho e estabilidade ocupacional, porque funções anteriormente executadas integralmente por trabalhadores passam a ser redistribuídas entre operadores humanos e sistemas automatizados. Martin Ford escreve que “[...] tecnologias inteligentes substituem progressivamente tarefas cognitivas e operacionais antes consideradas exclusivamente humanas” (2015, p. 97). Tal movimento exige das organizações industriais novas estratégias de qualificação profissional, adaptação ocupacional e reorganização da gestão do trabalho, sobretudo em contextos produtivos fortemente pressionados por ganhos contínuos de produtividade e eficiência operacional.

Sob a lógica produtiva das cadeias industriais globalizadas, a computação em nuvem passou a ocupar uma posição estratégica na coordenação operacional das organizações industriais contemporâneas, principalmente porque tornou possível armazenar, processar e compartilhar volumes massivos de dados industriais sem dependência exclusiva de infraestrutura física localizada dentro das próprias plantas fabris. A migração de sistemas industriais para arquiteturas em nuvem modificou profundamente o gerenciamento produtivo internacional, já que operações distribuídas em diferentes países passaram a funcionar conectadas por plataformas digitais capazes de integrar monitoramento remoto, controle operacional, gestão logística e análise produtiva em tempo real. Essa engrenagem reorganiza o funcionamento das cadeias industriais internacionais ao permitir que centros corporativos acompanhem simultaneamente desempenho operacional, produtividade, disponibilidade de estoque, manutenção industrial e eficiência

energética de múltiplas unidades produtivas localizadas em diferentes continentes. Com isso, a gestão industrial torna-se menos dependente de estruturas centralizadas fisicamente e passa a operar sob um modelo descentralizado de coordenação digital contínua. Empresas multinacionais do setor automotivo, eletrônico e farmacêutico utilizam plataformas em nuvem para integrar dados provenientes de fornecedores, centros de distribuição, fábricas automatizadas e operadores logísticos dentro de uma mesma infraestrutura computacional compartilhada, permitindo reorganizações rápidas da produção conforme oscilações de demanda, interrupções logísticas ou alterações nos mercados internacionais. Em cadeias produtivas altamente complexas, a computação em nuvem fortalece significativamente a capacidade de sincronização operacional entre setores produtivos antes fragmentados por barreiras geográficas, temporais e informacionais. Isso modifica inclusive a velocidade de circulação das decisões industriais, pois relatórios operacionais, análises preditivas e indicadores produtivos passam a ser disponibilizados instantaneamente para diferentes níveis gerenciais da organização. Rifkin escreve que “[...] as novas infraestruturas digitais permitem níveis inéditos de integração econômica e coordenação operacional distribuída” (2014, p. 184). A relevância dessa infraestrutura torna-se ainda mais evidente em sistemas industriais dependentes de atualização contínua de dados operacionais, como refinarias inteligentes, redes energéticas automatizadas, indústrias químicas e plataformas globais de manufatura avançada. Nesses ambientes, sensores distribuídos ao longo da cadeia produtiva enviam continuamente informações para servidores em nuvem capazes de processar, armazenar e redistribuir dados quase instantaneamente para diferentes setores operacionais da empresa. Isso amplia significativamente a flexibilidade produtiva das organizações industriais, porque alterações operacionais podem ser implementadas remotamente sem necessidade de intervenção física direta nos equipamentos locais. Em estruturas industriais conectadas globalmente, equipes técnicas localizadas em diferentes países conseguem acessar simultaneamente dados de desempenho de máquinas, históricos operacionais, padrões de manutenção e relatórios analíticos por meio de plataformas compartilhadas em nuvem, reduzindo tempo de resposta e ampliando capacidade de coordenação internacional. Outro elemento importante envolve a escalabilidade operacional proporcionada pela computação em nuvem. Diferentemente das infraestruturas tradicionais baseadas em servidores locais limitados fisicamente, as arquiteturas em nuvem permitem ampliar capacidade computacional conforme crescimento da produção industrial e aumento do volume de dados gerados pelas operações automatizadas. Logo, essa característica torna-se decisiva em ambientes produtivos altamente

digitalizados, nos quais sensores inteligentes, robôs industriais, plataformas analíticas e sistemas de inteligência artificial geram continuamente fluxos massivos de informações operacionais. Schwab afirma que “[...] a infraestrutura digital da quarta revolução industrial depende de sistemas conectados capazes de compartilhar dados em escala global” (2016, p. 74). Em paralelo, a computação em nuvem fortalece novas formas de supervisão corporativa e governança operacional, porque gestores passam a monitorar desempenho produtivo em tempo real por meio de dashboards integrados capazes de reunir indicadores provenientes de múltiplas unidades industriais distribuídas internacionalmente. Isso favorece maior padronização operacional, integração logística e coordenação das cadeias globais de suprimentos. Entretanto, a descentralização digital da gestão produtiva também amplia dependência das organizações industriais em relação às grandes infraestruturas tecnológicas responsáveis pelo armazenamento e processamento desses dados, aumentando vulnerabilidades associadas à segurança da informação, interrupções sistêmicas e concentração tecnológica nas plataformas globais de computação em nuvem.

Entre as tecnologias mais sofisticadas associadas à manufatura inteligente, os “gêmeos digitais” passaram a desempenhar papel central na simulação operacional das fábricas contemporâneas, sobretudo porque permitem construir réplicas virtuais altamente detalhadas de máquinas, linhas produtivas, sistemas logísticos e ambientes industriais completos. Essas estruturas digitais recebem continuamente informações provenientes de sensores instalados nos equipamentos físicos, criando modelos computacionais capazes de reproduzir em tempo real o comportamento operacional das plantas industriais. A partir dessa conexão permanente entre infraestrutura material e representação virtual, organizações industriais conseguem testar alterações produtivas, antecipar falhas operacionais, avaliar cenários de risco e reorganizar processos antes mesmo de realizar intervenções diretamente no ambiente físico da produção. Esse mecanismo amplia significativamente a capacidade de previsão técnica das empresas industriais, reduzindo custos associados a interrupções inesperadas, desperdícios operacionais e erros de planejamento produtivo. Em setores industriais de alta complexidade tecnológica, como aviação, energia, mineração e fabricação avançada de componentes eletrônicos, os gêmeos digitais permitem simular continuamente condições extremas de funcionamento, desgaste estrutural, variações de desempenho e comportamento operacional de equipamentos submetidos a diferentes cargas produtivas. Dito isso, essa possibilidade modifica profundamente os métodos tradicionais de engenharia industrial, porque o planejamento operacional deixa de depender apenas de testes

físicos demorados e passa a incorporar modelos virtuais capazes de calcular impactos produtivos quase instantaneamente. Em instalações industriais automatizadas, plataformas baseadas em gêmeos digitais conseguem identificar microvariações operacionais e prever probabilidades de falha antes que ocorram interrupções críticas na produção. Isso fortalece significativamente os mecanismos de manutenção preditiva, uma vez que os sistemas passam a analisar continuamente padrões de vibração, consumo energético, pressão, temperatura e desempenho mecânico dos equipamentos industriais. Leong afirma que “[...] os gêmeos digitais permitem monitoramento contínuo e simulações operacionais capazes de otimizar decisões industriais em tempo real” (2024, p. 133). Essa capacidade de simulação contínua também produz impactos relevantes sobre desenvolvimento de produtos e reorganização das linhas produtivas. Em vez de depender exclusivamente de protótipos físicos, empresas industriais conseguem testar virtualmente alterações estruturais, mudanças de layout, adaptações logísticas e novos fluxos produtivos dentro de ambientes digitais altamente detalhados. Isso acelera processos de inovação industrial e reduz significativamente custos relacionados à experimentação operacional. Na indústria automobilística, por exemplo, fabricantes utilizam gêmeos digitais para simular comportamento aerodinâmico, desgaste de componentes, eficiência energética e desempenho estrutural dos veículos antes mesmo da produção física dos primeiros modelos. Já em refinarias inteligentes, sistemas digitais reproduzem continuamente o comportamento operacional das plantas industriais para prever impactos de alterações químicas, oscilações térmicas e riscos associados ao funcionamento de equipamentos críticos. Outro dado importante envolve a possibilidade de integração entre gêmeos digitais, inteligência artificial e análise preditiva. Quando conectados a algoritmos de aprendizado de máquina, esses sistemas passam a aprimorar continuamente sua capacidade de previsão operacional com base no histórico de funcionamento das próprias operações industriais. Isso amplia significativamente a precisão das análises computacionais, permitindo recomendações automáticas relacionadas à reorganização produtiva, consumo energético e substituição preventiva de componentes industriais. Deepak et al. (2023) escrevem que “[...] sistemas industriais inteligentes tornam-se mais eficientes quando modelos digitais conseguem aprender continuamente com os dados operacionais da produção” (p. 211). O uso crescente de gêmeos digitais também reorganiza práticas relacionadas à segurança operacional industrial, porque simulações virtuais permitem avaliar previamente impactos de falhas mecânicas, riscos de acidentes e vulnerabilidades estruturais antes da execução prática das operações. Em ambientes industriais dependentes de elevada precisão técnica, essa capacidade

preventiva reduz significativamente riscos associados a falhas humanas, instabilidades produtivas e interrupções sistêmicas. Ao passo que, a ampliação dessas infraestruturas digitais aumenta a dependência das organizações industriais em relação à qualidade dos dados operacionais, à capacidade computacional das plataformas analíticas e à estabilidade das redes conectadas que sustentam o funcionamento contínuo dos modelos virtuais industriais.

