


TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA ZONA FRANCA DE MANAUS: CAMINHOS E DESAFIOS ENTRE A INDÚSTRIA 4.0 E A SOCIEDADE 5.0

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-253>

Data de submissão: 17/11/2024

Data de publicação: 17/12/2024

Rosangela Victor do Vale

Engenheira de Produção

Acadêmica do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSSA/ITEGAM) –

AM – BRASIL

E-mail: rosangela.victor@gmail.com

Gil Eduardo Guimarães

D. Sc.

Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais

Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSSA/ITEGAM) –

AM – BRASIL

E-mail: gil.guimaraes@itegam.org.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2800-4620>

Nelson Marinelli Filho

D. Sc.

Doutor em Engenharia Mecânica

Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSSA/ITEGAM) –

AM – BRASIL

E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4362-0132>

Rodrigo Fernando dos Santos Salazar

D. Sc.

Doutor em Ciências – Química Analítica

Professor do Curso de MBA em Agronegócio - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz -

Esalq/USP – SP – BRASIL

E-mail: r.f.s.salazar@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5808-4321>

Geraldo Nunes Correa

D. Sc.

Doutor em Engenharia Mecânica

Professor do Curso Sistemas de Informação da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) -

MG – BRASIL

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5477-6953>

RESUMO

Este estudo analisa os impactos e desafios da transformação digital na Zona Franca de Manaus, destacando como as tecnologias da Indústria 4.0 podem impulsionar a transição para a Sociedade 5.0. A pesquisa emprega uma abordagem mista, integrando métodos qualitativos e quantitativos, com estudo de caso e pesquisa de campo aplicada ao Polo Industrial de Manaus (PIM). Os resultados indicam que 75% das empresas analisadas já implementaram iniciativas alinhadas à Sociedade 5.0, com ênfase em Produção/Operações e Tecnologia da Informação. No entanto, barreiras como deficiência na qualificação profissional, resistência organizacional e altos custos limitam o pleno aproveitamento das tecnologias emergentes. Por outro lado, benefícios como redução de custos, conectividade aprimorada e maior satisfação do cliente são evidentes. O artigo propõe um modelo integrativo que combina adoção tecnológica com estratégias de capacitação, incentivos fiscais e parcerias entre empresas e instituições acadêmicas. Conclui-se que a transformação digital no PIM tem potencial para posicionar a Zona Franca de Manaus como um exemplo global de desenvolvimento sustentável, promovendo inclusão social e inovação tecnológica.

Palavras-chave: Transformação Digital, Indústria 4.0, Sociedade 5.0, Polo Industrial de Manaus, Sustentabilidade, Zona Franca de Manaus.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, frequentemente referida como a Quarta Revolução Industrial, é um marco transformador no cenário industrial global. Esse paradigma caracteriza-se pela integração de tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data, robótica avançada e sistemas ciber-físicos (CPS), promovendo automação, conectividade e eficiência em níveis inéditos (Schwab, 2016). No Brasil, a Zona Franca de Manaus (ZFM) emerge como um caso peculiar, sendo um importante polo econômico que simultaneamente enfrenta desafios estruturais e busca alinhar-se às demandas de um mercado global cada vez mais digitalizado.

Criada em 1967 com o objetivo de promover o desenvolvimento econômico e social na Amazônia, a ZFM se consolidou como um dos principais motores industriais da região, abrangendo setores diversos como eletroeletrônicos, químico e de duas rodas (Silva & Silva, 2017). Contudo, a modernização tecnológica das indústrias locais tornou-se uma exigência para que a ZFM mantenha sua relevância no cenário global. Nesse contexto, a transformação digital impulsionada pelas tecnologias da Indústria 4.0 não é apenas uma oportunidade, mas uma necessidade para assegurar a competitividade do Polo Industrial de Manaus (PIM).

A transição para a Sociedade 5.0, conceito introduzido no Japão, apresenta um horizonte promissor para integrar avanços tecnológicos às necessidades humanas e sociais (Fukuyama, 2018). Essa visão propõe uma economia digital inclusiva e sustentável, que utiliza tecnologias como IA e IoT não apenas para ganhos econômicos, mas também para resolver desafios sociais, como desigualdade, infraestrutura precária e mudanças climáticas (Deguchi et al., 2020). Dessa forma, alinhar os princípios da Indústria 4.0 às metas da Sociedade 5.0 torna-se essencial para transformar a ZFM em um modelo de desenvolvimento sustentável e inovador.

1.1 JUSTIFICATIVA

A relevância desta pesquisa reside na necessidade de modernização do Polo Industrial de Manaus frente às pressões competitivas e aos desafios impostos pela globalização e pela digitalização econômica. Embora a ZFM represente uma parcela significativa da economia brasileira e desempenhe um papel estratégico na geração de empregos e na preservação ambiental, muitos de seus processos produtivos permanecem desatualizados em relação às tendências globais (CNI, 2018). Além disso, a transição para a Sociedade 5.0 pode contribuir para enfrentar problemas sociais e estruturais que há décadas limitam o pleno desenvolvimento da região.

Investir na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 no PIM não apenas elevará sua produtividade e eficiência, mas também criará condições para alinhar o crescimento industrial ao bem-

estar social, em consonância com os princípios da Sociedade 5.0. Iniciativas como a automação de processos, o uso de dados em tempo real e a qualificação profissional podem reduzir as desigualdades regionais e posicionar a ZFM como um exemplo de economia sustentável e inovadora.

Neste contexto, este estudo busca explorar como a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus (PIM) pode viabilizar a transição para a Sociedade 5.0, alinhando eficiência industrial, inovação tecnológica e bem-estar social.

A pesquisa procura compreender os impactos dessas tecnologias nas operações industriais, com foco em ganhos de produtividade, eficiência e sustentabilidade, enquanto avalia os desafios e oportunidades relacionados à capacitação da força de trabalho e à adaptação aos novos paradigmas tecnológicos. Além disso, investiga iniciativas colaborativas entre indústrias, governo e instituições de ensino, buscando soluções inovadoras para questões sociais, como mobilidade urbana e saúde, que possam ser enfrentadas por meio de tecnologias digitais.

