


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 (BUYAYA 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.; EVERSHEIM, 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.