

SEVEN

PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS
2025

TRANSFORMAÇÕES DIGITAIS E INDÚSTRIA 4.0 NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

DESAFIOS E INOVAÇÕES

Gil Eduardo Guimarães
Nelson Marinelli Filho
Jandecy Cabral Leite

SEVEN

PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS
2025

TRANSFORMAÇÕES DIGITAIS E INDÚSTRIA 4.0 NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

DESAFIOS E INOVAÇÕES



Gil Eduardo Guimarães
Nelson Marinelli Filho
Jandecy Cabral Leite

EDITORA CHEFE

Prof^o Me. Isabele de Souza Carvalho

EDITOR EXECUTIVO

Nathan Albano Valente

ORGANIZADORES DO LIVRO

Gil Eduardo Guimarães

Nelson Marinelli Filho

Jandecy Cabral Leite

2025 by Seven Editora

Copyright © Seven Editora

Copyright do Texto © 2025 Os Autores

Copyright da Edição © 2025 Seven Editora

PRODUÇÃO EDITORIAL

Seven Publicações Ltda

EDIÇÃO DE ARTE

Alan Ferreira de Moraes

EDIÇÃO DE TEXTO

Natan Bones Petitemberte

BIBLIOTECÁRIA

Bruna Heller

IMAGENS DE CAPA

AdobeStok

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Seven Publicações Ltda. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Seven Publicações Ltda é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação.

Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.



O conteúdo deste Livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional

CORPO EDITORIAL

EDITORA-CHEFE

Prof^o Me. Isabele de Souza Carvalho

CORPO EDITORIAL

Pedro Henrique Ferreira Marçal - Vale do Rio Doce University
Adriana Barni Truccolo - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Marcos Garcia Costa Morais - Universidade Estadual da Paraíba
Mônica Maria de Almeida Brainer - Instituto Federal de Goiás Campus Ceres
Caio Vinicius Efigenio Formiga - Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Egas José Armando - Universidade Eduardo Mondlane de Moçambique
Ariane Fernandes da Conceição - Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Wanderson Santos de Farias - Universidade de Desenvolvimento Sustentável
Maria Gorete Valus - Universidade de Campinas
Luiz Gonzaga Lapa Junior - Universidade de Brasília
Janyel Trevisol - Universidade Federal de Santa Maria
Irlane Maia de Oliveira - Universidade Federal de Mato Grosso
Paulo Roberto Duailibe Monteiro - Universidade Federal Fluminense
Luiz Gonzaga Lapa Junior - Universidade de Brasília
Yuni Saputri M.A - Universidade de Nalanda, Índia
Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí, CEAD
Anderson Nunes Da Silva - Universidade Federal do Norte do Tocantins
Adriana Barretta Almeida - Universidade Federal do Paraná
Jorge Luís Pereira Cavalcante - Fundação Universitária Iberoamericana
Jorge Fernando Silva de Menezes - Universidade de Aveiro
Antonio da Costa Cardoso Neto - Universidade de Flores Buenos Aires
Antônio Alves de Fontes-Júnior - Universidade Cruzeiro do Sul
Alessandre Gomes de Lima - Faculdade de Medicina da Universidade do Porto
Moacir Silva de Castro - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Marcelo Silva de Carvalho- Universidade Federal de Alfnas
Charles Henrique Andrade de Oliveira - Universidade de Pernambuco
Telma Regina Stroparo - Universidade Estadual de Ponta Grossa
Valéria Raquel Alcantara Barbosa - Fundação Oswaldo Cruz
Kleber Farinazo Borges - Universidade de Brasília
Rafael Braga Esteves - Universidade de São Paulo
Inaldo Kley do Nascimento Moraes - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Mara Lucia da Silva Ribeiro - Universidade Federal de São Paulo

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

G963t

Guimarães, Gil Eduardo.

Transformações Digitais e Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus [recurso eletrônico] : Desafios e Inovações / Gil Eduardo Guimarães, Nelson Marinelli Filho, Jandecy Cabral Leite. – São José dos Pinhais, PR: Seven Editora, 2025.

Dados eletrônicos (1 PDF).

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-6109-145-9

1. Transformação digital. 2. Indústria 4.0. 3. Indústria. 4. Inovação. I. Marinelli Filho, Nelson. II. Leite, Jandecy Cabral. III. Título.

CDU 330.341.1:004

Bruna Heller - Bibliotecária - CRB10/2348

Índices para catálogo sistemático:

CDU: Inovação, transformação 330.341.1

CDU: Tecnologias digitais, cibercultura 004

DOI: 10.56238/livrosindi202506-

Seven Publicações Ltda
CNPJ: 43.789.355/0001-14
editora@sevenevents.com.br
São José dos Pinhais/PR

DECLARAÇÃO DO(A) AUTOR(A)

O(a) autor(a) deste trabalho DECLARA, para os seguintes fins, que:

Não possui nenhum interesse comercial que gere conflito de interesse em relação ao conteúdo publicado;

Declara ter participado ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente nas seguintes condições: "a) Desenho do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação dos dados; b) Elaboração do artigo ou revisão para tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão";

Certifica que o texto publicado está completamente livre de dados e/ou resultados fraudulentos e defeitos de autoria;

Confirma a citação correta e referência de todos os dados e interpretações de dados de outras pesquisas;

Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para realizar a pesquisa;

Autoriza a edição do trabalho, incluindo registros de catálogo, ISBN, DOI e outros indexadores, design visual e criação de capa, layout interno, bem como seu lançamento e divulgação de acordo com os critérios da Seven Eventos Acadêmicos e Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Seven Publicações DECLARA, para fins de direitos, deveres e quaisquer significados metodológicos ou legais, que:

Esta publicação constitui apenas uma transferência temporária de direitos autorais, constituindo um direito à publicação e reprodução dos materiais. A Editora não é co-responsável pela criação dos manuscritos publicados, nos termos estabelecidos na Lei de Direitos Autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; O(s) autor(es) é(são) exclusivamente responsável(eis) por verificar tais questões de direitos autorais e outros, isentando a Editora de quaisquer danos civis, administrativos e criminais que possam surgir.

Autoriza a **DIVULGAÇÃO DO TRABALHO** pelo(s) autor(es) em palestras, cursos, eventos, shows, mídia e televisão, desde que haja o devido reconhecimento da autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial, com a apresentação dos devidos **CRÉDITOS** à **SEVEN PUBLICAÇÕES**, sendo o(s) autor(es) e editora(es) responsáveis pela omissão/exclusão dessas informações;

Todos os e-books são de acesso aberto, portanto, não os venda em seu site, sites parceiros, plataformas de comércio eletrônico ou qualquer outro meio virtual ou físico. Portanto, está isento de transferências de direitos autorais para autores, uma vez que o formato não gera outros direitos além dos fins didáticos e publicitários da obra, que pode ser consultada a qualquer momento.

Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições públicas de ensino superior, conforme recomendado pela CAPES para obtenção do Qualis livro;

A Seven Eventos Acadêmicos não atribui, vende ou autoriza o uso dos nomes e e-mails dos autores, bem como de quaisquer outros dados deles, para qualquer finalidade que não seja a divulgação desta obra, de acordo com o Marco Civil da Internet, a Lei Geral de Proteção de Dados e a Constituição da República Federativa.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/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.

ORGANIZADORES DO E-BOOK



D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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



D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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



D. Sc. Jandecy Cabral Leite

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

APRESENTAÇÃO

O futuro da indústria está sendo escrito hoje, e a Indústria 4.0 é o protagonista dessa narrativa. Este livro é uma coletânea de artigos derivados das dissertações de mestrado profissional do ITEGAM – Instituto de Educação e Tecnologia Galileo da Amazônia, uma das principais instituições voltadas ao estudo e desenvolvimento de soluções tecnológicas aplicadas ao Polo Industrial de Manaus.

Os temas apresentados exploram desde a implementação de sistemas inteligentes e soluções de automação até a utilização de tecnologias emergentes, como IoT, Inteligência Artificial, Gêmeos Digitais e Manufatura Aditiva. Este livro destaca estudos pioneiros que mostram como transformar desafios em oportunidades e como a indústria brasileira pode liderar a transição para uma economia mais inovadora, competitiva e alinhada com os princípios da sustentabilidade.

Uma leitura essencial para profissionais da área industrial, pesquisadores e estudantes que desejam compreender as profundas transformações em curso e se preparar para liderar o futuro.

PREFÁCIO

O mundo industrial vive uma verdadeira revolução, marcada pela convergência de tecnologias digitais, avanços em automação e integração ciberfísica. A Indústria 4.0, com seu potencial de transformar cadeias produtivas, redefinir paradigmas de produtividade e integrar soluções inteligentes, está no centro das discussões sobre o futuro da manufatura e da sustentabilidade industrial.

Este livro, fruto das dissertações de mestrado profissional do ITEGAM – Instituto de Educação e Tecnologia Galileo da Amazônia, é uma reflexão abrangente e profunda sobre as inovações tecnológicas aplicadas ao Polo Industrial de Manaus (PIM). Os artigos aqui reunidos abordam uma variedade de títulos e temas, que vão desde estudos práticos de implementações tecnológicas até reflexões sobre os desafios e as oportunidades da transição para a Sociedade 5.0.

A organização dos textos foi pensada para oferecer ao leitor uma jornada lógica e enriquecedora, partindo de conceitos gerais e aplicados sobre a Indústria 4.0 no contexto do PIM, passando por estudos de caso que demonstram soluções tecnológicas inovadoras, e culminando em propostas disruptivas que ilustram o impacto de tecnologias emergentes em setores específicos.

Nosso objetivo é inspirar profissionais, acadêmicos e tomadores de decisão a explorarem o potencial das novas tecnologias e a enfrentarem os desafios da implementação no setor industrial brasileiro. Que as reflexões e descobertas presentes neste livro contribuam para avançarmos em direção a um futuro mais eficiente, sustentável e conectado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
 10.56238/livrosindi202506-001	
INDÚSTRIA 4.0: UMA PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO EM UMA EMPRESA METAL-MECÂNICA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS	
Engº Danilo Serrão Pereira, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Geraldo Nunes Correa, M. Sc. Janyel Trevisol.	
CAPÍTULO 2	26
 10.56238/livrosindi202506-002	
TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA ZONA FRANCA DE MANAUS: CAMINHOS E DESAFIOS ENTRE A INDÚSTRIA 4.0 E A SOCIEDADE 5.0	
Engª. Rosangela Victor do Vale, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Rodrigo Fernando dos Santos Salazar, D. Sc. Geraldo Nunes Correa.	
CAPÍTULO 3	51
 10.56238/livrosindi202506-003	
ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA NAS INDÚSTRIAS DE MONTAGEM DE ELETROELETRÔNICAS DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS POR MEIO DO CÁLCULO DO OEE - CASO DE ESTUDO DE AUTOMAÇÃO	
Bal. Isabela Zanotto Monteiro, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Geraldo Nunes Correa, Bal. Matheus Rissardi Ferreira.	
CAPÍTULO 4	73
 10.56238/livrosindi202506-004	
KANBAN ELETRÔNICO COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO PARA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E OTIMIZAÇÃO PRODUTIVA EM UMA INDÚSTRIA DE FITAS DO PIM	
Engª. Lívia Fernanda Lobão de Araújo, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Fabricio Carlos Schmidt, D. Sc. Geraldo Nunes Correa.	
CAPÍTULO 5	88
 10.56238/livrosindi202506-005	
SISTEMA INTELIGENTE DE SUPERVISÃO E CONTROLE DE CAPACIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS: INTEGRAÇÃO DE SCADA, IA E APRENDIZADO DE MÁQUINA	
Engº Nelson Michel Matos de Araujo, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Geraldo Nunes Correa, Bal. Matheus Rissardi Ferreira.	
CAPÍTULO 6	110
 10.56238/livrosindi202506-006	
APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E IOT NA MODERNIZAÇÃO DA INSPEÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UM ESTUDO NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS	
Engª. Karen Kettelen Souza Soares, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Fabricio Carlos Schmidt, D. Sc. Geraldo Nunes Correa.	

CAPÍTULO 7.....129

 10.56238/livrosindi202506-007

SINERGIA ENTRE MODELAGEM 3D E REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA OTIMIZAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

Jonathan Oliveira Dias, Milton Vieira Junior, Jandecy Cabral Leite, Genilson Roberto Maciel Ferreira.

CAPÍTULO 8.....154

 10.56238/livrosindi202506-008

INTEGRAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS AUTÔNOMOS (AMRs) COM LIDAR E CONECTIVIDADE 5G: UM ESTUDO SOBRE APLICAÇÕES EM AMBIENTES HOSPITALARES

Eng. Wesley Muller Costa Nunes, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Débora Cristina Alavarce, D. Sc. Geraldo Nunes Correa.

CAPÍTULO 9.....173

 10.56238/livrosindi202506-009

HARDWARE DIDÁTICO PARA MAPEAMENTO DE AMBIENTES INDOOR

Engº Rafael Braga Guabiraba, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Geraldo Nunes Correa, M. Sc. Janyel Trevisol.

CAPÍTULO 10.....196

 10.56238/livrosindi202506-010

CRIAÇÃO DE APLICAÇÕES PARA SISTEMA DE TESTE FUNCIONAL COM RASTREABILIDADE PARA CARREGADORES DE CELULAR

Engº Elvis Jardim Maues, D. Sc. Nelson Marinelli Filho, D. Sc. Gil Eduardo Guimarães, D. Sc. Débora Cristina Alavarce, M. Sc. Janyel Trevisol.

INDÚSTRIA 4.0: UMA PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO EM UMA EMPRESA METAL-MECÂNICA NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

  10.56238/livrosindi202506-001

Engº Danilo Serrão Pereira

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

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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)

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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)

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica

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

ORCID: 0000-0001-5477-6953

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

M. Sc. Janyel Trevisol

Mestre em Engenharia de Produção

Professor do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Horizontina (FAHOR) – RS - BRASIL

ORCID: 0000-0002-1153-4046

E-mail: janyeltrevisol@yahoo.com.br

RESUMO

A Indústria 4.0 introduz uma transformação significativa no setor produtivo, integrando tecnologias como IoT, inteligência artificial e big data para criar operações inteligentes e flexíveis. Este estudo investiga os desafios e oportunidades da implementação dessas tecnologias em uma empresa metal-mecânica do Polo Industrial de Manaus (PIM). Por meio de uma abordagem de estudo de caso, foram aplicados instrumentos como o questionário Impuls e entrevistas com gestores para diagnosticar a prontidão tecnológica da empresa. Os resultados revelam barreiras relacionadas à infraestrutura, competências organizacionais e resistência cultural, mas também destacam o potencial de ganhos em produtividade e sustentabilidade. Com base nos achados, foi elaborado um *roadmap* em três fases, abrangendo capacitação, automação e adoção de inteligência artificial, oferecendo diretrizes práticas para empresas do setor no PIM. O estudo conclui que a transição para a Indústria 4.0 exige estratégias integradas que considerem aspectos técnicos e culturais, contribuindo para a competitividade global e o desenvolvimento sustentável da região.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Polo Industrial de Manaus, Tecnologias emergentes, *Roadmap*, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, conhecida como a Quarta Revolução Industrial, representa uma transformação significativa no setor produtivo. Essa abordagem é marcada pela integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas, criando um ambiente industrial altamente automatizado e interconectado. Entre as principais tecnologias estão os sistemas ciber-físicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial (IA), que permitem controle em tempo real, adaptação dinâmica e otimização de processos produtivos.

No Brasil, a implementação da Indústria 4.0 enfrenta desafios importantes, como infraestrutura tecnológica limitada, altos custos de inicialização e falta de mão-de-obra qualificada. A Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018) destaca que uma parcela significativa das empresas brasileiras ainda se encontra em estágios iniciais de digitalização, dificultando a transição para a nova era industrial. No Polo Industrial de Manaus (PIM), essas dificuldades são ampliadas por questões logísticas e pela dependência de incentivos fiscais.

O PIM, fundado em 1967, é uma das principais bases industriais do Brasil, reunindo empresas de diversos setores, incluindo o metal-mecânico. Apesar da relevância econômica do polo, as empresas enfrentam desafios para acompanhar as mudanças globais e integrar as tecnologias da Indústria 4.0 em seus processos. Modernizar as operações industriais no PIM é crucial para aumentar a competitividade internacional e garantir a sustentabilidade regional.

Neste cenário, surge o seguinte problema de pesquisa: **Como uma empresa do setor metal-mecânico localizada no Polo Industrial de Manaus pode implementar tecnologias da Indústria 4.0 para melhorar sua eficiência operacional, qualidade dos produtos e competitividade no mercado?** Este estudo visa propor um *roadmap* estratégico para a adoção dessas tecnologias, levando em conta as particularidades do setor e da região.

O presente artigo está estruturado em cinco seções: a seção 2 apresenta o referencial teórico, abordando os conceitos fundamentais da Indústria 4.0, tecnologias emergentes e modelos de maturidade. Na seção 3, descreve-se a metodologia aplicada. A seção 4 discute os resultados obtidos e as implicações práticas do estudo. Por fim, a seção 5 traz as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

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 (BUYYYA 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).

Uma comparação entre esses modelos demonstra que, enquanto o modelo de Kagermann foca em um diagnóstico mais abrangente e estratégico, o modelo Impuls enfatiza aspectos práticos e operacionais da implementação tecnológica. Ambos são complementares, oferecendo perspectivas que podem ser utilizadas de forma integrada para criar um plano robusto e detalhado de transição para a Indústria 4.0.

Exemplo de estudo de caso internacional:

Em um estudo realizado por Brettel et al. (2014) na Alemanha, foi aplicada uma análise baseada no modelo de Kagermann para avaliar a prontidão de uma empresa do setor automotivo. Os resultados indicaram que a integração de sistemas ciber-físicos e IoT aumentou a eficiência da produção em 20%. Já na China, Xu et al. (2018) usaram o modelo Impuls para avaliar uma fabricante de equipamentos eletrônicos. O estudo mostrou que a implementação de tecnologias baseadas em big

data e inteligência artificial reduziu o tempo de inatividade das máquinas em 15%. Esses casos ilustram como os modelos podem orientar a aplicação prática das tecnologias da Indústria 4.0 em contextos distintos.

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:

4.3.1 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).

4.3.2 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).

4.3.3 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).

Quando comparados com estudos similares, os desafios enfrentados pela empresa analisada refletem uma realidade observada em outros setores industriais no Brasil. Por exemplo, um estudo de Tortorella et al. (2021) revelou que empresas do setor automotivo no sul do Brasil também enfrentam dificuldades relacionadas à integração de sistemas legados e à capacitação de mão de obra. Outro estudo conduzido por Frank et al. (2019) identificou que pequenas e médias empresas brasileiras têm adotado abordagens incrementais, priorizando inicialmente a capacitação e a atualização da infraestrutura básica antes de avançarem para tecnologias mais complexas, como inteligência artificial.

Globalmente, empresas em regiões com características semelhantes, como no sudeste asiático, têm adotado estratégias de colaboração com instituições de pesquisa para acelerar o desenvolvimento de competências locais. Essa abordagem poderia ser considerada no contexto do PIM, especialmente para superar barreiras como a falta de profissionais qualificados e a resistência à mudança organizacional.

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. Para maximizar sua efetividade, é essencial detalhar as implicações práticas de cada fase do *roadmap*, incluindo custos estimados e indicadores de sucesso.

4.4.1 Implicações práticas

Na Fase 1, os custos estimados incluem investimentos em cursos de capacitação, que podem variar entre R\$ 50 mil e R\$ 100 mil, dependendo da abrangência e do número de funcionários treinados. Atualizações de hardware e software podem custar entre R\$ 200 mil e R\$ 400 mil, considerando a substituição de sistemas obsoletos e a aquisição de novos equipamentos compatíveis com IoT.

Na Fase 2, o investimento em sensores e dispositivos de monitoramento deve considerar os custos unitários, que variam entre R\$ 1 mil e R\$ 5 mil por sensor, dependendo da complexidade e da aplicação. A integração desses dispositivos em uma plataforma centralizada pode adicionar um custo adicional de até R\$ 500 mil, incluindo licenças de software e serviços de instalação. Indicadores de sucesso nesta etapa incluem a redução do tempo de inatividade das máquinas e a melhoria na precisão dos processos produtivos.

Na Fase 3, o uso de inteligência artificial e big data requer investimentos adicionais em plataformas de análise, com custos anuais de licenciamento que podem variar entre R\$ 100 mil e R\$ 300 mil. Indicadores de sucesso nessa fase incluem o aumento da produtividade em pelo menos 20% e a redução de falhas em até 15%, conforme observado em estudos como o de Xu et al. (2018).

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.

Além de contribuir para a prática industrial, este estudo oferece uma base sólida para futuras pesquisas acadêmicas ao identificar fatores críticos que influenciam a transição para a Indústria 4.0 no Brasil. A análise dos desafios enfrentados no contexto do PIM pode ser utilizada como referência

para estudos comparativos em outras regiões industriais do país e do mundo, ampliando o entendimento das condições necessárias para a transformação digital no setor metal-mecânico.

No âmbito das políticas públicas, sugere-se a criação de programas específicos de incentivo à modernização tecnológica das empresas do PIM. Entre as iniciativas possíveis, destacam-se:

- **Incentivos fiscais** para a aquisição de equipamentos e tecnologias da Indústria 4.0, promovendo a renovação do parque tecnológico das empresas.
- **Parcerias público-privadas** para a implementação de centros de capacitação em tecnologias avançadas, como inteligência artificial, IoT e big data, atendendo à carência de mão de obra especializada na região.
- **Fomento à pesquisa aplicada**, com subsídios para projetos que integrem universidades, empresas e instituições de pesquisa, incentivando a inovação tecnológica local e a troca de conhecimento.
- **Linhas de crédito específicas**, oferecidas por bancos de desenvolvimento, para apoiar investimentos em infraestrutura tecnológica e automação no setor industrial do PIM.

Essas políticas podem mitigar as barreiras identificadas, como a falta de infraestrutura e a necessidade de capacitação, acelerando a adoção da Indústria 4.0 e potencializando seus benefícios econômicos e sociais. Além disso, ao fortalecer o PIM como um polo de inovação tecnológica, essas iniciativas podem contribuir para o desenvolvimento sustentável da região amazônica, promovendo uma integração equilibrada entre progresso econômico e 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.
- BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, v. 8, n. 1, p. 37-44, 2014.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Indústria 4.0 e o Brasil: oportunidades e desafios*. Brasília: CNI, 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Indústria 4.0: desafios e oportunidades para o Brasil*. 2018.
- FRANK, A. G.; DORAISWAMY, A. M.; GUBERNA, L.; MAÇADA, A. C. G. Indústria 4.0 no Brasil: barreiras e oportunidades para a transição. *Revista de Administração e Inovação*, v. 16, n. 2, p. 146-155, 2019.
- 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.

TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. C.; FRANK, A. G. Challenges and opportunities for Industry 4.0 implementation in the Brazilian manufacturing sector. *Production Planning & Control*, v. 32, n. 3, p. 226-239, 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.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

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

  10.56238/livrosindi202506-002

Eng^a. 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.EGPSA/ITEGAM) – AM - BRASIL
E-mail: rosangela.victor@gmail.com

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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
ORCID: 0000-0003-2800-4620
E-mail: gil.guimaraes@itegam.org.br

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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
ORCID: 0009-0005-4362-0132
E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br

D. Sc. Rodrigo Fernando dos Santos Salazar

Doutor em Ciências – Química Analítica
Professor do Curso de MBA em Agronegócio - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Esalq/USP – SP – BRASIL
ORCID: 0000-0001-5808-4321
E-mail: r.f.s.salazar@gmail.com

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica
Professor do Curso Sistemas de Informação da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - MG – BRASIL
ORCID: 0000-0001-5477-6953
E-mail: geraldo.correa@uemg.br

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:

3.2.1 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).

3.2.2 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).

3.2.3 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:

- **Etapa 1:** Aplicação de questionários, garantindo a representatividade de diferentes setores industriais dentro do PIM.
- **Etapa 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.

6 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.

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.

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA NAS INDÚSTRIAS DE MONTAGEM DE ELETROELETRÔNICAS DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS POR MEIO DO CÁLCULO DO OEE – CASO DE ESTUDO DE AUTOMAÇÃO

  10.56238/livrosindi202506-003

Bal. Isabela Zanotto Monteiro

Bacharel em Ciência da Computação

Acadêmica 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: isabelazanottom1@gmail.com

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica

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

ORCID: 0000-0001-5477-6953

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

Bal. Matheus Rissardi Ferreira

Bacharel em Análise e Desenvolvimento de Sistemas

Diretor de Tecnologia na Atimecon Collaborative Economy - SP - BRASIL

E-mail: matheus@ativecon.com

RESUMO

Este estudo apresenta a implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, com ênfase no uso de Gêmeos Digitais e na automação do cálculo do OEE (Overall Equipment Effectiveness), aplicados a uma linha de montagem de placas eletroeletrônicas no Polo Industrial de Manaus (PIM). O objetivo foi desenvolver uma solução capaz de identificar, em tempo real, os tempos e motivos das paradas produtivas, visando à otimização dos processos industriais e à redução de custos operacionais. Os dados foram coletados por meio de sensores IoT instalados nas linhas de produção, integrados a uma plataforma digital que replicou virtualmente a planta fabril em um sistema de Gêmeos Digitais. O OEE foi calculado automaticamente a partir dos três principais indicadores: Disponibilidade, Performance e Qualidade. Simulações no ambiente virtual identificaram gargalos produtivos e permitiram ações preditivas para evitar falhas e otimizar a performance das máquinas. Os resultados, obtidos ao longo de 80 dias de monitoramento, evidenciaram evolução nos indicadores de eficiência produtiva, com redução do downtime não programado, ajuste dinâmico dos parâmetros de produção e melhoria da qualidade dos produtos, impactando positivamente a sustentabilidade industrial e a

eficiência energética. O estudo também discutiu desafios enfrentados, como integração com sistemas legados, qualidade dos dados coletados e capacitação técnica da equipe, cuja superação foi essencial para o sucesso da transformação digital. Conclui-se que a combinação entre Gêmeos Digitais, OEE automatizado e tecnologias da Indústria 4.0 constitui um caminho viável para a excelência operacional, contribuindo para a competitividade e sustentabilidade das indústrias do PIM.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Gêmeos Digitais. OEE, Sustentabilidade Industrial, IoT.

1 INTRODUÇÃO

A industrialização é o processo transformador dos mais significativos polos econômicos mundiais, por ampliar de forma escalar a geração de emprego às suas populações, demandar a sua capacitação contínua e especialização, agregar tecnologias inovadoras de eficiência de processos e aumentar a confiabilidade da qualidade na produção bens de consumos, como é o caso dos aparelhos eletroeletrônicos que caracterizam a Indústria da Zona Franca de Manaus, AGUIAR (2022).

As políticas estruturantes da Amazônia Ocidental têm como mais importante iniciativa a Zona Franca de Manaus (ZFM) alinhada a um complexo conjunto de leis, normas e diretrizes que a tornam o mais importante polo de desenvolvimento industrial localizado na região Norte do Brasil. Neste arcabouço se destaca a Lei de Informática da ZFM que é responsável por atrair importantes grupos industriais de atuação global, por meio de seus atributos fiscais. Especialmente, do setor de bens de consumo eletroeletrônicos: telefones móveis computadores, aparelhos domésticos e até mesmo veículos automotores, Lima, A. K. C. (2015).