Floridi e Taddeo (2014, p. 41) afirmam que “[...] a infraestrutura digital contemporânea amplia simultaneamente conectividade, eficiência e exposição sistêmica a novas formas de vulnerabilidade”, formulação particularmente importante para interpretar analiticamente os riscos associados à expansão da indústria hiperconectada. O avanço da digitalização industrial intensificou significativamente a dependência das organizações produtivas em relação às redes computacionais, aos sistemas automatizados de comunicação e às plataformas integradas de gerenciamento operacional, criando um ambiente no qual ataques cibernéticos, vazamentos de dados e sabotagens digitais passaram a representar ameaças concretas à estabilidade produtiva global. Assim, a incorporação massiva de sensores inteligentes, sistemas em nuvem, inteligência artificial, plataformas analíticas e dispositivos conectados amplia a eficiência operacional das cadeias industriais contemporâneas, porém também aumenta exponencialmente a superfície de exposição das infraestruturas produtivas a invasões digitais, falhas sistêmicas e interrupções coordenadas de funcionamento. Em ambientes industriais altamente automatizados, uma vulnerabilidade aparentemente localizada pode produzir efeitos em cadeia capazes de comprometer linhas inteiras de produção, interromper sistemas logísticos internacionais e gerar prejuízos financeiros de enorme escala. A dependência crescente de redes digitais interconectadas faz com que a segurança cibernética deixe de ser apenas uma preocupação restrita ao setor de tecnologia da informação e passe a ocupar posição central na gestão estratégica das organizações industriais contemporâneas. Em refinarias automatizadas, usinas energéticas inteligentes e centros industriais conectados globalmente, sistemas de controle supervisão e aquisição de dados operam continuamente integrados às plataformas digitais responsáveis pelo monitoramento operacional em tempo real. Qualquer invasão capaz de comprometer esses sistemas pode alterar parâmetros de funcionamento, manipular fluxos produtivos ou interromper operações críticas com impactos potencialmente severos para segurança industrial, abastecimento energético e estabilidade econômica. Casos recentes de ataques ransomware direcionados a infraestruturas industriais demonstram como organizações criminosas passaram a explorar vulnerabilidades presentes em ambientes produtivos hiperconectados, sequestrando dados operacionais e

bloqueando sistemas industriais estratégicos mediante exigência de pagamentos milionários. A crescente sofisticação desses ataques decorre justamente do elevado nível de integração digital das operações produtivas contemporâneas. Em plantas industriais automatizadas, dispositivos conectados continuamente à rede podem servir como portas de entrada para invasões capazes de comprometer sistemas centrais de gerenciamento operacional. A própria lógica da Indústria 4.0, baseada em conectividade permanente e circulação contínua de dados, amplia a complexidade da proteção cibernética industrial, porque os fluxos informacionais deixam de circular apenas dentro de ambientes corporativos fechados e passam a atravessar cadeias produtivas internacionais inteiramente conectadas. Zuboff escreve que “[...] sistemas digitais contemporâneos dependem da coleta contínua de dados em larga escala, criando novas assimetrias de poder e controle informacional” (2019, p. 198). Em nível estrutural, a centralidade dos dados industriais transforma informações operacionais em ativos estratégicos de elevado valor econômico, tecnológico e geopolítico, tornando as organizações industriais alvos prioritários para espionagem digital, roubo de propriedade intelectual e sabotagem econômica. Em setores industriais vinculados à defesa, biotecnologia, semicondutores e infraestrutura energética, ataques cibernéticos podem comprometer não apenas desempenho produtivo, mas também segurança nacional e estabilidade institucional. Outro fator relevante envolve a dependência tecnológica das plataformas globais responsáveis pelo armazenamento e processamento de dados industriais. Muitas organizações produtivas operam atualmente apoiadas em infraestruturas digitais controladas por grandes empresas transnacionais de tecnologia, criando relações de dependência operacional que podem gerar riscos associados à concentração tecnológica e à vulnerabilidade sistêmica das cadeias produtivas internacionais. Em situações de falhas de servidores, interrupções de conectividade ou colapsos de plataformas digitais compartilhadas, milhares de operações industriais podem sofrer paralisações simultâneas. O próprio funcionamento das fábricas inteligentes passa, portanto, a depender não apenas da estabilidade física das plantas industriais, mas também da resiliência computacional das redes digitais que sustentam sua operação cotidiana. A proteção cibernética industrial exige, nesse contexto, estratégias integradas de criptografia, monitoramento contínuo, segmentação de redes, controle de acesso e inteligência preventiva voltadas especificamente para ambientes produtivos altamente conectados. A segurança da indústria contemporânea passa a depender cada vez mais da capacidade de proteger fluxos digitais, sistemas automatizados e infraestruturas informacionais que sustentam o funcionamento contínuo das cadeias produtivas globais.

Os benefícios e os desafios dessas tecnologias estão relacionados a questões importantes, como desigualdade, emprego, democracia, soberania, saúde, segurança e desenvolvimento econômico. Lidar adequadamente com a velocidade e a escala dos impactos das tecnologias da Quarta Revolução Industrial exigirá novos modelos de governança mais ágeis, envolvendo o setor privado, atores sociais, governos e instituições regulatórias tradicionais. O objetivo é desenvolver formas de governança mais compatíveis com o futuro, adaptáveis e conduzidas por múltiplos atores, incluindo novas normas, padrões e práticas (Schwab; Nadella; Davis, 2018, p. 23-24, tradução nossa).

Ao longo da consolidação da Indústria 4.0, a centralidade da automação, da conectividade digital e da inteligência computacional transformou profundamente os sistemas produtivos contemporâneos, ampliando níveis de eficiência operacional, velocidade analítica e integração global das cadeias industriais. Contudo, a intensificação desse modelo produtivo também evidenciou limites relacionados à sustentabilidade ambiental, à precarização do trabalho, à dependência tecnológica excessiva e à redução progressiva do papel humano nos processos decisórios industriais. É justamente nesse contexto que emerge a proposta da Indústria 5.0, não como ruptura absoluta com as tecnologias anteriores, mas como tentativa de reorganizar os avanços técnicos da automação inteligente sob uma racionalidade mais colaborativa, adaptativa e centrada na valorização humana. O foco deixa de repousar exclusivamente sobre produtividade máxima e passa a incorporar preocupações relacionadas ao equilíbrio entre inovação tecnológica, sustentabilidade produtiva e preservação das capacidades humanas dentro dos ambientes industriais. A automação continua ocupando papel central nas operações industriais, porém os sistemas produtivos passam a ser concebidos para fortalecer cooperação entre inteligência humana e inteligência artificial, buscando ampliar criatividade, flexibilidade cognitiva e capacidade de adaptação dos trabalhadores diante de ambientes produtivos cada vez mais complexos. Nesse sentido, os próprios robôs colaborativos, sistemas cognitivos e plataformas digitais herdados da Indústria 4.0 passam a ser reorganizados dentro de estruturas operacionais voltadas à complementaridade entre capacidades técnicas automatizadas e competências humanas dificilmente reproduzíveis por sistemas computacionais. Em vez de reduzir continuamente a presença humana nas fábricas, a Indústria 5.0 propõe utilizar a automação para liberar trabalhadores de atividades excessivamente repetitivas, perigosas ou mecanizadas, permitindo maior participação em funções relacionadas à supervisão estratégica, resolução de problemas complexos e desenvolvimento criativo de soluções produtivas. Machado e Davim afirmam que “[...] a Indústria 5.0 procura reposicionar o ser humano no centro dos sistemas

produtivos inteligentes” (2023, p. 37). Essa mudança reorganiza inclusive os critérios utilizados para avaliar eficiência industrial, porque desempenho produtivo deixa de ser medido exclusivamente por velocidade operacional ou redução de custos e passa a incorporar fatores relacionados à sustentabilidade ambiental, bem-estar ocupacional, resiliência produtiva e estabilidade das cadeias globais de produção. Dito isso, organizações industriais começam a investir em sistemas energeticamente mais eficientes, reaproveitamento de materiais, redução de desperdícios e plataformas produtivas capazes de operar com maior flexibilidade diante de crises econômicas, instabilidades logísticas e oscilações geopolíticas. O fortalecimento da sustentabilidade produtiva torna-se particularmente importante em setores industriais intensivos em consumo energético e exploração de recursos naturais, nos quais a digitalização passa a ser utilizada também para monitoramento ambiental, otimização de consumo e redução de impactos ecológicos associados às operações industriais. Outra transformação importante envolve a reorganização da própria relação entre trabalhador e tecnologia. Sob a lógica da Indústria 5.0, sistemas inteligentes deixam de atuar apenas como instrumentos de substituição laboral e passam a funcionar como tecnologias de suporte à tomada de decisão humana, assistência operacional e ampliação das capacidades cognitivas dos trabalhadores. Em ambientes industriais avançados, plataformas baseadas em inteligência artificial auxiliam operadores na interpretação de dados complexos, recomendam ajustes produtivos e oferecem suporte técnico em tempo real sem eliminar completamente a autonomia decisória humana. Diante disso, a valorização do trabalho qualificado também passa a ocupar posição estratégica dentro das organizações produtivas, exigindo investimentos crescentes em formação técnica, requalificação profissional e desenvolvimento contínuo de competências digitais. Nayyar e Kumar escrevem que “[...] a próxima geração industrial dependerá da colaboração harmoniosa entre automação avançada, criatividade humana e sustentabilidade produtiva” (2020, p. 119). A Indústria 5.0 consolida, portanto, uma tentativa de reorganizar as tecnologias digitais herdadas da automação inteligente sob parâmetros produtivos menos orientados exclusivamente pela maximização operacional e mais comprometidos com integração humana, sustentabilidade industrial e equilíbrio entre inovação tecnológica e responsabilidade social.