Por fim, o estudo propõe um modelo integrativo que alinhe a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 aos princípios da Sociedade 5.0, promovendo uma economia mais inclusiva e inovadora, capaz de transformar a Zona Franca de Manaus em um exemplo de desenvolvimento sustentável e socialmente responsável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA 4.0

2.1.1 Definição e Origem

A Indústria 4.0, também chamada de Quarta Revolução Industrial, simboliza um novo paradigma na produção industrial, caracterizado pela integração de tecnologias digitais avançadas em processos produtivos. Introduzida oficialmente na Alemanha em 2011, durante a Feira de Hannover, a iniciativa foi desenhada para modernizar o setor industrial e torná-lo mais competitivo em um ambiente global digitalizado (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013).

A evolução das revoluções industriais anteriores destaca as distinções da Indústria 4.0. Enquanto a Primeira Revolução Industrial (Indústria 1.0) marcou a mecanização impulsionada pelo vapor, a Indústria 2.0 trouxe a produção em massa alimentada pela eletricidade. Na Indústria 3.0, a automação e o uso de computadores avançaram as linhas de produção. A Indústria 4.0, no entanto, conecta máquinas, sistemas e produtos por meio de redes digitais, permitindo que os processos sejam adaptáveis e gerenciados em tempo real (Schwab, 2016).

2.1.2 Principais Tecnologias

O cerne da Indústria 4.0 reside em tecnologias emergentes que integram os mundos físico e digital, promovendo automação, conectividade e personalização. Dentre as principais tecnologias destacam-se:

- **Internet das Coisas (IoT):** A IoT conecta dispositivos físicos à internet, permitindo a coleta e troca de dados em tempo real. Em fábricas inteligentes, sensores IoT monitoram e ajustam operações automaticamente, otimizando processos produtivos (Xu, He & Li, 2014).
- **Sistemas Ciber-Físicos (CPS):** Integram processos físicos e computacionais para o controle e monitoramento em tempo real, possibilitando a adaptação de máquinas às demandas de produção (Lee et al., 2015).
- **Big Data e Analytics:** A análise de grandes volumes de dados em tempo real oferece insights para decisões estratégicas, otimizando a eficiência e identificando falhas potenciais nos processos (Chen, Chiang & Storey, 2012).
- **Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina:** A IA permite que máquinas aprendam a partir de dados, resultando em manutenção preditiva, controle de qualidade automatizado e ajustes contínuos nas operações (Jordan & Mitchell, 2015).
- **Automação e Robótica Avançada:** Robôs colaborativos (cobots) realizam tarefas complexas, aumentando a produtividade e melhorando a segurança dos trabalhadores (Bahrin et al., 2016).
- **Blockchain:** Amplamente utilizada para segurança e rastreabilidade, especialmente em cadeias de suprimentos, garantindo transações transparentes e seguras (Kavalikov & Lagrange, 2018).

2.1.3 Impactos na Manufatura

A Indústria 4.0 transforma a manufatura com impactos significativos:

1. **Aumento da produtividade:** Máquinas inteligentes, conectadas e autônomas operam continuamente, reduzindo o tempo de inatividade (Schwab, 2016).
2. **Redução de custos operacionais:** A manutenção preditiva e a automação reduzem custos com mão de obra e desperdício de materiais (Porter & Heppelmann, 2014).
3. **Flexibilidade e personalização:** A produção personalizada em massa torna-se viável, permitindo que empresas atendam às demandas específicas dos consumidores (Bahrin et al., 2016).
4. **Melhoria na qualidade dos produtos:** Sensores e monitoramento em tempo real identificam defeitos, garantindo altos padrões de qualidade (Jordan & Mitchell, 2015).

5. **Sustentabilidade:** Processos mais eficientes reduzem emissões e consumo de energia, promovendo práticas ambientalmente responsáveis (Stock & Seliger, 2016).

Apesar das vantagens, os desafios incluem altos custos iniciais, necessidade de infraestrutura robusta e resistência à mudança por parte dos trabalhadores, além de preocupações com segurança cibernética (Caniato et al., 2018).

2.1.4 Indústria 4.0 no Contexto Brasileiro e na Zona Franca de Manaus

No Brasil, a adoção da Indústria 4.0 está em estágio inicial, mas apresenta potencial significativo, especialmente na Zona Franca de Manaus (ZFM). O Polo Industrial de Manaus (PIM), núcleo da ZFM, concentra indústrias que abrangem setores como eletroeletrônicos e químico, cuja modernização é essencial para manter a competitividade global (Silva & Silva, 2017).

A ZFM enfrenta desafios particulares, como limitações logísticas e falta de infraestrutura tecnológica avançada. Contudo, a adoção de tecnologias como IoT e automação pode aumentar a eficiência e reduzir custos. Investimentos em capacitação e infraestrutura digital, incluindo redes de alta velocidade e soluções de big data, são fundamentais para o sucesso da transformação digital na região (CNI, 2018).

Além disso, a Indústria 4.0 na ZFM pode promover sustentabilidade, utilizando tecnologias para reduzir emissões de carbono e minimizar desperdícios, alinhando-se aos princípios da Sociedade 5.0 e contribuindo para o desenvolvimento social e ambiental da Amazônia (Fukuyama, 2018).

2.2 SOCIEDADE 5.0

2.2.1 Conceito e Desenvolvimento

A Sociedade 5.0, um conceito introduzido pelo governo japonês em 2016 no 5th Science and Technology Basic Plan, representa uma nova etapa no desenvolvimento humano, focada em integrar avanços tecnológicos com o bem-estar social. Diferente da Indústria 4.0, cujo objetivo central é otimizar os processos industriais e a eficiência econômica, a Sociedade 5.0 coloca o ser humano no centro das inovações, utilizando tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Big Data para resolver problemas sociais, como desigualdade, envelhecimento populacional e mudanças climáticas (Fukuyama, 2018).

