

## **INDUSTRIA 4.0: UMA PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO EM UMA EMPRESA METAL MECÂNICA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-195>

**Data de submissão:** 12/11/2024

**Data de publicação:** 12/12/2024

**Danilo Serrão Pereira**

Engº

Engenheiro de Controle e Automação; Acadêmico do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL  
E-mail: danilodsp@outlook.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.EGPSA/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.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL  
E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4362-0132>

**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>

**Janyel Trevisol**

M. Sc.

Mestre em Engenharia de Produção; Professor do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Horizontina (FAHOR) – RS – BRASIL  
E-mail: janyeltrevisol@yahoo.com.br /  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1153-4046>

### **RESUMO**

**INTRODUÇÃO:** A Indústria 4.0, considerada a Quarta Revolução Industrial, introduz uma transformação abrangente no setor produtivo, marcada pela integração de tecnologias avançadas que conectam o ambiente físico e digital. Com o uso de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial (IA), a Indústria 4.0 possibilita operações automatizadas e inteligentes,

viabilizando a produção em tempo real, flexibilidade, e otimização de recursos. Essa revolução impacta especialmente setores de produção de alta complexidade, como o setor metal-mecânico, essencial para indústrias estratégicas, incluindo automotiva, aeronáutica e de eletrônicos (STAUFFER et al., 2020).

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Implementação Tecnológica. Empresa Metal-Mecânica. Polo Industrial de Manaus.

## 1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, considerada a Quarta Revolução Industrial, introduz uma transformação abrangente no setor produtivo, marcada pela integração de tecnologias avançadas que conectam o ambiente físico e digital. Com o uso de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial (IA), a Indústria 4.0 possibilita operações automatizadas e inteligentes, viabilizando a produção em tempo real, flexibilidade, e otimização de recursos. Essa revolução impacta especialmente setores de produção de alta complexidade, como o setor metal-mecânico, essencial para indústrias estratégicas, incluindo automotiva, aeronáutica e de eletrônicos (STAUFFER et al., 2020).

No Brasil, a implementação da Indústria 4.0 ainda enfrenta desafios significativos, principalmente relacionados à infraestrutura, altos custos iniciais, e carência de mão-de-obra qualificada. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018), as principais barreiras para a adoção no país incluem a necessidade de investimentos substanciais em tecnologia e a falta de políticas de capacitação que preparem a força de trabalho para lidar com as novas demandas tecnológicas. Essas barreiras tornam-se ainda mais evidentes em regiões como o Polo Industrial de Manaus (PIM), onde a infraestrutura e os incentivos são voltados a setores de manufatura tradicionais (TORTORELLA et al., 2021).

O Polo Industrial de Manaus, um dos principais centros industriais do país, concentra uma vasta gama de empresas do setor metal-mecânico, responsáveis por produtos como motocicletas, componentes eletrônicos e eletrodomésticos. Fundado em 1967, o PIM oferece incentivos fiscais com o objetivo de promover o desenvolvimento econômico e industrial na região amazônica (SUFRAMA, 2020). No entanto, o setor enfrenta o desafio de modernizar suas operações para se manter competitivo no mercado global, adotando as tecnologias da Indústria 4.0 para aumentar sua eficiência e qualidade de produção.

A transição para a Indústria 4.0 representa uma oportunidade estratégica para as empresas do setor metal-mecânico do PIM. A integração de tecnologias avançadas pode trazer ganhos substanciais em termos de redução de custos, aumento da produtividade e flexibilização dos processos produtivos (HERMANN et al., 2016). Além disso, ao adotar essas tecnologias, o setor pode contribuir para o desenvolvimento sustentável da região amazônica, mitigando o impacto ambiental das operações industriais por meio da otimização de recursos e da redução de desperdícios (GAO et al., 2015).