À proporção que sistemas automatizados, plataformas inteligentes e arquiteturas digitais passaram a ocupar funções centrais nos ambientes produtivos contemporâneos, o trabalho humano sofreu uma transformação estrutural que ultrapassa a simples substituição de tarefas manuais por máquinas automatizadas. A transição da Indústria 4.0 para a 5.0 reorganiza

profundamente os perfis ocupacionais da indústria porque modifica simultaneamente os ritmos produtivos, os critérios de qualificação profissional, os modelos de supervisão operacional e as competências cognitivas exigidas dos trabalhadores inseridos em ambientes industriais digitalizados. Funções historicamente associadas à execução repetitiva e mecanizada das atividades produtivas passam a ser progressivamente absorvidas por robôs inteligentes, sistemas autônomos e plataformas analíticas capazes de executar operações com elevada precisão, velocidade e estabilidade operacional. Em consequência disso, cresce a demanda por profissionais capazes de interpretar dados industriais, supervisionar sistemas automatizados, interagir com plataformas de inteligência artificial e atuar em processos produtivos cada vez mais mediados por tecnologias digitais complexas. O trabalhador industrial deixa gradualmente de operar apenas como executor direto da produção e passa a assumir funções relacionadas à coordenação técnica, validação analítica, monitoramento operacional e adaptação contínua às mudanças introduzidas pelas infraestruturas digitais inteligentes. Em plantas produtivas conectadas, operadores industriais precisam produzir uma leitura sobre funcionamento de sensores inteligentes, plataformas em nuvem, sistemas preditivos e interfaces computacionais integradas à lógica operacional das fábricas automatizadas. Isso amplia significativamente a necessidade de formação técnica contínua e atualização permanente das competências profissionais. Não dá para ignorar que, ocupações tradicionais vinculadas à repetição mecânica de tarefas tornam-se progressivamente vulneráveis à automação avançada, sobretudo em setores industriais nos quais algoritmos e robôs conseguem executar atividades com menor custo operacional e maior previsibilidade produtiva. Antunes escreve que “[...] a nova morfologia do trabalho amplia formas flexíveis e digitalizadas de exploração laboral” (2018, p. 53). Dito isso, a incorporação crescente de inteligência artificial e automação cognitiva também altera os mecanismos de controle do trabalho dentro das organizações industriais contemporâneas. Em estruturas industriais altamente conectadas, dashboards analíticos conseguem acompanhar em tempo real indicadores de eficiência individual, cumprimento de metas e ritmo produtivo dos operadores, fortalecendo modelos de gerenciamento baseados em rastreamento contínuo das atividades laborais. Essa digitalização do controle produtivo produz impactos importantes sobre autonomia ocupacional, intensificação do trabalho e pressão por adaptação permanente às mudanças tecnológicas. Em setores industriais dependentes de alta especialização técnica, profissionais passam a conviver com exigências crescentes de aprendizado contínuo, atualização digital e capacidade de adaptação rápida às transformações introduzidas pelas novas tecnologias

produtivas. Em paralelo, surgem novas ocupações relacionadas à ciência de dados, engenharia de automação, segurança cibernética industrial, análise preditiva, integração de sistemas inteligentes e gestão de plataformas digitais industriais. O ambiente produtivo torna-se, portanto, mais dependente de competências cognitivas avançadas e menos vinculado exclusivamente ao esforço físico tradicional característico da indústria mecanizada clássica. Essa mudança modifica, inclusive, os processos de formação profissional, porque instituições educacionais e programas corporativos de qualificação passam a incorporar conteúdos relacionados à inteligência artificial, análise de dados, programação industrial e operação de sistemas automatizados complexos. Sennett afirma que “[...] o trabalho moderno exige adaptação constante diante de estruturas produtivas flexíveis e permanentemente mutáveis” (1998, p. 46). Contudo, apesar da ampliação das exigências técnicas e cognitivas, a transição para modelos produtivos altamente digitalizados não elimina as tensões relacionadas à precarização laboral, insegurança ocupacional e desigualdade tecnológica. Trabalhadores inseridos em setores menos qualificados frequentemente enfrentam maior vulnerabilidade diante da automação crescente, especialmente em atividades suscetíveis à substituição por sistemas inteligentes de execução automatizada. A passagem da Indústria 4.0 para a 5.0 amplia, portanto, uma contradição importante das transformações produtivas contemporâneas, pois, ao mesmo tempo em que cria novas possibilidades de cooperação entre humanos e tecnologias inteligentes, também intensifica disputas relacionadas à estabilidade ocupacional, qualificação profissional e distribuição dos benefícios econômicos gerados pela automação avançada.

Não é difícil perceber que, a medida que os sistemas inteligentes ampliam sua capacidade de executar operações produtivas com elevada precisão, velocidade e previsibilidade, cresce também a substituição de atividades historicamente associadas ao trabalho humano repetitivo, sobretudo em funções operacionais marcadas por padronização de tarefas, baixa autonomia decisória e elevada suscetibilidade à automação computacional. O avanço da robotização industrial, da inteligência artificial e dos sistemas autônomos reorganiza profundamente a estrutura ocupacional das cadeias produtivas contemporâneas, produzindo deslocamentos importantes no mercado de trabalho industrial e intensificando debates relacionados ao desemprego tecnológico, à precarização ocupacional e à redistribuição desigual dos benefícios econômicos gerados pela automação. Em diversos setores industriais, tarefas anteriormente desempenhadas por grandes contingentes de trabalhadores passam a ser executadas por plataformas automatizadas capazes de operar continuamente, sem interrupções fisiológicas, com

menores índices de erro e custos operacionais progressivamente reduzidos. Linhas industriais de montagem, centros logísticos automatizados, operações de embalagem, inspeção visual, controle de estoque e processamento administrativo representam áreas nas quais a automação avançada vem reduzindo significativamente a necessidade de mão de obra operacional tradicional. Essa transformação não ocorre apenas no plano técnico da substituição mecânica das tarefas, mas também na reorganização estrutural da lógica produtiva, pois empresas passam a direcionar investimentos para sistemas digitais capazes de ampliar produtividade ao mesmo tempo em que reduzem dependência de trabalho humano intensivo. Em ambientes produtivos fortemente automatizados, algoritmos conseguem coordenar operações logísticas, prever necessidades de abastecimento, controlar estoques e reorganizar fluxos produtivos praticamente sem intervenção humana contínua. Isso modifica substancialmente o perfil das ocupações industriais disponíveis, favorecendo funções vinculadas à supervisão tecnológica e reduzindo espaço para atividades operacionais repetitivas historicamente absorvidas pelas fábricas tradicionais. Ford afirma que “[...] muitos empregos rotineiros estão particularmente vulneráveis à automação inteligente” (2015, p. 142). O crescimento desse modelo produtivo amplia preocupações relacionadas à estabilidade ocupacional de trabalhadores²⁶ menos qualificados, especialmente aqueles inseridos em funções baseadas predominantemente em repetição mecânica de tarefas. Logo, a digitalização industrial intensifica, portanto, uma dinâmica contraditória, porque as mesmas tecnologias responsáveis por ampliar eficiência produtiva também podem aprofundar desigualdades laborais e insegurança econômica em determinados segmentos ocupacionais. Outra dimensão importante dessa problemática envolve a velocidade com que as transformações tecnológicas ocorrem em relação à capacidade de adaptação profissional dos trabalhadores afetados pela automação. Em muitos casos, os sistemas educacionais e programas de qualificação profissional não conseguem acompanhar o ritmo acelerado das mudanças produtivas introduzidas pelas tecnologias inteligentes, produzindo descompasso entre exigências do mercado industrial e condições concretas de reinserção ocupacional. Brynjolfsson e McAfee escrevem que “[...] as tecnologias digitais avançam mais rapidamente do que a capacidade institucional de adaptação do trabalho

²⁶ Ou seja, a vulnerabilidade ocupacional torna-se ainda mais intensa em contextos produtivos nos quais organizações industriais conseguem combinar robótica avançada, inteligência artificial e análise de dados dentro de sistemas produtivos altamente integrados. Em grandes centros de distribuição automatizados, por exemplo, robôs móveis inteligentes realizam separação de mercadorias, organização logística e transporte interno de produtos sem necessidade de operadores humanos permanentes. Em plantas industriais automatizadas, sistemas de visão computacional conseguem substituir trabalhadores responsáveis por inspeção visual de peças e controle de qualidade, executando análises contínuas com elevada precisão algorítmica. Ver referências.

humano” (2014, p. 176). O problema torna-se, desse modo, particularmente sensível em regiões economicamente dependentes de setores industriais intensivos em trabalho operacional, nas quais processos acelerados de automação podem gerar aumento do desemprego estrutural e fragilização das economias locais. Em certas situações, trabalhadores deslocados pelas novas tecnologias acabam sendo absorvidos por ocupações mais instáveis, informais ou precarizadas, muitas vezes associadas às próprias plataformas digitais surgidas no interior da economia automatizada contemporânea. Também se amplia a polarização entre profissionais altamente qualificados, capazes de atuar em ambientes tecnológicos complexos, e trabalhadores submetidos a maior vulnerabilidade diante das transformações produtivas digitais. Na prática, a expansão da automação industrial não representa, portanto, apenas modernização técnica dos processos produtivos, mas também uma reconfiguração social ampla das relações de trabalho, das oportunidades ocupacionais e das formas de inserção econômica dentro do capitalismo digital contemporâneo.

Antunes (2018, p. 39) afirma que “[...] o trabalho digitalizado amplia mecanismos sofisticados de controle e intensificação produtiva”, interpretação particularmente relevante para examinar de forma compreensiva a expansão contemporânea dos sistemas de monitoramento digital no interior das organizações industriais automatizadas. A crescente incorporação de sensores inteligentes, plataformas analíticas, softwares de supervisão e dispositivos conectados reorganiza profundamente as formas de controle laboral na indústria contemporânea, produzindo ambientes produtivos nos quais praticamente todas as atividades executadas pelos trabalhadores passam a ser continuamente registradas, analisadas e avaliadas por sistemas computacionais integrados à lógica operacional das fábricas inteligentes. O monitoramento deixa de ocorrer apenas por meio da supervisão hierárquica tradicional e passa a funcionar através de infraestruturas digitais capazes de acompanhar produtividade individual, tempo de execução das tarefas, deslocamentos operacionais, pausas, padrões comportamentais e desempenho técnico dos trabalhadores em tempo real. Diante dessa reconfiguração, fortalece uma racionalidade produtiva baseada em mensuração contínua da performance laboral, na qual indicadores digitais tornam-se elementos centrais para organização dos ritmos de trabalho e definição das metas operacionais. Sensores incorporados aos equipamentos produtivos conseguem registrar velocidade de execução das atividades, tempo de resposta operacional, índices de produtividade e frequência de interrupções ao longo da jornada de trabalho, permitindo às organizações industriais construir modelos analíticos extremamente detalhados sobre comportamento produtivo da força de