Historicamente, a Sociedade 5.0 é vista como a evolução natural de sociedades anteriores:

- **Sociedade 1.0:** Caça e coleta;
- **Sociedade 2.0:** Agricultura;

- **Sociedade 3.0:** Revolução industrial;
- **Sociedade 4.0:** Era da informação e digitalização.

A **Sociedade 5.0** surge como uma fusão entre os mundos físico, digital e biológico, promovendo uma sociedade superinteligente e inclusiva. Este paradigma expande as possibilidades da Indústria 4.0, aplicando suas tecnologias em áreas como saúde, mobilidade urbana, educação e sustentabilidade (Deguchi et al., 2020).

2.2.2 Tecnologias Habilitadoras

As tecnologias da Sociedade 5.0 são as mesmas da Indústria 4.0, mas seu uso está voltado para aplicações sociais e sustentáveis. Entre as mais relevantes estão:

- **Inteligência Artificial (IA):** Central na Sociedade 5.0, a IA automatiza processos e analisa grandes volumes de dados, com aplicações que vão desde a personalização da educação até melhorias no sistema de saúde, como diagnóstico precoce e monitoramento remoto de pacientes (Roser & Nakamura, 2020).
- **Internet das Coisas (IoT):** Essencial para criar cidades inteligentes, a IoT conecta dispositivos e sistemas, possibilitando o gerenciamento eficiente de recursos urbanos, como transporte, energia e resíduos (Zanella et al., 2014).
- **Big Data:** Permite compreender melhor as necessidades das populações, planejando políticas públicas baseadas em análises preditivas e garantindo o uso eficiente dos recursos (Gubbi et al., 2013).
- **Robótica:** Vai além das indústrias e ganha protagonismo em áreas como saúde, com robôs de assistência para idosos, e transporte, com veículos autônomos (Deguchi et al., 2020).
- **Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV):** Oferecem soluções para treinamento, educação e simulações realistas, com aplicações que vão de ambientes educacionais imersivos até o suporte remoto a profissionais de saúde (Schwab, 2016).

Essas tecnologias habilitam a criação de um ambiente onde as inovações tecnológicas resolvem problemas cotidianos, ao mesmo tempo em que promovem inclusão social e sustentabilidade.

2.2.3 Benefícios e Desafios

A Sociedade 5.0 apresenta inúmeros benefícios, destacando-se:

1. **Melhoria na qualidade de vida:** Aplicações como saúde digital e mobilidade urbana inteligente aumentam a acessibilidade a serviços essenciais, promovendo maior bem-estar para as populações (Fukuyama, 2018).
2. **Inclusão social:** A tecnologia é usada para eliminar barreiras, criando soluções acessíveis para pessoas com deficiência, idosos e populações marginalizadas (Roser & Nakamura, 2020).
3. **Sustentabilidade ambiental:** Tecnologias como IoT e Big Data ajudam a otimizar o uso de recursos naturais, promovendo cidades mais limpas e com menor pegada ecológica (Deguchi et al., 2020).

No entanto, a implementação da Sociedade 5.0 enfrenta desafios significativos:

- **Acesso desigual à tecnologia:** Em regiões periféricas ou com infraestrutura limitada, garantir o acesso às tecnologias habilitadoras é um desafio, especialmente em países em desenvolvimento.
- **Segurança cibernética:** O aumento da interconectividade aumenta a exposição a ataques cibernéticos, demandando protocolos rigorosos de segurança digital (Roser & Nakamura, 2020).
- **Qualificação profissional:** A Sociedade 5.0 requer trabalhadores capacitados para lidar com tecnologias avançadas e complexas, exigindo investimentos em educação e requalificação (Schwab, 2016).

2.2.4 Aplicações no Contexto Brasileiro e Global

O Japão lidera a implementação da Sociedade 5.0, com iniciativas que abrangem desde veículos autônomos até robôs de assistência para cuidados com idosos. Essas soluções são desenvolvidas para enfrentar desafios como o envelhecimento populacional e a falta de mão de obra (Deguchi et al., 2020).

No Brasil, embora a Sociedade 5.0 ainda não seja amplamente discutida, há iniciativas que incorporam seus princípios. Exemplos incluem:

- **Mobilidade urbana inteligente:** Em cidades como São Paulo, sistemas de IoT são usados para gerenciar o tráfego e melhorar o transporte público.
- **Saúde digital:** A telemedicina ganhou destaque durante a pandemia de COVID-19, demonstrando o potencial das tecnologias para expandir o acesso a cuidados médicos em áreas remotas (Roser & Nakamura, 2020).
- **Sustentabilidade:** Projetos de cidades inteligentes, como Curitiba, integram Big Data e IoT para gerenciar recursos urbanos de forma mais eficiente.

Essas aplicações demonstram o potencial transformador da Sociedade 5.0, especialmente quando adaptada a contextos desafiadores como o brasileiro.

2.3 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

2.3.1 Definição e Estratégias

A transformação digital refere-se à integração de tecnologias digitais em todos os aspectos de uma organização, resultando em mudanças fundamentais na maneira como os negócios operam e geram valor para clientes. Mais do que adotar ferramentas tecnológicas, a transformação digital implica em uma reavaliação completa dos modelos de negócios, estruturas organizacionais e culturas empresariais (Bharadwaj et al., 2013).

Segundo Rogers (2016), a transformação digital não é um processo pontual, mas contínuo, abrangendo a modernização da infraestrutura tecnológica, a reinvenção de processos empresariais e a adaptação de estratégias organizacionais às demandas de um ambiente cada vez mais digitalizado. No contexto industrial, isso inclui a utilização de tecnologias como Big Data, IoT, IA e automação para otimizar operações e promover inovações em produtos e serviços.