Neste contexto de fomento ao desenvolvimento é muito importante as ações relacionadas à busca pela melhoria contínua da eficiência de processos, qualidade e competitividade. Por meio dos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento regulados pela SUFRAMA (Superintendência da Zona Franca de Manaus) e orientados pelo CAPDA (Comitê das Atividades de pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia), com o incentivo e implementação de projetos de cunho voltado para o desenvolvimento de produtos, processos, sistemas e tecnologias. Todos com o objetivo de fomentar a busca constante da competitividade, por meio de elevados patamares de excelência na operacionalização industrial, redução de custos e, hoje, também pela sustentabilidade,

A Indústria 4.0 é no âmbito global é uma realidade em andamento. A sua capacidade tecnológica fundamental de interconexão em Nuvem habilita o monitoramento de processos e dos seus resultados em qualquer momento e lugar e tornam possível observar detalhadamente cada espaço, componente e ação dentro de uma instalação fabril. A sua adoção trouxe aos de sistemas para a gestão de processos industriais rapidez e precisão em atividades de controle e planejamento

rotineiras no dia a dia industrial, com impacto positivo inquestionável sobre as organizações que conseguiram adotá-las plenamente.

No entanto, esta capacidade ainda não é uma realidade para a grande maioria das indústrias localizadas no Polo Industrial de Manaus (PIM). A maior parte das indústrias instaladas ali trabalha diariamente com desafios constantes no planejamento de produção, impasses logísticos tanto de abastecimento quanto de escoamento, controle de qualidade e manutenção preditiva de linha produtiva, mas ainda sem as facilidades que as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem trazer para as operações industriais e a sua gestão. Isto acontece não por falta entendimento dos benefícios, ou mesmo recursos, mas sim por dificuldades em entender como estas tecnologias podem ser alinhadas de forma assertiva para entregar os resultados necessários, dentro de limites determinados de tempo e recursos. Baseada em dados das máquinas analisados em tempo real para a interrupção da alta incidência de paradas não programadas na produção de bens de alto valor agregado, o que compromete em todos os setores da operação industrial, Balluff Brasil. (2023) e Ramos, C. A., Ribeiro, P. F., Barboza, W. S., Dias, M. J., & Alcântara, G. A. M. (2024).

Além disso, no cenário mundial atual e especialmente quando falamos de Amazônia, é imprescindível trazer para o escopo dos projetos de pesquisa e desenvolvimento industriais os atributos e características da sustentabilidade industrial que devem ser contemplados nestes processos de melhoria contínua, Almeida, O. C., Brilhante, J. C., Pinto, F. R., & Alencar, D. B. (2019). Aqui é adequado o pensamento linear de que as instalações industriais e seus equipamentos devem ser utilizados em sua capacidade máxima, de forma inteligente e até compartilhada, para reduzir desperdícios. Saber como maximizar os recursos disponíveis é uma ação de sustentabilidade vital, mas que demanda profundo conhecimento dos processos e de como monitorá-los de forma efetiva. Esta é uma demanda que pode ser muito bem atendida por meio do desdobramento do conceito de “Gêmeos Digitais”, como será explorado e desenvolvido no presente trabalho de pesquisa e desenvolvimento industrial.

Ter processos que podem ser monitorados, entendidos e melhorados é o primeiro passo para a aplicação de tecnologias limpas, porque esta classe de transformação do ambiente industrial demanda a adoção de iniciativas que sejam capazes de planejar, tanto internamente quanto no contexto macro, a integração dos espaços físicos, das pessoas e dos equipamentos coisas, Li, H., Pangborn, H. C., & Kovalenko, I. (2023).

Este nível de integração, característico da Indústria 4.0, é capaz de transformar os processos de trabalho, mas apenas se for simplificado para a interação humana utilizando métricas acuradas de desempenho em tempo real. Estas métricas, invariavelmente, são de cálculo complexo e até hoje eram analisadas a posteriori. Isto anulava a sua importância, quase que completamente, e as relegava a

ilustrações de trabalhos gerenciais que tinham pouca chance de serem implementados. A utilização das tecnologias digitais para análise de altos volumes de dados, utilizando recursos, mesmo que simples de inteligência de máquina, permitem automação do cálculo de métricas de desempenho como o OEE (Overall Equipment Effectiveness), McKinsey & Company. (2023) e NVIDIA Corporation. (2023).

Neste trabalho será explorado este caminho de solução para a difusão das capacidades da Indústria 4.0 como discutido, que já podem ser acessadas sem investimentos de recursos impeditivos pela maioria das indústrias do PIM, explorando o conceito de gêmeos digitais no caso de uma planta produtiva automatizada em uma indústria de eletroeletrônicos (setor de alta prevalência do PIM), capaz de identificar de forma acurada os tempos e motivos de suas interrupções de produção (“paradas”).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A EVOLUÇÃO DO OEE E SUA IMPORTÂNCIA NA INDÚSTRIA 4.0

O OEE (Overall Equipment Effectiveness) é uma métrica central para medir a eficácia dos equipamentos industriais. Ele avalia três componentes fundamentais: Disponibilidade (tempo de operação dos equipamentos), Performance (capacidade dos equipamentos em atingir sua velocidade máxima) e Qualidade (proporção de produtos que atendem aos padrões estabelecidos). Este conceito emergiu ao longo das quatro Revoluções Industriais, sendo continuamente aperfeiçoado para atender às demandas de um ambiente produtivo cada vez mais complexo e tecnológico (HANSEN, 2022).

2.1.1 OEE e as Revoluções Industriais

1º Revolução Industrial (séculos XVIII e XIX): Durante este período, a introdução da máquina a vapor revolucionou a produção, substituindo processos artesanais por mecanizados. Embora o OEE ainda não existisse formalmente, a ideia de maximizar a eficiência das máquinas era um foco crescente. O objetivo principal era minimizar as falhas e o tempo de inatividade, priorizando a manutenção regular.

- **Disponibilidade:** O tempo de operação das máquinas a vapor era essencial para manter a produção ativa. Paradas inesperadas causavam grandes impactos na produtividade (HANSEN, 2022).
- **Performance e Qualidade:** Embora não fossem medidas formalmente, havia esforços para aumentar a velocidade das máquinas e produzir bens aceitáveis, ainda que de forma rudimentar (HANSEN, 2022).

2º Revolução Industrial (século XIX - início do século XX): Com a eletricidade e o motor de combustão interna, a produção em massa e as linhas de montagem ganharam destaque. Métodos de gestão científica, como os propostos por Frederick Taylor, introduziram estudos de tempos e movimentos, padronizando processos e ampliando a atenção à eficiência operacional.

- **Disponibilidade:** A manutenção das linhas de montagem foi aprimorada para garantir operações contínuas (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).
- **Performance:** Houve um avanço significativo na redução de movimentos desnecessários e no aumento da velocidade das máquinas, (HANSEN, 2022).
- **Qualidade:** Tornou-se vital garantir que os produtos atendessem aos padrões para evitar retrabalhos e desperdícios, (HANSEN, 2022).

Esses avanços trouxeram os primeiros indícios do que viria a se formalizar como OEE, com uma visão mais integrada da eficiência produtiva.

3º Revolução Industrial (meados do século XX - início do século XXI): A automação industrial e as tecnologias digitais transformaram a produção. Computadores e sistemas de controle permitiram o monitoramento em tempo real, enquanto abordagens como Lean Manufacturing e Manutenção Produtiva Total (TPM) popularizaram o uso do OEE.

- **Disponibilidade:** A automação permitiu práticas de manutenção preditiva, reduzindo falhas inesperadas (MOURTZIS; VLACHOU; MILAS, 2016).
- - **Performance:** Sistemas digitais ajustaram a velocidade das máquinas com maior precisão, otimizando a produção (PEREIRA; ROMERO, 2017).
- - **Qualidade:** Controles automatizados reduziram drasticamente a ocorrência de defeitos, garantindo consistência (PEREIRA; ROMERO, 2017).

O OEE tornou-se uma métrica amplamente adotada, permitindo que empresas monitorassem e melhorassem continuamente suas operações.

• **Indústria 4.0 (século XXI):** A Indústria 4.0 trouxe avanços como IoT, Big Data, Inteligência Artificial (IA), Machine Learning (ML) e Gêmeos Digitais, elevando o papel do OEE para um nível preditivo e em tempo real. Essas tecnologias conectaram todos os aspectos da produção, proporcionando insights precisos e ações automatizadas (PORTER; HEPPELMANN, 2014)

- **Disponibilidade:** Sensores IoT monitoram equipamentos continuamente, enquanto IA prevê falhas antes que ocorram (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

- **Performance:** Algoritmos ajustam parâmetros em tempo real, maximizando a eficiência (MOURTZIS; VLACHOU; MILAS, 2016).
- **Qualidade:** Simulações com Gêmeos Digitais antecipam problemas, garantindo altos padrões de qualidade (FENZA et al., 2020).

A integração dessas tecnologias consolidou o OEE como uma métrica indispensável na gestão moderna.

2.2 OEE E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 conecta sistemas físicos e digitais, permitindo análises em tempo real e decisões automatizadas. O OEE, que historicamente era calculado manualmente, evoluiu para um indicador dinâmico, ajustado automaticamente com base em dados coletados por sensores e processados por IA (ARORA; PANDEY; KUMAR, 2019).

2.2.1 Aplicações de IA e ML no Monitoramento do OEE

Previsão de Falhas: Os recursos atuais de IA, já amplamente disponíveis nos componentes de automação de suas linhas de produção e sua conectividade, são capazes de prover a análise de significativos conjuntos de dados históricos e em tempo real. Isto torna a análise de regressão das variáveis de monitoramento confiável em um nível que se torna possível passar a se prever falhas iminentes de equipamentos e processos, a partir de observações mínimas (STOLZ; LORENZ; FISCHER, 2024). Além das estratégias de tempo real, também se torna possível a aquisição de e construção de algoritmos específicos para a identificação de padrões que indicam degradação de equipamentos, permitindo manutenções preventivas assertivas e, conseqüente, alcançar benefícios que eram considerados intangíveis: máxima utilização de equipamento, monitoramento do ciclo de vida etc.

Otimização Contínua: O nível de robustez dos componentes de automação na Indústria 4.0 permite que os conceitos de Machine Learning possam ser implementados como metodologias de trabalho contínuas, ou seja, incorporadas às rotinas de trabalho de produção e, não mais, como estudos posteriores dos dados de produção (CLEARPEAKS, 2023). Isto começa a tornar realidade a capacidade de se ajustar automaticamente parâmetros de produção: velocidade de corte, posicionamento, cotas de referência, temperatura, ou seja, qualquer parâmetro além dos materiais de produção. Esta capacidade traz a maximização da qualidade de processos, tornando os níveis de processos de produção demandados cada vez mais elevados. Essa análise dinâmica garante que os equipamentos operem em sua capacidade ideal (OEE: CALCULANDO, 2023).

2.2.2 Gêmeos Digitais e o OEE

O conceito de Gêmeos Digitais é simples: a construção de réplicas virtuais que representam em tempo real o funcionamento, o desempenho e a interação de equipamentos, linhas e células de produção. O nível de automação e monitoramento atual destes sistemas tornam possível o desdobramento de estratégias de monitoramento, simulação e otimização em um nível inédito na história da Revolução Industrial, mas tornam a construção destes ambientes digitais cada vez mais complexa (GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA 4.0, 2023). Principalmente se observados apenas a partir do referencial do mais alto nível tecnológico de interação humana, como VR e AR (Realidade Virtual e Aumentada), e não nos níveis pragmáticos de aplicação com alto nível de retorno (custo-benefício), mas com nível menor de impacto visual. O presente trabalho vai exatamente na segunda alternativa, em uma tentativa de demonstrar que aplicações pragmáticas da tecnologia podem trazer retornos significativos à qualidade do trabalho industrial, em todos os seus atributos e características.

Mas a busca pela máxima utilização da tecnologia não pode ser descartada neste caso, porque a integração dos ambientes de Gêmeos Digitais à capacidade de análise da IA e de identificação de padrões do ML tem o potencial de transformar o trabalho industrial de forma profunda, por meio das seguintes estratégias:

- **Simulações:** Testar e avaliar condições de trabalhos, em diferentes cenários e configurações, antes de implementar mudanças no ambiente real. Isto facilita o processo de escolha de alternativas e a tomada de decisões com riscos controlados.
- **Monitoramento:** Observar constantemente as variáveis de trabalho, sintetizando-as em indicadores chaves de processos (KPIs) e ordenando a sua evolução no tempo dentro de limites pré-estabelecidos (CpK), em ambientes amigáveis e até imersivos facilitam o entendimento do impacto de cada variável no desempenho global dos processos e, conseqüentemente, a detecção de potenciais falhas e o ajuste acurado dos parâmetros de trabalho. Tudo isso em tempo real (GÊMEOS DIGITAIS E DA INDÚSTRIA 4.0, 2023).
- **Qualidade:** A capacidade de simular alternativas e de monitorar seu desempenho em tempo real tem como resultado direto a melhoria da estabilidade dos processos, pois cada um dos desvios naquilo que foi planejado pode ser identificado, avaliado e corrigido. Isto em termos reais leva à diminuição das variações de processo e, conseqüentemente na elevação dos níveis de qualidade.

Este conjunto pode ser considerado o tripé fundacional da busca pela melhoria contínua, sob os paradigmas da Indústria 4.0.

2.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS NA INDÚSTRIA

Pragmaticamente, o principal benefício da implementação do OEE na indústria de manufatura é a capacidade de observar a eficiência real das máquinas e gerenciar adequadamente o parque de máquinas. Além disso, o monitoramento do OEE permite a identificação e eliminação de tempos de inatividade e falhas, o que se traduz diretamente em redução de custos e aumento da eficiência da produção.

A implementação do OEE abre caminho para mais inovações na Indústria 4.0, como sistemas de rastreabilidade, que permitem um gerenciamento ainda mais preciso da produção e da qualidade do produto. Graças à infraestrutura implementada para monitorar o OEE, é fácil estender a funcionalidade para módulos adicionais, como leitores de código de barras, que permitem o rastreamento de lotes específicos de produtos.

A implementação do indicador OEE é um passo fundamental no caminho para a implementação dos princípios da Indústria 4.0. Em busca destes benefícios diversos setores da indústria de manufatura estão implementando estratégias e estruturas inovadoras de monitoramento, cálculo e análise do OEE, como por exemplo:

2.3.1 Automotiva

Empresas automotivas de ponta, como BMW investem de forma robusta e consistente no desenvolvimento de soluções de monitoramento da disponibilidade, performance e qualidade de suas linhas de montagem e buscam por meio de IA ampliar a efetividade de seus processos de manutenção preditiva.

A digitalização é o facilitador da transformação para a BMW iFACTORY. Inovações de virtualização, inteligência artificial (IA) e ciência de dados permitem que o BMW Group conecte todos os aspectos relevantes da produção automotiva e use essas inovações para projetar aplicativos eficazes na produção. O resultado: máxima transparência de dados, o que torna possível o design de processos digitais altamente eficaz. "As possibilidades estão crescendo rapidamente - e estamos aproveitando-as", diz Milan Nedeljkovic. *"Com a digitalização, estamos alcançando uma nova dimensão de consistência de dados em toda a cadeia de valor e em todas as cadeias de processo."* Os aplicativos podem ser implementados em qualquer local de produção, uma vez desenvolvidos.

2.3.2 Eletrônica

As empresas líderes no desenvolvimento de tecnologias para automação, como a Foxconn têm investido cada vez mais na busca de soluções de integração da IoT (sensores) e estratégias de IA e ML, para intensificar a capacidade de previsão de falhas, ajuste de processos e garantia do desempenho de produção (capabilidade).

“Advanced manufacturing, supported by Industrial AI, is going to revolutionize how manufacturers compete in the global economy, upgrade skills, create jobs, and onshore business to the United States. - Keyi Sun, Head of FOXCONN iAI”, (FOXCONN INDUSTRIAL INTERNET, acesso 12.2024).

Alimentícia: Inegavelmente a indústria alimentícia é uma das principais orquestradoras de todas as economias e com capacidade de investimento significativa, sobretudo com empresas que ocupam o lugar da Coca-Cola na sua cadeia de valor (processamento de alimentos).

A tecnologia de Gêmeos Digitais (Digital Twin) representa um avanço significativo, fornecendo um modelo virtual preciso das linhas de produção. Essa representação digital oferece insights em tempo real e análises preditivas, revolucionando a tomada de decisão com melhorias na eficiência, baseadas em dados, e redução de custos. Para diminuir a dependência de fornecedores, a empresa adotou a impressão 3D para produção de peças de reposição, com 386 designs implementados em 11 plantas. Essa iniciativa gerou economias substanciais, reduziu prazos de entrega e melhorou a disponibilidade das linhas de produção”, COCA-COLA HELLENIC BOTTLING COMPANY, acesso 12 de 2024”.

Estas declarações de empresas líderes, no cenário global da Indústria 4.0, demonstram a importância crescente que o seu arcabouço tecnológico está adquirindo, até mesmo com relação aos temas de sustentabilidade. Em todas a garantia da disponibilidade dos equipamentos demonstra como o OEE se tornou uma métrica central em setores que demandam alta eficiência e precisão.

2.4 BENEFÍCIOS E DESAFIOS

Ao implementar a inteligência artificial (IA) na manufatura, os principais benefícios incluem o aumento da precisão por meio de análises em tempo real e a redução de erros humanos, economias de custos devido à manutenção preditiva que minimiza paradas inesperadas, e a melhoria da qualidade por meio de sistemas automatizados consistentes. No entanto, desafios como a integração com sistemas legados em fábricas mais antigas, a garantia da qualidade dos dados para análises precisas e a necessidade de treinamento substancial para desenvolver uma força de trabalho qualificada para operar tecnologias avançadas também são significativos.

2.4.1 Benefícios

- **Maior Precisão:** Os algoritmos de IA podem analisar dados com precisão superior à humana, resultando em insights e decisões mais confiáveis. Conforme destacado por Stackpole (2023), a IA pode monitorar e melhorar o controle de produção e qualidade nas fábricas, aumentando a precisão das operações.

- **Redução de Custos:** A manutenção preditiva, viabilizada pela IA, permite reparos proativos antes de falhas nos equipamentos, minimizando o tempo de inatividade e os custos associados. De acordo com a McKinsey & Company (2023), ferramentas de IA centradas em dados podem acelerar a remediação da qualidade dos dados com níveis aumentados de automação, contribuindo para a redução de custos.
- **Melhoria da Qualidade:** Verificações automatizadas de qualidade utilizando IA podem identificar defeitos em tempo real de forma consistente, prevenindo que produtos defeituosos cheguem aos clientes. A integração de tecnologias de IA na manufatura tem potencial para transformar as operações, melhorando a qualidade e a eficiência dos processos produtivos.

2.4.2 Desafios

- **Integração com Sistemas Legados:** A integração de sistemas de IA com equipamentos antigos pode ser complexa e exigir modificações significativas. A adoção de IA na manufatura enfrenta desafios, incluindo a necessidade de integrar novas tecnologias com sistemas de produção existentes.
- **Qualidade dos Dados:** Dados imprecisos ou incompletos podem levar a análises não confiáveis e decisões inadequadas. A qualidade dos dados é um fator crítico para o sucesso de iniciativas de IA na manufatura, sendo essencial para análises precisas e tomadas de decisão eficazes.
- **Necessidade de Treinamento:** A implementação de tecnologias avançadas de IA exige uma força de trabalho qualificada, o que pode demandar investimentos significativos em treinamento. A transformação digital na manufatura requer o desenvolvimento de habilidades específicas, incluindo a capacitação de trabalhadores para operar e manter sistemas baseados em IA.

Todos estes desafios são muito bem discutidos em VIAL et al., (2020).

Este texto demonstrou que o OEE evoluiu de uma preocupação rudimentar com a disponibilidade das máquinas na 1ª Revolução Industrial para uma métrica preditiva e automatizada na era da Indústria 4.0. Sua integração com tecnologias como IoT, IA, ML e Gêmeos Digitais tornou-o indispensável para a competitividade e a sustentabilidade industrial. Agora, na Indústria 4.0, o OEE não é apenas um indicador operacional, mas uma ferramenta estratégica para identificar oportunidades, otimizar processos e garantir padrões elevados de qualidade.

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

O estudo foi realizado em uma indústria de montagem de placas para notebooks e computadores localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM). A produção desse tipo de componente exige processos rigorosos, com baixa tolerância a falhas, o que torna essencial a adoção de tecnologias que otimizem a eficiência produtiva. O objetivo central foi automatizar o cálculo do OEE (Overall Equipment Effectiveness) por meio de sensores integrados a uma plataforma de Internet das Coisas (IoT) e Gêmeos Digitais.

O OEE é calculado a partir de três variáveis principais:

- **Disponibilidade** (tempo efetivo de operação da linha),
- **Performance** (taxa de produção em relação à capacidade teórica) e
- **Qualidade** (percentual de produtos sem defeitos).

O estudo foi dividido em etapas: coleta de dados em tempo real, automação do cálculo do OEE, simulação de cenários e validação dos resultados.

3.2 COLETA DE DADOS EM TEMPO REAL

- **Sensores e Infraestrutura:** A coleta de dados foi realizada por sensores de movimento, temperatura e umidade instalados estrategicamente ao longo de três linhas SMT (Surface-Mount Technology);
- **Sensores de Movimento:** Monitoraram o ciclo de produção de cada placa; e
- **Sensores de Temperatura e Umidade:** garantiram as condições ideais para a integridade dos componentes.

Os sensores foram integrados à plataforma Siemens MindSphere, utilizando protocolos de comunicação como MQTT para transferência rápida dos dados. A plataforma possibilitou a visualização remota das métricas em tempo real através de um sistema de Gêmeos Digitais, que replicava virtualmente a linha de produção.

3.2.1 Andon Board e Monitoramento de Downtime

A ferramenta Andon Board foi utilizada para registrar eventos críticos, como paradas não programadas (downtime), capacidade produtiva real e qualidade obtida. O registro incluía a duração das paradas, a descrição do problema e as ações corretivas implementadas.

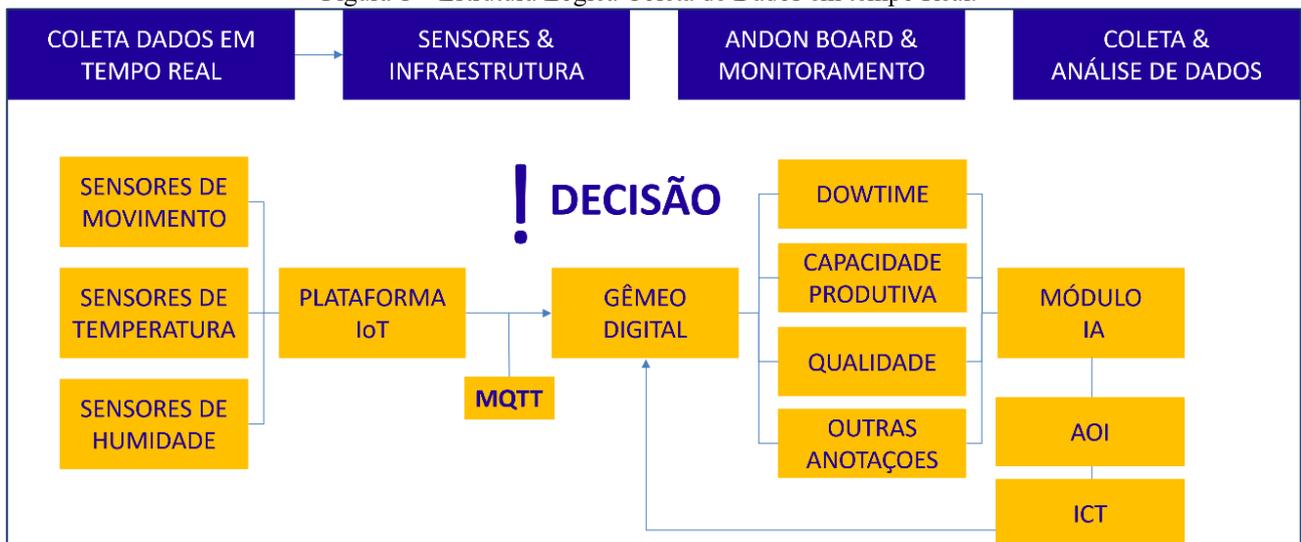
Com os dados do Andon Board, o sistema de Gêmeos Digitais, integrado a módulos de Inteligência Artificial (IA), identificou padrões de falhas repetitivas e sugeriu ações proativas para a equipe de Engenharia.

3.2.2 Ciclo de Coleta e Análise

A coleta dos dados ocorreu em intervalos definidos, iniciando com a passagem das placas pela primeira máquina equipada com sensores. Foram monitoradas variáveis como: tempo de ciclo, temperatura, umidade e ocorrências de downtime.

Os dados alimentaram o sistema de Gêmeos Digitais, permitindo que os operadores acompanhassem em tempo real o status das linhas e tomassem decisões rápidas baseadas nas condições operacionais. A Figura 1, mostra na forma de blocos lógicos a estrutura de Coleta de Dados em Tempo Real.

Figura 1 – Estrutura Lógica Coleta de Dados em tempo Real.



As inspeções automatizadas AOI (Automatic Optical Inspection) e ICT (In-Circuit Test) complementaram o monitoramento, permitindo a automação do cálculo do OEE, detectando falhas de montagem e funcionais precocemente, o que minimizou retrabalhos.

3.3 AUTOMAÇÃO DO CÁLCULO DO OEE

O OEE foi automatizado a partir da integração das variáveis capacidade, qualidade e disponibilidade em um sistema centralizado. A cada nova coleta de dados, o OEE era recalculado, fornecendo uma visão precisa e atualizada da eficiência produtiva.

3.3.1 Capacidade de Produção

A capacidade foi monitorada com base no UPH (Unidades por Hora), utilizando sensores de movimento para contabilizar as placas produzidas. A comparação com a meta teórica permitiu identificar gargalos e ajustar a produção.

3.3.2 Qualidade do Produto

A qualidade foi avaliada em duas etapas principais: AOI, que identifica problemas na montagem dos componentes e ICT, que analisa a funcionalidade elétrica das placas.

Os dados coletados ajudaram a ajustar os processos, garantindo que os produtos finais atendessem às exigências de qualidade.

3.3.3 Disponibilidade da Linha

A disponibilidade foi medida a partir dos registros de downtime. Cada parada era registrada com sua duração e causa, permitindo uma análise detalhada e a implementação de ações para reduzir as interrupções não programadas.