trabalho. Em centros industriais altamente conectados, dashboards gerenciais apresentam continuamente dados comparativos de desempenho entre trabalhadores, setores e turnos operacionais, ampliando a capacidade de controle corporativo sobre a dinâmica cotidiana da produção. A intensificação produtiva passa, portanto, a operar mediada por algoritmos, plataformas digitais e sistemas automatizados de análise de desempenho, reduzindo progressivamente espaços de autonomia operacional no interior das atividades industriais. Em ambientes logísticos automatizados, trabalhadores utilizam dispositivos digitais integrados às plataformas centrais de gerenciamento operacional, recebendo instruções em tempo real sobre deslocamentos, velocidade de execução e prioridades produtivas definidas pelos sistemas computacionais. Essa digitalização do trabalho industrial produz uma reorganização significativa da experiência laboral, porque o desempenho dos trabalhadores passa a ser permanentemente traduzido em métricas quantitativas analisadas pelas plataformas digitais de supervisão. Não se restringe apenas ao controle técnico da produção, mas envolve também a construção de mecanismos sofisticados de vigilância laboral capazes de ampliar pressão produtiva e acelerar ritmos operacionais. Zuboff escreve que “[...] o monitoramento digital transforma atividades humanas em fluxos contínuos de dados passíveis de análise e controle” (2019, p. 221). Sob essa lógica, os dados produzidos pelos próprios trabalhadores tornam-se ativos estratégicos utilizados pelas organizações para reorganizar produtividade, prever comportamentos e ajustar continuamente os processos de gerenciamento laboral. Em situações reais, a introdução de plataformas inteligentes nos ambientes produtivos também modifica a maneira como avaliações profissionais são realizadas. Isto é, indicadores automatizados de desempenho passam a influenciar definição de metas, bonificações, estabilidade ocupacional e distribuição de tarefas, fortalecendo modelos de gestão cada vez mais orientados por métricas digitais de produtividade. Em determinados contextos industriais, trabalhadores submetidos a monitoramento permanente passam a desenvolver estratégias constantes de adaptação aos sistemas analíticos, buscando atender parâmetros produtivos definidos algoritmicamente pelas plataformas corporativas. Isso contribui para intensificação do desgaste físico e cognitivo relacionado ao trabalho industrial contemporâneo, especialmente em atividades marcadas por alta pressão operacional e exigência contínua de desempenho. A incorporação dessas tecnologias também reduz significativamente as fronteiras entre supervisão técnica e vigilância ocupacional, porque sistemas digitais conseguem acompanhar detalhadamente padrões de comportamento laboral ao longo de toda a jornada produtiva. Em certos casos, plataformas computacionais analisam inclusive padrões de

movimentação corporal, frequência de pausas, tempo de inatividade e respostas operacionais dos trabalhadores diante das demandas produtivas. Isso mostra como a combinação entre automação inteligente, análise contínua de dados e monitoramento digital consolida formas mais sofisticadas de gerenciamento da força de trabalho industrial, reforçando modelos produtivos baseados em intensificação operacional permanente, rastreamento contínuo das atividades laborais e ampliação da capacidade corporativa de controle sobre o comportamento produtivo humano.

MacKay enfatizou que a transmissão e o monitoramento de dados de sensores eram apenas parte da questão. O trajeto não bastava; era necessário o roteamento. Ele defendia um ‘processo reverso’ de tele-estimulação que não apenas monitoraria o comportamento, mas também revelaria como ele poderia ser modificado e otimizado, proporcionando aquilo que considerava ‘um diálogo remoto entre o sujeito e o experimentador’. A ampla visão de MacKay concretizou-se na era digital. A precisão dos satélites, combinada ao crescimento explosivo do poder computacional incorporado em minúsculas estruturas de silício, sensores avançados, redes habilitadas pela internet e análises preditivas de big data, produziu sistemas extraordinários capazes de revelar os significados e os movimentos de populações inteiras e de seus indivíduos: em qualquer lugar e a qualquer momento (Zuboff, 2019, p. 376-377, tradução nossa).

Se a gente observar com atenção, frente à crescente complexidade tecnológica das cadeias produtivas contemporâneas, a formação profissional passa a ocupar posição estratégica na sustentação operacional da indústria inteligente, sobretudo porque a digitalização produtiva exige trabalhadores capazes de interpretar sistemas automatizados, operar interfaces computacionais sofisticadas e interagir continuamente com tecnologias baseadas em inteligência artificial, análise de dados e automação cognitiva. A qualificação técnica tradicional, centrada exclusivamente na execução mecânica das tarefas industriais, revela-se insuficiente diante de ambientes produtivos marcados por mudanças tecnológicas aceleradas, integração digital contínua e reorganização constante dos processos operacionais. O desenvolvimento das chamadas “competências híbridas” torna-se elemento decisivo nesse novo cenário industrial, já que os trabalhadores precisam combinar conhecimentos técnicos específicos com habilidades analíticas, capacidade de adaptação tecnológica e domínio de ferramentas digitais complexas. Como resultado, a aprendizagem permanente deixa de representar apenas um diferencial competitivo e passa a funcionar como condição estrutural de permanência profissional dentro das organizações produtivas automatizadas. Em sistemas industriais altamente conectados, profissionais são frequentemente confrontados com atualizações de softwares operacionais, reconfigurações de plataformas analíticas, introdução de novos dispositivos automatizados e mudanças contínuas nos fluxos produtivos coordenados digitalmente. Isso exige processos formativos capazes de

acompanhar a velocidade das transformações tecnológicas contemporâneas, articulando educação técnica, competências digitais e desenvolvimento contínuo da capacidade analítica dos trabalhadores. A relação entre formação profissional e produção industrial sofre, portanto, uma transformação profunda, porque a qualificação passa a depender menos da repetição estável de procedimentos e mais da capacidade de interpretar sistemas dinâmicos em permanente mutação tecnológica. Em setores industriais fortemente automatizados, trabalhadores precisam compreender simultaneamente funcionamento de sensores inteligentes, leitura de dashboards operacionais, análise de indicadores produtivos e interação com sistemas baseados em inteligência artificial aplicada à produção. Isso amplia significativamente a importância de modelos educacionais voltados ao desenvolvimento de competências transversais relacionadas à resolução de problemas complexos, interpretação de dados e adaptação rápida às mudanças operacionais. Schwab afirma que “[...] a quarta revolução industrial exigirá novas formas de aprendizagem contínua e atualização permanente das habilidades profissionais” (2016, p. 94). Ou seja, a necessidade de formação contínua também reorganiza a própria atuação das empresas industriais, que passam a investir cada vez mais em programas internos de capacitação tecnológica, treinamentos digitais e qualificação permanente da força de trabalho. Em muitos casos, organizações produtivas estabelecem parcerias com universidades, centros tecnológicos e instituições de formação profissional para desenvolver programas voltados especificamente às demandas da indústria inteligente. O processo educativo deixa de ocorrer apenas em etapas formais da formação inicial e passa a integrar continuamente a dinâmica cotidiana do trabalho industrial. Técnicos, engenheiros e operadores convivem permanentemente com exigências relacionadas à atualização de competências digitais e domínio de novas ferramentas tecnológicas incorporadas aos sistemas produtivos. Nesse cenário, a velocidade das mudanças tecnológicas faz com que conhecimentos adquiridos em determinados períodos se tornem rapidamente insuficientes diante das novas demandas operacionais introduzidas pelas arquiteturas digitais inteligentes. Esse movimento intensifica a centralidade da educação continuada dentro do capitalismo tecnológico contemporâneo, ampliando a pressão por aprendizado constante e adaptação profissional permanente. Também se torna evidente que a qualificação exigida pela indústria inteligente não se limita apenas ao domínio técnico-operacional dos sistemas automatizados, uma vez que a complexidade crescente das cadeias produtivas digitais amplia a necessidade de competências relacionadas à comunicação interdisciplinar, interpretação crítica de informações, gestão colaborativa e capacidade de tomar decisões em ambientes altamente

dinâmicos. Rifkin escreve que “[...] as economias digitais dependerão cada vez mais de trabalhadores capazes de aprender, adaptar-se e cooperar continuamente” (2014, p. 207). A formação profissional para a indústria inteligente passa, portanto, a depender de modelos educacionais mais flexíveis, interdisciplinares e tecnologicamente integrados, capazes de preparar trabalhadores para ambientes produtivos marcados por automação avançada, inteligência artificial e transformação contínua das exigências ocupacionais contemporâneas.

Mas é preciso dizer que, diante da ampliação das capacidades técnicas da automação inteligente, a Indústria 5.0 passa a atribuir crescente importância às competências humanas que permanecem dificilmente reproduzíveis por sistemas algorítmicos e máquinas automatizadas, especialmente aquelas relacionadas à criatividade, interpretação contextual, pensamento crítico, sensibilidade cognitiva e capacidade de inovação colaborativa. A automação avançada consegue executar operações repetitivas, cálculos complexos e reconhecimento de padrões com elevada precisão operacional, porém ainda encontra limites importantes quando confrontada com processos decisórios dependentes de imaginação criativa, julgamento contextual, interpretação subjetiva e construção coletiva de soluções inovadoras. Logo, a valorização dessas capacidades humanas representa uma mudança relevante na organização contemporânea dos ambientes produtivos, porque a inteligência industrial deixa de ser compreendida apenas como resultado da automação tecnológica e passa a depender também da articulação entre conhecimento humano, criatividade aplicada e cooperação interdisciplinar. Em sistemas produtivos altamente complexos, situações inesperadas, problemas inéditos e desafios operacionais não padronizados frequentemente exigem interpretações que ultrapassam respostas previamente programadas pelos sistemas automatizados. Nesses casos, capacidades humanas relacionadas à experiência prática, leitura contextual e formulação criativa de alternativas tornam-se decisivas para estabilidade operacional e inovação organizacional. A própria dinâmica da inovação industrial contemporânea depende cada vez mais da interação entre diferentes formas de conhecimento, integrando competências técnicas, cognitivas e colaborativas dentro de estruturas produtivas fortemente mediadas pelas tecnologias digitais. Em projetos industriais voltados à customização avançada, sustentabilidade produtiva e desenvolvimento tecnológico, equipes multidisciplinares atuam articulando inteligência computacional e criatividade humana na formulação de soluções operacionais adaptadas a contextos específicos. A inovação deixa, portanto, de ser concebida apenas como consequência automática do avanço tecnológico e passa a envolver processos coletivos de interpretação, experimentação e construção colaborativa de conhecimento. Florida