Estratégias de transformação digital bem-sucedidas normalmente incluem:

1. **Digitalização dos processos operacionais:** A automação de tarefas e a integração de dados reduzem custos e melhoram a eficiência (Bharadwaj et al., 2013).
2. **Inovação de produtos e serviços:** O uso de tecnologias como IA e Big Data permite desenvolver produtos personalizados e alinhados às demandas do consumidor em tempo real (Schwab, 2016).
3. **Criação de modelos de negócios digitais:** Empresas inovadoras aproveitam plataformas digitais para gerar novas fontes de receita, como serviços por assinatura ou marketplaces online (Rogers, 2016).
4. **Capacitação e mudança cultural:** A transformação digital requer trabalhadores habilitados e uma cultura organizacional que valorize a inovação e a adaptabilidade (Westerman, Bonnet & McAfee, 2014).

2.3.2 Papel na Indústria 4.0 e Sociedade 5.0

A transformação digital é um elemento central tanto na Indústria 4.0 quanto na Sociedade 5.0, servindo como uma ponte entre eficiência industrial e progresso social. No contexto da Indústria 4.0, ela viabiliza a automação, a conectividade e a personalização por meio de tecnologias como sistemas

ciber-físicos, sensores IoT e IA. Esses avanços permitem a criação de fábricas inteligentes que monitoram e otimizam a produção em tempo real (Lasi et al., 2014).

Na Sociedade 5.0, a transformação digital transcende o ambiente industrial para melhorar a qualidade de vida das pessoas. Tecnologias habilitadoras são aplicadas em áreas como saúde, educação e mobilidade urbana, promovendo inclusão social e sustentabilidade (Deguchi et al., 2020). Por exemplo:

- Na saúde, plataformas de telemedicina permitem o atendimento remoto, enquanto IA auxilia no diagnóstico e monitoramento de pacientes.
- Em cidades inteligentes, sensores conectados otimizam o trânsito, reduzem o consumo de energia e melhoram o gerenciamento de resíduos (Zanella et al., 2014).

2.3.3 Aplicações na Zona Franca de Manaus

Na Zona Franca de Manaus (ZFM), a transformação digital apresenta um grande potencial para modernizar o Polo Industrial de Manaus (PIM), elevando sua competitividade no mercado global. Indústrias locais podem adotar tecnologias como IoT e Big Data para monitorar a eficiência das operações, reduzir desperdícios e melhorar a sustentabilidade (Silva & Silva, 2017).

Além disso, a transformação digital no PIM pode facilitar a integração das indústrias locais em cadeias globais de valor, aumentando sua atratividade para investidores estrangeiros. Por exemplo:

- **Manutenção preditiva:** O uso de sensores IoT e IA pode prever falhas em máquinas, reduzindo paradas não planejadas e custos operacionais.
- **Automação avançada:** Robôs colaborativos podem ser utilizados para tarefas repetitivas, permitindo que trabalhadores se concentrem em atividades de maior valor agregado.
- **Capacitação profissional:** Programas de treinamento em tecnologias digitais são essenciais para preparar a força de trabalho local para as demandas da Indústria 4.0 e da Sociedade 5.0 (CNI, 2018).

No entanto, a implementação da transformação digital na ZFM enfrenta desafios significativos, como a necessidade de uma infraestrutura tecnológica robusta e a escassez de mão de obra qualificada. Investimentos governamentais em conectividade digital, como redes de alta velocidade, e a criação de parcerias entre empresas e instituições de ensino são fundamentais para superar essas barreiras.

A transformação digital também pode contribuir para a sustentabilidade da região amazônica. Tecnologias como Big Data e blockchain podem rastrear a origem e o impacto ambiental dos produtos da ZFM, fortalecendo sua reputação no mercado internacional. Além disso, a digitalização dos

processos produtivos pode reduzir o consumo de recursos naturais e a emissão de poluentes, alinhando-se aos princípios da economia circular (Stock & Seliger, 2016).

3 METODOLOGIA

3.1 CATEGORIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia utilizada neste estudo segue uma abordagem científica sólida, combinando diferentes técnicas de coleta e análise de dados. Com base na classificação proposta por Gil (2010), a pesquisa pode ser categorizada da seguinte forma:

1. Quanto aos objetivos:

A pesquisa é de natureza exploratória e descritiva. É exploratória por buscar compreender como a Indústria 4.0 está sendo implementada no Polo Industrial de Manaus (PIM) e quais os desafios enfrentados nesse processo. Simultaneamente, é descritiva ao detalhar os impactos dessa implementação em termos econômicos, sociais e ambientais, além de estratégias para viabilizar a transição para a Sociedade 5.0.

2. Quanto aos procedimentos:

Este estudo utiliza dois principais métodos:

- **Estudo de caso:** Focado em empresas do PIM que já adotaram ou estão em processo de adoção das tecnologias da Indústria 4.0.
- **Pesquisa de campo:** Incluindo coleta de dados primários por meio de entrevistas semiestruturadas e questionários aplicados a gestores e trabalhadores do PIM. Complementarmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente para embasar teoricamente as análises.

3. Quanto à abordagem dos dados:

Adotou-se uma abordagem multimétodos, integrando dados qualitativos e quantitativos.

- O **aspecto quantitativo** incluiu a análise dos questionários aplicados em campo, com o uso de estatísticas descritivas para identificar padrões e tendências.
- O **aspecto qualitativo** baseou-se nas entrevistas semiestruturadas realizadas com especialistas e gestores do PIM, explorando percepções e experiências relacionadas à transformação digital.

3.2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi a etapa inicial da metodologia e teve como objetivo construir a base teórica para a análise dos impactos e desafios da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus (PIM),

bem como a transição para a Sociedade 5.0. Essa revisão focou em estudos relevantes relacionados ao tema, organizados em três grandes áreas:

1. Indústria 4.0:

A pesquisa abordou as tecnologias-chave da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data, automação e sistemas ciber-físicos. Foram analisados seus impactos nos processos produtivos, incluindo melhorias na eficiência operacional, personalização em massa e redução de custos. Além disso, os desafios para a implementação dessas tecnologias foram destacados, como os altos custos iniciais, a necessidade de infraestrutura tecnológica robusta e a qualificação da força de trabalho (Schwab, 2016; Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013).