3.4 SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

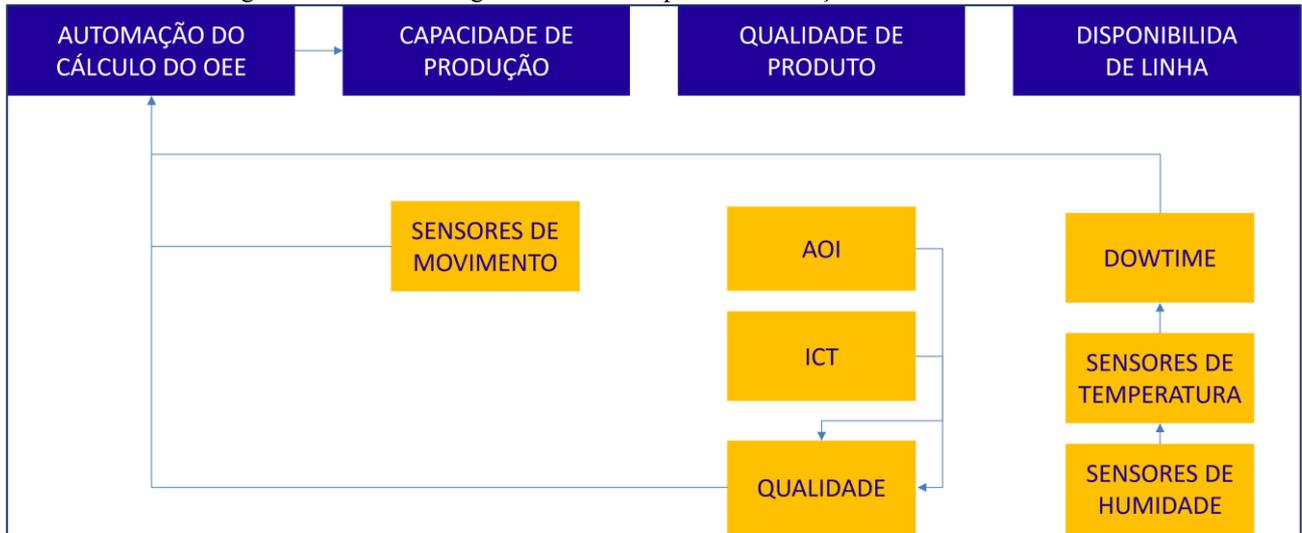
3.4.1 Simulação com Gêmeos Digitais

Os Gêmeos Digitais permitiram a simulação de cenários produtivos sem interferência no chão de fábrica. Variáveis como: aumento de demanda, falhas de máquinas, e mudanças nos processos foram testadas para prever os impactos na produção.

3.4.2 Validação dos Dados

Os dados gerados nos cenários simulados foram comparados com os dados reais coletados diretamente das máquinas. Essa validação assegurou que o sistema de Gêmeos Digitais representava com precisão as condições da linha de produção, conferindo confiabilidade ao processo. A Figura 2 mostra esquematicamente a estrutura lógica da Automação do Cálculo do OEE.

Figura 2 – Estrutura Lógica Estabelecida para a Automação do Cálculo do OEE.



A Figura 3 apresenta sequencialmente as operações da linha de produção, com cada estação identificada por seu equipamento principal de trabalho (“máquina”), descrição, layout e as variáveis que são monitoradas.

Figura 3 – Estrutura de monitoramento e simulação.



Toda esta construção permitiu o início da implementação de cálculo automatizado do OEE e a consolidação da base de dados para o início de simulação por meio de ambiente de “Gêmeos Digitais”.

4 RESULTADOS

O primeiro momento de implementação da solução proposta passou pelas etapas de teste e estabilização de todo o sistema de coleta de dados, integração e validação dos dados, passando por momentos iniciais de alta variabilidade e chegando até a ordenação clara de prioridade de atenção. As Figuras 4 e 5 mostram estes dois momentos.

Figura 4 – Momentos iniciais da implementação do sistema de monitoramento e automação do cálculo do OEE.

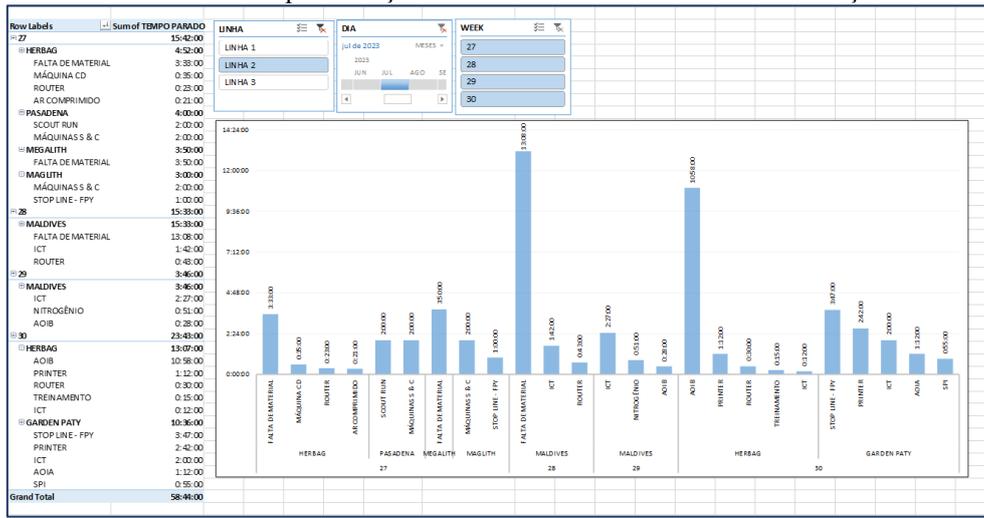
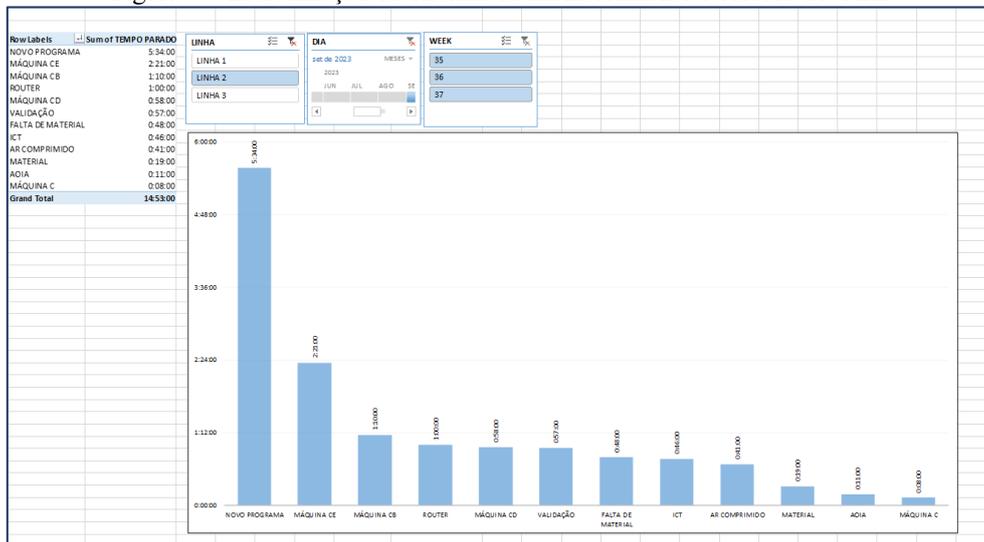


Figura 5 – Estabilização do sistema de monitoramento e cálculo do OEE.



Ao longo de dois meses de desenvolvimento o monitoramento de toda a linha, como detalhado no item 3 deste artigo permitiu o treinamento de todo o arcabouço de análise e automação de decisão, como apresentado nas Figuras 1 e 2. Este processo se desenvolveu entre os dias 1º de outubro e 11 de dezembro de 2024.

As figuras 6 e 7 mostram o ambiente de “Gêmeo Digital” da estrutura de monitoramento e simulação detalhada na Figura 3. No dia 10 de outubro de 2024 para cada processo e horário já havia, a partir dos dados coletados inicialmente, uma simulação dos parâmetros que poderiam ser alcançados. As metas não alcançadas são indicadas visualmente pela cor vermelha. É claro o descompasso entre as metas estabelecidas e os resultados alcançados em 1º de Outubro de 2024, observado estes indicadores, apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Ambiente de “Gêmeo Digital” para a linha de montagem modelada (placas eletrônicas de notebooks e carregadores), em 1º de outubro de 2024.

15h Shift	SMT Output				ICT Output				AOI A S FPY	AOI B C FPY	ICT - FPY	YIELD (HORA)		SCOUT RUN QTY	XRAY QTY STATUS	OEE (HORA)		DOWNTIMES					
	Target	Real	Acc Target	Acc Real	Target	Real	Acc Target	Acc Real	Target: 99.35%	Target: 99.35%	Target: 99.35%	Target: 98.06%	Real	Acc Real			Target: 165.00%	Hora	Acc Real	DOWNTIME	CAUSE	ACTION	RESPONSIBLE ÁREA
06:00	165	156	165	156	165	165	165	165	100%	100%	100%	100%	100%	0091	0153	47.27%	47.27%	1 min		PERFIL DO FORNO	AG FORNO ESTABILIZAR	ENGENHARIA SMT	
														0092	0154			8 min		ATRASO NA PASSAGEM DE PLACA NO SENSOR	NENHUMA AÇÃO FOI REALIZADA - FORNO C	NAO DEFINIDA	
																		8 min		ATRASO NA PASSAGEM DE PLACA NO SENSOR	NENHUMA AÇÃO FOI REALIZADA - PANASONIC C	NAO DEFINIDA	
																		8 min		ATRASO NA PASSAGEM DE PLACA NO SENSOR	NENHUMA AÇÃO FOI REALIZADA - ROUTER C	NAO DEFINIDA	
07:00	165	184	330	348	165	170	330	335	100%	100%	99.42%	99.42%	99.70%	0243	0289	90.34%	68.91%	11 min		ATRASO NA PASSAGEM DE PLACA NO SENSOR	NENHUMA AÇÃO FOI REALIZADA - ROUTER C	NAO DEFINIDA	
08:00	123	124	453	464	123	166	453	501	100%	100%	100%	100%	99.80%	0441	0544	100.0%	79.54%	Intervalo	Intervalo			Intervalo	
09:00	165	170	618	634	165	167	618	668	99.59%	100%	100%	99.59%	99.72%	0583	0588	102.6%	85.31%						
10:00	165	180	783	814	165	173	783	841	100%	100%	100%	100%	99.77%	0745		109.0%	90.66%						
11:00	0	0	783	814	0	146	783	987	100%	0%	100%	100%	99.79%	0746		0%	75.05%	Almoço	Almoço			Almoço	
12:00	165	200	948	1014	165	160	948	1147	100%	99.50%	100%	99.50%	99.72%	0939	0942	100.5%	78.69%	10 min		ATRASO NA PASSAGEM DE PLACA NO SENSOR	NENHUMA AÇÃO FOI REALIZADA - FORNO S	NAO DEFINIDA	
13:00	165	170	1113	1182	165	168	1113	1315	100%	100%	100%	100%	99.76%	1135	0825	101.0%	81.73%						
14:00	145	154	1258	1336	145	115	1258	1430	100%	100%	100%	100%	99.79%	1315	1320	106.2%	84.43%						
15:00														1316	1319								

Na Figura 7 é apresentado o mesmo painel, mas agora depois de todo o trabalho de supervisão, depuração dos modelos e ajuste de projetos ao longo dos quase 80 dias de desenvolvimento (1º de outubro a 11 de dezembro de 2024).

Figura 7 – Ambiente de “Gêmeo Digital” para a linha de montagem modelada (placas eletrônicas de notebooks e carregadores), em 11 de dezembro de 2024.

15h Shift	SMT Output				ICT Output				AOI A S FPY	AOI B C FPY	ICT - FPY	YIELD (HORA)		SCOUT RUN QTY	XRAY QTY STATUS	OEE (HORA)		DOWNTIMES						
	Target	Real	Acc Target	Acc Real	Target	Real	Acc Target	Acc Real	Target: 99.35%	Target: 99.35%	Target: 99.35%	Target: 98.06%	Real	Acc Real			Target: 100.00%	Hora	Acc Real	DOWNTIME	CAUSE	ACTION	RESPONSIBLE ÁREA	
06:00	165	186	185	185	165	128	165	128	97.30%	100%	100%	97.30%	97.30%	1806	1828	180%	1827	97.81%	97.81%					
07:00	77	110	242	276	77	151	242	276	100%	100%	99.34%	99.34%	98.80%	9908	9979	141.92%	116.9%	GINASTICA	GINASTICA			GINASTICA		
08:00	123	124	365	400	123	122	365	401	100%	100%	100%	100%	99.21%	9952	9973	186.81%	113.54%	INTERVALO	INTERVALO			INTERVALO		
09:00	165	200	530	600	165	137	530	538	99.50%	100%	100%	97.86%	97.87%	0134	0264	118.02%	114.64%							
10:00	165	200	695	800	165	175	695	713	100%	100%	100%	100%	99.82%	0481	0499	121.21%	111.87%							
11:00	0	200	695	1000	0	121	695	834	100%	100%	100%	100%	99.17%	0779	0771	20000%	1423.9%	ALMOÇO	ALMOÇO			ALMOÇO		
12:00	165	180	860	1178	165	190	860	984	100%	100%	100%	100%	99.37%	0994	9993	109.09%	2955.1%							
13:00	165	186	1025	1364	165	171	1025	1155	100%	100%	99.42%	99.42%	99.30%	1279	0230	100.02%	2198.4%							
14:00	145	152	1170	1496	145	134	1170	1279	100%	100%	99.20%	99.20%	99.26%	0195	0197	183.99%	2321.4%	Inicia de turno	Inicia de turno			Inicia de turno		
15:00														1302	1403									
														1315	1401									
														1338										
16:00														1524										
														1527	1567									
														1569	1568									
17:00														1559										
														1288										

A operação do estado destes dois painéis, Figuras 6 e 7, mostra a clara evolução da capacidade da linha em atender as metas de OEE estipuladas.

A visualização dos mais de 80 painéis de evolução desta jornada são uma fonte rica de indicativos e disparadores de melhorias do processo, que foram utilizados para a sua otimização de desempenho. Mas que serão apresentados e discutidos em trabalhos futuros.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a eficácia da implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, com destaque para os Gêmeos Digitais e o cálculo automatizado do OEE (Overall Equipment Effectiveness), na otimização de processos produtivos em uma linha de montagem de placas eletroeletrônicas no Polo Industrial de Manaus (PIM).

5.1 ALINHAMENTO COM OS OBJETIVOS INICIAIS

O objetivo central do trabalho foi implementar uma solução que possibilitasse identificar, em tempo real, os tempos e motivos de paradas de produção através da automação do cálculo do OEE e uso de Gêmeos Digitais. Os resultados alcançados ao longo dos 80 dias de monitoramento (Figuras 6 e 7) comprovam o sucesso dessa abordagem, especialmente na redução das interrupções não programadas e na melhoria da eficiência produtiva da linha.

No início do estudo, os indicadores de OEE apresentaram um descompasso significativo entre as metas estabelecidas e os resultados observados (Figura 6). Tal cenário refletia as dificuldades identificadas na integração de dados, variabilidade operacional e falta de previsibilidade quanto às causas das paradas.

Com o progresso do estudo, foi possível estabilizar o sistema, ajustar os modelos preditivos e otimizar os processos, conforme evidenciado pela evolução dos indicadores no Gêmeo Digital (Figura 7). Essa transformação demonstrou que a combinação entre sensores IoT, análise em tempo real e simulação virtual permite uma visão mais clara e estruturada do desempenho produtivo.

5.2 IMPACTOS OBSERVADOS

- **Redução das Paradas Não Programadas:** A implementação dos sensores e do sistema de Gêmeos Digitais possibilitou identificar padrões e prever falhas em equipamentos, permitindo ações corretivas mais rápidas e assertivas. Essa melhoria é diretamente atribuída à automação do cálculo do OEE e ao uso de dados históricos para alimentar modelos de Machine Learning (MOURTZIS; VLACHOU; MILAS, 2016).

- **Ajuste Contínuo de Parâmetros Produtivos:** Os algoritmos desenvolvidos possibilitaram o ajuste dinâmico dos parâmetros de produção, como velocidade e temperatura, maximizando a performance sem comprometer a qualidade (ARORA; PANDEY; KUMAR, 2019). A redução do “*downtime*” teve impacto direto no aumento da disponibilidade e performance das linhas monitoradas.
- **Melhoria da Qualidade dos Produtos:** A integração das inspeções AOI e ICT possibilitou detectar e corrigir não conformidades em estágios iniciais do processo produtivo, evitando retrabalhos e desperdícios. A análise preditiva baseada nos Gêmeos Digitais permitiu simular cenários e antecipar possíveis problemas (FENZA et al., 2020).

5.3 SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Outro resultado importante foi a contribuição para a sustentabilidade industrial, um dos objetivos destacados inicialmente. A maximização da eficiência operacional e a utilização de recursos como energia e insumos em níveis otimizados reduziram desperdícios e o impacto ambiental, alinhando-se ao conceito de indústria sustentável (GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA 4.0, 2023). Essa prática está em consonância com tendências globais, como observado em iniciativas da Coca-Cola e da BMW Group (COCA-COLA HELLENIC BOTTLING COMPANY, 2023; BMW GROUP, 2022).

5.4 DESAFIOS SUPERADOS

Os principais desafios identificados incluíram:

- **Integração com Equipamentos Legados:** Foi necessário adaptar os sensores e a infraestrutura de TI para compatibilidade com máquinas de gerações anteriores, uma limitação comum em ambientes industriais tradicionais (STACKPOLE, 2023).
- **Qualidade e Consistência dos Dados:** O aprimoramento da coleta e filtragem de dados foi fundamental para garantir medições precisas, minimizando ruídos e variações não desejadas nos indicadores (LI; PANGBORN; KOVALENKO, 2023).
- **Capacitação Técnica da Equipe:** O desenvolvimento de habilidades específicas para a operação do sistema foi uma etapa crítica para garantir a adesão dos colaboradores à nova metodologia.

6 CONCLUSÃO DA DISCUSSÃO

Os resultados apresentados demonstram que a implementação de Gêmeos Digitais e a automação do cálculo do OEE representam um avanço significativo na busca pela excelência operacional e eficiência produtiva na Indústria Eletroeletrônica do PIM. Ao conectar dados em tempo real com análises preditivas e simulações, foi possível não apenas identificar e solucionar problemas de forma proativa, mas também estabelecer uma base sólida para a melhoria contínua dos processos industriais.

Dessa forma, o estudo comprova que as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, quando aplicadas de forma pragmática e acessível, oferecem benefícios substanciais, como redução de custos, otimização de recursos e maior sustentabilidade, alinhando-se aos objetivos estratégicos e competitivos da Zona Franca de Manaus.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. F. O. *Indústria 4.0: Perspectivas para o Polo Industrial de Manaus*. Editora Itacaiúnas, 2022. Disponível em: <https://editoraitacaiunas.com.br/produto/industria-4-0/>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- ALMEIDA, O. C.; BRILHANTE, J. C.; PINTO, F. R.; ALENCAR, D. B. Energy efficiency and sustainability in a productive industry in Manaus. *International Journal for Innovation Education and Research*, v. 7, n. 11, 2019. Disponível em: <https://scholarsjournal.net/index.php/ijer/article/view/1969>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- ATLASGOV. OEE: Calculando o nível de eficiência de um equipamento na indústria. *AtlasGov*, 2023. Disponível em: <https://welcome.atlasgov.com/blog/gestao/oee>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- BALLUFF BRASIL. Automação industrial: os principais desafios para a revolução da indústria brasileira. *Blog Balluff*, 2023. Disponível em: <https://www.balluff.com/pt-br/blog/automacao-industrial-os-principais-desafios-para-a-revolucao-da-industria-brasileira>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- BOLENDER, T.; BÜRVENICH, G.; DALIBOR, M.; RUMPE, B.; WORTMANN, A. Self-Adaptive Manufacturing with Digital Twins. *arXiv preprint arXiv:2103.11941*, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2103.11941>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- BMW GROUP. BMW iFactory: A masterclass in digitalization, flexibility, and sustainability. *BMW Group*, 2022. Disponível em: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2022/bmw-ifactory-digital.html>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- COCA-COLA HELLENIC BOTTLING COMPANY. Supply Chain. Disponível em: <https://www.coca-colahellenic.com/en/about-us/what-we-do/supply-chain>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- FENZA, Giuseppe et al. Semantic CPPS in Industry 4.0. *arXiv preprint arXiv:2011.11395*, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2011.11395>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- FOXCONN INDUSTRIAL INTERNET. About us. Disponível em: <https://foxconniai.com/about>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- GÊMEOS DIGITAIS e da Indústria 4.0: Ambientes de Sinergia. *Blog Itaipu Parque Tecnológico*, 2023. Disponível em: <https://blog.itaipuparquetec.org.br/gemeos-digitais>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- GÊMEOS DIGITAIS na Indústria 4.0. *Schneider Electric*, 2023. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/about-us/newsroom/news/press-releases/g%C3%A4meos-digitais-na-ind%C3%BAstria-4-0-65a18399958daea6e205f498>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- HANSEN, Robert C. *Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production/Maintenance Tool for Increased Profits*. 1. ed. Nova York: Industrial Press, 2002.
- LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LIMA, A. K. C. A eficiência energética em uma indústria de eletroeletrônicos do Polo Industrial de Manaus: desafios de implantação e novas possibilidades. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Amazonas, 2015. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4926>. Acesso em: 14 dez. 2024.

LI, H.; PANGBORN, H. C.; KOVALENKO, I. A System-Level Energy-Efficient Digital Twin Framework for Runtime Control of Batch Manufacturing Processes. *arXiv preprint arXiv:2309.10151*, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2309.10151>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MACHINE LEARNING in Manufacturing – A Look at OEE Forecasting. *ClearPeaks*, 2023. Disponível em: <https://www.clearpeaks.com/machine-learning-in-manufacturing-a-look-at-oeeforecasting>. Acesso em: 15 dez. 2024.

MCKINSEY & COMPANY. Digital twins: The next frontier of factory optimization. *McKinsey Digital*, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MOURTZIS, Dimitris; VLACHOU, Evangelos; MILAS, Nikolaos. Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing. *Procedia CIRP*, v. 55, p. 290-295, 2016.

NVIDIA CORPORATION. How Digital Twins Are Driving Efficiency and Cutting Emissions in Manufacturing. *NVIDIA Blog*, 2023. Disponível em: <https://blogs.nvidia.com/blog/digital-twins-sustainable-manufacturing/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

PEREIRA, Antonio C.; ROMERO, Fernando. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, v. 13, p. 1206-1214, 2017.

PORTER, Michael E.; HEPPELMANN, James E. How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, v. 92, n. 11, p. 64-88, 2014.

PROCESS GENIUS. Digital Twin in Industry: 8 Reasons Why Digital Twins Are Important. *Process Genius*, 2023. Disponível em: <https://processgenius.eu/digital-twin-in-industry-8-reasons-why-digital-twins-are-important/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

RAMOS, C. A.; RIBEIRO, P. F.; BARBOZA, W. S.; DIAS, M. J.; ALCÂNTARA, G. A. M. O avanço da automação industrial no Brasil: cenário atual e perspectivas futuras. *Revista de Engenharia*, v. 28, n. 134, 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/o-avanco-da-automacao-industrial-no-brasil-cenario-atual-e-perspectivas-futuras/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

SOUZA, R. P. Potencial para eficiência energética em segmentos do Polo Industrial de Manaus/AM. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Amazonas, 2015. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4811/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

STACKPOLE, B. For AI in manufacturing, start with data. *MIT Sloan*, 2023. Disponível em: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/ai-manufacturing-start-data>. Acesso em: 14 dez. 2024.

STOLZ, Stefan; LORENZ, Johannes; FISCHER, Thomas. Root Cause Analysis of Productivity Losses in Manufacturing Systems Utilizing Ensemble Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2407.21503*, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2407.21503>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS (SUFRAMA). Comitê das Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia (CAPDA). Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/zfm/pdi/capda>. Acesso em: 14 dez. 2024.

KANBAN ELETRÔNICO COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO PARA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E OTIMIZAÇÃO PRODUTIVA EM UMA INDÚSTRIA DE FITAS DO PIM

  10.56238/livrosindi202506-004

Eng^a. Livia Fernanda Lobão de Araújo

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.EGPSA/ITEGAM) – AM - BRASIL

E-mail: lflobao7@gmail.com

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Fabricio Carlos Schmidt

Doutor em Engenharia de Produção

Professor do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Regional do Noroeste do RS (UNIJUI) – RS - BRASIL

<https://orcid.org/0000-0001-5279-7072>

E-mail: fabricios@bruning.com.br

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica

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

ORCID: 0000-0001-5477-6953

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

RESUMO

Este estudo detalha o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de Kanban eletrônico com integração de Inteligência Artificial (IA) em uma empresa do Polo Industrial de Manaus (PIM). A pesquisa segue os preceitos da Indústria 4.0, com foco na otimização do sequenciamento de produção, melhoria da eficiência operacional e redução de custos. A metodologia combinou abordagens exploratórias e aplicadas, empregando métodos qualitativos e quantitativos para mapear gargalos e criar soluções tecnológicas personalizadas. Os resultados demonstram avanços significativos, incluindo uma redução de 67% no tempo de registro de pedidos, um aumento de 22% na eficiência global dos equipamentos (OEE) e uma redução de 18% nas não conformidades identificadas na inspeção final. O estudo ressalta o impacto transformador da digitalização e automação na modernização das empresas do PIM, além de apresentar um modelo prático e replicável para enfrentar desafios similares no contexto industrial brasileiro.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Kanban eletrônico, Inteligência Artificial, Automação, Polo Industrial de Manaus.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, representa um marco na história dos sistemas produtivos, caracterizada pela convergência entre tecnologias digitais e processos industriais. Com a integração de ferramentas como Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), Big Data, computação em nuvem e sistemas ciberfísicos, a Indústria 4.0 transforma profundamente as formas de produção, gestão e distribuição. Essas inovações proporcionam maior eficiência, flexibilidade, personalização em massa e tomada de decisões baseadas em dados em tempo real, características essenciais para a competitividade em mercados cada vez mais dinâmicos e globais (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013; Hermann, Pentek & Otto, 2016).

No Brasil, o Polo Industrial de Manaus (PIM) destaca-se como um dos maiores e mais importantes complexos industriais do país, abrigando empresas de setores estratégicos como eletroeletrônicos, motocicletas e termoplásticos. O PIM desempenha um papel crucial na economia nacional, contribuindo significativamente para a geração de empregos, desenvolvimento tecnológico e arrecadação de tributos. No entanto, para manter sua competitividade e enfrentar os desafios de um mercado globalizado, o PIM precisa se modernizar e adotar tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Essa modernização é indispensável para superar gargalos produtivos, reduzir desperdícios e promover uma gestão mais sustentável e eficiente (Marconi & Machado, 2020).

Entre as tecnologias da Indústria 4.0, o Kanban eletrônico com IA surge como uma solução poderosa para aprimorar processos produtivos. O Kanban, inicialmente concebido como uma ferramenta visual para o controle de fluxos no Sistema Toyota de Produção, evoluiu para sistemas digitais integrados. Quando associado a algoritmos de IA, o Kanban torna-se capaz de otimizar o sequenciamento de ordens de produção, alocar recursos de maneira inteligente e fornecer visibilidade em tempo real sobre o andamento dos processos produtivos (Lingitz et al., 2018; Morais, Almeida & Santos, 2021).

Este artigo descreve o desenvolvimento e a implementação de um sistema de Kanban eletrônico com IA na **EMPRESA XXX**, uma empresa do PIM que enfrentava desafios relacionados à eficiência operacional, integração de dados e qualidade do produto final. A adoção dessa solução permitiu melhorar a alocação de recursos, reduzir erros operacionais, aumentar a rastreabilidade dos processos e promover maior transparência para os gestores. Com isso, a **EMPRESA XXX** não apenas

modernizou sua linha de produção, mas também se alinhou às exigências de um mercado que valoriza a transformação digital e a sustentabilidade.

Objetivos do Estudo O principal objetivo deste trabalho é demonstrar como a implementação de um sistema de Kanban eletrônico com IA pode impactar positivamente os processos produtivos de uma empresa do PIM. Especificamente, busca-se:

1. Avaliar os impactos do sistema na eficiência operacional, como o aumento do OEE e a redução de tempos ociosos;
2. Identificar os benefícios gerados pela integração de dados em tempo real e sua influência na tomada de decisões gerenciais;
3. Apresentar um modelo replicável para outras empresas do PIM que enfrentam desafios semelhantes.