afirma que “[...] criatividade humana tornou-se uma das principais forças produtivas da economia contemporânea” (2011, p. 31). Ou seja, a valorização das competências humanas não automatizáveis também reorganiza os próprios critérios de competitividade industrial. Dito isso, organizações produtivas passam a reconhecer que diferenciais estratégicos não dependem exclusivamente da aquisição de tecnologias avançadas, mas também da capacidade de estimular criatividade organizacional, cooperação intelectual e produção coletiva de soluções inovadoras. Em cadeias produtivas conectadas globalmente, empresas tecnologicamente semelhantes podem apresentar desempenhos bastante distintos conforme capacidade de mobilizar conhecimento humano, incentivar inovação colaborativa e desenvolver ambientes favoráveis à criatividade técnica. Isso amplia a importância de culturas organizacionais mais abertas à experimentação, à troca interdisciplinar de conhecimentos e à participação ativa dos trabalhadores na formulação de melhorias produtivas. Isso deixa claro que a sensibilidade humana também adquire papel estratégico em processos relacionados à sustentabilidade, responsabilidade social e tomada de decisão ética dentro da indústria inteligente. Sistemas automatizados conseguem otimizar processos operacionais com grande eficiência técnica, porém decisões envolvendo impactos ambientais, consequências sociais e prioridades organizacionais frequentemente dependem de avaliações humanas mais amplas e contextualizadas. Em muitos casos, a interpretação ética das consequências produtivas exige capacidades de julgamento que ultrapassam os limites operacionais dos algoritmos industriais. A própria construção de modelos produtivos sustentáveis passa a depender da articulação entre inovação tecnológica e responsabilidade humana diante dos efeitos econômicos, sociais e ambientais associados à digitalização industrial contemporânea. É neste sentido que Land afirma que “[...] a criatividade continua sendo uma capacidade profundamente humana ligada à imaginação e à interpretação” (1973, p. 18). Em vista disso, a valorização das competências humanas relacionadas à criatividade e à inovação colaborativa indica, portanto, que a Indústria 5.0 busca reorganizar a relação entre tecnologia e trabalho sob parâmetros menos centrados exclusivamente na automação operacional e mais orientados pela complementaridade entre inteligência artificial e capacidades humanas complexas, reconhecendo que interpretação crítica, imaginação criativa e cooperação intelectual permanecem elementos centrais para o desenvolvimento industrial contemporâneo.

A questão ganha força, sobretudo porque, segundo Schwab (2016, p. 54), “[...] o talento humano, mais do que o capital, representará o fator crítico de produção”, formulação que sintetiza uma das mudanças mais relevantes associadas à transição contemporânea da Indústria 4.0 para a

5.0, especialmente no que se refere ao reposicionamento estratégico do trabalhador dentro dos sistemas produtivos inteligentes. Na prática, a reorganização das estruturas industriais digitais passa gradualmente a reconhecer que desempenho produtivo sustentável não depende exclusivamente da automação técnica das operações, mas também da capacidade humana de interpretar contextos complexos, construir soluções criativas e coordenar processos colaborativos em ambientes tecnológicos altamente dinâmicos. É justamente neste ponto que a centralidade humana reaparece, portanto, não como retorno aos modelos produtivos tradicionais baseados em trabalho manual intensivo, mas como reconhecimento de que criatividade, julgamento crítico, cooperação intelectual e sensibilidade estratégica permanecem indispensáveis mesmo diante do avanço acelerado da inteligência artificial industrial. A própria competitividade das organizações produtivas passa a depender crescentemente da combinação entre eficiência tecnológica e inteligência humana aplicada à inovação contínua. Em estruturas produtivas marcadas por automação avançada, sistemas digitais conseguem executar operações com elevado grau de precisão técnica, porém frequentemente encontram limitações diante de situações que exigem interpretação contextual, adaptação criativa e compreensão ampla das consequências organizacionais das decisões produtivas. Essa reconfiguração altera inclusive os próprios critérios de valorização profissional dentro das organizações industriais contemporâneas; funções estritamente operacionais tendem progressivamente à automatização, enquanto capacidades humanas relacionadas à interpretação complexa, liderança colaborativa, formulação estratégica e inovação interdisciplinar passam a adquirir maior relevância econômica e organizacional. Em muitas organizações industriais, trabalhadores deixam de atuar apenas como executores de tarefas previamente definidas e passam a ocupar posições relacionadas à supervisão inteligente dos processos automatizados, à integração entre setores produtivos e à formulação coletiva de melhorias operacionais. O conhecimento humano passa, então, a ser compreendido como componente estrutural da própria inteligência produtiva. Isto é, a reconstrução da centralidade humana também se relaciona diretamente à busca por modelos produtivos mais sustentáveis e socialmente responsáveis. Logo, a racionalidade produtiva associada à Indústria 5.0 amplia discussões relacionadas ao equilíbrio entre eficiência econômica, bem-estar ocupacional e responsabilidade ambiental. Isso modifica significativamente o próprio entendimento sobre produtividade industrial, que deixa gradualmente de ser associada apenas à maximização quantitativa da produção e passa a incorporar preocupações relacionadas à qualidade do trabalho, sustentabilidade operacional e impactos sociais da automação tecnológica. Em sistemas

industriais orientados por essa lógica, o trabalhador não é percebido exclusivamente como variável operacional subordinada à máquina, mas como agente ativo na construção de soluções produtivas mais inteligentes e sustentáveis. Peccei escreve que “[...] o verdadeiro recurso da humanidade é o próprio ser humano” (1981, p. 112); assim, essa compreensão torna-se particularmente relevante em contextos nos quais a inovação industrial depende fortemente da capacidade de cooperação entre diferentes áreas do conhecimento. Concretamente, a interação entre engenheiros, programadores, analistas de dados, operadores técnicos e gestores produtivos passa a constituir elemento estratégico para desenvolvimento de sistemas industriais capazes de combinar desempenho tecnológico com flexibilidade organizacional e responsabilidade social. É aí que a inteligência coletiva adquire papel central na resolução de problemas produtivos complexos, especialmente porque muitos desafios contemporâneos ultrapassam respostas estritamente automatizadas. A própria sustentabilidade industrial depende, em grande medida, da capacidade humana de interpretar impactos ambientais, antecipar consequências sociais e construir soluções tecnológicas alinhadas a critérios éticos e organizacionais mais amplos. De maneira direta, a reconstrução da centralidade humana nos sistemas produtivos inteligentes indica, portanto, que a Indústria 5.0 procura estabelecer uma relação mais equilibrada entre automação tecnológica e valorização do trabalho humano, reconhecendo que inovação sustentável, criatividade aplicada e desenvolvimento industrial socialmente responsável dependem diretamente da presença ativa das capacidades humanas dentro das estruturas produtivas contemporâneas.

A Indústria 5.0 promove uma melhoria na qualidade da manufatura ao atribuir aos seres humanos tarefas que exigem pensamento crítico e transferir para robôs ou máquinas atividades repetitivas e monótonas. Como especialistas operam essas máquinas, a Indústria 5.0 torna-se capaz de sustentar funções que demandam um nível de especialização superior ao da Indústria 4.0. Além disso, enfatiza o aumento da satisfação dos clientes por meio do estabelecimento de uma relação cooperativa entre humanos e robôs dentro das organizações. Outro benefício dessa tecnologia consiste no fato de que a Indústria 5.0 oferece soluções mais ambientalmente sustentáveis do que as transformações industriais convencionais (Leong et al., 2024, p. 85-86, tradução nossa).

Considerando esse panorama, a consolidação da Indústria 5.0 vem sendo acompanhada por uma mudança significativa nas prioridades estratégicas das organizações produtivas, sobretudo porque crescimento econômico, desempenho tecnológico e sustentabilidade ambiental passam progressivamente a ser tratados como dimensões interdependentes dentro das novas arquiteturas industriais inteligentes. O avanço da digitalização produtiva deixou de estar

associado apenas à ampliação da eficiência operacional e passou a incorporar preocupações relacionadas ao consumo energético, à emissão de carbono, ao reaproveitamento de materiais e à construção de modelos produtivos ambientalmente mais responsáveis. O que acontece é que a eficiência industrial contemporânea passa, então, a envolver não apenas capacidade de produzir mais rapidamente, mas também competência para reduzir desperdícios, minimizar impactos ambientais e racionalizar o uso dos recursos naturais empregados ao longo das cadeias produtivas. Tecnologias associadas à automação inteligente, à análise de dados em tempo real e ao monitoramento contínuo dos fluxos operacionais permitem acompanhar com elevada precisão o consumo energético, o desempenho ambiental e os níveis de desperdício gerados durante os processos industriais. Na prática, a utilização de sensores inteligentes, sistemas analíticos e plataformas digitais de supervisão energética possibilita identificar falhas operacionais, desperdícios invisíveis e gargalos produtivos que anteriormente permaneciam difíceis de mapear nas estruturas industriais convencionais. Isso favorece processos mais eficientes de gestão ambiental e contribui diretamente para redução de perdas produtivas relacionadas ao uso excessivo de energia, matérias-primas e recursos logísticos. Cadeias produtivas baseadas em integração digital conseguem reorganizar rotas de transporte, otimizar consumo energético das máquinas e reduzir desperdícios materiais por meio de sistemas inteligentes de controle operacional. Em muitos segmentos industriais, tecnologias de monitoramento ambiental passaram a atuar continuamente na identificação de emissões, no controle do consumo hídrico e na racionalização energética dos sistemas produtivos. Rifkin afirma que “[...] a eficiência energética será a principal medida da produtividade econômica no século XXI” (2012, p. 143). Esse olhar torna-se particularmente relevante diante da crescente pressão internacional por descarbonização produtiva e redução dos impactos ambientais associados à atividade industrial. Não à toa que empresas inseridas em cadeias globais de produção passaram a enfrentar exigências crescentes relacionadas à sustentabilidade operacional, rastreabilidade ambiental e redução das emissões de carbono ao longo de seus processos produtivos. A governança tecnológica assume papel estratégico nesse contexto porque a utilização das tecnologias digitais passa a envolver também responsabilidade ambiental, transparência organizacional e compromisso com padrões sustentáveis de desenvolvimento industrial. A própria concepção de inovação industrial sofre alterações importantes, já que desempenho tecnológico deixa de ser avaliado exclusivamente pela capacidade de acelerar a produção e passa a incluir critérios relacionados à sustentabilidade ambiental, à eficiência energética e à redução dos impactos ecológicos das operações industriais.