O problema de pesquisa abordado neste estudo é: *Como uma empresa do setor metal-mecânico localizada no Polo Industrial de Manaus pode implementar as tecnologias da Indústria 4.0 para melhorar sua eficiência operacional, qualidade dos produtos e competitividade no mercado?* Para

responder a essa questão, a pesquisa propõe realizar uma análise detalhada das condições atuais de uma empresa representativa desse setor e desenvolver um plano estratégico de implementação da Indústria 4.0. Esse plano inclui um diagnóstico das necessidades e limitações da empresa, seguido pela definição de um roadmap de implementação que aborde os principais desafios e etapas para a transição tecnológica (LEE et al., 2015).

O objetivo geral deste estudo é propor uma metodologia para a adoção da Indústria 4.0 em uma empresa do setor metal-mecânico do PIM, visando otimizar processos produtivos e aumentar a competitividade. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos: (1) diagnosticar a situação atual da empresa em relação à infraestrutura tecnológica e aos processos de produção; (2) identificar as tecnologias da Indústria 4.0 mais adequadas ao contexto da empresa; (3) desenvolver um plano de implementação para essas tecnologias, detalhando etapas, recursos necessários e cronograma; e (4) propor um modelo de monitoramento contínuo para avaliar os resultados e promover melhorias contínuas.

A estrutura do artigo é organizada em cinco seções, além desta introdução. Na segunda seção, é apresentada uma revisão de literatura que aborda os conceitos fundamentais da Indústria 4.0, as principais tecnologias envolvidas e os modelos de maturidade usados para avaliar a prontidão das empresas. A terceira seção detalha a metodologia adotada no estudo, incluindo a aplicação do questionário Impuls e a coleta de dados através de visitas técnicas e entrevistas com gestores da empresa estudada. Na quarta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, incluindo o roadmap para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Por fim, a quinta seção apresenta as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições da pesquisa e sugerindo direções para futuros estudos no contexto do PIM e da Indústria 4.0 no Brasil.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, representa uma nova fase na organização e controle da cadeia de valor, com ênfase na digitalização e interconectividade dos processos produtivos. Esse conceito surge a partir da integração de tecnologias emergentes como sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), big data, e computação em nuvem, que transformam as fábricas em ambientes inteligentes e adaptáveis (HERMANN et al., 2016).

## 2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 é caracterizada pela convergência de tecnologias digitais e físicas, que possibilitam o controle em tempo real e a automação avançada dos processos industriais. Segundo Lee, Bagheri e Kao (2015), os sistemas ciber-físicos são centrais nesse paradigma, pois conectam o ambiente físico com sistemas digitais através de sensores, atuadores e redes de comunicação. Esses sistemas viabilizam a coleta contínua de dados e a adaptação imediata dos processos de produção às mudanças nas condições de operação.

Outro conceito fundamental é a Internet das Coisas (IoT), que permite que dispositivos e máquinas compartilhem dados automaticamente, promovendo uma comunicação integrada entre diferentes áreas da produção (XU et al., 2018). Essa interconectividade possibilita a criação de gêmeos digitais — réplicas virtuais de ativos físicos que podem ser monitoradas e otimizadas em tempo real (TAO et al., 2019).

## 2.2 TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA 4.0

As tecnologias que impulsionam a Indústria 4.0 não só melhoram a eficiência e a produtividade, como também abrem novas oportunidades para personalização e inovação. A inteligência artificial e o aprendizado de máquina, por exemplo, permitem a análise de grandes volumes de dados, auxiliando na detecção de falhas e no controle de qualidade (RUSSELL; NORVIG, 2016). Além disso, a robótica avançada possibilita a automação de tarefas complexas e repetitivas, como inspeções e montagens, aumentando a precisão e a segurança no ambiente de trabalho (BOGUE, 2016).

A computação em nuvem é outra tecnologia essencial, oferecendo uma infraestrutura escalável para armazenamento e processamento de dados (ARMBRUST et al., 2010). No contexto da Indústria 4.0, a nuvem permite o acesso remoto a informações e sistemas de análise, facilitando a colaboração entre diferentes setores da empresa e a integração de operações em tempo real (BUYYA et al., 2009).