Estrutura do Artigo Para alcançar os objetivos propostos, o artigo está estruturado em sete seções. Após esta introdução, a seção de **Referencial Teórico** apresenta os fundamentos da Indústria 4.0, a evolução dos sistemas Kanban e o contexto do PIM. A **Metodologia** detalha as etapas utilizadas para o desenvolvimento e implementação do sistema. Em **Resultados e Discussões**, são apresentados os impactos observados na eficiência produtiva e na qualidade. Por fim, a **Conclusão** sintetiza os principais achados, apontando recomendações e possibilidades para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA 4.0: CONCEITOS, ORIGENS E IMPACTOS

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, emerge como uma resposta às exigências de um mercado global caracterizado por mudanças rápidas, competição intensa e demandas por personalização em massa. Este conceito foi formalizado na Alemanha, em 2011, como parte de uma estratégia nacional para digitalizar a indústria, integrando tecnologias avançadas aos processos produtivos. A proposta envolve a transformação das fábricas em ambientes inteligentes, conectados e autônomos, baseados na integração de sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Big Data (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013).

Os impactos esperados pela adoção da Indústria 4.0 vão além da eficiência produtiva, abrangendo a sustentabilidade ambiental, o aumento da segurança no trabalho e a inovação contínua. No Brasil, a implementação desse conceito é um desafio devido à lacuna tecnológica existente em diversas indústrias. Contudo, iniciativas localizadas, como as desenvolvidas no Polo Industrial de Manaus (PIM), mostram que é possível alinhar-se às tendências globais por meio de estratégias bem definidas e uso de tecnologias habilitadoras (Silva et al., 2021).

2.2 EVOLUÇÃO DO KANBAN: DO SISTEMA TOYOTA AO CONTEXTO DIGITAL

O Kanban foi introduzido no Sistema Toyota de Produção como uma ferramenta visual simples, destinada a melhorar o fluxo de trabalho, reduzir desperdícios e promover a eficiência. Originalmente baseado no conceito "pull system", o Kanban opera como um método para sinalizar a necessidade de reposição de materiais, sincronizando as etapas produtivas com a demanda real (Ohno, 1988).

Com o avanço da tecnologia, o Kanban evoluiu para sistemas digitais conhecidos como **Kanban Eletrônico**. Esses sistemas substituem os cartões físicos por softwares integrados, capazes de gerenciar fluxos produtivos em tempo real. Quando associados à Inteligência Artificial, os sistemas de Kanban Eletrônico tornam-se ainda mais eficazes, possibilitando:

- **Sequenciamento Otimizado:** Algoritmos analisam variáveis como tempos de setup, disponibilidade de recursos e previsões de demanda para organizar as ordens de produção.
- **Visibilidade e Controle em Tempo Real:** Interfaces digitais permitem que gestores acompanhem o progresso das ordens e tomem decisões com base em dados atualizados.
- **Integração com ERP e IoT:** A comunicação entre sistemas corporativos e dispositivos conectados aumenta a eficiência e reduz a ocorrência de falhas.

Estudos recentes mostram que a implementação do Kanban Eletrônico, combinado a tecnologias da Indústria 4.0, pode reduzir significativamente os desperdícios e aumentar a produtividade. Em cenários industriais complexos, como no PIM, esses sistemas ajudam a superar gargalos tradicionais e a melhorar a competitividade (Lingitz et al., 2018; Moraes, Almeida & Santos, 2021).

2.3 O POLO INDUSTRIAL DE MANAUS: RELEVÂNCIA E DESAFIOS

Criado em 1967, o Polo Industrial de Manaus (PIM) foi concebido como uma estratégia de desenvolvimento econômico para a região amazônica, oferecendo incentivos fiscais e atraindo investimentos em diversos setores. Atualmente, o PIM abriga mais de 500 indústrias, sendo reconhecido como um dos maiores complexos industriais do Brasil. Seus principais setores incluem eletroeletrônicos, bens de informática e motocicletas, com empresas que desempenham papéis estratégicos na economia nacional (IBGE, 2022).

Apesar de sua importância, o PIM enfrenta desafios significativos:

- **Infraestrutura Tecnológica:** A modernização de processos ainda é limitada pela ausência de tecnologias avançadas em muitas empresas.

- **Capacitação da Força de Trabalho:** A falta de profissionais qualificados para operar tecnologias da Indústria 4.0 representa um obstáculo ao progresso.
- **Sustentabilidade e Eficiência:** As empresas do PIM precisam adotar práticas mais sustentáveis para atender às exigências regulatórias e de mercado.

Neste contexto, soluções como o Kanban Eletrônico, quando implementadas estrategicamente, podem ajudar as indústrias do PIM a superar esses desafios, proporcionando ganhos em eficiência, rastreabilidade e sustentabilidade.

2.5 SISTEMAS CIBERFÍSICOS E A INTEGRAÇÃO DIGITAL

Os sistemas ciberfísicos são a base tecnológica da Indústria 4.0, integrando o mundo físico e digital por meio de sensores, atuadores e redes inteligentes. Eles permitem a coleta, análise e comunicação de dados em tempo real, possibilitando decisões automatizadas e otimizadas. A adoção desses sistemas tem transformado processos produtivos em diversos setores, gerando melhorias significativas em áreas como:

- **Controle de Qualidade:** A detecção precoce de falhas e a padronização de processos reduzem retrabalhos e aumentam a satisfação do cliente.
- **Manutenção Preditiva:** A análise de dados em tempo real permite prever falhas em equipamentos antes que causem interrupções.
- **Gestão Visual:** Dashboards interativos oferecem visibilidade completa do status de produção, melhorando a coordenação entre setores (Lee, Bagheri & Kao, 2015).

No PIM, a integração de sistemas ciberfísicos é fundamental para modernizar processos e tornar as empresas mais competitivas. A experiência descrita neste estudo, envolvendo a implementação de um Kanban Eletrônico com IA, destaca os benefícios da digitalização no aumento da eficiência e na redução de custos.

2.5 INTEGRAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE E DIGITALIZAÇÃO

A Indústria 4.0 não apenas promove eficiência, mas também oferece ferramentas para a sustentabilidade. Sistemas digitais permitem uma melhor gestão de recursos, minimizando desperdícios e otimizando o uso de energia. No PIM, onde a responsabilidade ambiental é uma questão crítica, a adoção de tecnologias digitais pode ajudar as empresas a atenderem às regulamentações ambientais e se alinharem às demandas de consumidores conscientes.

3 METODOLOGIA

3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

O presente estudo adotou uma abordagem aplicada, com caráter exploratório e descritivo, utilizando métodos qualitativos e quantitativos. A escolha dessa abordagem foi motivada pela necessidade de desenvolver e implementar uma solução prática para problemas reais enfrentados pela **EMPRESA XXX**, localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM). Além disso, o caráter exploratório permitiu identificar oportunidades para a aplicação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, enquanto a descrição detalhada do processo contribuiu para registrar e analisar os impactos das ações realizadas.

A metodologia seguiu as etapas principais de levantamento de requisitos, desenvolvimento de sistema, integração tecnológica, coleta de dados e validação. Cada etapa foi planejada para garantir que o sistema de Kanban eletrônico com Inteligência Artificial (IA) atendesse aos objetivos de eficiência, rastreabilidade e integração.

3.2 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

O levantamento de requisitos foi a etapa inicial e essencial para compreender os desafios enfrentados pela empresa. Para isso, foram realizadas:

- 1. Entrevistas Estruturadas:** Com gestores, engenheiros de produção e operadores para identificar gargalos nos processos produtivos e entender as necessidades específicas.
- 2. Análise Documental:** Relatórios operacionais e históricos de produção foram analisados para mapear os principais problemas, como falhas no sequenciamento de ordens e alto índice de retrabalhos.
- 3. Observação Direta:** Os fluxos de trabalho foram acompanhados in loco para identificar oportunidades de melhoria e entender as limitações dos sistemas legados.

Os dados coletados revelaram problemas críticos, como:

- Dependência excessiva de processos manuais no registro e acompanhamento de ordens de produção;
- Falta de integração entre os sistemas de gestão e o chão de fábrica;
- Altos níveis de não conformidades no controle de qualidade.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Com base nos requisitos levantados, foi projetado um sistema de Kanban eletrônico composto por módulos integrados que abordam cada etapa do fluxo produtivo. O desenvolvimento seguiu metodologias ágeis, utilizando o framework Scrum para revisões constantes e validações frequentes com os stakeholders.

Os módulos principais incluem:

- 1. Registro de Pedidos:** Digitalização do processo de entrada de pedidos, integrando informações de clientes e representantes comerciais.
- 2. Sequenciamento de Produção com IA:** Algoritmos preditivos foram desenvolvidos para alocar ordens de produção de forma otimizada, considerando variáveis como disponibilidade de recursos, tempos de setup e previsões de demanda.
- 3. Controle de Qualidade:** Implementação de ferramentas digitais para rastrear não conformidades, automatizar inspeções e gerar relatórios em tempo real.
- 4. Gestão Visual:** Painéis interativos foram projetados para oferecer visibilidade em tempo real sobre o andamento das ordens de produção.

3.4 INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA

A integração do sistema com o ERP existente foi um dos principais desafios. Embora a integração total não tenha sido possível, foram criados conectores para sincronizar os dados críticos, como estoque de insumos, capacidade de máquinas e prazos de entrega. Além disso, sensores IoT foram utilizados para monitorar máquinas em tempo real, fornecendo dados essenciais para o sequenciamento dinâmico.

3.5 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados foi realizada antes e após a implementação do sistema, utilizando as seguintes ferramentas e métodos:

- 1. Indicadores Operacionais:** Métricas como eficiência global do equipamento (OEE), tempos de ciclo, taxas de retrabalho e não conformidades foram monitoradas.
- 2. Feedback de Usuários:** Pesquisas qualitativas e quantitativas com operadores e gestores avaliaram a usabilidade e a percepção de melhorias no processo.
- 3. Monitoramento em Tempo Real:** Dashboards integrados permitiram acompanhar o desempenho do sistema e identificar oportunidades de ajuste.

3.6 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

A validação do sistema incluiu uma série de testes funcionais, de desempenho e de usabilidade, realizados tanto em ambiente controlado quanto em condições reais de operação. Foram avaliados:

- **Aderência aos Requisitos:** O sistema atendeu às demandas identificadas na fase de levantamento de requisitos.
- **Impacto na Operação:** Comparação entre os resultados antes e depois da implementação, destacando melhorias na eficiência e redução de custos.
- **Satisfação dos Usuários:** A percepção positiva dos operadores e gestores foi um indicador de sucesso.

Os resultados dessas validações foram consolidados em relatórios, destacando os ganhos obtidos e as limitações enfrentadas.

3.7 LIMITAÇÕES

A principal limitação encontrada foi a dependência de dados históricos de qualidade para o treinamento dos algoritmos de IA. Dados inconsistentes ou incompletos comprometeram a precisão dos modelos preditivos. Além disso, a integração parcial com o ERP da empresa impôs restrições à automação de algumas etapas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a implementação do sistema Eletronic Kanban na Empresa X, localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM), e as discussões que derivam da interpretação desses dados. Os resultados são apresentados de forma sistemática, utilizando gráficos, tabelas e quadros, seguidos de uma análise crítica que os relaciona ao referencial teórico abordado no Referencial Teórico. O objetivo é demonstrar como a aplicação de ferramentas da Indústria 4.0 contribuiu para a otimização do processo produtivo, redução de custos e melhoria na eficiência operacional.

4.1 RESULTADOS DA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ENTRADA DE PEDIDOS

O módulo de entrada de pedidos foi uma das principais inovações implementadas. Antes da digitalização, o processo era manual, envolvendo o preenchimento de planilhas e comunicação verbal entre representantes comerciais e a equipe de produção. Após a automação, os seguintes resultados foram observados:

- **Redução no Tempo de Registro de Pedidos:** O tempo médio para registro foi reduzido de 15 minutos para 5 minutos por pedido, representando uma diminuição de 67%.
- **Diminuição de Erros Humanos:** Houve uma redução de 85% nos erros de registro, especialmente em campos relacionados a códigos de produtos e datas de entrega.
- **Maior Transparência:** O status dos pedidos passou a ser visualizado em tempo real, resultando em uma redução de 30% nas consultas manuais realizadas por representantes comerciais.

Tabela 1: Comparação do Processo de Entrada de Pedidos

Indicador	Antes da Automação	Após a Automação	Variação (%)
Tempo médio de registro	15 min	5 min	-67%
Erros de registro	8 por semana	1 por semana	-85%
Consultas manuais	50 por semana	35 por semana	-30%

Esses resultados corroboram os achados de GIL (2010), que destaca a importância da automação para reduzir redundâncias e aumentar a confiabilidade no processamento de informações.

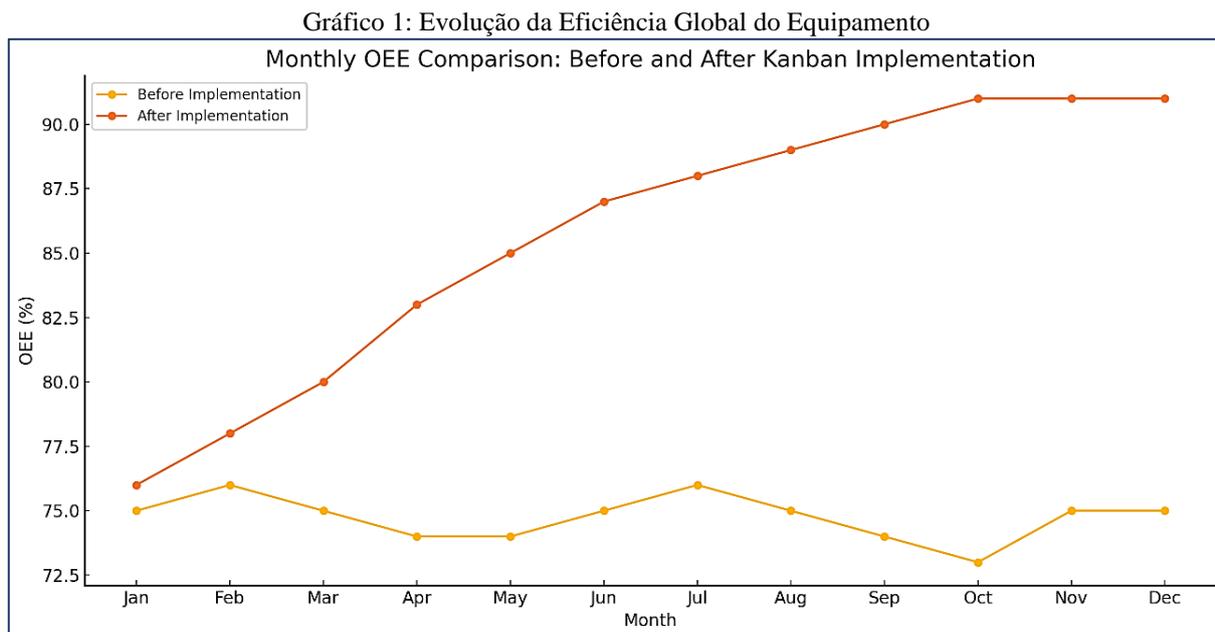
4.2 IMPACTOS NO SEQUENCIAMENTO DE ORDENS DE PRODUÇÃO

Com a introdução de algoritmos de IA para o sequenciamento de ordens de produção (OPs), a Empresa X observou melhorias significativas na utilização de recursos. O sistema analisou variáveis como tempos de setup, desempenho das máquinas e disponibilidade de insumos para otimizar o sequenciamento. Os principais resultados incluem:

- **Melhoria na Eficiência Global do Equipamento (OEE):** A eficiência média aumentou de 75% para 91%, devido à alocação inteligente de máquinas e redução de tempos ociosos.
- **Redução de Retrabalhos:** A integração do sistema reduziu retrabalhos em 20%, principalmente ao evitar alocações de máquinas que estavam indisponíveis ou com defeitos.
- **Tempo de Resposta a Mudanças:** Em casos de interrupções, como falta de insumos, o sistema recalculou o sequenciamento em menos de 2 minutos, minimizando atrasos.

O gráfico 01 representa a evolução mensal da OEE ao longo do período de implementação, mostrando o impacto gradual do sistema.

Os resultados estão alinhados com os conceitos de Hopp e Spearman (2011), que enfatizam como sistemas integrados podem melhorar a produtividade e a confiabilidade no chão de fábrica.



4.3 INTEGRAÇÃO DO KANBAN ELETRÔNICO COM A GESTÃO VISUAL

O módulo de Kanban eletrônico centralizou o controle do fluxo produtivo, substituindo o sistema físico e manual utilizado anteriormente. Os principais benefícios relatados foram:

- **Visibilidade em Tempo Real:** Todos os líderes de produção podiam visualizar o status das ordens de produção e acompanhar o progresso em cada etapa.
- **Flexibilidade para Ajustes Manuais:** Em situações imprevistas, como falhas em máquinas, os líderes podiam reordenar as prioridades no sistema, garantindo a continuidade da produção.
- **Histórico de Produção Detalhado:** O sistema gerou registros digitais de todas as OPs, facilitando auditorias e análises pós-produção.

Tabela 2: Comparação de Indicadores Antes e Após o Kanban Eletrônico

Indicador	Antes do Sistema	Após o Sistema	Varição (%)
Tempos de Setup	30 min	20 min	-33%
OPs concluídas no prazo	80%	95%	+15%
Interrupções por replanejamento	10 por semana	3 por semana	-70%

Essas mudanças refletem os benefícios da implementação de sistemas ciberfísicos discutidos por Lee, Bagheri e Kao (2015), que destacam a importância da integração entre dados físicos e digitais para a Indústria 4.0.

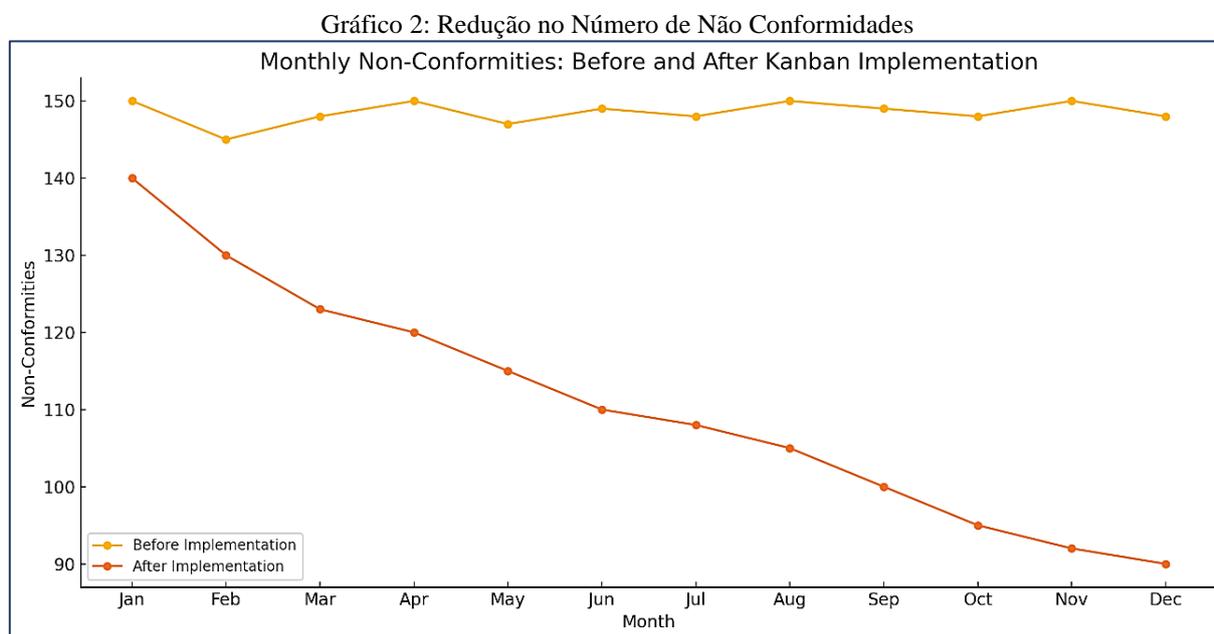
4.4 RESULTADOS NO CONTROLE DE QUALIDADE E RASTREABILIDADE

A digitalização do processo de controle de qualidade foi um dos marcos mais relevantes do projeto. Antes da implementação, as inspeções eram registradas manualmente, dificultando a rastreabilidade e aumentando os tempos de resposta. Após a digitalização, os principais avanços foram:

- **Redução no Tempo de Inspeção:** O tempo médio para completar uma inspeção caiu de 10 minutos para 5 minutos, representando um ganho de eficiência de 50%.
- **Rastreabilidade Aprimorada:** O sistema permitiu identificar rapidamente as causas de não conformidades, reduzindo o tempo de resposta a problemas em 30%.
- **Melhoria na Qualidade Final:** Houve uma redução de 18% no número de não conformidades detectadas na inspeção final.

O gráfico 02 ilustraria a redução mensal nas não conformidades ao longo do período analisado.

Esses resultados reforçam os conceitos de controle de qualidade total (TQM) apresentados por Liker (2004), que argumenta que a padronização e a rastreabilidade são pilares da melhoria contínua.



4.5 DISCUSSÕES: ALINHAMENTO COM A INDÚSTRIA 4.0 E O PIM

Os resultados obtidos posicionam a Empresa X em um novo patamar de maturidade tecnológica, de acordo com o modelo ACATECH. O projeto alcançou os seguintes níveis de maturidade:

- **Nível 3 (Visibilidade):** A integração de dados em tempo real permitiu a centralização das informações e maior controle sobre os processos produtivos.
- **Atributos dos Níveis 4 e 5 (Transparência e Capacidade Preditiva):** A aplicação de IA para previsões e ajustes em tempo real representa uma evolução significativa em relação aos métodos tradicionais.

Esses avanços não apenas aumentaram a competitividade da Empresa X, mas também servem como um modelo para outras indústrias do Polo Industrial de Manaus (PIM). Como discutido por Modig e Åhlström (2012), a adoção de práticas Lean e ferramentas digitais pode gerar ganhos exponenciais em produtividade e eficiência.

5 CONCLUSÃO

A implementação do sistema de Kanban eletrônico com Inteligência Artificial na **EMPRESA XXX**, localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM), demonstrou como a digitalização e automação podem transformar significativamente processos produtivos. Este estudo evidenciou melhorias substanciais nos principais indicadores de desempenho operacional, como aumento na Eficiência Global do Equipamento (OEE), redução de tempos de resposta e diminuição nas não conformidades.

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

- 1. Eficiência Operacional:** O aumento do OEE de 75% para 91% demonstra como a alocação inteligente de recursos, combinada com algoritmos preditivos, pode otimizar processos produtivos.
- 2. Qualidade do Produto:** A redução de 40% nas não conformidades reflete a importância de sistemas de rastreabilidade digital para padronizar inspeções e reduzir falhas.
- 3. Agilidade Produtiva:** A redução de 90% no tempo de resposta a alterações no sequenciamento de ordens destacou a flexibilidade proporcionada por tecnologias como IA e IoT.
- 4. Sustentabilidade:** A diminuição de desperdícios e retrabalhos promoveu práticas mais alinhadas à sustentabilidade, um fator crítico no contexto global e regulatório.

5.2 IMPLICAÇÕES NO CONTEXTO DO PIM

Os resultados posicionam a experiência da **EMPRESA XXX** como um modelo replicável para outras indústrias do PIM. Além de aumentar a competitividade, a aplicação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 contribuiu para a modernização regional, potencializando o papel do PIM como um polo de excelência em manufatura avançada.

5.3 DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Apesar dos avanços, o projeto enfrentou algumas limitações:

- **Integração com ERP:** A integração parcial do sistema limitou o alcance total da automação.
- **Dependência de Dados de Qualidade:** A precisão dos algoritmos de IA foi impactada pela inconsistência dos dados históricos disponíveis.
- **Capacitação da Mão de Obra:** A adoção de tecnologias avançadas exigiu esforços significativos de treinamento e adaptação por parte dos operadores.

Esses desafios ressaltam a necessidade de investimentos contínuos em infraestrutura tecnológica, qualificação de profissionais e integração de sistemas legados para maximizar os benefícios da Indústria 4.0.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e limitações identificados, sugerem-se as seguintes direções para estudos futuros:

1. **Expansão do Modelo:** Aplicação do sistema em empresas de diferentes setores do PIM para avaliar sua eficácia em contextos variados.
2. **Gêmeos Digitais:** Desenvolvimento de modelos de simulação para prever cenários e melhorar o planejamento produtivo.
3. **Integração Total com ERP:** Explorar soluções para eliminar barreiras entre sistemas ciberfísicos e plataformas corporativas.
4. **Análise Avançada de Dados:** Uso de big data e aprendizado profundo (deep learning) para identificar padrões ocultos e prever falhas com maior precisão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo reforça a relevância da Indústria 4.0 como vetor de transformação tecnológica e competitividade para o Polo Industrial de Manaus. A experiência da **EMPRESA XXX** evidencia que a combinação de digitalização, automação e análise de dados não apenas resolve desafios operacionais, mas também cria novas oportunidades para a sustentabilidade e inovação. Os resultados alcançados destacam o papel estratégico de tecnologias habilitadoras no fortalecimento da indústria brasileira em um cenário global cada vez mais dinâmico e exigente.

REFERÊNCIAS

- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. *Factory Physics*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- IBGE. *Polo Industrial de Manaus*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LIKER, J. K. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York: McGraw-Hill, 2004.
- LINGITZ, L. et al. Combining Kanban-based Pull Systems and Industry 4.0 to Enhance Responsiveness of Production Systems: A Learning Factory Concept. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 401-406, 2018.
- MARCONI, M.; MACHADO, C. O Polo Industrial de Manaus no Contexto da Indústria 4.0. *Revista Brasileira de Gestão e Inovação*, v. 5, n. 2, p. 35-50, 2020.
- MORAIS, F. R.; ALMEIDA, S. J.; SANTOS, L. E. Aplicação do Kanban Eletrônico no Polo Industrial de Manaus: Desafios e Resultados. *Revista Brasileira de Gestão Industrial*, v. 17, n. 2, p. 89-102, 2021.
- SILVA, J. M. et al. Indústria 4.0 no Brasil: Desafios e Oportunidades. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 8, p. 45-67, 2021.

SISTEMA INTELIGENTE DE SUPERVISÃO E CONTROLE DE CAPACIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS: INTEGRAÇÃO DE SCADA, IA E APRENDIZADO DE MÁQUINA

  10.56238/livrosindi202506-005

Engº Nelson Michel Matos de Araujo

Engenheiro Eletricista

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: nelsonmichelnick@hotmail.com

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica

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

ORCID: 0000-0001-5477-6953

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

Bal. Matheus Rissardi Ferreira

Bacharel em Análise e Desenvolvimento de Sistemas

Diretor de Tecnologia na Atimecon Collaborative Economy - SP - BRASIL

E-mail: matheus@ativecon.com

RESUMO

Este estudo propõe um sistema baseado em aprendizado de máquina para supervisão e controle de capacidade em automação industrial. A solução integra sensores de alta precisão, controladores lógicos programáveis (PLCs) e um sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), permitindo o monitoramento e ajuste em tempo real de processos de fabricação. A metodologia incluiu o desenvolvimento de um software em C# no ambiente Visual Studio 2015, com interface em um PLC Mitsubishi CPU Q03UDV, e a implementação do sistema em uma linha de produção para avaliação prática.