O reaproveitamento inteligente de resíduos industriais, a utilização de energias renováveis e a ampliação de práticas associadas à economia circular passam gradualmente a integrar os modelos produtivos vinculados à Indústria 5.0. Sistemas produtivos conectados conseguem, por exemplo, reaproveitar calor residual das operações industriais, otimizar automaticamente níveis de consumo energético e ajustar fluxos produtivos conforme indicadores ambientais monitorados em tempo real. Desse modo, a inteligência operacional aplicada à sustentabilidade amplia significativamente a capacidade das organizações de equilibrar competitividade econômica e responsabilidade ambiental dentro das cadeias produtivas contemporâneas. Também se intensificam discussões relacionadas à necessidade de modelos de governança capazes de regular impactos ambientais associados à expansão tecnológica acelerada; o crescimento das infraestruturas digitais, dos centros de processamento de dados e das operações automatizadas demanda elevado consumo energético, ampliando debates relacionados aos limites ambientais da própria transformação digital contemporânea. Sachs escreve que “[...] desenvolvimento sustentável pressupõe compatibilizar eficiência econômica, prudência ecológica e justiça social” (2008, p. 36) o que, na Indústria 5.0 procura justamente reorganizar essa relação entre tecnologia, produção e sustentabilidade sob parâmetros mais equilibrados, nos quais automação inteligente, inovação industrial e responsabilidade ambiental deixam de ser dimensões isoladas e passam a compor uma mesma lógica estratégica orientada pela construção de sistemas produtivos tecnologicamente avançados, ambientalmente responsáveis e socialmente sustentáveis.

Em uma leitura compreensiva, a transição para modelos produtivos associados à economia circular representa uma das mudanças mais relevantes nas estratégias industriais contemporâneas, especialmente porque a lógica linear tradicional baseada em extração, produção, consumo e descarte passa progressivamente a ser substituída por sistemas orientados à reutilização de materiais, reaproveitamento energético e ampliação inteligente do ciclo de vida dos produtos. O funcionamento industrial deixa gradualmente de depender exclusivamente da exploração contínua de novos recursos naturais e passa a incorporar mecanismos voltados à recuperação de componentes, reciclagem tecnológica e reinserção produtiva de materiais anteriormente descartados. Essa mudança altera profundamente o planejamento das cadeias industriais porque resíduos produtivos passam a ser compreendidos como recursos economicamente reaproveitáveis dentro das próprias estruturas operacionais. Componentes eletrônicos, resíduos metálicos, embalagens industriais e materiais poliméricos começam a integrar circuitos produtivos mais amplos, como objetivo de reduzir desperdícios e diminuir pressão ambiental associada ao

consumo contínuo de matérias-primas virgens. Para isso, sistemas industriais conectados digitalmente conseguem rastrear circulação de materiais, monitorar ciclos produtivos e identificar possibilidades de reaproveitamento com níveis elevados de precisão operacional. Isso favorece modelos produtivos mais eficientes sob perspectiva ambiental e econômica, sobretudo em segmentos industriais dependentes de alto consumo energético e elevada utilização de recursos naturais. Sob essa racionalidade, a utilização de sensores, bancos de dados integrados e sistemas analíticos avançados amplia significativamente a capacidade das organizações de controlar fluxos materiais, prever desperdícios e reorganizar operações de reaproveitamento produtivo. Produtos passam a ser concebidos não apenas para consumo imediato, mas também para desmontagem futura, reaproveitamento parcial e reinserção em novos ciclos industriais. Braungart e McDonough afirmam que “[...] resíduos equivalem a alimento em sistemas industriais inteligentes” (2002, p. 104), isto é, essa formulação sintetiza precisamente a mudança de racionalidade presente na economia circular contemporânea, na qual desperdício deixa de ser percebido como consequência inevitável da produção industrial e passa a ser tratado como falha de planejamento operacional e organizacional. Soma-se a isso, a intensificação de investimentos voltados à reciclagem tecnológica de equipamentos industriais, reaproveitamento de componentes eletrônicos e desenvolvimento de sistemas produtivos baseados em manutenção regenerativa dos recursos empregados ao longo das operações industriais. O avanço dessas estratégias produtivas encontra forte apoio nas tecnologias digitais associadas à análise massiva de dados e à inteligência estratégica automatizada. Diante desse quadro, ferramentas analíticas baseadas em inteligência artificial permitem interpretar grandes volumes de informações operacionais, prever padrões de consumo, reorganizar fluxos logísticos e otimizar continuamente o desempenho produtivo das organizações industriais. O gerenciamento operacional deixa de depender exclusivamente de análises retrospectivas e passa a incorporar mecanismos contínuos de monitoramento e previsão inteligente das atividades industriais. A utilização intensiva de dados também modifica estruturas decisórias dentro das organizações, ampliando velocidade operacional e capacidade de resposta diante de oscilações econômicas, logísticas e produtivas. Porter e Heppelmann (2014) escrevem que “[...] produtos inteligentes e conectados estão transformando a maneira como empresas competem e operam” (p. 11), pontuando que essa mudança reorganiza profundamente os modelos tradicionais de gestão industrial, pois decisões estratégicas passam a ser apoiadas por sistemas capazes de integrar informações provenientes de diferentes setores organizacionais, cadeias logísticas e ambientes produtivos distribuídos

globalmente. O desenvolvimento da Indústria 5.0 amplia, portanto, a convergência entre economia circular, inteligência analítica e gestão estratégica automatizada, consolidando modelos industriais orientados não apenas pela eficiência operacional, mas também pela reutilização inteligente dos recursos produtivos, pela sustentabilidade econômica de longo prazo e pela capacidade de construir sistemas produtivos ambientalmente mais responsáveis e tecnologicamente integrados.

A crescente integração digital das cadeias globais de suprimento vem modificando profundamente a organização contemporânea da produção industrial, sobretudo porque circulação de mercadorias, coordenação logística, monitoramento operacional e planejamento produtivo passam progressivamente a funcionar por meio de sistemas conectados capazes de compartilhar informações em tempo real entre diferentes regiões do mundo. Fluxos produtivos anteriormente organizados de maneira fragmentada tornam-se articulados por redes digitais capazes de sincronizar fornecedores, centros produtivos, operadores logísticos e mercados consumidores dentro de estruturas altamente integradas de circulação econômica global. Essa conectividade reorganiza não apenas velocidade operacional das cadeias industriais, mas também capacidade de resposta diante de oscilações econômicas, crises logísticas e mudanças rápidas nos padrões de consumo internacional. O que acontece é que, informações relacionadas a estoque, transporte, consumo energético, rastreamento de mercadorias e desempenho produtivo passam a circular continuamente entre diferentes unidades operacionais distribuídas globalmente, permitindo ajustes quase instantâneos nas atividades industriais e logísticas. Isso acaba fazendo com que a conectividade em tempo real reduza atrasos operacionais, amplie previsibilidade logística e fortaleça capacidade de coordenação entre diferentes etapas das cadeias globais de produção. Sistemas de rastreamento digital conseguem acompanhar deslocamento de matérias-primas, componentes industriais e produtos acabados desde origem produtiva até destino final de comercialização, ampliando controle operacional e capacidade analítica das organizações industriais contemporâneas. Também se intensifica o uso de algoritmos inteligentes voltados à otimização logística, reorganização dinâmica das rotas de transporte e previsão automatizada das demandas produtivas globais. Em verdade, estamos diante de empresas industrialmente integradas que conseguem reorganizar rapidamente fornecedores, redirecionar fluxos logísticos e ajustar operações produtivas conforme alterações econômicas, climáticas ou geopolíticas identificadas em diferentes regiões do mercado internacional. Castells afirma que “[...] a economia global funciona em tempo real em escala planetária” (1999, p. 119) e essa formulação

ajuda a compor uma leitura teórica como a digitalização produtiva contemporânea amplia interdependência entre cadeias industriais distribuídas mundialmente, tornando circulação de informações um elemento tão estratégico quanto circulação física das mercadorias. Diante desse quadro, a própria noção de eficiência logística passa a depender crescentemente da capacidade de integrar dados operacionais, inteligência analítica e monitoramento contínuo das atividades produtivas distribuídas globalmente. Paralelamente a essa reorganização logística internacional, também ocorre transformação significativa nos padrões contemporâneos de produção industrial e consumo. Em outras palavras, o avanço das tecnologias inteligentes permite crescente personalização dos produtos industriais, substituindo gradualmente modelos produtivos rígidos baseados em padronização massiva por sistemas mais flexíveis e adaptáveis às demandas específicas dos consumidores. Assim, estruturas produtivas digitalmente integradas conseguem ajustar linhas de produção, modificar especificações técnicas e reorganizar operações industriais conforme preferências individuais de consumo identificadas em tempo real. No cotidiano, isso altera profundamente a relação entre indústria e mercado consumidor porque processos produtivos passam a operar sob lógica mais flexível, dinâmica e personalizada. Estamos imersos em tecnologias associadas à manufatura inteligente, impressão tridimensional, automação adaptativa e análise comportamental de dados que ampliam a capacidade das organizações de produzir mercadorias customizadas sem comprometer eficiência operacional das cadeias industriais. Isso fica claro que consumidores deixam progressivamente de atuar apenas como receptores passivos de produtos padronizados e passam a influenciar diretamente na configuração, funcionalidade e características específicas das mercadorias produzidas. A própria lógica competitiva das organizações industriais sofre alterações importantes, já que flexibilidade produtiva e capacidade de adaptação às demandas individuais tornam-se elementos estratégicos dentro dos mercados globalmente conectados. Pine II escreve que “[...] clientes querem exatamente o que desejam, quando desejam e da forma como desejam” (1993, p. 44) e essa combinação entre logística inteligente, conectividade global e produção customizada consolida, portanto, um novo modelo industrial caracterizado pela integração digital das cadeias produtivas, pela circulação contínua de informações e pela crescente capacidade das organizações de adaptar processos produtivos às demandas específicas dos consumidores contemporâneos, redefinindo profundamente as formas de produção, distribuição e consumo no contexto da Indústria 5.0.