2. Sociedade 5.0:

A revisão explorou o conceito de Sociedade 5.0, desenvolvido no Japão, como um modelo de sociedade centrado no ser humano e sustentado por inovações tecnológicas. Foram analisadas as inter-relações entre a Indústria 4.0 e a Sociedade 5.0, destacando como a tecnologia pode ser usada para enfrentar problemas sociais, como desigualdades econômicas, mudanças climáticas e a acessibilidade a serviços essenciais (Fukuyama, 2018; Deguchi et al., 2020).

3. Estudos de caso internacionais:

Exemplos de melhores práticas em outros países foram analisados para identificar modelos de implementação bem-sucedidos de tecnologias da Indústria 4.0. Especial atenção foi dada a casos que envolvem economias emergentes ou contextos industriais semelhantes ao do PIM, oferecendo insights sobre como superar barreiras estruturais e adaptar soluções tecnológicas às particularidades regionais (Porter & Heppelmann, 2014).

A revisão de literatura também incluiu análises sobre os benefícios da transformação digital em termos de produtividade, sustentabilidade e inclusão social. Por fim, consolidou o estado da arte sobre a aplicação de tecnologias digitais no ambiente industrial, fornecendo uma base sólida para as etapas subsequentes da pesquisa.

3.3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi selecionado como uma abordagem metodológica central devido à sua capacidade de investigar fenômenos contemporâneos dentro de seus contextos reais. Essa metodologia foi aplicada para analisar empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM) que já estão implementando

ou em processo de adoção de tecnologias da Indústria 4.0. O estudo de caso permitiu uma compreensão detalhada dos desafios e das oportunidades envolvidas nesse processo.

1. Seleção das Empresas:

As empresas participantes foram escolhidas com base em critérios como:

- Adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT), automação avançada, inteligência artificial (IA) e big data.
 - Relevância dessas tecnologias para a produção industrial e seus impactos nas operações.
- O critério de seleção visou garantir a representatividade de diferentes setores industriais dentro do PIM, incluindo eletroeletrônicos, químico e metalúrgico.

2. Entrevistas com Gestores e Especialistas:

Para enriquecer o estudo de caso, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com gestores e especialistas das empresas selecionadas. As entrevistas tiveram como foco:

- Identificar benefícios percebidos das tecnologias da Indústria 4.0.
- Explorar desafios operacionais relacionados à implementação dessas tecnologias.
- Mapear soluções e estratégias adotadas para superar barreiras estruturais e culturais.

3. Objetivo do Estudo de Caso:

O estudo buscou fornecer insights práticos e detalhados sobre as melhores práticas e os desafios enfrentados na integração das tecnologias digitais no contexto único do PIM. Esses dados serviram de base para a análise de impacto e para a proposição de estratégias direcionadas à aceleração da transição para a Sociedade 5.0.

O uso do estudo de caso contribuiu para contextualizar os resultados, destacando as especificidades regionais e as implicações práticas da adoção das tecnologias da Indústria 4.0 no PIM.

3.4 PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo complementou o estudo de caso, permitindo a coleta de dados primários diretamente de trabalhadores, gestores e outras partes interessadas no Polo Industrial de Manaus (PIM). Essa abordagem foi essencial para entender as percepções e experiências relacionadas à implementação da Indústria 4.0 e à transição para a Sociedade 5.0.

1. Questionários:

Foram desenvolvidos questionários com perguntas abertas e fechadas, aplicados a uma amostra representativa de trabalhadores e gestores de diferentes empresas do PIM. Os questionários buscaram:

- Capturar percepções sobre os impactos da Indústria 4.0 no ambiente de trabalho.
 - Identificar desafios enfrentados durante a adoção das tecnologias digitais.
 - Avaliar as expectativas quanto à transição para a Sociedade 5.0.
- Os dados quantitativos coletados foram analisados utilizando estatísticas descritivas para identificar padrões e tendências.

2. Entrevistas:

Entrevistas semiestruturadas foram conduzidas com gestores e trabalhadores diretamente envolvidos nos processos automatizados, além de especialistas em tecnologia industrial. Essa abordagem qualitativa permitiu uma exploração mais profunda de:

- Benefícios percebidos das tecnologias habilitadoras.
- Soluções adotadas para superar desafios, como a falta de qualificação profissional e limitações estruturais.
- Visões sobre o papel das tecnologias digitais na promoção de bem-estar social e eficiência produtiva.

3. Processo de Coleta de Dados:

A coleta de dados foi realizada em duas etapas:

- **Etapla 1:** Aplicação de questionários, garantindo a representatividade de diferentes setores industriais dentro do PIM.
- **Etapla 2:** Condução de entrevistas, proporcionando uma visão prática e detalhada sobre os impactos das tecnologias no contexto local.

4. Análise dos Dados:

Os dados primários foram analisados de forma integrada:

- A análise quantitativa utilizou estatísticas descritivas para identificar correlações e tendências relevantes.
- A análise qualitativa baseou-se em técnicas de análise de conteúdo, permitindo a identificação de temas e padrões emergentes nas respostas dos entrevistados.

A pesquisa de campo forneceu uma base sólida para a avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais da Indústria 4.0 no PIM, além de contribuir para a formulação de estratégias práticas para a transição para a Sociedade 5.0.

3.5 ANÁLISE DE IMPACTO

A análise de impacto foi um componente central da pesquisa, avaliando como a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 afeta as dimensões econômica, social e ambiental no Polo Industrial de Manaus (PIM). Essa etapa baseou-se nos dados coletados durante o estudo de caso e a pesquisa de campo, fornecendo uma visão abrangente dos benefícios e desafios enfrentados.

1. Impacto Econômico:

A análise econômica focou nos efeitos das tecnologias habilitadoras sobre:

- **Produtividade e eficiência:** As tecnologias da Indústria 4.0, como automação e IoT, contribuíram para a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência produtiva nas empresas do PIM.
- **Criação de oportunidades de negócios:** A digitalização abriu novos mercados e possibilitou modelos de negócios mais ágeis e conectados às demandas globais.
- **Redução de custos:** Foi observado que tecnologias como manutenção preditiva e sistemas de monitoramento em tempo real diminuíram significativamente os custos relacionados a falhas operacionais.