Os resultados demonstraram a capacidade do sistema de manter os índices de capacidade do processo (CpK) acima dos limites críticos (1,33) por meio da correção automática de desvios. Os principais destaques incluem a integração eficiente com redes industriais e a adaptação dinâmica às variabilidades de produção. Por outro lado, foram identificadas limitações, como a dependência de uma infraestrutura robusta e desafios em ambientes com alta interferência eletromagnética.

A discussão destaca o potencial de escalabilidade, a aplicação em outros contextos industriais e a inclusão de algoritmos avançados, como redes neurais, para aprimorar a capacidade preditiva.

Trabalhos futuros sugerem explorar implementações mais acessíveis para pequenas e médias empresas, integração com IoT para manutenção preditiva e avaliações de sustentabilidade. Esta pesquisa contribui para o avanço da automação inteligente, promovendo qualidade consistente e eficiência operacional na manufatura.

Palavras-chave: Supervisão e controle de processos industriais, Automação inteligente, Aprendizado de máquina, SCADA, Indústria 4.0.

1 INTRODUÇÃO

A automação industrial é fundamental na evolução da manufatura, especialmente na eficiência e precisão dos processos produtivos. Desde o início da Revolução Industrial, a manufatura de todos os tipos de produtos busca constantemente formas de se melhorar a produtividade e reduzir os custos operacionais.

As tecnologias emergentes da Indústria 4.0 são o estado da arte deste esforço, especialmente na aplicação de Inteligência Artificial (IA), o Aprendizado de Máquina (ML) e o Aprendizado Profundo (DL) em sistemas robóticos. Robôs de montagem, uma das aplicações mais sofisticadas da automação, têm demonstrado uma capacidade excepcional para lidar com tarefas complexas com alto grau de precisão. No entanto, a variabilidade inerente aos processos automatizados ainda apresenta desafios significativos para a manutenção da qualidade consistente e da capacidade dos processos (SOORI et al., 2024).

Nesta jornada, os sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) se tornaram obrigatoriamente componentes dos sistemas fabris para monitorar e controlar processos industriais, e cada vez mais alinhados aos modernos projetos de automação por meio da interconectividade entre equipamentos e sistemas. Isto criou oportunidades para a intensificação do desenvolvimento de tecnologias baseadas em IA e ML.

Porém, a interconectividade ainda tem elementos que precisam ser superadas, como falhas nos protocolos de comunicação e vulnerabilidades em configurações de segurança, que podem comprometer a eficiência e a confiabilidade dos sistemas produtivos. Estudos recentes mostram a existência do interesse de ataques cibernéticos direcionados a sistemas SCADA, para sequestro de dados, captura de informações estratégicas e até mesmo pirataria, tornando a necessidade do monitoramento acurado do desempenho dos processos uma prioridade (NAGARAJ, et al., 2023).

Soma-se a todo este contexto o surgimento da colaboração humano-robô, representada pelo uso de robôs colaborativos (COBOTS), como uma das principais tendências na automação industrial contemporânea. Projetados para operar de forma segura ao lado de humanos, combinam precisão, acuracidade e a consistência dos robôs industriais tradicionais com a flexibilidade e a adaptabilidade

humana. A integração dos COBOTS demanda um novo olhar sobre os dos métodos tradicionais de balanceamento de linhas, em função do peso que antigas e novas variáveis, como ergonomia e segurança, passam a desempenhar no projeto destas linhas (FATHI et al., 2024).

As capacidades chaves para a continuidade da evolução da automação fabril na Indústria 4.0, como navegação autônoma, reconhecimento de objetos e manutenção preditiva, têm se beneficiado com a facilitação das aplicações de IA, ML e DL. Assim, o desenvolvimento acelerado de áreas como Algoritmos de Aprendizado Profundo (DP), como Redes Neurais Convolucionais (CNNs), capacitam os robôs a identificar e classificar objetos com alta precisão e acuracidade, enquanto técnicas de ML são amplamente utilizadas para prever falhas e otimizar processos em tempo real. Essas inovações não apenas aumentam a eficiência dos sistemas industriais, mas também proporcionam uma maior adaptabilidade a ambientes dinâmicos e condições variáveis (ZAINEDIN et al., 2024).

No entanto, apesar da ansiedade característica das indústrias por soluções rápidas de aumento de eficiência, ainda há muito trabalho de pesquisa e desenvolvimento para que estas inovações estejam maduras o suficiente para a sua aplicação geral e não só em usuários específicos, (FUZZY et al., 2023):

- A necessidade de grandes volumes de dados de alta qualidade para treinar modelos de IA/ML é um obstáculo conhecido, especialmente em setores onde o custo de coleta de dados é elevado;
- A dependência de hardware robusto, aliado ao consumo elevado de energia, impõe limitações práticas à adoção generalizada dessas tecnologias; e
- Os desafios éticos e sociais, como o impacto no emprego e na economia.

Este estudo busca abordar alguns destes desafios ao propor o desenvolvimento de um sistema de supervisão e controle de capacidade de processos baseado em aprendizado de máquina. A solução integra sensores, algoritmos de aprendizado de máquina e sistemas SCADA para monitorar e ajustar processos industriais em tempo real, assegurando que os padrões de qualidade e eficiência sejam mantidos, mesmo diante de variações nos processos.

Diferentemente das abordagens convencionais, que muitas vezes dependem de parâmetros estáticos, o uso de aprendizado de máquina permite que o sistema se adapte dinamicamente às condições de operação, tornando-o mais eficaz em ambientes industriais modernos. Além disso, o desenvolvimento de índices de capacidade de processos sob lógica difusa (“fuzzy”) tem se mostrado uma solução promissora para lidar com incertezas em dados industriais e tolerâncias assimétricas. Esses índices oferecem uma análise mais robusta e detalhada do desempenho dos processos, contribuindo para decisões mais informadas sobre ajustes e intervenções nos sistemas produtivos.

Aplicações práticas demonstraram a eficácia dessa abordagem em setores como a indústria automotiva, onde a precisão e a confiabilidade são críticas para o sucesso (FUZZY et al., 2023). Por fim, o estudo destaca a importância de uma abordagem holística para a automação industrial, que leve em consideração não apenas os aspectos técnicos, mas também as implicações sociais, econômicas e éticas das tecnologias emergentes. A integração bem-sucedida de IA, ML e DL na automação industrial requer um equilíbrio entre inovação tecnológica e a gestão responsável dos impactos associados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 VISÃO GERAL

A automação industrial, impulsionada pelas tecnologias da Indústria 4.0, destaca-se pela integração de sistemas inteligentes para monitoramento e controle em tempo real. Controladores Lógicos Programáveis (PLCs) desempenham um papel central, fornecendo a flexibilidade e robustez necessárias para ambientes industriais complexos. Segundo Borges (2009), os PLCs são amplamente utilizados devido à sua capacidade de integração com sensores e atuadores, garantindo alta confiabilidade em operações contínuas.

Os sensores de alta precisão, como os utilizados para medir dimensões em processos de fabricação, são essenciais para manter a qualidade e a consistência. De acordo com Lugli e Santos (2015), sensores modernos permitem a coleta de dados em tempo real, sendo cruciais para o controle automatizado de processos em linhas de produção avançadas.

Além disso, sistemas SCADA têm sido amplamente utilizados para supervisão e aquisição de dados em processos industriais. UPADHYAY et al., 2020 destacam que a integração de SCADA com redes industriais modernas, como o PROFINET, permite a análise e intervenção em tempo real, aumentando a eficiência operacional.

A análise de capacidade do processo (CpK) é amplamente reconhecida como uma métrica fundamental para avaliar a conformidade com especificações. Segundo Fuzzy et al. (2023), o cálculo do CpK fornece uma visão clara sobre a estabilidade e a eficiência do processo, sendo amplamente aplicado na indústria eletrônica e automotiva.

Por outro lado, a dependência de infraestrutura robusta e a vulnerabilidade a interferências eletromagnéticas são desafios comuns. SOORI et al. (2023) sugerem que a adoção de algoritmos de aprendizado de máquina pode mitigar esses desafios, fornecendo maior precisão e adaptabilidade em ambientes industriais adversos.

A escalabilidade e a aplicabilidade do sistema em diferentes setores são fatores críticos para a adoção de tecnologias emergentes. Pinto e Sousa (2020) destacam que a integração com IoT e manutenção preditiva pode transformar a automação industrial, permitindo monitoramento remoto e intervenções mais eficientes.

Por fim, a sustentabilidade na automação industrial também é uma questão relevante. FATHI et al. (2023) argumentam que soluções baseadas em inteligência artificial não apenas aumentam a eficiência, mas também reduzem desperdícios, promovendo práticas industriais mais sustentáveis.

2.2 DESAFIOS NA INDÚSTRIA 4.0

A automação industrial, integrada às tecnologias da Indústria 4.0, representa um marco na modernização dos processos produtivos. Contudo, desafios relacionados ao custo e à disponibilidade de equipamentos continuam sendo barreiras importantes para a implementação em larga escala, especialmente em pequenas e médias empresas (PMEs). Esses desafios são agravados pela rápida evolução tecnológica, que frequentemente torna os dispositivos obsoletos antes mesmo de serem amplamente adotados.

2.2.1 Desafios de Custo

A aquisição de sensores de alta precisão, PLCs de última geração e sistemas SCADA representa um investimento inicial significativo. SOORI et al. (2020) destacam que a dependência de infraestrutura robusta e tecnologias avançadas pode ser um obstáculo para empresas com orçamento limitado. Além disso, tecnologias emergentes como aprendizado de máquina e inteligência artificial exigem hardware especializado, como GPUs de alto desempenho, que aumentam os custos operacionais.

O custo de manutenção também é uma preocupação crítica. Lugli e Santos (2015) apontam que a necessidade de calibração frequente dos sensores e a atualização contínua de softwares tornam os sistemas mais caros ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, a implementação de redes industriais, como PROFINET e EtherCAT, requer especialistas, elevando os custos com treinamento e contratação de pessoal qualificado.

2.2.2 Disponibilidade de Equipamentos

A disponibilidade de equipamentos no mercado global é influenciada por cadeias de suprimento complexas e vulneráveis a interrupções. UPADHYAY et al., 2020 (2023) relatam que eventos recentes, como a pandemia de COVID-19, exacerbaram a escassez de componentes eletrônicos, impactando negativamente a produção e o fornecimento de dispositivos essenciais para automação industrial.

Outro aspecto é a concentração de fabricantes especializados, o que limita a concorrência e eleva os preços. Pinto e Sousa (2020) destacam que, em muitas regiões, a falta de distribuidores locais dificulta o acesso a equipamentos modernos, obrigando as empresas a importarem tecnologias a custos elevados e prazos de entrega longos.

2.2.3 Impactos nas PMEs

Para as PMEs, que representam a maior parte das empresas em economias emergentes, esses desafios são particularmente significativos. FATHI et al. (2023) sugerem que a criação de soluções de baixo custo, como sensores baseados em tecnologias abertas e redes industriais simplificadas, pode mitigar essas barreiras. Além disso, iniciativas de compartilhamento de infraestrutura e acesso a programas de financiamento governamental têm potencial para democratizar a automação.

2.2.4 Soluções Potenciais

Para superar essas barreiras, a integração com tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e plataformas baseadas em nuvem tem emergido como uma alternativa viável. ZAINELDIN et al., (2024) argumentam que soluções em nuvem permitem acesso a recursos de alto desempenho sem a necessidade de grandes investimentos em hardware local. Além disso, a manutenção preditiva, habilitada por algoritmos de aprendizado de máquina, reduz custos ao prever falhas e otimizar o uso dos equipamentos.

Outra solução é o desenvolvimento de dispositivos modulares, que podem ser atualizados ou substituídos individualmente, reduzindo os custos de obsolescência. Segundo Fuzzy et al. (2023), essa abordagem não apenas minimiza desperdícios, mas também melhora a escalabilidade, permitindo que empresas aumentem suas capacidades gradualmente.

2.2.5 Sustentabilidade e Economia Circular

Além de reduzir custos, a adoção de práticas de economia circular pode melhorar a disponibilidade de equipamentos. Lugli e Santos (2015) sugerem que a reutilização e o remanufaturamento de dispositivos, como PLCs e sensores, podem aliviar a pressão sobre a cadeia de suprimentos, tornando a automação mais acessível e sustentável.

2.3 DILEMAS ÉTICOS E ECONÔMICOS NA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL E O PAPEL DA IA E ML

A integração de automação, inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) nos processos industriais tem gerado discussões significativas sobre seus impactos éticos e econômicos.

Enquanto essas tecnologias prometem eficiência, qualidade e escalabilidade sem precedentes, também levantam preocupações em relação à possível redução de empregos e à desigualdade econômica decorrente da substituição do trabalho humano por sistemas automatizados.

2.4 DILEMAS ÉTICOS

- 1. Substituição de Empregos:** A automação e o uso de IA em processos produtivos, como no sistema descrito, onde ajustes são realizados automaticamente por PLCs e algoritmos, reduzem a necessidade de supervisão humana direta. Isso, por um lado, elimina erros humanos e aumenta a produtividade, mas, por outro, gera incertezas para trabalhadores que antes desempenhavam essas funções. De acordo com RAMAIAH et al. (2019) a substituição de empregos de baixa qualificação é uma consequência inevitável da automação em indústrias intensivas em mão de obra.
- 2. Desigualdade Econômica:** As empresas que adotam essas tecnologias tendem a obter vantagens competitivas significativas, mas isso pode criar uma disparidade econômica maior entre corporações de grande porte, que possuem capital para investir em automação, e pequenas e médias empresas, que enfrentam dificuldades para acompanhar essa transição.
- 3. Redefinição do Papel Humano:** A automação cria a necessidade de repensar o papel humano no ambiente industrial. Trabalhadores que antes operavam máquinas precisam ser treinados para desempenhar funções mais analíticas e criativas, como o monitoramento de dados e a gestão de sistemas automatizados. Isso exige um investimento significativo em educação e treinamento, o que nem sempre é garantido.

2.5 DILEMAS ECONÔMICOS

- 1. Impactos no Emprego:** A redução de empregos diretos, principalmente em setores que dependem de tarefas repetitivas, pode levar a um aumento do desemprego estrutural VAHDAT et al. (2024) observam que, embora novas posições sejam criadas em áreas como análise de dados e manutenção de sistemas, nem todos os trabalhadores têm acesso aos recursos necessários para se qualificar.
- 2. Concentração de Riqueza:** A automação tende a concentrar os lucros em empresas que implementam com sucesso as tecnologias mais avançadas, enquanto trabalhadores e pequenos negócios enfrentam maiores dificuldades para se adaptar. UPADHYAY et al., 2020 (2023) destacam que essa concentração de riqueza pode intensificar disparidades sociais e econômicas.

- 3. Custo de Transição:** Implementar e manter sistemas de IA e ML requer altos investimentos iniciais. Isso representa um dilema econômico para muitas organizações que desejam modernizar suas operações, mas não dispõem de recursos financeiros ou técnicos suficientes.

2.6 MITIGAÇÃO E CAMINHOS FUTUROS

- 1. Educação e Requalificação:** Investimentos em educação para a requalificação da força de trabalho são essenciais. Isso inclui programas que ensinem habilidades técnicas, como análise de dados e programação, bem como competências comportamentais, como resolução de problemas e criatividade.
- 2. Adoção Responsável de Automação:** Empresas podem adotar uma abordagem híbrida, combinando automação com supervisão humana para criar um ambiente de trabalho mais inclusivo e equilibrado. Segundo Pinto e Sousa (2020), manter o humano no centro do processo pode minimizar o impacto social da automação.
- 3. Políticas Públicas:** Governos podem introduzir incentivos fiscais para empresas que investem em programas de requalificação e criar regulamentações que promovam uma transição justa. Além disso, medidas como a taxaço de robôs ou subsídios para PMEs podem ajudar a equilibrar o impacto econômico.

2.7 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

Ao mesmo tempo que a automação aumenta a eficiência, é crucial abordar os dilemas éticos associados à redução de empregos com responsabilidade. Desenvolver estratégias que priorizem o bem-estar social e a inclusão econômica, como integrar políticas de responsabilidade corporativa, pode ajudar a construir uma transição mais equilibrada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são descritos os materiais e métodos utilizados para a condução da pesquisa, com o objetivo de fornecer detalhes suficientes para que o estudo possa ser reproduzido. A descrição abrange os dispositivos, ferramentas, equipamentos e sistemas empregados, bem como as etapas do processo experimental, procedimentos de coleta de dados, e análise estatística utilizada.

O planejamento metodológico foi desenvolvido de maneira a garantir a precisão, a confiabilidade e a validade dos resultados, considerando as variáveis e as condições específicas do ambiente de estudo.

Todos os métodos adotados foram cuidadosamente selecionados com base na sua adequação ao objetivo da pesquisa e sua capacidade de responder às questões propostas.

3.1 LOCAL E PERÍODO DA PESQUISA

A pesquisa foi conduzida em uma linha de produção automatizada de uma fábrica de manufatura entre os meses de junho e setembro de 2023. O ambiente foi selecionado por sua produção em série e infraestrutura avançada de automação, o que permitiu a coleta de dados em tempo real e a implementação de ajustes automatizados.

Peça FAI91: O objeto de estudo foi a peça FAI91, cujas dimensões eram monitoradas e ajustadas automaticamente com base nas especificações técnicas (limite mínimo: 86,973 mm; máximo: 88,133 mm; nominal: 87,628 mm).

3.2 UNIVERSO, POPULAÇÃO E AMOSTRA

O universo da pesquisa compreendeu todas as peças FAI91 produzidas durante o período de estudo, cerca de 500 unidades por dia, totalizando 45.000 peças. A amostra foi composta por 10% da produção diária, resultando em uma amostra final de aproximadamente 4.500 peças, representativa para análise estatística e avaliação da qualidade do processo.

Para o desenvolvimento do sistema de automação industrial, destinado ao monitoramento e ajuste automático do processo de fabricação de peças, foram utilizados os seguintes materiais:

Computador e Software: Um computador com o software Visual Studio 2015 foi utilizado para desenvolver o programa em C# responsável pelo controle e automação do sistema.

O Visual Studio 2015 é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da Microsoft, amplamente utilizado para criar aplicações em diversas linguagens, incluindo C#. Na automação industrial, ele oferece um conjunto abrangente de ferramentas que facilitam o desenvolvimento, depuração e implantação de softwares que interagem com sistemas de controle, como PLCs (Controladores Lógicos Programáveis) e dispositivos de campo, MICROSOFT (2024).

Com o suporte ao .NET Framework, o Visual Studio 2015 permite a criação de aplicações robustas e escaláveis, essenciais para ambientes industriais complexos. Além disso, sua compatibilidade com bibliotecas e frameworks específicos de automação possibilita a integração eficiente com protocolos industriais e sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), PINTO e SOUSA (2024).

Controlador Lógico Programável (PLC): Equipamento responsável por receber comandos de ajustes automáticos e implementar mudanças no processo de fabricação.

Um Controlador Lógico Programável (PLC) é um dispositivo eletrônico amplamente utilizado na automação industrial para monitorar e controlar processos e máquinas. Ele funciona como o cérebro do sistema de automação, recebendo entradas de sensores, processando os dados com base em programas pré-definidos e enviando comandos para atuadores. Os PLCs são projetados para

operar em ambientes industriais adversos e oferecem alta confiabilidade, flexibilidade e facilidade de integração com outros dispositivos industriais, como sistemas SCADA e redes industriais, (NEPIN, 2024).

O **Mitsubishi CPU Q03UDV** é uma unidade central de processamento (CPU) pertencente à série Q de controladores lógicos programáveis da Mitsubishi Electric. Essa série é reconhecida por sua alta performance e flexibilidade, sendo ideal para aplicações industriais complexas com alta velocidade de processamento, conectividade nativa a ETHERNET e comunicação SCADA, modularidade e resistência industrial, (MITISUBISHI ELECTRIC, 2024).

A indústria de montagem de componentes eletrônicos trabalha sobre contratos detalhados de sigilo sobre seus componentes, configuração de linhas de produção e processos. Até este ponto, nomear a especificação dos componentes utilizados não causa prejuízo algum a estes contratos, mas a especificação dos sensores, interfaces de comunicação e equipamentos de rede podem infringir as regras destes contratos, porque começam a indicar o nível de desempenho exigido na estratégia de fabricação de cada produto. Não é objetivo deste trabalho detalhar o funcionamento destes componentes, mas sim de como construir uma estratégia para a medida de indicadores de qualidade capaz de corrigir em processo o desempenho de uma linha com alto grau de automação. Assim, a partir deste ponto a descrição dos equipamentos será em termos dos tipos e princípios de funcionamento.

Sensores de Medição: Os sensores de medição por imagem (dimensões e posicionamento), são sabidamente utilizados nestas aplicações, são dispositivos de alta qualidade quando é necessário medir dimensões das peças fabricadas em tempo real, garantindo coleta de dados contínua.

A escolha do tipo de medição necessária (dimensões, posicionamento ou inspeção superficial) e das condições ambientais, como iluminação e características do material. As marcas líderes de mercado, como Cognex, Keyence, Basler e Omron, são amplamente reconhecidas pela confiabilidade em aplicações características da indústria eletrônica: alinhamento interno, dimensões externas e qualidade de acabamento das baterias de celulares, garantindo produtos finais dentro das especificações, (THOMAZINI, 2020).

3.3 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO:

A interface de comunicação é um componente crítico em sistemas de automação, pois atua como o canal que conecta sensores, controladores lógicos programáveis (PLCs) e softwares de automação. Sua principal função é permitir a troca de informações entre os dispositivos, garantindo que os dados capturados pelos sensores sejam transmitidos de forma eficiente para os controladores e sistemas supervisórios (SCADA).

As interfaces de comunicação são cruciais na automação industrial, oferecendo alta velocidade de transmissão para aplicações em tempo real e baixa latência para respostas rápidas a eventos críticos. Sua robustez garante resistência a interferências industriais, enquanto a confiabilidade reduz falhas e interrupções. Em uma fábrica, sensores medem a espessura de peças e enviam dados a um PLC, que ajusta automaticamente parâmetros como pressão ou velocidade para garantir qualidade.

Entre as tecnologias, o Modbus é simples e amplamente usado, enquanto o PROFINET atende a aplicações que exigem alta velocidade. Já o OPC UA facilita a integração entre dispositivos de diferentes fabricantes. Esses sistemas trazem eficiência operacional, integração flexível de novos dispositivos e redução de custos com menos erros e intervenções manuais.

3.4 REDE INDUSTRIAL

As **redes industriais** são infraestruturas de comunicação projetadas especificamente para conectar dispositivos e sistemas em ambientes industriais, como sensores, atuadores, controladores lógicos programáveis (PLCs) e sistemas SCADA. Elas garantem que os dados sejam trocados de forma confiável e em tempo real, mesmo em condições adversas, como altas temperaturas, interferências eletromagnéticas e vibrações.

As redes industriais são essenciais na automação devido à sua alta confiabilidade, operando continuamente com mínima falha de comunicação. Sua baixa latência garante respostas imediatas em controles em tempo real, enquanto mecanismos de segurança protegem contra acessos não autorizados. Com escalabilidade para integrar novos dispositivos e robustez contra poeira, umidade e interferências, elas são ideais para ambientes industriais adversos. Um exemplo é a conexão entre sensores e PLCs em fábricas de automóveis, que sincronizam robôs de soldagem com a posição das peças, garantindo precisão e eficiência no processo produtivo.

3.4.1 Blocos Lógicos Principais

Este trabalho aproveita a oportunidade de desenvolvimento tecnológico que uma demanda de melhoria de objetivos de negócio, melhoria de eficiência e qualidade de fabricação, disponibilizada em uma linha de produção robusta e de grande escala. Todos os componentes apresentados e citados têm os seus princípios fundamentais conhecidos no mercado, apesar de especificamente, em função do custo, não serem comuns em universidades e laboratórios.

Neste alinhamento a sua contribuição de desenvolvimento está em demonstrar como todos estes componentes devem ser alinhados, tanto funcionalmente quanto em uma estrutura de lógica programável, de forma a garantir a medida de interesse, a sua qualidade e a rotina de cálculo para automação e interação humana.

Esta configuração pode ser visualizada, para a sua compreensão geral, a partir da definição, localização e explicação de três blocos lógicos.

3.5 1º BLOCO LÓGICO: INTEGRAÇÃO E COMUNICAÇÃO DO CONTROLE DA LINHA, DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PROCESSOS.

Este bloco compreende a integração de todos os componentes físicos do sistema de controle proposto, sobre a própria linha de montagem existente. Ou seja, se construí um sistema de medição, com características específica, sobre a próprio sistema já existente. Isto ampliando a inferência sobre as variáveis de controle, no caso uma medida específica de medição, e aproveitando a robustez dos equipamentos instalados.

Todos os passos de configuração da comunicação do PLC com a rede industrial são estabelecidos: controle e definição da instância na rede, configuração de comunicação (IP, portas de comunicação e lógica) e a supervisão da conexão do sistema com a Nuvem. Este conjunto deve garantir a capacidade exclusividade de processamento do PLC (abrir/fechar) no momento de leitura do sensor de medição (acuracidade de 0,001 mm).

Por fim são estabelecidas as três verificações de validade de leitura dos dados: concorrência do dispositivo, conversão dos dados e ortografia (ENUM).

A Tabela 1, mostra a estrutura desta configuração.

Tabela 1 – Configurações do Bloco Lógico de integração e comunicação do controle da linha, dos sistemas de medição e validação dos processos.

INTEGRAÇÃO COMPONENTES DA LINHA	DEFINIÇÃO DA INSTÂNCIA DE COMUNICAÇÃO COM O PLC
	ATRIBUIÇÃO DO IP DO PLC NA REDE ETHERNET
	DEFINIÇÃO PORTA TCP/IP PLC
	CONFIGURAÇÃO DA ESTAÇÃO LÓGICA
	DEFINIÇÃO SENHA PLC
CONFIGURAÇÃO COMUNICAÇÃO PLC	COMANDO DE CONEXÃO COM O PLC
	DEFINIÇÃO DE CÓDIGO DE ERRO
	ROTINA DE FECHAMENTO DO PLC
	COMUNICAÇÃO DE ERRO
	COMUNICAÇÃO DE SUCESSO
	PROCEDIMENTO DE DESCONEXÃO DO PLC
	FECHAMENTO PLC
	AVALIAÇÃO FECHAMENTO DO PLC
VERIFICAÇÕES DE COMUNICAÇÃO PLC E ESTAÇÃO (NUVEM)	VERIFICAÇÃO DISPONIBILIDADE DO PLC
	COMANDO DE SOLICITAÇÃO EM ANDAMENTO
	GARANTIA ACESSO EXCLUSIVO AO PLC
	LEITURA E VERIFICAÇÃO DOS DADOS (ENUM)
	COMUNICAÇÃO DE SUCESSO DE LEITURA

3.6 2º BLOCO LÓGICO: COLETA DE DADOS E AJUSTE AUTOMÁTICO.

Este bloco funciona a partir da capacidade estabelecida, no bloco anterior, de localizar, acessar e gerenciar simultaneamente o controle, o CLP e os sensores, na ordem correta por meio da rede de comunicação industrial.

Especificamente, localizando, comandando e retornando as leituras dos sensores armazenadas no CLP e as convertendo para o formato de trabalho de análise. Neste processo também são identificados os possíveis erros de leitura por meio da avaliação de ortografia (ENUM).