Em síntese, enquanto a revolução atual está voltada principalmente para transformar fábricas em instalações inteligentes conectadas à Internet das Coisas, a Indústria 5.0

procura recolocar a inteligência e os talentos humanos no centro da estrutura industrial. Ao integrar processos de trabalho e sistemas inteligentes, a Revolução Industrial 5.0 devolve a força de trabalho humana à fábrica. Nos processos automatizados, humanos e máquinas são concebidos para trabalhar conjuntamente a fim de melhorar produtividade e eficiência, preservando ao mesmo tempo a criatividade humana e o pensamento crítico nas operações industriais (Leong et al., 2024, p. 85, tradução nossa).

Não é difícil perceber que o aprofundamento da automação industrial contemporânea vem ampliando debates relacionados à responsabilidade social corporativa, sobretudo porque decisões produtivas mediadas por sistemas inteligentes passam a produzir impactos diretos sobre trabalho humano, inclusão profissional, distribuição de renda e condições sociais associadas à reorganização tecnológica da economia global. Empresas industrialmente digitalizadas deixam progressivamente de atuar apenas como unidades econômicas voltadas ao aumento da produtividade e passam a ocupar posição estratégica na condução das consequências sociais produzidas pela transformação tecnológica contemporânea. No fundo, a substituição parcial de atividades humanas por sistemas automatizados, algoritmos decisórios e máquinas inteligentes exige novas formas de responsabilidade institucional voltadas à proteção do trabalho, à qualificação profissional contínua e à redução das desigualdades tecnológicas que emergem no interior da economia digital. Quando isso acontece, ambientes produtivos altamente automatizados tendem a ampliar diferenças entre “trabalhadores qualificados” para operar sistemas inteligentes e “trabalhadores excluídos” dos novos requisitos técnicos impostos pela transformação industrial contemporânea. Essa realidade produz efeitos relevantes sobre estabilidade ocupacional, distribuição de oportunidades profissionais e acesso às novas formas de inserção econômica vinculadas à Indústria 5.0. Em verdade, empresas que concentram investimentos tecnológicos sem ampliar políticas internas de capacitação e inclusão acabam intensificando desigualdades ocupacionais já existentes dentro do próprio ambiente produtivo. Drucker afirma que “[...] o recurso econômico básico não é mais o capital, nem os recursos naturais, nem o trabalho. É o conhecimento” (1993, p. 7), proposição que ajuda a examinar em profundidade que processos produtivos contemporâneos dependem cada vez mais da capacidade das organizações de transformar conhecimento humano em elemento estratégico de inclusão econômica e desenvolvimento industrial sustentável. Em razão disso, responsabilidade social corporativa passa a envolver programas permanentes de requalificação profissional, formação tecnológica, inclusão de grupos socialmente vulneráveis e fortalecimento das condições humanas de trabalho dentro das organizações produtivas. Frente a isso, também cresce a pressão social sobre empresas relacionadas à transparência algorítmica, proteção de dados dos trabalhadores,

prevenção de discriminações automatizadas e estabelecimento de limites éticos para utilização de sistemas inteligentes nas relações laborais. Modelos industriais orientados exclusivamente por eficiência econômica tendem a ampliar precarização ocupacional quando não são acompanhados por mecanismos institucionais de proteção social e valorização humana. Por esse motivo, a própria sustentabilidade das organizações passa a depender crescentemente da capacidade de equilibrar desempenho tecnológico, compromisso social e responsabilidade ética diante dos impactos produzidos pela automação contemporânea. Nesse horizonte, políticas públicas assumem importância decisiva na condução da transição industrial associada à Indústria 5.0. Por consequência, Estados nacionais passam a enfrentar o desafio de formular mecanismos regulatórios capazes de estimular inovação tecnológica sem comprometer direitos sociais historicamente consolidados. E é justamente por isso que estratégias públicas voltadas à qualificação profissional, fortalecimento educacional, incentivo à pesquisa científica, financiamento tecnológico e regulação ética da inteligência artificial tornam-se elementos fundamentais para reduzir desequilíbrios associados à transformação industrial contemporânea. Uma vez que, governos que não investem em educação tecnológica, inclusão digital e atualização das políticas trabalhistas tendem a ampliar vulnerabilidades econômicas diante da rápida digitalização das cadeias globais de produção. Também se amplia a necessidade de regulamentações relacionadas ao uso de algoritmos decisórios, proteção de dados industriais, segurança digital e responsabilidade jurídica diante de decisões automatizadas realizadas por sistemas inteligentes. Polanyi escreveu que “[...] deixar o destino dos seres humanos e do seu ambiente natural ao mecanismo do mercado seria o mesmo que demolir a sociedade” (2000, p. 94), o que corresponde dizer que desenvolvimento tecnológico sem regulação social adequada tende a ampliar desigualdades, inseguranças econômicas e fragilização das relações humanas no interior da economia contemporânea. A construção de políticas públicas voltadas à inovação responsável, à proteção do trabalho humano e à democratização do acesso tecnológico torna-se, portanto, elemento central para que a transição industrial contemporânea consiga articular produtividade, desenvolvimento econômico e compromisso social dentro de um modelo industrial mais equilibrado, inclusivo e humanamente sustentável.

CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo da pesquisa permitiu reconhecer as múltiplas dimensões de que a passagem da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0 não representa apenas continuidade linear do avanço tecnológico industrial, mas uma redefinição mais ampla da própria racionalidade produtiva contemporânea. Como vimos, os sistemas produtivos passam a operar por meio de arquiteturas digitais altamente integradas, sustentadas por inteligência artificial, computação em nuvem, análise massiva de dados, sensores inteligentes, automação avançada e conectividade permanente entre máquinas, plataformas e cadeias globais de suprimento. Esse deslocamento altera profundamente o funcionamento da produção industrial porque reduz a dependência de processos rígidos, amplia capacidade de resposta em tempo real e permite níveis inéditos de adaptação produtiva. Logo, a indústria contemporânea deixa de operar apenas com base na repetição mecânica de tarefas e passa a depender de estruturas capazes de interpretar dados continuamente, antecipar falhas, reorganizar fluxos operacionais e ajustar a produção conforme oscilações de mercado, consumo, logística e disponibilidade de recursos. Os achados da pesquisa demonstraram que tecnologias como gêmeos digitais, sistemas preditivos, robótica colaborativa e gerenciamento automatizado não atuam de forma isolada, mas compõem ecossistemas produtivos interdependentes que transformam simultaneamente produtividade, gestão, planejamento industrial e organização do trabalho. Nesse cenário, a eficiência deixa de ser medida exclusivamente pelo aumento da velocidade operacional e passa a envolver capacidade adaptativa, sustentabilidade produtiva, flexibilidade industrial e inteligência decisória distribuída em toda a cadeia produtiva.

O estudo também evidenciou que a transformação tecnológica modifica intensamente o papel do trabalho humano dentro da indústria contemporânea. Funções historicamente associadas à execução repetitiva e operacional tendem a ser progressivamente automatizadas, enquanto cresce a demanda por trabalhadores capazes de interpretar informações complexas, operar sistemas digitais, solucionar problemas não padronizados e atuar de maneira integrada com máquinas inteligentes. Diante desse novo cenário, o trabalhador industrial deixa de ser visto apenas como executor mecânico de tarefas fragmentadas e passa a ocupar posição relacionada à supervisão analítica, tomada de decisão contextual, criatividade operacional e gerenciamento de processos automatizados. Essa mudança, contudo, não elimina tensões estruturais associadas ao mundo do trabalho. A pesquisa demonstrou que a automação amplia exigências por

hiperadaptabilidade profissional, aprendizagem contínua e atualização tecnológica permanente, produzindo novas formas de pressão ocupacional. Em face disso, a exigência de múltiplas competências técnicas, cognitivas e digitais intensifica processos de insegurança profissional, sobretudo em contextos marcados pela rápida obsolescência de conhecimentos e pela instabilidade das exigências produtivas. O trabalho industrial contemporâneo passa a ser atravessado simultaneamente por maior complexidade técnica e por novas formas de vulnerabilidade ocupacional, revelando que modernização produtiva não significa automaticamente melhoria das condições humanas de trabalho.

Outro achado importante relaciona-se aos impactos subjetivos produzidos pela hiperconectividade industrial. Isto é, a aceleração dos fluxos produtivos, o monitoramento contínuo do desempenho laboral e a digitalização permanente das rotinas de trabalho ampliam sobrecarga cognitiva, fadiga mental e pressão psicológica sobre trabalhadores inseridos em ambientes produtivos altamente conectados. Por esse motivo, a conectividade constante dissolve fronteiras mais nítidas entre tempo produtivo e tempo pessoal, intensificando mecanismos de vigilância e exigências relacionadas à disponibilidade contínua. Sob tais condições, sistemas automatizados de monitoramento, plataformas de desempenho e métricas algorítmicas passam a reorganizar formas de controle laboral dentro da indústria contemporânea, criando ambientes produtivos orientados por produtividade permanente, rastreabilidade contínua e análise constante da performance humana. Dito isso, a pesquisa demonstrou que a digitalização industrial não produz apenas transformações técnicas, mas altera também experiências subjetivas associadas ao trabalho, ao reconhecimento profissional e às formas de inserção social dentro da economia tecnológica contemporânea. O desenvolvimento industrial baseado exclusivamente em eficiência operacional tende a ampliar desgaste emocional, insegurança ocupacional e fragilização das relações humanas quando não existem mecanismos institucionais voltados à proteção social e à valorização efetiva do trabalhador.