2. Impacto Social:

A automação e a digitalização apresentaram impactos sociais tanto positivos quanto desafiadores:

- **Geração de empregos qualificados:** A adoção de tecnologias digitais criou demandas por profissionais capacitados, incentivando a qualificação da força de trabalho local.
- **Mudanças no perfil profissional:** Apesar de novas oportunidades, houve desafios relacionados à substituição de empregos tradicionais por funções que exigem maior qualificação técnica.
- **Melhoria nas condições de trabalho:** A automação de tarefas repetitivas e perigosas contribuiu para a redução de riscos ocupacionais, promovendo um ambiente mais seguro.

3. Impacto Ambiental:

A sustentabilidade foi outro ponto avaliado, com destaque para:

- **Redução de emissões:** O uso de tecnologias como big data e IoT permitiu otimizar processos industriais, reduzindo o consumo de energia e as emissões de carbono.
- **Minimização de resíduos:** Processos digitais facilitaram a adoção de práticas sustentáveis, como a economia circular, diminuindo o desperdício de materiais.
- **Soluções limpas e eficientes:** Empresas que adotaram automação avançada relataram maior eficiência na utilização de recursos naturais.

4. Metodologia da Análise:

A análise foi estruturada com base nos dados obtidos nas etapas anteriores:

- Indicadores quantitativos, como redução de custos e aumento de produtividade, foram mensurados através de estatísticas descritivas.
- Resultados qualitativos, como percepções sobre os impactos sociais e ambientais, foram avaliados por meio de análise de conteúdo das entrevistas.

A análise de impacto proporcionou uma visão integrada dos benefícios e desafios associados à Indústria 4.0 no PIM, fundamentando as proposições estratégicas apresentadas nas etapas subsequentes.

3.6 PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS

Com base nos resultados da revisão de literatura, do estudo de caso e da pesquisa de campo, esta etapa da pesquisa propõe estratégias práticas para superar os desafios identificados e acelerar a transição do Polo Industrial de Manaus (PIM) para a Sociedade 5.0. As estratégias foram formuladas considerando as particularidades regionais e as especificidades das empresas no contexto da Zona Franca de Manaus.

1. Elaboração de um Roadmap para a Transição:

Foi desenvolvido um plano de ação estruturado em etapas para guiar o PIM na adoção das tecnologias da Indústria 4.0 e na preparação para os desafios da Sociedade 5.0. As principais diretrizes incluem:

- **Infraestrutura tecnológica:** Investimentos em conectividade digital, como redes de alta velocidade e sistemas de big data, são essenciais para viabilizar a automação avançada.
- **Capacitação profissional:** Parcerias com instituições de ensino para oferecer treinamentos voltados às tecnologias habilitadoras, como IoT, IA e automação.
- **Incentivos governamentais:** Políticas públicas para apoiar empresas na aquisição de tecnologias inovadoras, reduzindo barreiras financeiras para pequenas e médias empresas.

2. Recomendações Práticas para Empresas do PIM:

Com base nas melhores práticas observadas em estudos de caso internacionais e na análise local, foram sugeridas ações específicas para as empresas:

- **Automação modular:** Adotar soluções escaláveis que permitam a integração gradual de tecnologias da Indústria 4.0, minimizando os custos iniciais.

- **Foco em sustentabilidade:** Priorizar tecnologias que reduzam o consumo de energia e promovam práticas ambientalmente responsáveis, alinhando-se à economia circular.
- **Integração digital:** Utilizar sistemas baseados em blockchain e IoT para melhorar a rastreabilidade e eficiência nas cadeias de suprimentos.

3. Recomendações para Políticas Públicas:

O papel do governo e de instituições reguladoras foi destacado como fundamental para fomentar a inovação tecnológica e promover o desenvolvimento social e econômico:

- **Incentivos fiscais e financeiros:** Redução de tributos para empresas que investem em tecnologias digitais e práticas sustentáveis.
- **Programas de inclusão digital:** Iniciativas para levar conectividade e treinamento tecnológico às populações mais isoladas da região amazônica.
- **Fomento à pesquisa e inovação:** Apoiar projetos de P&D que conectem universidades, empresas e centros de pesquisa na criação de soluções tecnológicas locais.

4. Sustentabilidade e Inclusão Social:

As estratégias foram alinhadas aos princípios da Sociedade 5.0, integrando avanços tecnológicos com o bem-estar humano:

- **Projetos comunitários:** Desenvolver iniciativas que utilizem tecnologia para resolver problemas sociais, como mobilidade urbana, saúde e educação.
- **Parcerias regionais:** Estimular colaborações entre empresas do PIM para promover um ecossistema inovador e sustentável.

As proposições apresentadas visam transformar o PIM em um modelo de referência para a integração entre a Indústria 4.0 e a Sociedade 5.0, promovendo simultaneamente competitividade industrial e desenvolvimento social.

3.7 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

As contribuições desta pesquisa abrangem três dimensões principais: teórica, prática e social, oferecendo uma visão ampla e integrada sobre os impactos da Indústria 4.0 e da transição para a Sociedade 5.0 no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM).

1. Contribuições Teóricas:

- Este estudo contribui para o avanço da literatura acadêmica ao explorar a integração entre os conceitos de Indústria 4.0 e Sociedade 5.0 em um contexto específico de economias emergentes.

- A análise detalhada dos desafios e oportunidades enfrentados pelo PIM fornece insights relevantes sobre como adaptar essas tecnologias a realidades regionais.
- O desenvolvimento de um modelo integrativo que considera as particularidades da ZFM pode servir como referência para estudos futuros em outros polos industriais com características semelhantes.

2. Contribuições Práticas:

- A pesquisa oferece recomendações práticas e diretas para as empresas do PIM, auxiliando na implementação de tecnologias da Indústria 4.0 e na adaptação às demandas da Sociedade 5.0.
- As estratégias propostas, como o roadmap de transição e as recomendações para capacitação profissional, podem ser aplicadas de forma imediata, contribuindo para a modernização das indústrias locais.
- As análises de impacto econômico, social e ambiental fornecem dados concretos para subsidiar decisões empresariais e políticas públicas voltadas para inovação e sustentabilidade.