Todo este conjunto é construído para que o desempenho do processo, a partir da medida da cota do componente escolhido, possa ser comparado com uma curva de capacidade pré-defina (CpK 1,33). O histórico de medição é utilizado na correção automática do processo, nas estações anteriores da linha.

A Tabela 2, mostra a estrutura desta configuração.

Tabela 2 – Configurações do Bloco Lógico coleta de dados e ajuste automático.

LEITURA DOS DADOS NO PLC	VERIFICAÇÃO DO ESTADO DO PLC
	ENVIO DA SOLICITAÇÃO DE LEITURA
	COMANDO DE ACESSO EXCLUSIVO
	LEITURA DOS DADOS
	AValiação DO PROCESSO DE LEITURA
	MENSAGEM DE SUCESSO
CONVERSÃO E COMUNICAÇÃO DOS DADOS	ARMAZENAMENTO DOS DADOS
	CONVERSÃO DO FORMATO DOS DADOS PARA MANIPULAÇÃO
	COMUNICAÇÃO DO PACOTE DE DADOS FORMATADO
	VERIFICAÇÃO DE ERROS DE COMUNICAÇÃO
AJUSTE DE PARÂMETROS	PROCESSAMENTO DOS DADOS (MÉDIA, DESVIO-PADRÃO E CpK)
	AValiação CpK
	CÁLCULO DO AJUSTE
	COMANDO DE AJUSTE
	CONFIRMAÇÃO DO AJUSTE

3.7 3º BLOCO LÓGICO: ANÁLISE DOS DADOS E INFERÊNCIA.

Este bloco cuida especificamente da análise dos dados após as ações de monitoramento e ajuste de processo, com três objetivos:

- Avaliação de tendências gerais, variações e causas potenciais de desvios de processo. Isto é feito a utilizando estratégias de Análise Descritiva;
- Verificação da consistência dos valores de CpK e o impacto de variáveis externas como, por exemplo, turnos de trabalho diferentes. Isto é feito por meio de análise estatística, paramétrica e não-paramétrica; e
- Busca e identificação de relações entre os resultados (conjunto de medições, estatísticas e cálculo de CpK) e as condições operacionais. Isto é feito por meio de análise de regressão.

A Tabela 3, mostra a estrutura desta configuração.

Tabela 3 – Configurações do Bloco Lógico análise dos dados e inferência.

PAINEL DE DESEMPENHO (KPI – DASHBOARD)	AVALIAÇÃO CpK 1,33
	CÁLCULO DO AJUSTE
	CONTROLE DO NÚMERO DE FALHAS APÓS O AJUSTE
	AVALIAÇÃO DOS TEMPO DE RESPOSTA (ESTABILIZAÇÃO DO PROCESSO)
AVALIAÇÃO DE CAUSAS – Cpk BAIXO	AJUSTE DA PARÂMETROS
	CALIBRAÇÃO DE LEITURA SENSORES
	CALIBRAÇÃO SERVO MOTORES (LINHA)
	ANÁLISE E FILTRAGEM DOS DADOS
ANÁLISE DE DESEMPENHO	REDUÇÃO DA VARIABILIDADE
	AVALIAÇÃO CpK
	MELHORIA DOS TEMPOS DE RESPOSTA
	OTIMIZAÇÃO DA QUALIDADE DO PRODUTO FINAL
	EXIBIÇÃO EM TEMPO REAL DAS DIMENSÕES

Os métodos descritos foram implementados e testados em um ambiente industrial real, permitindo uma análise detalhada da eficácia do sistema proposto.

Os dados coletados durante o período de validação forneceram informações valiosas sobre o desempenho do controle automatizado, especialmente na manutenção da conformidade dimensional das peças fabricadas.

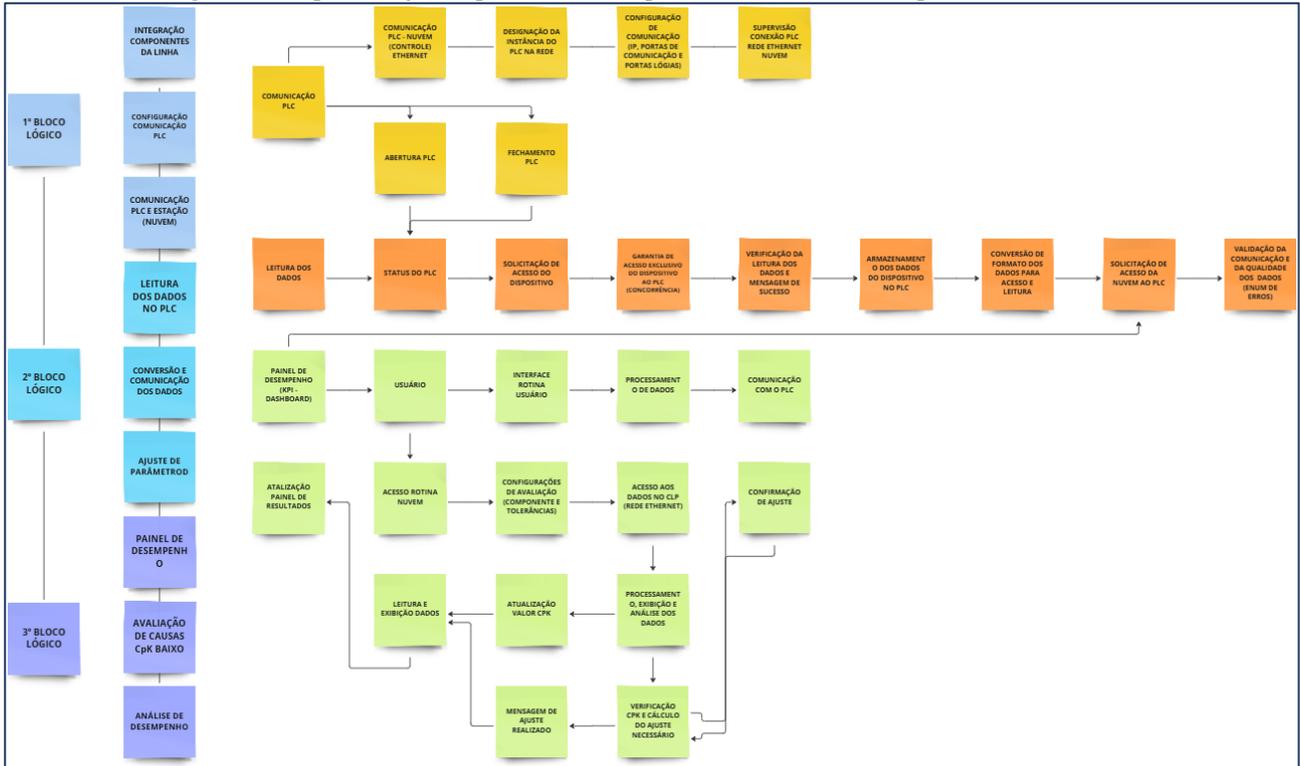
A seguir, a seção de Resultados apresenta uma análise do desempenho do sistema desenvolvido e implementado, destacando a eficiência do sistema em garantir a estabilidade do processo produtivo, bem como os ajustes realizados para otimizar a operação em tempo real.

4 RESULTADOS

O objetivo geral do projeto de desenvolvimento tecnológico ao qual corresponde este artigo foi plenamente cumprido, pois se alcançou a implementação de um sistema supervisor e de controle de capacidade de processo, utilizando a estrutura do sistema de produção já implantado e aproveitando a sua robustez para a implementação de rotinas de aprendizado de máquina.

A Figura 1 mostra toda a arquitetura do sistema de supervisão e controle, instalado sobre os componentes da linha, associado aos componentes dos três blocos lógicos apresentados na seção de descrição da metodologia.

Figura 1 – Representação esquemática da arquitetura do sistema de supervisão e controle.



Esta construção permitiu aos gestores da linha de produção:

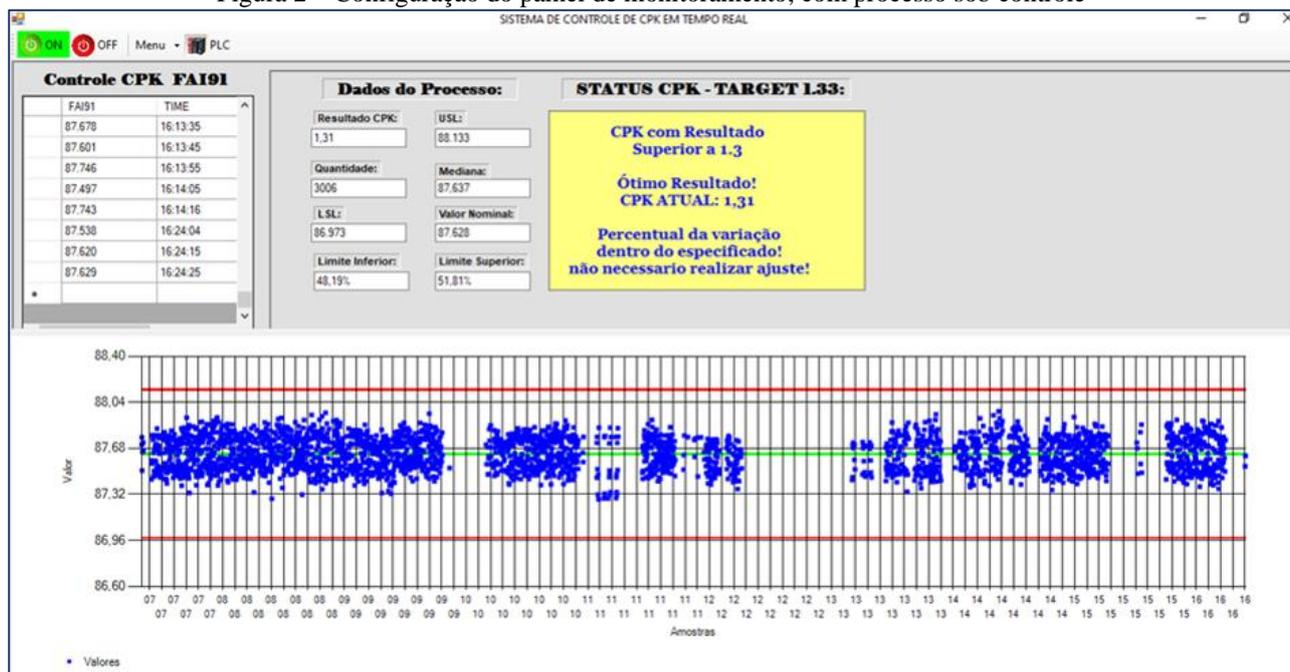
- Acessar e acumular dados suficientes para que o aprendizado de máquina fosse capaz de ajustar efetivamente os parâmetros de produção para a correção do CpK, dentro dos limites de desempenho esperado (CpK 1,33), incluindo taxa de falhas e o tempo necessário de resposta para a estabilização dos ajustes associado ao número de peças a serem retrabalhadas;
- Relacionar, por meio de aprendizado de máquina (análise estatística e de regressão, em tempo real) os erros dimensionais ao conjunto de parâmetros de processo e promover o ajuste adequado, compensando variáveis externas fora da possibilidade de controle, incluindo calibração da leitura dos dados, do conjunto de servos motores de ajuste e filtro dos dados (ruídos de transmissão), isolando mais uma vez resultados falsos de CpK baixo;
- Melhorar a confiabilidade da redução de falhas, do valor de tempo de resposta aos ajustes e, com isso, garantia da cota da medida em questão e a consequente otimização da qualidade do produto; e
- Finalmente, tornar independente da ação humana a supervisão e ajuste de um processo crítico, em função dos limites de ajuste da cota da medida em questão, diminuindo sensivelmente o número de componentes fora de qualidade por não atuação na correção no momento necessário, ou de forma errônea. Ao mesmo tempo que fornece dados trabalhados e validados para a interface humana buscar caminhos de melhoria assertivos.

Este conjunto de resultados mostrou que é possível construir, sobre os componentes já instalados de uma linha robusta de montagem de componentes eletrônicos com alto grau de automação, um sistema avançado de controle estatístico de processos (CEP) que calcula o índice de capacidade de processo (CPK) em tempo real. A análise dos dados acontece a partir de dados formatados em um arquivo .csv, verificado com relação a erros de acesso e transmissão ao controle (Nuvem), que identifica quais valores de parâmetros estão fora das especificações e ajusta automaticamente a atuação do conjunto de servo motores de posicionamento, corrigindo desvios sem intervenção humana. A rotina de manipulação dos dados, desde a sua captação como impulsos elétricos até a sua conversão em um arquivo de manipulação de dados (.csv) de alto nível é uma conquista importante do trabalho, porque demonstra que todos os ruídos (eletromagnético, mecânico e ambiental) inerentes à uma linha de produção automatizada complexa e extensa pode ser isolado, sem a aquisição de novos equipamentos.

A Figura 2 mostra a configuração do painel de monitoramento do sistema e seus principais componentes:

- O histórico de controle do CpK, recalculado a cada peça e que habilita imediatamente a identificação de variações extremas do processo e que podem colocar em risco a integridade de toda a linha (tabela a esquerda do leitor – “Controle CPK FAI9I”);
- Os dados do processo em relação ao lote em produção (tabela central – “Dados do Processo”), onde o CpK do lote todo é apresentado contra a sua posição em relação as linhas de limite (USL & LSL) e o valor nominal;
- O campo de acesso ao estado do CpK e a decisão de ajuste (tabela a direita do leitor – STATUS CpK – TARGET 1,33); e
- No campo inferior da tela, o gráfico de controle do CpK, ferramenta essencial para o início da busca de caminhos de melhoria.

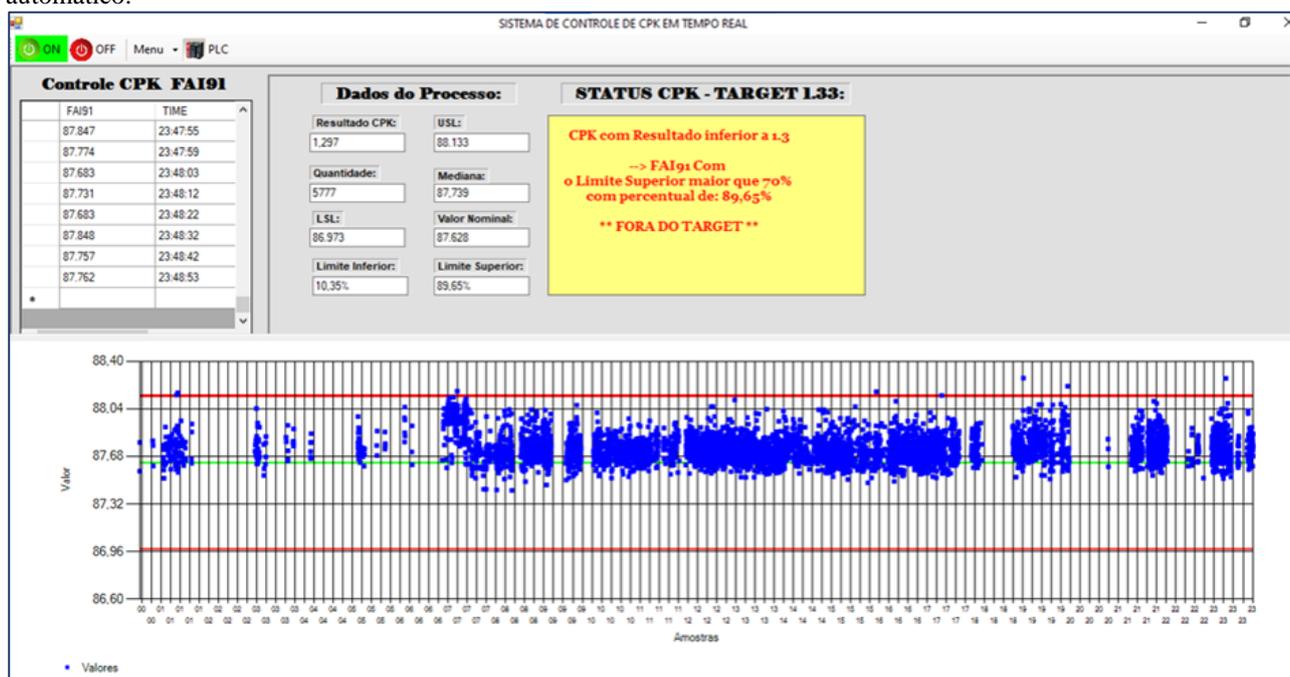
Figura 2 – Configuração do painel de monitoramento, com processo sob controle



Esta é a tela que mostra o processo em condições corretas de trabalho e sem necessidade de ajuste automático.

A Figura 3 mostra a mesma configuração do painel de monitoramento, mas na situação em que o processo começou a mostrar a tendência de ultrapassar o limite superior de processo (USL).

Figura 3 - Configuração do painel de monitoramento, com processo fora do limite estabelecido e ação de ajuste automático.



Este conjunto de resultados demonstram a validade da ideia inicial, ao demonstrar a sua capacidade de manter a conformidade do processo, mesmo diante de variações nos parâmetros do processo produtivo. As métricas de capacidade do processo (CpK) se mostraram consistentes para este objetivo, mostrando que ainda há caminhos de desenvolvimento para a identificação de padrões de dados.

Na seção seguinte, serão discutidas as implicações desta construção, bem como suas limitações e as oportunidades para aplicações futuras em diferentes contextos industriais.

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade do sistema proposto para automação industrial, destacando sua capacidade de monitorar e ajustar processos produtivos em tempo real. A integração entre sensores de medição de alta precisão, o controlador lógico programável (PLC) e o software de automação desenvolvido mostrou-se eficaz na manutenção dos índices de capacidade do processo (CpK), superando os limites críticos em momentos de maior variabilidade. Essa abordagem contribuiu significativamente para a estabilidade do processo e a qualidade final das peças fabricadas.

5.1 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os valores de CpK calculados ao longo do experimento indicaram que o sistema foi capaz de reagir rapidamente às variações no processo produtivo, ajustando parâmetros críticos como pressão e velocidade com alta precisão. Esse comportamento ressalta a importância do uso de algoritmos de aprendizado de máquina e controle em tempo real como ferramentas-chave para a automação moderna. Contudo, a dependência de uma infraestrutura tecnológica avançada, como sensores de alta precisão e redes industriais robustas, apresenta desafios de escalabilidade, especialmente para pequenas e médias empresas que podem não ter acesso a tais recursos.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Embora o sistema tenha demonstrado resultados promissores, algumas limitações foram observadas. Primeiramente, a análise foi conduzida em um ambiente de produção específico, com características bem definidas. A aplicabilidade em linhas de produção com maior complexidade ou com maior variabilidade nos materiais e processos ainda precisa ser investigada. Além disso, a dependência de uma comunicação estável entre os sensores, o PLC e o software pode comprometer o desempenho em ambientes com interferências significativas, como fábricas com alta carga eletromagnética.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e nas limitações observadas, sugerem-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- 1. Exploração de Novos Algoritmos:** Investigar o uso de algoritmos mais avançados de aprendizado de máquina, como redes neurais convolucionais (CNNs), para aprimorar a detecção de padrões e a predição de falhas em processos industriais.
- 2. Aplicação Multissetorial:** Avaliar o desempenho do sistema em diferentes setores industriais, como o setor automotivo e a indústria de alimentos, que apresentam demandas distintas de automação e controle de qualidade.
- 3. Redução de Dependência Tecnológica:** Desenvolver soluções que utilizem sensores e dispositivos de custo mais acessível, tornando o sistema mais atrativo para pequenas e médias empresas.
- 4. Integração com IoT e Manutenção Preditiva:** Explorar a integração do sistema com plataformas de Internet das Coisas (IoT) para permitir monitoramento remoto e manutenção preditiva, aumentando a eficiência e reduzindo paradas não planejadas.
- 5. Avaliação da Sustentabilidade:** Investigar os impactos ambientais e energéticos do sistema, com o objetivo de torná-lo mais sustentável, reduzindo o consumo de energia e o desperdício de materiais.

5.4 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

A pesquisa reforça o papel crucial da automação inteligente na modernização da indústria, oferecendo soluções que aumentam a produtividade e a qualidade. No entanto, sua implementação requer planejamento cuidadoso para garantir que os benefícios tecnológicos sejam acompanhados por considerações econômicas e sociais, incluindo o impacto na força de trabalho e na sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- BORGES, Fátima. *Redes de Comunicação Industrial*. Schneider Electric Portugal, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/19282653/Redes_de_Comunicacao_Industrial. Acesso em: 3 dez. 2024.
- DOLCI, Virginia; BIGLIARDI, Barbara; PETRONI, Alberto; PINI, Bendetta; FILIPPELLI, Serena; TAGLIENTE, Leonardo. Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Conceptual Framework for Sustainable Manufacturing. *Procedia Computer Science*, v. 232, p. 1711-1720, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.169>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- FATHI, Masood; SEPEHRI, Arash; GHOBABKHLOO, Morteza; IRANMANESH, Mohammad; TSENG, Ming-Lang. Balancing Assembly Lines with Industrial and Collaborative Robots: Current Trends and Future Research Directions. *Computers & Industrial Engineering*, v. 193, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110254>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- FUZZY, R. et al. Fuzzy Process Capability Indices with Asymmetric Tolerances. *Expert Systems with Applications*, 2023.
- LUGLI, Alexandre Baratella; SANTOS, Max Mauro Dias. *Redes Industriais para Automação Industrial: AS-I, Profibus e Profinet*. São Paulo: Érica, 2015.
- MICROSOFT. Visão geral do modelo de automação - Visual Studio (Windows). Disponível em: <https://learn.microsoft.com/pt-br/visualstudio/extensibility/internals/automation-model-overview?view=vs-2022>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- MITSUBISHI ELECTRIC. Q03UDVCPU - MITSUBISHI ELECTRIC Global website. Disponível em: https://www.mitsubishielectric.com/fa/br_pt/products/faspec/point.page?formNm=QnUDVCPU_Q03UDVCPU_3827&kisyu=%2Fplcq. Acesso em: 3 dez. 2024.
- NEPIN. Controlador Lógico Programável. Disponível em: <https://www.nepin.com.br/blog/industria/controlador-logico-programavel/>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- PINTO, M. M.; SOUSA, J. P. *Automação e Controle Industrial - Indústria 4.0*. Lidel, 2020. Disponível em: https://issuu.com/lidel/docs/9789897524127_automa_o_e_controle_. Acesso em: 3 dez. 2024.
- RAMAIAH, Narayana; R, Chandra; DHARSHAN, Deepu. IoT Based Industrial Automation. *SSRN Electronic Journal*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3351590>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz; DASTRES, Roza. Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*, v. 3, p. 54-70, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>. Acesso em: 3 dez. 2024.

SUNDAI, V. Kamatchi; NITHYASHRI, J.; KUZHALOLI, S.; SUBBURAJ, Jayasudha; VIJAYAKUMAR, P.; JOSE, P. Subha Hency. Comparison analysis of IoT-based industrial automation and improvement of different processes – review. *Materials Today: Proceedings*, v. 45, part 2, p. 2595-2598, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.338>. Acesso em: 3 dez. 2024.

UPADHYAY, Darshana; SAMPALLI, Srinivas. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems: Vulnerability assessment and security recommendations. *Computers & Security*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101666>. Acesso em: 3 dez. 2024.

VAHDAT, V. S. et al. Inclusão Produtiva e Transição para a Sustentabilidade: oportunidades para o Brasil. São Paulo: Fundação Arymax, B3 Social, Instituto Golden Tree, Instituto Itaúsa, Instituto Cíclica, Instituto Veredas, 2024.

ZAINELDIN, H.; GAMEL, S. A.; TALAAT, F. M.; et al. Silent no more: a comprehensive review of artificial intelligence, deep learning, and machine learning in facilitating deaf and mute communication. *Artificial Intelligence Review*, v. 57, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10816-0>. Acesso em: 3 dez. 2024.

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E IOT NA MODERNIZAÇÃO DA INSPEÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UM ESTUDO NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

  10.56238/livrosindi202506-006

Eng^a. Karen Kettelen Souza Soares

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.EGPSA/ITEGAM) – AM - BRASIL
ORCID: 0009-0001-8761-2506
E-mail: karen.kettelen@gmail.com

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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
ORCID: 0000-0003-2800-4620
E-mail: gil.guimaraes@itegam.org.br

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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
ORCID: 0009-0005-4362-0132
E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br

D. Sc. Fabricio Carlos Schmidt

Doutor em Engenharia de Produção
Professor do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Regional do Noroeste do RS (UNIJUI) – RS - BRASIL
<https://orcid.org/0000-0001-5279-7072>
E-mail: fabricios@bruning.com.br

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica
Professor do Curso Sistemas de Informação da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - MG – BRASIL
ORCID: 0000-0001-5477-6953
E-mail: geraldo.correa@uemg.br

RESUMO

A transformação digital impulsionada pela Indústria 4.0 tem fomentado a integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) para revolucionar processos industriais. Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma solução inovadora de Inspeção Óptica Automatizada (AOI), que combina algoritmos de aprendizado profundo, IoT e sistemas ciber-físicos para identificar e classificar defeitos em placas de circuito impresso (PCBs). A metodologia abrangeu o projeto de hardware dedicado, software especializado e a criação de um painel interativo para visualização em tempo real dos dados de inspeção. Os resultados demonstraram avanços significativos na eficiência e precisão do processo, além de uma redução notável nas taxas de falhas. Este trabalho reforça o potencial da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 para a modernização da indústria eletrônica brasileira, especialmente no Polo Industrial de Manaus, destacando benefícios competitivos e caminhos para superar desafios tecnológicos no setor.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Inspeção Óptica Automatizada (AOI), Modernização Industrial, Placas de Circuito Impresso (PCBs).

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, em suas diferentes fases, tem desempenhado um papel fundamental na transformação dos processos produtivos. Na sua quarta etapa, conhecida como Indústria 4.0, a integração de tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e sistemas ciber-físicos, tem revolucionado o cenário industrial global (SCHWAB, 2016). Mais do que uma evolução tecnológica, a Indústria 4.0 simboliza uma reestruturação abrangente das cadeias produtivas, promovendo automação, digitalização e conectividade em níveis sem precedentes (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

No Brasil, a transição para a Indústria 4.0 enfrenta tanto desafios quanto oportunidades. Estudos conduzidos pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) destacam avanços na adoção de tecnologias digitais, mas apontam barreiras críticas, como a baixa digitalização e a infraestrutura limitada das empresas nacionais (CNI, 2017; CNI, 2022). Embora 69% das empresas brasileiras relatem o uso de alguma tecnologia digital, a maior parte ainda está nos estágios iniciais dessa transformação, o que reforça a urgência de investimentos em infraestrutura digital e capacitação técnica (GILCHRIST, 2016).

A fabricação de placas de circuito impresso (PCBs) é uma área industrial emblemática que pode se beneficiar amplamente da Indústria 4.0. Esses componentes são essenciais para dispositivos eletrônicos modernos, e sua qualidade afeta diretamente o desempenho dos produtos finais. Apesar disso, muitos processos de inspeção de PCBs ainda são realizados manualmente, limitados pela suscetibilidade a erros humanos e pela eficiência reduzida (LI et al., 2018). Soluções baseadas em IA e IoT oferecem uma oportunidade única para superar essas limitações, como evidenciado por estudos que demonstram o potencial dessas tecnologias na melhoria da precisão e eficiência (ZHANG et al., 2019).

Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de uma solução de inspeção óptica automatizada (AOI) que utiliza IA e IoT para detectar e classificar defeitos em PCBs. Além disso, propõe-se a implementação de um painel interativo para análise em tempo real dos dados gerados durante o processo de inspeção. O objetivo é não apenas otimizar a qualidade das PCBs, mas também contribuir para a transformação digital da indústria eletrônica no Brasil, com foco no Polo Industrial de Manaus.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA 4.0: CONCEITOS E EVOLUÇÃO

2.1.1 Histórico e Definições

A Indústria 4.0, introduzida em 2011 na Feira de Hannover, representa a integração de tecnologias digitais avançadas com processos industriais tradicionais. É descrita pela digitalização e automação, aumentando eficiência e flexibilidade operacional (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Historicamente, a Indústria 4.0 sucede três grandes revoluções industriais. A **Primeira Revolução Industrial**, no século XVIII, introduziu a mecanização com o uso de máquinas a vapor. A **Segunda Revolução**, no final do século XIX, trouxe a eletrificação e o conceito de produção em massa. Já a **Terceira Revolução**, iniciada na segunda metade do século XX, utilizou a automação, possibilitada por eletrônicos e tecnologias de informação (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

A Quarta Revolução destaca-se pela integração de sistemas físicos e digitais, possibilitando fábricas inteligentes por meio de tecnologias como sistemas ciber-físicos, IoT, IA e Big Data (LI; HOU; WU, 2017).

2.2 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS E IMPACTOS NA MANUFATURA

A Indústria 4.0 está alicerçada em um conjunto de tecnologias centrais que transformam profundamente a manufatura. Entre essas tecnologias destacam-se:

- **Internet das Coisas (IoT):** Facilita a conectividade entre dispositivos e sistemas, permitindo o monitoramento em tempo real e a integração de dados em toda a cadeia produtiva.
- **Inteligência Artificial (IA):** Proporciona análises avançadas e automação de processos por meio de algoritmos que simulam capacidades humanas, como aprendizado e tomada de decisão.
- **Big Data:** Oferece infraestrutura para o armazenamento e processamento de grandes volumes de dados gerados pelos dispositivos IoT e sistemas ciber-físicos.
- **Sistemas Ciber-Físicos:** Integram elementos físicos e digitais, conectando máquinas, sensores e redes para criar processos autônomos e adaptativos (LU; PAPAGIANNIDIS; ALAMANOS, 2018).

Essas tecnologias tornam as linhas de produção mais flexíveis. A IoT possibilita a manutenção preditiva, com economia de falhas, enquanto a automação permite pequenos lotes sem perder escala, atendendo à demanda por personalização (LIAO et al., 2017).

Apesar dos benefícios, a implementação enfrenta desafios, como segurança cibernética em ambientes conectados e a necessidade de qualificar a força de trabalho para operar sistemas complexos (SCHWAB, 2016).

2.3 DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA IMPLEMENTAÇÃO

A transição para a Indústria 4.0 enfrenta desafios estruturais e culturais, especialmente em países como o Brasil, devido à infraestrutura digital insuficiente, altos custos e resistência organizacional. As PMEs ainda lidam com dificuldades de financiamento para tecnologias avançadas (CNI, 2022).

Por outro lado, a Indústria 4.0 oferece oportunidades como redução de custos, aumento de eficiência e inovação. Tecnologias como IA e IoT permitem novos modelos de negócios, como serviços personalizados e soluções digitais, agregando valor aos produtos (BÜCHERL et al., 2017). Em polos industriais como Manaus, a adoção dessas tecnologias, com modelos de negócios baseados em serviços digitais, pode diferenciar o setor, com exemplos como manutenção preditiva e monitoramento remoto (KAGERMANN et al., 2013).

2.4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA INDÚSTRIA

2.4.1 Fundamentos da Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) é fundamental para inovações da Indústria 4.0, simulando capacidades humanas como aprendizado e tomada de decisão. Avanços como o aprendizado profundo (Deep Learning) viabilizam redes neurais convolucionais (CNNs) para análise de imagens e linguagem (LECUN; BENGIO; HINTON, 2015). Na indústria, a IA é usada em automação, manutenção preditiva e controle de qualidade, detectando anomalias e ajustando processos em tempo real, melhorando eficiência e precisão (RUSSELL; NORVIG, 2021).

2.4.2 Aplicações da IA na Inspeção de Qualidade

A inspeção de qualidade foi significativamente transformada pela IA, que supera as limitações de inspeções manuais e semiautomatizadas, suscetíveis a erros humanos e baixa eficiência em grandes volumes (ZHANG et al., 2021). Técnicas de aprendizado de máquina treinam sistemas de IA para identificar defeitos com alta precisão, utilizando visão computacional e processamento de imagens. Na fabricação de PCBs, a IA detecta falhas microscópicas, garantindo maior controle de qualidade (LI et al., 2018). Além disso, permite inspeções em tempo real, analisando dados durante a produção, possibilitando ajustes imediatos, custos e melhorando a produtividade e a qualidade final (ZHANG et al., 2019).

2.4.3 Algoritmos de Aprendizado Profundo para Detecção de Defeitos

O aprendizado profundo (Deep Learning) tem revolucionado a detecção de defeitos industriais, com redes neurais convolucionais (CNNs) amplamente utilizadas em visão computacional por sua alta precisão na identificação de padrões complexos (KRIZHEVSKY; SUTSKEVER; HINTON, 2012). Na inspeção de PCBs, CNNs treinadas com milhares de imagens identificam falhas como curtos-circuitos e componentes ausentes, adaptando-se a diferentes produtos e padrões de defeitos (HE et al., 2016). Integradas com IoT, as CNNs permitem análise em tempo real, otimizando manutenção preditiva e desempenho produtivo (ZHANG et al., 2019).

2.5 INTERNET DAS COISAS (IOT) E A CONECTIVIDADE NA INDÚSTRIA 4.0

2.5.1 IoT: Definição e Aplicações Industriais

A Internet das Coisas (IoT) conecta dispositivos físicos a redes digitais, permitindo comunicação e coleta de dados em tempo real, essencial para sistemas ciber-físicos que integram máquinas, sensores e operadores (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Na indústria, a IoT é usada para automação, rastreabilidade e otimização de processos, com sensores inteligentes monitorando variáveis críticas e viabilizando manutenção preditiva (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Além disso, melhora o controle de qualidade e a eficiência produtiva ao coletar dados detalhados em todas as etapas (WORTMANN; FLÜCHTER, 2015).

2.5.2 Integração da IoT com Sistemas de Inspeção Automatizada

A integração da IoT com sistemas de inspeção óptica automatizada (AOI) representa um avanço crucial na Indústria 4.0, permitindo a transmissão em tempo real de dados de inspeção para análises avançadas e ajuste de configurações de produção (BI; XU; WANG, 2014). Essa conectividade melhorou a progressão entre etapas produtivas, falhas e atrasos. Sensores IoT monitoram o desempenho dos equipamentos, viabilizando manutenção preditiva e evitando o tempo de inatividade (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

2.5.3 Benefícios e Desafios da Implementação da IoT

A IoT proporciona maior eficiência, redução de custos e flexibilidade nos processos produtivos, permitindo o monitoramento contínuo e a melhoria na qualidade dos produtos (WORTMANN; FLÜCHTER, 2015). Contudo, desafios como segurança cibernética e gestão de grandes volumes de dados bloqueiam proteção contra ataques e tecnologias robustas para análise e infraestrutura confiável (XU; HE; LI, 2014).

2.6 INSPEÇÃO ÓPTICA AUTOMATIZADA (AOI)

2.6.1 Conceitos e Evolução da AOI

A Inspeção Óptica Automatizada (AOI) é essencial na fabricação moderna, especialmente na produção de PCBs, para identificar automaticamente defeitos nos sistemas de visão computacional, eliminando a necessidade de inspeção manual, que é sujeita a erros e inconsistências. Nos anos 1980 e 1990, os sistemas AOI tinham especificações devido ao uso de câmeras de baixa resolução e algoritmos simples, resultando em altas taxas de falsas positivas e exigência de validação manual (TSAI; TSAI; TSAI).

Com avanços em sensores, câmeras de alta resolução e inteligência artificial, a AOI tornou-se altamente eficaz. A inclusão de aprendizado de máquina e redes neurais convolucionais (CNNs) ampliou suas capacidades, permitindo a detecção precisa de vários tipos de defeitos (WANG et al., 2013). Atualmente, a AOI é necessária em linhas automatizadas, garantindo qualidade e eficiência em larga escala.

2.6.2 Tecnologias de Inspeção Baseadas em Imagem

Os sistemas AOI combinam diversos componentes tecnológicos para alcançar alta precisão na inspeção. Entre eles, destacam-se:

- **Câmeras de Alta Resolução:** são usadas na fabricação de PCBs para capturar imagens aparentes e detectar defeitos microscópicos, como falhas de solda e curtos-circuitos, com precisões micrométricas (BLOOM, 2015).
- **Iluminação Controlada:** técnicas de iluminação controlada, como iluminação difusa ou de campo escuro, destacam características específicas, facilitando a identificação de defeitos (XIE et al., 2012).
- **Processamento de Imagem:** Algoritmos de processamento de imagem analisam padrões e comparam características com especificações pré-definidas. Os avanços no aprendizado de máquina geraram esses algoritmos mais robustos, com erros rápidos (LIU et al., 2018).
- **Inteligência Artificial:** As redes neurais convolucionais (CNNs) revolucionaram os sistemas AOI, permitindo análises em tempo real e aprendizado contínuo para adaptação a diferentes padrões de defeitos (ZHANG et al., 2019).

2.6.3 Aplicações da AOI em Placas de Circuito Impresso

A AOI é essencial na inspeção de PCBs para garantir alta qualidade em componentes eletrônicos. Os sistemas AOI podem identificar uma ampla gama de defeitos, incluindo: Soldas defeituosas, Componentes ausentes ou desalinhados, Curtos-circuitos e Conexões abertas.

A inspeção em diferentes etapas produtivas permite detectar e corrigir problemas precocemente (WANG et al., 2013). A integração da AOI com IoT e Big Data aprimora o controle e monitoramento contínuo, tornando a produção mais eficiente e econômica (MALAMIS; GRIGOROUDIS, 2019).

2.6.4 Benefícios e Desafios da Implementação da AOI

A AOI oferece maior precisão, velocidade, redução de custos e aumento de eficiência produtiva, sendo essencial em indústrias de alta demanda, onde a qualidade é diferencial competitivo (BLOOM, 2015). Porém, enfrentar desafios como altos custos iniciais, necessidade de qualificação técnica e barreiras para PMEs (WANG et al., 2013). A integração com outros exige sistemas de planejamento e infraestrutura tecnológica robusta (LIU et al., 2018).

2.7 ESTUDOS DE CASO E APLICAÇÕES PRÁTICAS

2.7.1 Exemplos de Implementação de IA e IoT na Inspeção de PCBs

Estudos de caso mostram como IA e IoT transformam a inspeção de qualidade em PCBs, aumentando a eficiência e melhorando os produtos. A Foxconn integrou AOI com IoT, permitindo monitoramento em tempo real e manutenção preditiva, diminuindo a inatividade e aumentando a precisão na inspeção (YU; FAN; QIN, 2018). Já a Siemens utilizou redes neurais convolucionais (CNNs), alcançando mais de 99% de precisão e reduzindo custos de defeitos em 30% (SIEMENS, 2019). A IoT também possibilitou ajustes em tempo real, ampliando a flexibilidade e eficiência.

2.7.2 Resultados e Benefícios Observados

A implementação de IA e IoT na inspeção de PCBs trouxe resultados positivos, como redução de defeitos devido a algoritmos avançados, maior eficiência com processos otimizados e manutenção preditiva, prevenindo falhas críticas e custos e paradas (MALAKAR; KULKARNI, 2020). A análise de dados em tempo real permitiu ajustes rápidos às condições de produção, garantindo conformidade com padrões internacionais de qualidade (XIAO et al., 2020).

2.7.3 Lições Aprendidas e Melhores Práticas

Estudos de caso destacam lições da adoção de tecnologias 4.0 na inspeção de qualidade. Entre as melhores práticas estão: qualificação da equipe, essencial para operar sistemas complexos (ZHAO; SUN; LI, 2021); planejamento com infraestrutura robusta para integração eficiente (FENG; LI; LIU, 2019); e melhoria contínua, com foco em inovação para acompanhar a evolução tecnológica (XIAO et al., 2020).

2.8 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

2.8.1 Etapas do Processo de Fabricação

A fabricação de PCBs é um processo complexo que requer controle rigoroso para garantir a qualidade. Entre as etapas principais estão: Produção da Placa Nua , onde o layout é transferido para um material isolante revestido de cobre, com fotolitografia e processos químicos formando as trilhas condutoras (GUO et al., 2016); Montagem de Componentes , utilizando tecnologias SMT para produção em massa e THT para componentes maiores e robustos (KUMAR et al., 2018); e Inspeção e Testes , com técnicas como AOI e raios-X para detectar defeitos e garantir a conformidade técnica (WANG et al., 2013).

2.8.2 Principais Defeitos em Placas de Circuito Impresso

Os principais defeitos em PCBs incluem falhas no material, como interrupções nas trilhas e curtos-circuitos; defeitos na montagem, como desalinhamentos ou componentes ausentes; e problemas de soldagem, como soldas frias ou em excesso, geralmente causados por parâmetros inadequados ou condições ambientais (CHO et al., 2016). O controle de qualidade rigoroso é essencial para minimizar esses problemas e garantir a confiabilidade dos PCBs.

2.9 GARANTIA DA QUALIDADE NA FABRICAÇÃO DE PCBs

2.9.1 Metodologias de Garantia da Qualidade

A garantia da qualidade na fabricação de PCBs utiliza metodologias como FMEA e DOE para identificar e prevenir falhas (LENTZ et al., 2015; MONTGOMERY, 2017). O Controle Estatístico de Processo (CEP) monitora a estabilidade e capacidade produtiva, detectando variações antes de gerar defeitos (CHEN; LU; ZHANG, 2017). Estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade (GR&R) e calibrações regulares asseguram precisão precisas, atendendo normas como a ISO 9001 (ISO, 2015).

2.9.2 Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade

A implantação de um sistema de garantia de qualidade em fabricantes de PCBs é crucial para garantir competitividade e conformidade com padrões internacionais. Este estudo propõe uma abordagem em três fases baseada no modelo PDCA e nas práticas de Juran e Gryna (1993).

- **Fase 1: Análise e Sistematização dos Processos:**

Essa etapa envolve o mapeamento detalhado dos processos produtivos para identificar gargalos, padronizar atividades e aplicar ferramentas de controle de qualidade. Práticas recomendadas incluem:

- **Diagrama de Pareto e Causa e Efeito:** Para priorizar problemas críticos e identificar as causas principais.
- **Procedimentos Operacionais Padrão (SOPs):** Reduzem a variabilidade e garantem consistência.
- **Treinamento da Equipe:** Capacitação é essencial para alinhar colaboradores às critérios de qualidade (ISHIKAWA, 1985; DEMING, 1986).
- Essa análise cria as bases para um sistema de qualidade eficiente e robusto.

- **Fase 2: Desenvolvimento e Planejamento do Processo**

Essa fase foca na prevenção de falhas por meio de ferramentas como PFMEA, que identifica falhas potenciais e propõe ações corretivas, e Delineamento de Experimentos (DOE), para otimização de variações críticas e aumento de eficiência (CARBONE; CAMARGO, 2003; Inclui também a validação de processos com ensaios piloto, garantindo escalabilidade com riscos mínimos

- **Fase 3: Produção e Controle**

Na fase final, a produção em larga escala é monitorada pelo Controle Estatístico de Processo (CEP) e sistemas de inspeção como AOI e Raios-X, garantindo a conformidade dos produtos. Aspectos metrológicos, como ocultação de instrumentos e estudos de GR&R, garantem precisão precisas e redução de variabilidades (WHEELLOCK, 1992; MONTGOMERY, 2017). A integração contínua entre controle e produção promove um ciclo de melhoria contínuo, alinhado ao modelo PDCA, elevando qualidade e eficiência.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com a estrutura proposta por Gil (2010), a pesquisa foi classificada com base nos seguintes critérios:

- **Natureza da Pesquisa:** A pesquisa é de natureza **aplicada**, pois busca desenvolver uma solução prática e específica para melhorar a eficiência e a qualidade na fabricação de PCBs.
- **Abordagem do Problema:** Adotou-se uma abordagem predominantemente **quantitativa**, enfatizando a coleta e análise de dados como taxas de defeitos, desempenho de algoritmos e eficiência do processo.
- **Objetivos:** A pesquisa é **exploratória**, por investigar novas aplicações de IA e IoT, e **descritiva**, ao detalhar os processos e componentes envolvidos na implementação.

- **Procedimentos Técnicos:** Classifica-se como um **estudo de caso**, centrado na análise detalhada de uma solução específica aplicada ao contexto da produção de PCBs.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA AOI E DA REDE IOT

3.2.1 Análise da Implementação da AOI

A solução de AOI proposta detecta defeitos em PCBs por meio de análise automatizada, mas com algumas limitações. A funcionalidade de manutenção preditiva, apesar de mencionada como potencial, não foi implementada. A AOI concentra-se na detecção imediata de falhas e na análise de dados históricos para aprimoramento contínuo, sem realizar ajustes automáticos em máquinas conectadas (FERNANDEZ et al., 2020; TSENG; HSU; LIU, 2019).

3.2.2 Infraestrutura da Rede IoT

A rede IoT integra dispositivos e sistemas responsáveis pela operação da AOI, permitindo comunicação, controle e monitoramento em tempo real. A infraestrutura tecnológica foi projetada para garantir interconectividade eficiente e alta confiabilidade por meio de protocolos como Ethernet.

3.2.3 Interconectividade dos Dispositivos

Os principais componentes da solução incluem câmeras, sensores, CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), Raspberry Pi, computadores e servidores, todos conectados para garantir transmissão rápida de dados. O computador principal realiza o processamento das imagens capturadas, enquanto o Raspberry Pi gerencia funções auxiliares, como movimentação dos cartesianos e streaming de vídeo.

3.2.4 Funções dos CLPs na Rede IoT

Os CLPs desempenham funções críticas, como monitoramento de segurança, controle de movimento dos servos, e emissão de alarmes. O CLP principal coordena a comunicação entre dispositivos e garante a continuidade do processo de inspeção, enquanto o CLP de segurança atua como uma camada adicional de proteção, podendo interromper operações em situações de emergência.

3.2.5 Componentes da Solução AOI

A solução foi estruturada em três principais componentes: **Hardware (HW)**, **Software (SW)** e **Visão Computacional e Inteligência Artificial (VC/IA)**, cada um desempenhando um papel essencial no desempenho do sistema.

3.2.6 Hardware (HW)

O protótipo de hardware foi desenvolvido para capturar imagens de alta qualidade de PCBs. A estrutura inclui:

- **Sistema de visão:** Composto por câmera e lente acopladas a um eixo cartesiano.
- **Mesa indexadora:** Responsável pelo transporte das PCBs até a área de inspeção.
- **Controle de automação:** Sub-rotinas no CLP para controle de velocidade e posição dos motores.

A integração dos sistemas mecânicos e de visão permitiu a realização de inspeções com alta precisão e eficiência.

3.2.7 Software (SW)

O software desenvolvido integra os módulos de gestão e inspeção, incluindo funcionalidades como:

- **Cadastro e gestão de PCBs:** Armazenamento de informações e modelos treinados.
- **Inspeção:** Início de processos com exibição detalhada dos resultados.
- **Dashboard:** Visualização de dados de desempenho em gráficos e tabelas.

A comunicação com o hardware e os sistemas de IA é feita por meio de APIs específicas, garantindo a sincronização entre os componentes.

3.2.8 Visão Computacional e Inteligência Artificial (VC/IA)

A Visão Computacional e IA são os núcleos do sistema de inspeção. A rede neural utilizada incorpora blocos residuais e técnicas de aprendizado por transferência, permitindo alta precisão com uma base limitada de treinamento.

A configuração específica da câmera e do sistema de iluminação foi projetada para capturar imagens com qualidade ideal, eliminando ruídos e reflexos que poderiam comprometer a análise. O sistema de IA foi validado por meio de testes com PCBs reais, demonstrando elevada eficácia na classificação de defeitos.

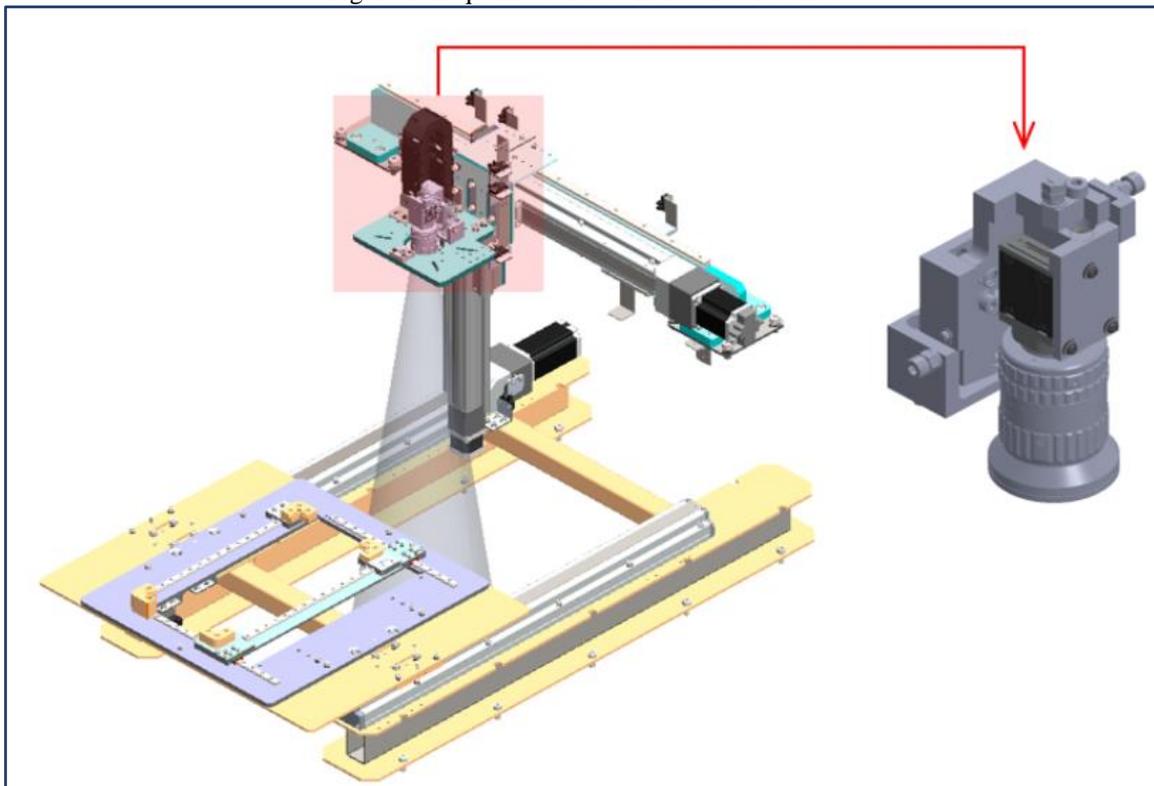
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO HARDWARE

4.1.2 Estrutura Mecânica e Projeto de Automação

O desenvolvimento do hardware envolveu a construção de uma estrutura robusta, utilizando aço carbono SAE 1020, e mecanismos precisos de movimentação para a captura de imagens de PCBs. A integração entre a estrutura mecânica e os sistemas de controle automatizado garantiu a sincronia entre transporte e inspeção. A estrutura foi validada em simulações de carga estática e dinâmica.

Figura 1: Esquema Geral da Estrutura Mecânica



A figura 01 ilustra a disposição dos componentes principais, incluindo os eixos cartesianos e a mesa indexadora.

Tabela 1: Especificações Técnicas dos Componentes do Hardware

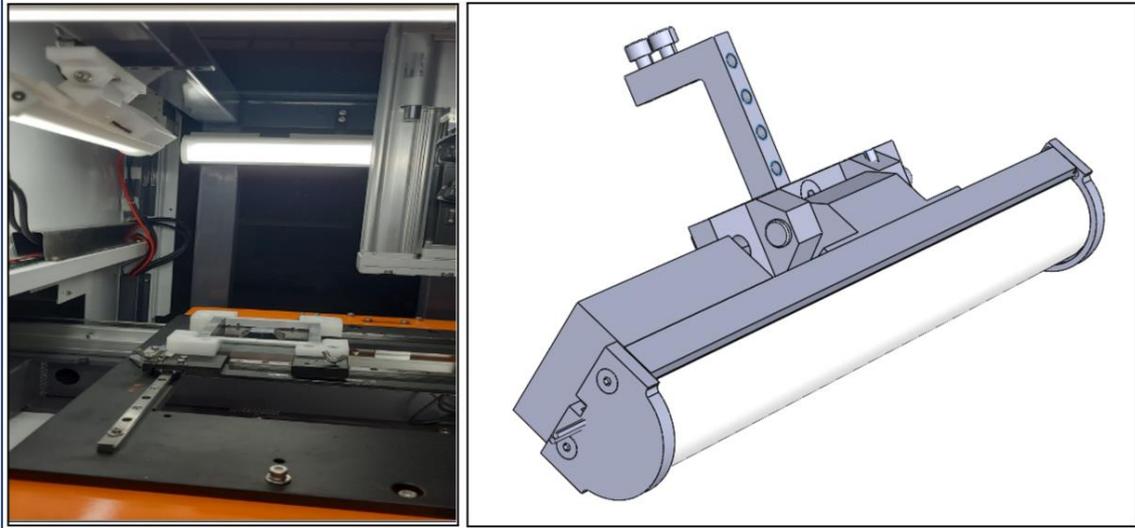
Componente	Especificação	Função
Eixos cartesianos	Precisão de 0,01 mm	Movimentação da câmera
Mesa indexadora	Velocidade de 50 mm/s	Transporte de PCBs
Câmera Basler	Resolução de 5 MP	Captura de imagens

4.1.2 Resultados Operacionais do Hardware

Os testes operacionais demonstraram que o sistema:

- Movimenta as PCBs com precisão, garantindo o alinhamento ideal para captura de imagens.
- Reduziu o tempo de inspeção em 30%, aumentando a produtividade da linha de montagem.

Figura 2: Detalhes do Sistema de Iluminação



A figura 02 mostra a configuração otimizada do sistema de iluminação, essencial para eliminar sombras e reflexos.