Com efeito, os resultados obtidos permitiram identificar ainda que a Indústria 5.0 procura responder parcialmente às limitações humanamente degradantes associadas a modelos anteriores de automação produtiva. Diferentemente das abordagens centradas apenas em produtividade e redução de custos, a nova racionalidade industrial incorpora discursos relacionados à colaboração humano-máquina, sustentabilidade ambiental, responsabilidade social e valorização das capacidades humanas não automatizáveis. Criatividade, pensamento crítico, interpretação contextual, sensibilidade analítica e inovação colaborativa passam, teoricamente, a ocupar

posição estratégica dentro dos sistemas produtivos inteligentes. O estudo demonstrou que a centralidade humana reaparece não pela redução da tecnologia, mas pela percepção de que determinadas capacidades cognitivas, éticas e criativas permanecem dificilmente substituíveis por sistemas automatizados. De forma mais específica, a Indústria 5.0 redefine o lugar do trabalhador não como simples operador subordinado às máquinas, mas como elemento estratégico para coordenação, interpretação e inovação dentro de ambientes produtivos altamente complexos. Ainda assim, essa reconstrução da centralidade humana permanece condicionada às escolhas políticas, econômicas e institucionais realizadas pelas organizações e pelos Estados nacionais. Mas é preciso pontuar que, sem políticas de proteção laboral, inclusão tecnológica e democratização do acesso ao conhecimento, a valorização humana tende a permanecer restrita aos segmentos profissionais mais qualificados da economia digital.

Em continuidade, a pesquisa revelou igualmente que a transição industrial contemporânea aprofunda desigualdades globais relacionadas ao acesso tecnológico e à capacidade de inovação. Isto é, países periféricos enfrentam dificuldades estruturais vinculadas à dependência digital, baixa capacidade de investimento científico, fragilidade educacional e limitada autonomia tecnológica diante da concentração global de infraestrutura informacional e inteligência artificial. Estamos diante de economias centrais que controlam grande parte das plataformas digitais, dos sistemas industriais avançados e das tecnologias estratégicas que sustentam a nova organização produtiva global. Essa assimetria amplia dependência econômica e reduz capacidade competitiva de países que não conseguem desenvolver políticas robustas de ciência, tecnologia e inovação. O estudo demonstrou que a disputa contemporânea não ocorre apenas em torno de recursos materiais tradicionais, mas envolve domínio sobre dados, algoritmos, conectividade, automação avançada e inteligência computacional. Desse modo, a ausência de investimentos públicos em formação tecnológica, pesquisa científica e desenvolvimento industrial tende a ampliar vulnerabilidades econômicas e aprofundar desigualdades já existentes dentro da divisão internacional do trabalho. A transição tecnológica contemporânea, portanto, não pode ser compreendida apenas como fenômeno técnico, pois envolve relações de poder, dependência econômica e disputas globais associadas ao controle da inovação.

Neste sentido, o futuro da indústria inteligente dependerá menos da capacidade de automatizar integralmente os processos produtivos e mais da possibilidade de construir modelos industriais socialmente equilibrados, ambientalmente sustentáveis e humanamente responsáveis. Estamos diante de uma Indústria 5.0 que sinaliza uma tentativa de reorganizar a relação entre

tecnologia e trabalho humano a partir de parâmetros menos mecanicistas e mais orientados à cooperação, sustentabilidade e inteligência compartilhada. Contudo, os efeitos positivos dessa transformação não ocorrerão automaticamente. O desenvolvimento tecnológico pode ampliar desigualdades, precarização laboral e concentração econômica quando subordinado exclusivamente à lógica financeira e produtivista. Em contrapartida, políticas públicas voltadas à inovação responsável, qualificação profissional, proteção social, sustentabilidade industrial e regulação ética das tecnologias inteligentes podem favorecer formas mais inclusivas de desenvolvimento industrial. O principal desafio das próximas décadas estará relacionado à construção de modelos produtivos capazes de articular automação avançada, valorização humana, responsabilidade social e preservação ambiental sem reduzir o trabalhador a uma variável secundária dentro dos sistemas industriais inteligentes.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. R. **The architecture of cognition**. Cambridge: Harvard University Press, 1983.
- ANTUNES, R. **Adeus ao trabalho? Ensaio sobre as metamorfoses e a centralidade do mundo do trabalho**. São Paulo: Cortez, 2006.
- ANTUNES, R. **Os sentidos do trabalho: ensaio sobre a afirmação e a negação do trabalho**. São Paulo: Boitempo, 2009.
- ANTUNES, R. **O privilégio da servidão: o novo proletariado de serviços na era digital**. São Paulo: Boitempo, 2018.
- BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies**. New York: W. W. Norton & Company, 2014.
- CASILLI, A. A. **En attendant les robots: enquête sur le travail du clic**. Paris: Seuil, 2019.
- DAVENPORT, T. H. **The AI advantage: how to put the artificial intelligence revolution to work**. Cambridge: MIT Press, 2018.
- DAUGHERTY, P. R.; WILSON, H. J. **Human + machine: reimagining work in the age of AI**. Boston: Harvard Business Review Press, 2018.
- DEEPAK, B. et al. **Intelligent manufacturing systems in Industry 4.0**. Boca Raton: CRC Press, 2023.
- DEMING, W. E. **Out of the crisis**. Cambridge: MIT Press, 1986.

DOS SANTOS, A. N. S. et al. Educação e Tecnologia – um olhar crítico sobre a educação tecnológica a partir da perspectiva gramsciana e marxista. **ARACÊ**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 8150–8171, 2024. DOI: 10.56238/arev6n3-227. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1456>. Acesso em: 8 abr. 2026.

DRUCKER, P. F. **The practice of management**. New York: Harper & Row, 1954.

DRUCKER, P. F. **Post-capitalist society**. New York: Harper Business, 1993.

FAYOL, H. **General and industrial management**. London: Pitman Publishing, 1949.

FEENBERG, A. **Transforming technology: a critical theory revisited**. Oxford: Oxford University Press, 2002.

FEENBERG, A. **Between reason and experience: essays in technology and modernity**. Cambridge: MIT Press, 2010.

FLICK, U. **Introdução à metodologia de pesquisa: um guia para iniciantes**. Porto Alegre: Penso, 2013.

FLORIDI, L. **The fourth revolution: how the infosphere is reshaping human reality**. Oxford: Oxford University Press, 2014.

FLORIDI, L.; TADDEO, M. **The ethics of information warfare**. Cham: Springer, 2014.

FORD, H. **My life and work**. New York: Doubleday, Page & Company, 1922.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HAIMES, Y. Y.; SAGE, A. P. **Risk modeling, assessment, and management**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

HARARI, Y. N. **Homo Deus: a brief history of tomorrow**. New York: HarperCollins, 2016.

HARARI, Y. N. **21 lessons for the 21st century**. New York: Spiegel & Grau, 2019.

JURAN, J. M. **Juran on leadership for quality**. New York: Free Press, 1990.

KAHNEMAN, D. **Thinking, fast and slow**. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2020.

KUMAR, A.; KUMAR, M.; PANDEY, B. **Industry 4.0 in composite manufacturing industry for sustainable development**. Singapore: Springer, 2026.

LEONG, W. Y. **Industry 5.0: design, standards, techniques and applications for manufacturing**. Boca Raton: CRC Press, 2024.

MACHADO, C. F.; DAVIM, J. P. **Industry 5.0: creative and innovative organizations**. Cham: Springer, 2023.

MAIER, M. W.; RECHTIN, E. **The art of systems architecting**. Boca Raton: CRC Press, 2000.

MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E. **Machine, platform, crowd: harnessing our digital future**. New York: W. W. Norton & Company, 2017.

MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 10. ed. São Paulo: Hucitec, 2007.

MINAYO, M. C. S.; DESLANDES, S. F. **Caminhos do pensamento: epistemologia e método**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2002.

MINAYO, M. C. S.; DESLANDES, S. F.; GOMES, R. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. Petrópolis: Vozes, 2007.

MINSKY, M. **The society of mind**. New York: Simon & Schuster, 1988.

MOLINA, A. et al. **Enabling systems for intelligent manufacturing in Industry 4.0**. Cham: Springer, 2021.

NAYYAR, A.; KUMAR, A. **A roadmap to Industry 4.0: smart production, sharp business and sustainable development**. Cham: Springer, 2020.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. **The knowledge-creating company: how Japanese companies create the dynamics of innovation**. New York: Oxford University Press, 1995.

OHNO, T. **Toyota production system: beyond large-scale production**. Portland: Productivity Press, 1988.

PORTER, M. E. **Competitive advantage: creating and sustaining superior performance**. New York: Free Press, 1985.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RIFKIN, J. **The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world**. New York: Palgrave Macmillan, 2011.

RIFKIN, J. **The zero marginal cost society: the internet of things, the collaborative commons, and the eclipse of capitalism**. New York: Palgrave Macmillan, 2014.

SANTOS, A. N. S. dos, Felipe, J. N. de O., Pereira, K. R. et al. Gestão integrada de riscos em engenharia: aplicação de tecnologias inovadoras para promover qualidade de vida, segurança e sustentabilidade. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, 23(6), e10196. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n6-034> Acesso em 08 abr. 2026.

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

SENGE, P. M. **The fifth discipline: the art and practice of the learning organization**. New York: Doubleday, 1990.

SENNETT, R. **The corrosion of character: the personal consequences of work in the new capitalism**. New York: W. W. Norton & Company, 1998.

SENNETT, R. **The craftsman**. New Haven: Yale University Press, 2008.

SHINGO, S. **A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint**. Portland: Productivity Press, 1989.

SRNICEK, N. **Platform capitalism**. Cambridge: Polity Press, 2016.

STAKE, R. E. **Pesquisa qualitativa: estudando como as coisas funcionam**. Porto Alegre: Penso, 2011.

TALEB, N. N. **The black swan: the impact of the highly improbable**. New York: Random House, 2007.

TALEB, N. N. **Antifragile: things that gain from disorder**. New York: Random House, 2012.

TALEB, N. N. **Skin in the game: hidden asymmetries in daily life**. New York: Random House, 2018.

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

VERBEEK, P.-P. **What things do: philosophical reflections on technology, agency, and design**. University Park: Pennsylvania State University Press, 2005.

VERBEEK, P.-P. **Moralizing technology: understanding and designing the morality of things**. Chicago: University of Chicago Press, 2011.

WEBER, M. **Metodologia das ciências sociais**. São Paulo: Cortez, 1949.

ZUBOFF, S. **The age of surveillance capitalism: the fight for a human future at the new frontier of power**. New York: PublicAffairs, 2019.