## 2.3 BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A PRODUÇÃO METAL-MECÂNICA

A implementação da Indústria 4.0 no setor metal-mecânico traz uma série de benefícios, transformando profundamente os processos de produção. Um dos principais ganhos é o aumento da eficiência e produtividade. Tecnologias como IoT e IA permitem a otimização contínua dos processos, reduzindo desperdícios e aumentando a flexibilidade da produção (LEE et al., 2015).

Outro benefício é a possibilidade de customização em massa, permitindo que as empresas atendam a demandas específicas dos clientes de maneira eficiente. A análise de big data oferece

insights sobre preferências e necessidades dos consumidores, permitindo ajustes rápidos na linha de produção para atender a essas expectativas (RÜßMANN et al., 2015). Além disso, a manutenção preditiva reduz o tempo de inatividade das máquinas e otimiza a vida útil dos equipamentos, essencial para a continuidade e produtividade das operações (LEE et al., 2013).

#### 2.4 MODELOS DE MATURIDADE PARA AVALIAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

A transição para a Indústria 4.0 requer que as empresas compreendam seu nível de prontidão e capacidade de integrar novas tecnologias. Diversos modelos de maturidade foram desenvolvidos para avaliar esse preparo, fornecendo um diagnóstico detalhado e orientações estratégicas. O modelo de maturidade de Kagermann, por exemplo, avalia seis dimensões principais, como estratégia, clientes e tecnologia, identificando o nível de alinhamento da empresa com os princípios da Indústria 4.0 (KAGERMANN et al., 2013).

Outro modelo relevante é o questionário Impuls, desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer, que examina seis áreas fundamentais, incluindo organização, operações e serviços baseados em dados. Esse questionário permite uma análise prática e estruturada, facilitando a criação de um plano de ação para a implementação gradual das tecnologias da Indústria 4.0 (SCHUMACHER et al., 2016).

#### 2.5 DESAFIOS E BARREIRAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Apesar dos benefícios, a adoção da Indústria 4.0 enfrenta barreiras significativas, tanto tecnológicas quanto organizacionais. A falta de interoperabilidade entre sistemas legados e novos dispositivos é um dos principais desafios técnicos, dificultando a integração de tecnologias avançadas com estruturas já existentes (HERMANN et al., 2016). Além disso, a falta de profissionais qualificados representa uma barreira para a implementação bem-sucedida da Indústria 4.0, especialmente em regiões como o PIM, onde a capacitação de mão-de-obra em tecnologias avançadas ainda é limitada (CNI, 2018).

A resistência cultural e a necessidade de uma mudança organizacional também são desafios críticos. Segundo Müller, Kiel e Voigt (2018), a adaptação cultural é essencial para que a inovação seja aceita pelos colaboradores e integrada à cultura organizacional. A segurança cibernética é outro fator crucial, pois o aumento da conectividade expõe as empresas a riscos adicionais, exigindo medidas robustas de proteção de dados (KOLBERG e ZÜHLKE, 2015).

## 2.6 ESTRATÉGIAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Para enfrentar os desafios e maximizar os benefícios, diversas estratégias são sugeridas para a implementação da Indústria 4.0. O planejamento estratégico, incluindo uma avaliação inicial de maturidade, é essencial para estabelecer um roadmap claro e identificar as tecnologias prioritárias. A capacitação contínua da força de trabalho e a promoção de uma cultura de inovação são estratégias recomendadas para facilitar a adaptação e reduzir a resistência interna (FRANK et al., 2019).

Investimentos em infraestrutura tecnológica, como redes 5G e sistemas de segurança, são igualmente importantes para garantir a estabilidade e a segurança dos processos. Parcerias estratégicas com instituições de pesquisa e empresas de tecnologia também são indicadas para compartilhar conhecimento e recursos, reduzindo custos e acelerando a inovação (KAGERMANN et al., 2013).