3. Contribuições Sociais:

- A pesquisa destaca o potencial das tecnologias digitais para reduzir desigualdades socioeconômicas na região amazônica, promovendo inclusão digital e desenvolvimento humano.
- Soluções sugeridas, como projetos de telemedicina e educação digital, podem melhorar significativamente a qualidade de vida da população local, especialmente em áreas remotas.
- Ao alinhar os princípios da Sociedade 5.0 às necessidades do PIM, a pesquisa reforça o papel da inovação tecnológica como motor para o desenvolvimento sustentável e socialmente inclusivo.

Essas contribuições demonstram a relevância do estudo não apenas para o avanço teórico, mas também para a aplicação prática e o impacto social. Ao conectar os conceitos de Indústria 4.0 e Sociedade 5.0 às realidades e desafios do PIM, esta pesquisa propõe soluções que podem transformar a Zona Franca de Manaus em um modelo exemplar de integração entre competitividade industrial e desenvolvimento social.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS

A pesquisa realizada com empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM) revelou aspectos importantes sobre a adoção de práticas da Indústria 4.0 e a preparação para a Sociedade 5.0. Esses resultados foram organizados nas seguintes categorias:

4.1.1 Preparação para a Sociedade 5.0

Cerca de **75% das empresas** relataram ter iniciado projetos relacionados à transição para a Sociedade 5.0. As principais iniciativas concentram-se em áreas como Produção/Operações e Tecnologia da Informação (TI). Entretanto, **12,5% das empresas** ainda não começaram atividades específicas, e outras **12,5%** planejam implementações em longo prazo.

4.1.2 Objetivos Principais

Os objetivos das empresas refletem uma combinação de metas econômicas e sociais:

- **Aumento da eficiência operacional:** Citado como objetivo isolado por **25%** e em combinação com outros por **62,5%**.
- **Inovação de produtos e serviços:** Destacado por **12,5%** como prioridade central.
- **Sustentabilidade ambiental e melhoria da experiência do cliente:** Citados como complementares em algumas respostas.

4.1.3 Desafios Enfrentados

As principais barreiras à implementação da Sociedade 5.0 foram:

- **Falta de mão de obra qualificada:** Identificada por **62,5%** das empresas.
- **Resistência à mudança:** Citada por **50%**.
- **Custos elevados de implementação:** Também mencionado por **50%**.
- Infraestrutura inadequada e questões regulatórias foram destacadas, mas com menor frequência.

4.1.4 Benefícios Observados

Embora **50% das empresas** ainda não tenham percebido benefícios tangíveis, os impactos positivos relatados incluem:

- Redução de custos operacionais.
- Processos mais rápidos e conectados.

- Melhoria na qualidade dos produtos e na satisfação dos clientes.

4.1.5 Tecnologias Utilizadas ou Planejadas

As tecnologias mais citadas foram:

- **Big Data e Análise de Dados:** Utilizadas ou planejadas por **50%** das empresas.
- **Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT):** Destacadas como pilares para a modernização.
- Tecnologias como robótica, automação e realidade aumentada/virtual foram mencionadas por uma parcela menor.

4.2 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos corroboram com o referencial teórico e destacam os desafios e oportunidades enfrentados pelas empresas do PIM na transição tecnológica. Essa discussão foi organizada nas seguintes dimensões:

4.2.1 Preparação e Maturidade Tecnológica

Embora a maioria das empresas tenha iniciado a transição para a Sociedade 5.0, a desigualdade nos estágios de preparação reflete a falta de acesso uniforme a recursos e capacitação. Isso está alinhado à literatura, que enfatiza a necessidade de uma infraestrutura digital robusta para suportar a transformação tecnológica.

4.2.2 Objetivos Estratégicos

Os objetivos das empresas do PIM demonstram uma convergência entre os princípios da Indústria 4.0 (eficiência e inovação) e da Sociedade 5.0 (sustentabilidade e foco humano). Contudo, a ausência de estratégias estruturadas compromete a maximização dos benefícios.

4.2.3 Desafios Estruturais

Desafios como falta de mão de obra qualificada, resistência à mudança e custos elevados são amplamente discutidos na literatura sobre Indústria 4.0. A superação desses obstáculos exige investimentos em capacitação profissional, incentivos econômicos e melhoria da infraestrutura.

4.2.4 Benefícios e Impactos

Os benefícios relatados confirmam as expectativas em torno das tecnologias avançadas. No entanto, a ausência de métricas claras para avaliar os impactos a médio e longo prazo impede uma análise mais robusta dos avanços obtidos.

4.2.5 Tecnologias como Facilitadoras

As tecnologias citadas, como IoT, Big Data e IA, reafirmam seu papel central na transformação digital. Contudo, a disparidade nas respostas demonstra que muitas empresas ainda exploram possibilidades, sem uma implementação consolidada.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados da pesquisa e nas discussões desenvolvidas, é possível concluir que a implementação da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus (PIM) representa uma oportunidade estratégica para promover inovação tecnológica e transição para a Sociedade 5.0. Este processo, embora desafiador, apresenta potencial significativo para transformar o ambiente industrial e social da região.

5.1 PRINCIPAIS ACHADOS

Os principais achados desta pesquisa destacam:

1. Preparação das Empresas:

- **75% das empresas** já iniciaram ações específicas para adotar práticas alinhadas à Sociedade 5.0, com foco em áreas como Produção/Operações e Tecnologia da Informação (TI).

2. Motivações Principais:

- Os objetivos identificados incluem inovação de produtos/serviços, aumento da eficiência operacional e melhorias na qualidade de vida de trabalhadores e clientes. Esses objetivos refletem uma convergência entre os pilares da Indústria 4.0 e os valores humanizados da Sociedade 5.0.