## 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo é baseada em uma abordagem qualitativa e quantitativa, estruturada como um estudo de caso. Esse método foi selecionado devido à sua eficácia em proporcionar uma análise aprofundada de um cenário específico, permitindo identificar os desafios e oportunidades da implementação da Indústria 4.0 em uma empresa metal-mecânica localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM). A pesquisa segue as recomendações de Gil (2010) e Marconi e Lakatos (2010), que enfatizam a importância do estudo de caso como uma ferramenta para examinar fenômenos complexos em ambientes reais.

### 3.1 CATEGORIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa é caracterizada como aplicada, pois busca soluções práticas e estratégias de implementação da Indústria 4.0 para melhorar a competitividade da empresa estudada. Em relação aos objetivos, o estudo é descritivo e exploratório, pois detalha o cenário atual da empresa em relação às tecnologias digitais e investiga as possibilidades de aprimoramento e adoção das tecnologias da Indústria 4.0. A abordagem do problema combina aspectos qualitativos e quantitativos, permitindo uma análise abrangente do contexto organizacional e dos dados coletados (GIL, 2010).

### 3.2 UNIVERSO, POPULAÇÃO E AMOSTRA

O estudo foi conduzido em uma empresa representativa do setor metal-mecânico do PIM, com histórico de produção em larga escala de componentes para a indústria automotiva e eletrônica. A empresa foi selecionada por sua relevância no setor e pela necessidade de adaptação às novas demandas tecnológicas para aumentar sua competitividade. O universo da pesquisa inclui empresas

do setor metal-mecânico no PIM, enquanto a amostra é composta pelos gestores e técnicos responsáveis pela produção, manutenção e inovação tecnológica da empresa.

### 3.3 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas semiestruturadas com gestores e técnicos da empresa, além de visitas técnicas para observação direta dos processos produtivos. As entrevistas semiestruturadas permitiram explorar as percepções e expectativas dos gestores em relação à Indústria 4.0, abordando temas como desafios, investimentos necessários e impacto esperado na produtividade. Além disso, foi aplicado o questionário Impuls, uma ferramenta desenvolvida pelo Instituto Fraunhofer para avaliar a maturidade da empresa em relação à Indústria 4.0. O questionário Impuls é amplamente reconhecido por sua capacidade de fornecer uma análise estruturada e prática das capacidades tecnológicas de uma organização (TORTORELLA et al., 2021).

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados seguiu um cronograma estruturado, com etapas de planejamento, aplicação e análise dos instrumentos. Inicialmente, foram realizadas reuniões com a equipe de gestão para apresentar os objetivos da pesquisa e alinhar expectativas. Em seguida, foram aplicadas as entrevistas e o questionário Impuls, utilizando uma escala de maturidade que varia de 0 (não implementado) a 5 (totalmente implementado) para avaliar áreas como tecnologia, infraestrutura, cultura organizacional e operações. Cada resposta foi documentada e categorizada para facilitar a análise e o desenvolvimento de um roadmap para implementação (SCHUMACHER et al., 2016).

### 3.5 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi realizada por meio de métodos de estatística descritiva e análise de conteúdo, com o objetivo de interpretar os resultados das entrevistas e do questionário Impuls. As respostas foram codificadas e agrupadas em categorias, permitindo identificar os pontos fortes e fracos da empresa em relação à prontidão para a Indústria 4.0. Os dados quantitativos provenientes do questionário Impuls foram tabulados e analisados para identificar o nível de maturidade da empresa em cada uma das seis dimensões avaliadas (estratégia, operações, produtos inteligentes, entre outros) (LEE et al., 2015).

### 3.6 DESENVOLVIMENTO DO ROADMAP PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Com base nos resultados obtidos, foi desenvolvido um roadmap detalhado para guiar a empresa na transição para a Indústria 4.0. O roadmap foi estruturado em fases de curto, médio e longo prazo, com etapas específicas para a implementação das tecnologias prioritárias. A primeira fase do roadmap inclui a atualização da infraestrutura de TI e a capacitação dos funcionários em tecnologias digitais. A segunda fase foca na automação e integração de sistemas, enquanto a terceira fase abrange a adoção de IA e análise de big data para otimização contínua dos processos produtivos. Esse plano foi desenvolvido com base nas melhores práticas encontradas na literatura, considerando as limitações financeiras e estruturais da empresa (KAGERMANN et al., 2013).

### 3.7 VANTAGENS, DESVANTAGENS E LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA

A metodologia adotada apresenta várias vantagens, como a profundidade da análise proporcionada pelo estudo de caso e a capacidade de adaptação do questionário Impuls às particularidades da empresa. No entanto, também existem limitações, como a possibilidade de viés nas respostas dos gestores e a restrição de dados a uma única empresa, o que pode limitar a generalização dos resultados. Além disso, a implementação do roadmap dependerá de fatores externos, como a disponibilidade de investimentos e o apoio de políticas públicas voltadas para a inovação tecnológica no setor industrial (HERMANN et al., 2016).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a aplicação do questionário Impuls e as entrevistas com gestores e técnicos da empresa revelaram pontos críticos e oportunidades significativas para a implementação da Indústria 4.0 no setor metal-mecânico do Polo Industrial de Manaus (PIM). A análise destaca as dimensões nas quais a empresa possui maior maturidade e identifica as áreas que requerem melhorias para facilitar a transição tecnológica. A seguir, são discutidos os principais achados e suas implicações para a competitividade e a eficiência operacional da empresa.

### 4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS GERAIS

Os resultados do questionário Impuls indicam que a empresa apresenta níveis variados de maturidade nas seis dimensões avaliadas. Em termos de estratégia e liderança, a empresa está parcialmente preparada, possuindo uma visão inicial sobre a importância da Indústria 4.0, mas carecendo de um plano estratégico estruturado para a adoção das tecnologias. A área de operações

inteligentes apresenta um nível de maturidade mais baixo, refletindo a necessidade de melhorias em automação e conectividade entre os processos produtivos.

Em contrapartida, a dimensão produtos inteligentes mostrou maior prontidão, pois a empresa já utiliza sensores em alguns equipamentos para monitorar a qualidade dos produtos. No entanto, a ausência de uma infraestrutura de TI robusta limita a capacidade de expansão e integração de dados em tempo real. Esses resultados sugerem que, embora a empresa possua algumas bases para a transição, há desafios significativos a serem enfrentados, especialmente em termos de infraestrutura e cultura organizacional (LEE et al., 2015).

#### 4.2 ANÁLISE DAS DIMENSÕES AVALIADAS

A análise detalhada das seis dimensões do questionário Impuls revelou os seguintes pontos principais:

- Estratégia e Organização: Embora a liderança esteja ciente das oportunidades proporcionadas pela Indústria 4.0, faltam políticas e metas claras para orientar a transição. A ausência de um plano estratégico bem definido implica que a empresa depende, em grande medida, da motivação individual dos gestores e técnicos para inovar, sem uma direção unificada.
- Smart Factory e Operações: A empresa não possui integração completa dos sistemas de produção, com pouca conectividade entre as máquinas. Além disso, a utilização de IoT e de sistemas de monitoramento em tempo real é limitada, dificultando a automação eficiente dos processos. A falta de interconectividade afeta diretamente a capacidade de realizar ajustes rápidos nas operações, uma característica essencial para a flexibilidade produtiva exigida pela Indústria 4.0 (RÜßMANN et al., 2015).
- Tecnologia e Infraestrutura de TI: A infraestrutura tecnológica atual é um fator limitante para a adoção de tecnologias avançadas, como inteligência artificial e big data. A empresa utiliza sistemas legados que não foram projetados para integração com tecnologias de IoT ou para processamento de grandes volumes de dados. Isso representa uma barreira substancial, pois impede a implementação de soluções de análise preditiva e otimização de processos (TORTORELLA et al., 2021).
- Cultura e Competências: A falta de capacitação específica para a Indústria 4.0 é um obstáculo evidente. Os funcionários, embora experientes, não possuem as habilidades necessárias para lidar com tecnologias emergentes, como análise de big data e automação avançada. Esse aspecto ressalta a necessidade de programas de treinamento e

desenvolvimento contínuo, alinhados às demandas tecnológicas da Indústria 4.0 (FRANK et al., 2019).