3. Desafios Enfrentados:

- Os principais desafios incluem a falta de mão de obra qualificada, resistência à mudança e altos custos de implementação. Esses fatores destacam a necessidade de capacitação profissional e incentivos econômicos para acelerar a transformação digital.

4. Benefícios Observados:

- Empresas que implementaram tecnologias relataram benefícios como redução de custos, maior satisfação dos clientes e processos mais ágeis e conectados.

5. Apoio e Parcerias:

- A colaboração entre empresas, universidades e startups emergiu como um fator crítico para o sucesso das iniciativas, reforçando a importância de um ecossistema de inovação.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Com base nas conclusões, as seguintes recomendações são sugeridas para facilitar a transição para a Sociedade 5.0 no contexto do PIM:

1. Investimentos em Educação e Capacitação:

- Desenvolver programas específicos de qualificação profissional alinhados às demandas da Indústria 4.0 e Sociedade 5.0. Parcerias com instituições educacionais locais são essenciais para formar trabalhadores capacitados no uso de tecnologias como IoT, IA e Big Data.

2. Políticas Públicas de Incentivo:

- Estabelecer incentivos fiscais e linhas de crédito para empresas que investem em tecnologias habilitadoras e práticas sustentáveis.

3. Promoção da Inovação Colaborativa:

- Incentivar parcerias entre empresas, universidades e startups para fomentar a criação de soluções tecnológicas adaptadas às necessidades regionais.

4. Infraestrutura Tecnológica:

- Ampliar os investimentos em infraestrutura digital, como redes de alta velocidade e sistemas de dados avançados, para suportar a implementação de tecnologias.

5. Adoção de Indicadores de Sustentabilidade:

- Desenvolver métricas claras para avaliar os impactos ambientais, econômicos e sociais das práticas da Indústria 4.0, assegurando o alinhamento com os princípios da Sociedade 5.0.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa sugere as seguintes direções para estudos futuros:

1. Impacto Socioeconômico:

- Investigar como a transformação digital pode reduzir desigualdades regionais e promover maior inclusão social na Zona Franca de Manaus.

2. Desenvolvimento de Modelos Sustentáveis:

- Criar modelos de negócios baseados na economia circular e na redução de resíduos industriais no contexto do PIM.

3. Análise de Custos e Benefícios:

- Avaliar economicamente os investimentos necessários para a transição para a Sociedade 5.0, comparando com os benefícios em longo prazo.

4. Estudos de Caso Detalhados:

- Investigar empresas que já implementaram práticas avançadas, destacando fatores críticos de sucesso e lições aprendidas.

5. Integração de Mobilidade Urbana Inteligente:

- Explorar como tecnologias digitais podem ser aplicadas para melhorar a mobilidade na região, promovendo eficiência e sustentabilidade.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios para a implementação da Indústria 4.0 e a transição para a Sociedade 5.0 na Zona Franca de Manaus são complexos, mas os resultados demonstram que o potencial transformador é significativo. A combinação de esforços do setor público, privado e acadêmico pode posicionar o PIM como um exemplo global de integração tecnológica e desenvolvimento sustentável.

A Sociedade 5.0 oferece uma visão de futuro em que inovação e bem-estar caminham juntos. A Zona Franca de Manaus, com sua posição estratégica, está preparada para liderar esse movimento, transformando-se em um modelo de como a revolução digital pode impulsionar a transformação socioeconômica e a preservação ambiental.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSSA/ITEGAM), ao ITEGAM e as empresas Salcomp, Foxconn, Procomp/Diebold, Inventus Power, Coelmatic por meio da Lei no. 8.387/1991 de Informática para incentivo a Projetos de PD&I com apoio financeiro PUR044/2023/CITS ao projeto de Mestrado através da Coordenadora do Programa Prioritário da Indústria 4.0 e Modernização Industrial, o Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS)/CAPDA/SUFRAMA/MDIC.

REFERÊNCIAS

- BHARADWAJ, A.; SAWHNEY, M.; PAVLOU, P.; VENKATRAMAN, N. Digital Business Strategy: Toward a Next Generation of Insights. *MIS Quarterly*, v. 37, n. 2, p. 471–482, 2013.
- CANIATO, F.; CARIDI, M.; CASTELLANO, M.; SIANESI, A.; SPINA, G. Integration of Environmental Sustainability and Supply Chain Management. *Business Strategy and the Environment*, v. 27, n. 7, p. 1153–1165, 2018.
- CNI. Indústria 4.0: a caminho da manufatura avançada. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2018.
- DEGUCHI, A.; HORI, M.; KAWAI, H.; NISHIMURA, H.; SUNDARARAJAN, A. *Society 5.0: A People-centric Super-smart Society*. Singapore: Springer, 2020.
- FUKUYAMA, M. Society 5.0: Aiming for a New Human-centered Society. *Japan Spotlight*, v. 27, n. 3, p. 47-50, 2018.
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- JORDAN, M. I.; MITCHELL, T. M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, v. 349, n. 6245, p. 255–260, 2015.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. National Academy of Science and Engineering (Acatech), 2013.
- LEE, E. A.; SESHIA, S. A. *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2015.
- LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014.
- PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. *Harvard Business Review*, v. 92, n. 11, p. 64–88, 2014.
- ROGERS, D. L. *The Digital Transformation Playbook: Rethink Your Business for the Digital Age*. New York: Columbia Business School Publishing, 2016.
- SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. New York: Crown Publishing Group, 2016.
- SILVA, E. R.; SILVA, M. S. A Zona Franca de Manaus: Histórico, Desafios e Perspectivas. *Revista de Desenvolvimento Regional*, v. 13, n. 4, p. 45–57, 2017.
- STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 536–541, 2016.
- WESTERMAN, G.; BONNET, D.; MCAFEE, A. *Leading Digital: Turning Technology into Business Transformation*. Boston: Harvard Business Review Press, 2014.

XU, L. D.; HE, W.; LI, S. Internet of Things in Industries: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 10, n. 4, p. 2233–2243, 2014.

ZANELLA, A.; BORTOLLO, N.; CASTELLANI, A.; MILI, L. IoT for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.