#### 4.3 ROADMAP PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Com base nos resultados obtidos, foi elaborado um roadmap estratégico para guiar a empresa na implementação das tecnologias da Indústria 4.0. O roadmap está dividido em três fases:

1. Fase 1: Preparação e Capacitação (Curto Prazo)

A primeira fase envolve o fortalecimento da infraestrutura de TI e o treinamento da equipe em tecnologias digitais. Nessa etapa, a empresa deve realizar atualizações de software e hardware e investir em cursos de capacitação focados em análise de dados e automação básica. Também é recomendada a criação de um plano estratégico formal, que oriente o desenvolvimento da Indústria 4.0 dentro da organização (KAGERMANN et al., 2013).

2. Fase 2: Integração e Automação (Médio Prazo)

A segunda fase concentra-se na implementação de sistemas de IoT e na interconexão dos processos produtivos. A empresa deve instalar sensores e dispositivos de monitoramento em tempo real nas máquinas e integrar esses dados em uma plataforma centralizada, possibilitando a análise e o controle automatizado dos processos. Essa fase visa aumentar a flexibilidade e a eficiência operacional, permitindo ajustes rápidos com base nas demandas do mercado (LEE et al., 2015).

3. Fase 3: Inteligência Artificial e Otimização Contínua (Longo Prazo)

A última fase do roadmap envolve a adoção de inteligência artificial e análise de big data para a otimização contínua dos processos. Nesta etapa, os dados coletados são analisados para identificar padrões e prever possíveis falhas, permitindo a manutenção preditiva e a melhoria da qualidade dos produtos. A aplicação de IA em áreas como previsão de demanda e controle de qualidade aumenta a competitividade e a eficiência da empresa a longo prazo (HERMANN et al., 2016).

#### 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstram que, embora a empresa possua algumas bases para a adoção da Indústria 4.0, a transição completa exigirá um investimento substancial em infraestrutura e capacitação. A literatura confirma que a resistência organizacional e a falta de competências digitais são desafios comuns no contexto brasileiro, especialmente em regiões onde a Indústria 4.0 ainda está em fase inicial de implementação (CNI, 2018). Em consonância com estudos anteriores, os dados

sugerem que o sucesso da implementação dependerá de uma abordagem estratégica que considere tanto os aspectos técnicos quanto as mudanças culturais necessárias (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018).

O roadmap desenvolvido oferece um caminho viável para a empresa adotar gradualmente as tecnologias da Indústria 4.0, partindo da capacitação básica até a implementação de sistemas avançados de análise e automação. Esse plano também pode servir como um modelo para outras empresas do setor no PIM, fornecendo diretrizes práticas para superar as barreiras específicas da região e alcançar um nível mais competitivo no mercado global.

## 5 CONCLUSÃO

A transição para a Indústria 4.0 no setor metal-mecânico brasileiro, especialmente no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM), representa uma oportunidade estratégica para aumentar a competitividade, eficiência e sustentabilidade das operações industriais. Este estudo investigou as condições atuais de uma empresa metal-mecânica do PIM e desenvolveu um roadmap detalhado para a implementação gradual de tecnologias da Indústria 4.0, abordando desafios específicos de infraestrutura, cultura organizacional e capacitação.

Os resultados apontam que a empresa possui um nível inicial de prontidão para a Indústria 4.0, com algumas bases tecnológicas estabelecidas, como o uso de sensores para monitoramento de qualidade. No entanto, há uma necessidade urgente de investimentos em infraestrutura de TI e na capacitação da força de trabalho para que a transição ocorra de forma eficaz. A resistência cultural e a falta de habilidades específicas para lidar com tecnologias avançadas, como big data e inteligência artificial, são barreiras significativas, que requerem um plano estratégico de longo prazo para serem superadas.

O roadmap proposto neste estudo fornece um caminho prático e estruturado para a empresa implementar a Indústria 4.0 em três fases: preparação e capacitação, integração e automação, e otimização contínua com inteligência artificial. A primeira fase enfatiza a importância de fortalecer a infraestrutura tecnológica e capacitar os funcionários, enquanto as fases subsequentes introduzem progressivamente a automação e a inteligência artificial para alcançar um modelo de produção inteligente e flexível. Esse modelo de implementação pode ser adaptado por outras empresas do setor no PIM, servindo como um guia para superar as limitações comuns na região e maximizar os benefícios da Indústria 4.0.

Além de contribuir para a prática, este estudo fornece insights teóricos sobre os fatores que impulsionam e inibem a adoção da Indústria 4.0 no contexto brasileiro. A literatura aponta que a falta

de interoperabilidade, segurança cibernética e resistência à mudança são desafios universais da Indústria 4.0, mas que assumem características específicas no Brasil, onde a infraestrutura e as políticas de inovação ainda são limitadas. Esse contexto exige que as empresas não apenas invistam em tecnologias, mas também promovam uma mudança organizacional que valorize a inovação e a aprendizagem contínua (CNI, 2018; HERMANN et al., 2016).

As principais contribuições deste estudo estão na elaboração de um modelo de implementação prático e na identificação de estratégias para superar as barreiras associadas à transição para a Indústria 4.0. Ao adotar um roadmap estruturado, as empresas podem se preparar de forma mais eficiente para o futuro da produção digital, promovendo uma cultura de inovação e melhorando sua competitividade em um mercado globalizado. As limitações do estudo incluem o foco em uma única empresa, o que pode restringir a generalização dos resultados. Portanto, pesquisas futuras poderiam explorar a aplicação deste roadmap em diferentes setores do PIM, bem como avaliar o impacto econômico e social da Indústria 4.0 na região amazônica.

A Indústria 4.0 oferece o potencial de transformar profundamente a produção industrial, trazendo ganhos em produtividade, sustentabilidade e qualidade. No entanto, para que essa transformação seja sustentável e abrangente, é fundamental que políticas públicas e incentivos governamentais apoiem as empresas na jornada de modernização, especialmente em regiões onde os desafios estruturais são mais significativos. A implementação da Indústria 4.0 no PIM não apenas beneficiará a competitividade das empresas locais, mas também contribuirá para o desenvolvimento sustentável da região amazônica, alinhando progresso econômico com a preservação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ARMBRUST, M.; et al. A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, v. 53, n. 4, p. 50-58, 2010.
- BOGUE, R. Advanced robotics in the factory of the future. *Industrial Robot*, v. 43, n. 1, p. 21-25, 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Indústria 4.0: desafios e oportunidades para o Brasil. 2018.
- FRANK, A. G.; et al. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 15-26, 2019.
- GAO, W.; et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, v. 69, p. 65-89, 2015.
- GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In: *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on*. IEEE, 2016. p. 3928-3937.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.
- KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by Industry 4.0 technologies: A case study on cyber-physical system-based production logistics. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 45, p. 62-78, 2017.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, n. 1, p. 18-23, 2015.
- MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K. I. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, v. 10, n. 1, p. 247, 2018.
- RÜßMANN, M.; et al. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 2015.
- SCHUMACHER, A.; EVERSHAIM, A.; ORTIZ, J. E. Exploring industry 4.0 maturity models for SMEs. *Procedia Manufacturing*, v. 11, p. 1448-1456, 2016.
- STAUFFER, J. M.; et al. Evolution of Smart Manufacturing: Past Research and Future Directions. *Computers & Industrial Engineering*, v. 139, 2020.
- SUFRAMA. *Superintendência da Zona Franca de Manaus*. Relatório de atividades. 2020.

TORTORELLA, G. L.; FETTERMAN, D. A. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *Production*, 2021.

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.