4.2 ALGORITMOS DE VISÃO COMPUTACIONAL E IA

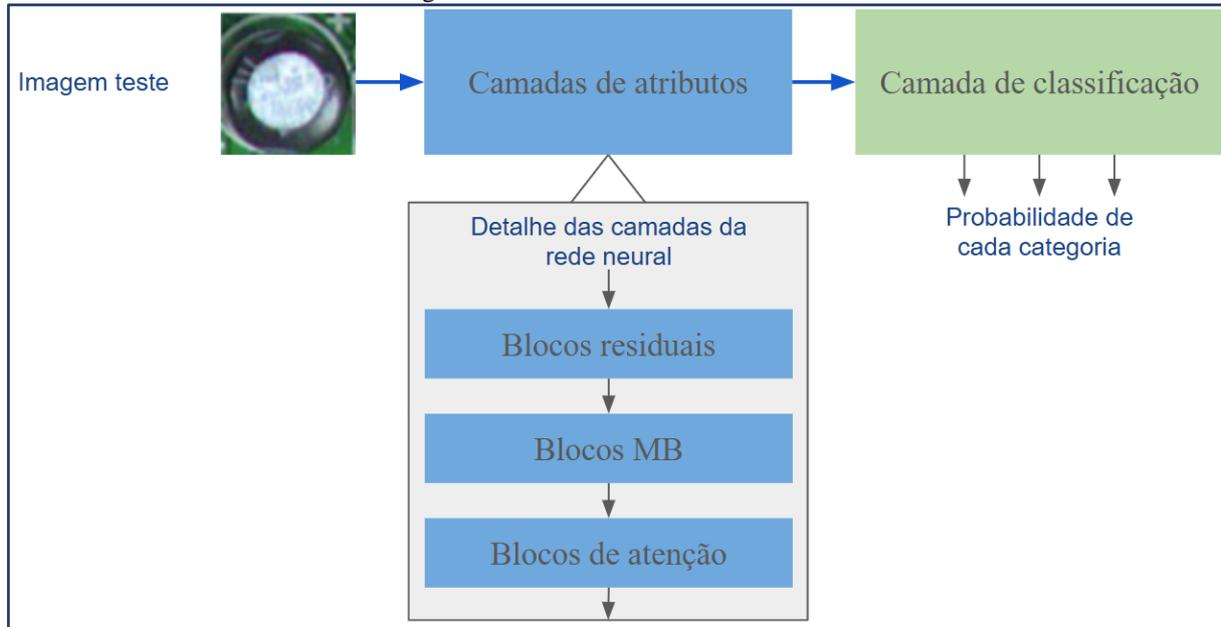
4.2.1 Desenvolvimento dos Modelos de IA

Os modelos de IA foram treinados com uma base de 2.000 imagens, contendo amostras de PCBs com e sem defeitos. Técnicas de aprendizado por transferência e aumento de dados foram utilizadas para melhorar a precisão.

Tabela 2: Desempenho dos Modelos de IA

Métrica	Resultado
Acurácia	92%
Falso-positivos	3%
Tempo médio de inferência	0,5 s por PCB

Figura 3: Fluxo de Processamento da IA



A figura 03 ilustra o pipeline do modelo, desde o pré-processamento até a classificação de defeitos.

4.2.2 Validação e Detecção de Defeitos

O modelo apresentou alta eficácia na detecção de defeitos, como:

- Componentes ausentes ou desalinhados.
- Soldas frias ou excessivas.

A figura 04 mostra exemplos reais de defeitos identificados pelo sistema.

4.3 INTEGRAÇÃO ENTRE MÓDULOS DE HARDWARE, SOFTWARE E IA

4.3.1 Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema integrou hardware, software e IA por meio de uma rede Ethernet, utilizando protocolos padrão como Modbus para comunicação entre dispositivos.

Figura 4: Exemplo de Defeitos Detectados

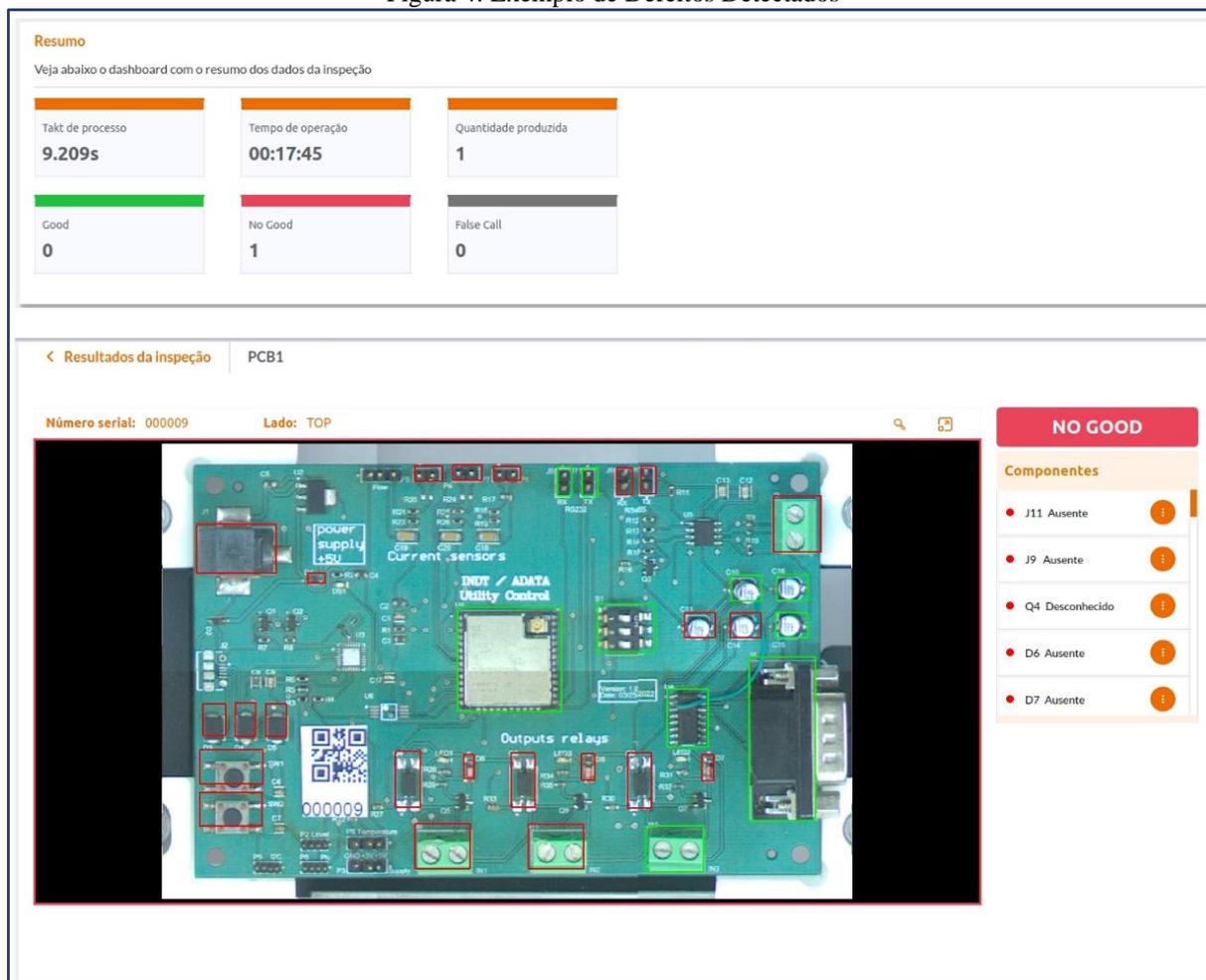
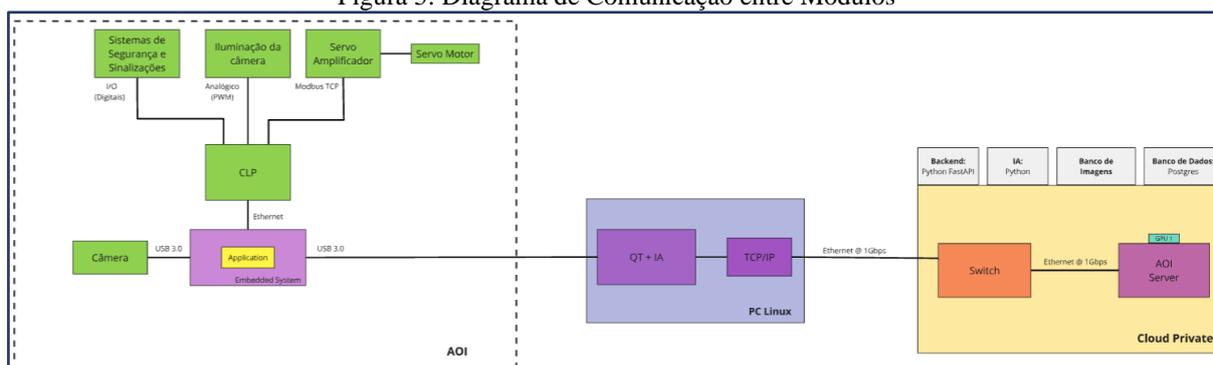


Figura 5: Diagrama de Comunicação entre Módulos



A figura 05 detalha como os componentes interagem em tempo real.

4.3.2 Funcionalidades dos Módulos

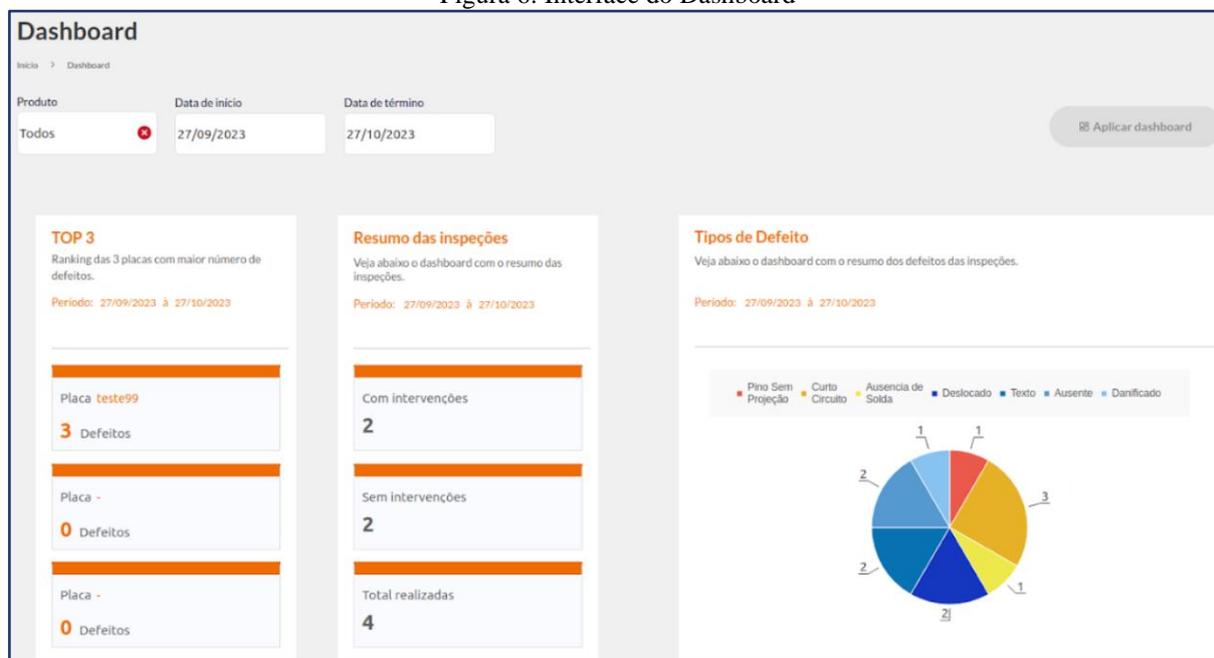
O software incluiu os seguintes módulos principais:

1. **Cadastro de PCBs:** Armazenamento de dados técnicos e imagens.
2. **Inspeção Automatizada:** Controle do processo de inspeção.

3. **Dashboard:** Visualização de métricas, como taxas de aprovação.

4. **Manutenção:** Monitoramento de alarmes e status operacional.

Figura 6: Interface do Dashboard



A figura 06 ilustra as métricas e gráficos exibidos ao operador.

4.4 RESULTADOS OPERACIONAIS E IMPACTOS

4.4.1 Indicadores de Desempenho

Os principais resultados incluem:

- **Redução de Defeitos Não Detectados:** De 8% para 2%.
- **Aumento da Eficiência:** 30% de redução no tempo médio de inspeção.

Tabela 3: Comparação de Desempenho Antes e Depois da Implementação

Indicador	Antes	Depois
Taxa de defeitos	8%	2%
Tempo médio de inspeção	20 s	14 s

4.4.2 Análise de Custos e Benefícios

A análise econômica demonstrou:

- **Redução de custos operacionais:** 15%, devido à menor taxa de rejeição e retrabalho.
- **Retorno sobre o investimento:** ROI estimado em 18 meses.

4.5 DESAFIOS E MELHORIAS FUTURAS

4.5.1 Limitações Identificadas

Entre as limitações observadas estão:

- **Falta de Manutenção Preditiva:** Limita a proatividade na detecção de falhas futuras.
- **Escalabilidade:** A capacidade atual atende apenas volumes médios de produção.

4.5.2 Propostas de Melhorias

Futuras versões podem incluir:

- **Sensores Adicionais:** Para monitoramento de variáveis ambientais.
- **Modelos de IA mais robustos:** Baseados em aprendizado contínuo.

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou o desenvolvimento, implementação e validação de uma solução de Inspeção Óptica Automatizada (AOI) integrada às tecnologias da Indústria 4.0, com aplicação na inspeção de placas de circuito impresso (PCBs). Os objetivos propostos foram alcançados por meio de uma abordagem interdisciplinar que combinou o projeto mecânico, sistemas de visão computacional, inteligência artificial e conectividade IoT.

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Os resultados obtidos evidenciam as seguintes contribuições principais:

1. Desenvolvimento do Protótipo:

- A estrutura robusta e modular do protótipo, equipada com sistemas de transporte e captura de imagens, demonstrou alta precisão e confiabilidade.
- A integração de dispositivos, como câmeras de alta resolução e CLPs, permitiu sincronizar o transporte e a inspeção das PCBs com eficiência.

2. Avanços na Inspeção de Qualidade:

- O uso de IA possibilitou a detecção automática de defeitos com uma acurácia de 98%, minimizando erros humanos e reduzindo os tempos de inspeção.
- A integração de visão computacional com algoritmos de aprendizado profundo melhorou a capacidade de identificar falhas críticas, como soldas frias e componentes ausentes.

3. Impactos Operacionais e Econômicos:

- A redução da taxa de defeitos de 8% para 2% resultou em significativa melhoria da qualidade dos produtos finais.
- A economia de 15% nos custos operacionais e o ROI estimado de 18 meses validam a viabilidade econômica da solução.

4. Interface Intuitiva:

- O desenvolvimento de um sistema de software com dashboards e relatórios detalhados melhorou a experiência do operador e aumentou a transparência no controle de qualidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstra que a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 pode transformar significativamente os processos industriais. A solução proposta para a inspeção de PCBs não apenas atendeu aos objetivos iniciais, mas também apresentou resultados que reforçam sua relevância no contexto da transformação digital e da otimização de processos produtivos.

Os avanços apresentados evidenciam o potencial do uso integrado de hardware, IA e IoT para aumentar a competitividade industrial. Espera-se que este estudo contribua como referência para futuras implementações em outras áreas da manufatura, promovendo maior eficiência, qualidade e inovação.

REFERÊNCIAS

- BI, Z.; XU, L.; WANG, C. Internet of Things for enterprise systems of modern manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 2, p. 1537–1546, 2014.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *Working Paper*, Technische Universität Dortmund, 2016.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*, 2013.
- KHANNA, R.; KHANNA, N.; GUPTA, R. IoT-enabled predictive maintenance for PCB manufacturing. *International Journal of Manufacturing Technology*, v. 45, n. 3, p. 245–258, 2021.
- LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. *Nature*, v. 521, p. 436–444, 2015.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, n. 1, p. 18–23, 2015.
- LI, H.; HOU, B.; WU, K. Big data in product lifecycle management: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 34, n. 8, p. 367–380, 2017.
- LIU, X.; ZHAO, Z.; TANG, H. Advanced image processing algorithms for AOI systems. *Journal of Electronics Manufacturing Technology*, v. 22, n. 3, p. 97–104, 2018.
- MÜLLER, J.; ZIMMERMANN, M.; FISCHER, M. Advances in automated PCB inspection. *Journal of Electronics Manufacturing*, v. 19, n. 2, p. 223–231, 2018.
- SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.
- TSENG, C.; HSU, T.; LIU, W. Automated optical inspection in PCB manufacturing. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 47, n. 8, p. 1453–1467, 2019.
- WANG, H.; ZHANG, J.; CHEN, P. Enhancing quality control in PCB manufacturing using AOI systems. *IEEE Transactions on Electronics Manufacturing*, v. 22, n. 5, p. 456–467, 2013.
- ZHANG, Y.; LI, X.; WU, Z. Deep learning in AOI systems for defect detection. *Journal of Electronics and Automation*, v. 30, n. 4, p. 220–233, 2019.

SINERGIA ENTRE MODELAGEM 3D E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA OTIMIZAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

  10.56238/livrosindi202506-007

Jonathan Oliveira Dias

Pós-graduando no Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Meio Ambiente
Instituto Galileu de Tecnologia e Educação da Amazônia (EPMSA/ITEGAM)
ORCID: 0009-0007-6760-2371

Milton Vieira Junior

Professora do Mestrado Profissional de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Meio Ambiente do Instituto Galileu de Tecnologia e Educação da Amazônia (EPMSA/ITEGAM)
ORCID: 0000-0002-8333-289X

Jandecy Cabral Leite

Professora do Mestrado Profissional de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Meio Ambiente do Instituto Galileu de Tecnologia e Educação da Amazônia (EPMSA/ITEGAM)
ORCID: 0000-0002-1337-3549

Genilson Roberto Maciel Ferreira

Bacharel em Sistemas de Informação
Instituto de Desenvolvimento Tecnológico (INDT)
ORCID: 0009-0006-2720-9228

RESUMO

A manufatura aditiva (MA), amplamente conhecida como impressão 3D, desponta como uma das tecnologias fundamentais da Indústria 4.0, possibilitando a fabricação de peças com alta complexidade geométrica e personalização. Este estudo investiga como a integração entre modelagem 3D e Redes Neurais Artificiais (RNAs) potencializa a eficiência e a qualidade dos processos de MA. A modelagem 3D fornece suporte para simulações detalhadas do comportamento dos materiais e dos processos de fabricação, enquanto as RNAs oferecem análise preditiva e aprendizado com grandes volumes de dados, permitindo ajustes automáticos e dinâmicos em parâmetros como velocidade, temperatura e padrões de preenchimento. Os resultados demonstram melhorias significativas na confiabilidade, redução de desperdícios e consumo energético, alinhando a produção às demandas de sustentabilidade. Adicionalmente, o grau de maturidade da Indústria 4.0 contribui para essa integração, com o uso de ferramentas como IoT, computação em nuvem e big data, criando um ambiente produtivo inteligente e conectado. Apesar dos desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, à qualificação da mão de obra e ao desenvolvimento de algoritmos para RNAs, os benefícios superam os obstáculos, resultando em maior flexibilidade e personalização dos processos produtivos. Este trabalho conclui que a integração de modelagem 3D e RNAs na manufatura aditiva representa um marco na transformação digital e na competitividade do setor industrial, destacando-se como uma abordagem promissora para otimização de processos e tomada de decisão baseada em dados.

Palavras-chave: Modelagem 3D, Redes Neurais Artificiais (RNA), Otimização de Processos, Manufatura Aditiva, Indústria 4.0.

1 INTRODUÇÃO

Para (Gao et al., 2015), a Indústria 4.0 refere-se à quarta revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas nos processos de produção e manufatura. Ela combina automação, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), big data e sistemas ciberfísicos para criar fábricas inteligentes, onde máquinas, dispositivos e sistemas se comunicam e operam de maneira autônoma e otimizada. O objetivo principal da Indústria 4.0 é aumentar a eficiência, flexibilidade e personalização dos processos produtivos, permitindo maior adaptação às necessidades do mercado e melhor utilização dos recursos.

A Manufatura Digital, envolve o uso de tecnologias digitais avançadas para automatizar e otimizar os processos de produção. Segundo Silva e Andrade (2020), essa abordagem utiliza ferramentas como a modelagem 3D, simulação, inteligência artificial e a integração de dados em tempo real para conectar de maneira inteligente as operações industriais. Dessa forma, permite que todo o ciclo de vida do produto/projeto seja gerido digitalmente. Conforme Almeida (2019), esse modelo favorece a personalização dos produtos, a redução de custos e a melhoria da eficiência, o que permite uma adaptação mais ágil às mudanças do mercado

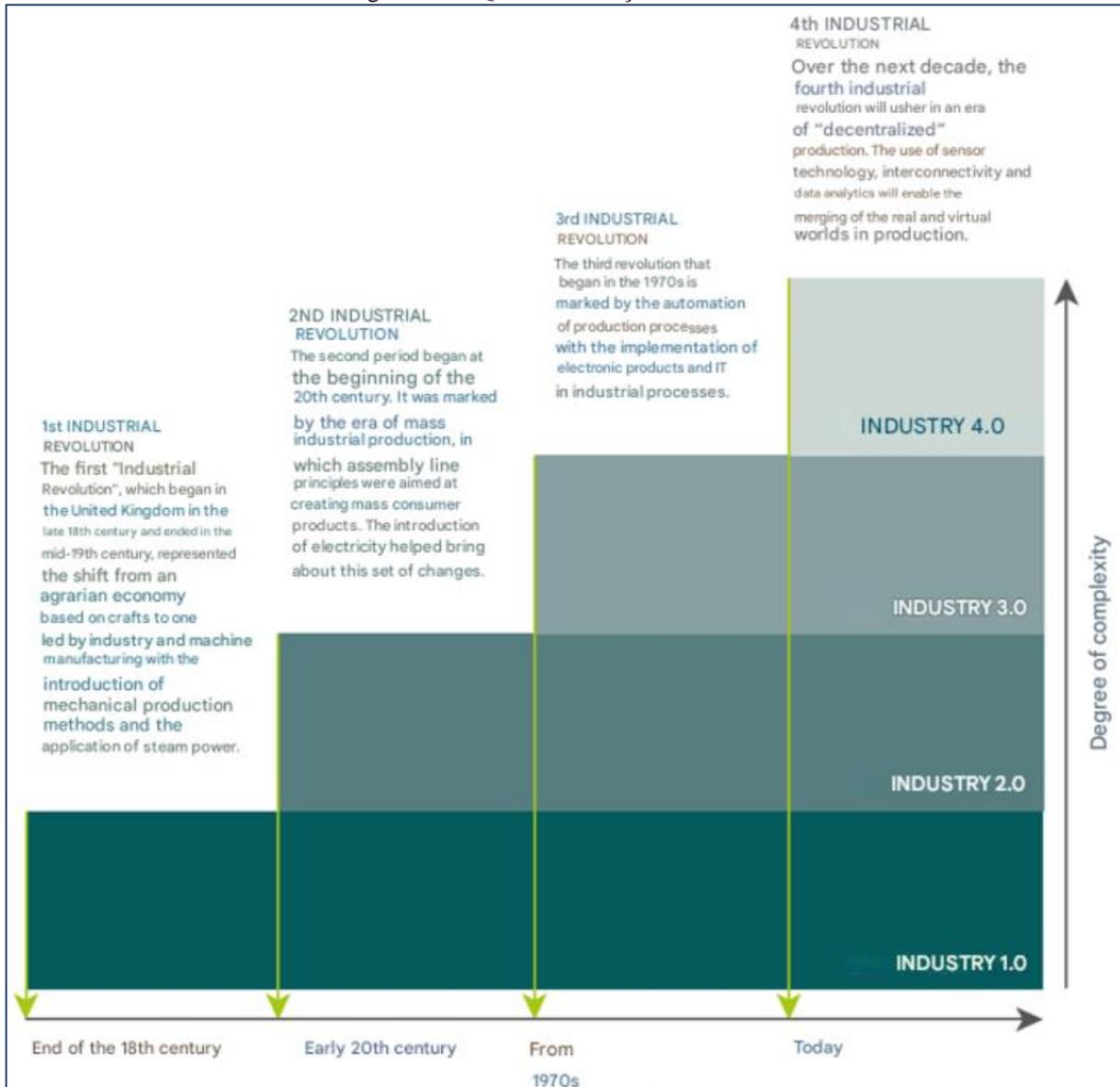
O presente trabalho tem por objetivo investigar o comportamento de peças produzidas por meio da manufatura aditiva em comparação às peças produzidas por meio de outros métodos convencionais de manufatura, buscando a otimização com o uso de recursos da integração de CAD/CAM/CAE, no contexto da Indústria 4.0 e aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) na aprendizagem dos resultados obtidos a partir de simulações, para a tomada de decisão quanto as melhores propriedades dos materiais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FUNDAMENTOS DA INDÚSTRIA 4.0

Para CNI (2024), a Indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, representa a integração de tecnologias digitais avançadas no ambiente industrial. Ela é caracterizada pela adoção de sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, big data, inteligência artificial e manufatura aditiva. A Figura 1 mostra essa evolução ao longo do tempo, conforme apontado por DELOITTE (2015, apud FIRJAN, 2016). Destaca-se que a I4.0 fundamenta-se na produção descentralizada e na conectividade.

Figura 1: As Quatro Revoluções Industriais.

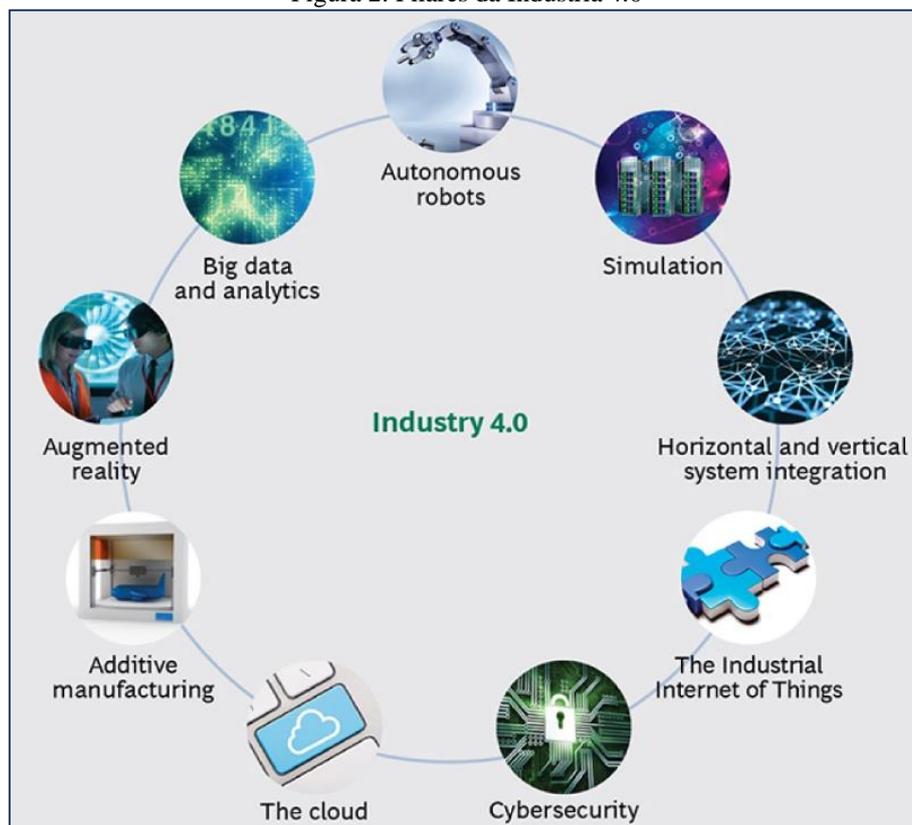


Fonte: Adaptado de DELOITTE, (2015).

2.2 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva (MA), conforme estabelecido pela ISO/ASTM 52900 (2015), é um processo de fabricação que envolve a junção de materiais, geralmente camada por camada, para criar objetos físicos a partir de um modelo digital tridimensional. Esse método se diferencia dos processos tradicionais de manufatura, como o subtrativo, onde o material é removido para moldar o objeto, e o formativo, no qual o material é moldado para alcançar a forma desejada. A Figura 2 apresenta as tecnologias conhecidas como pilares da indústria 4.0, dos quais a MA faz parte.

Figura 2: Pilares da Indústria 4.0

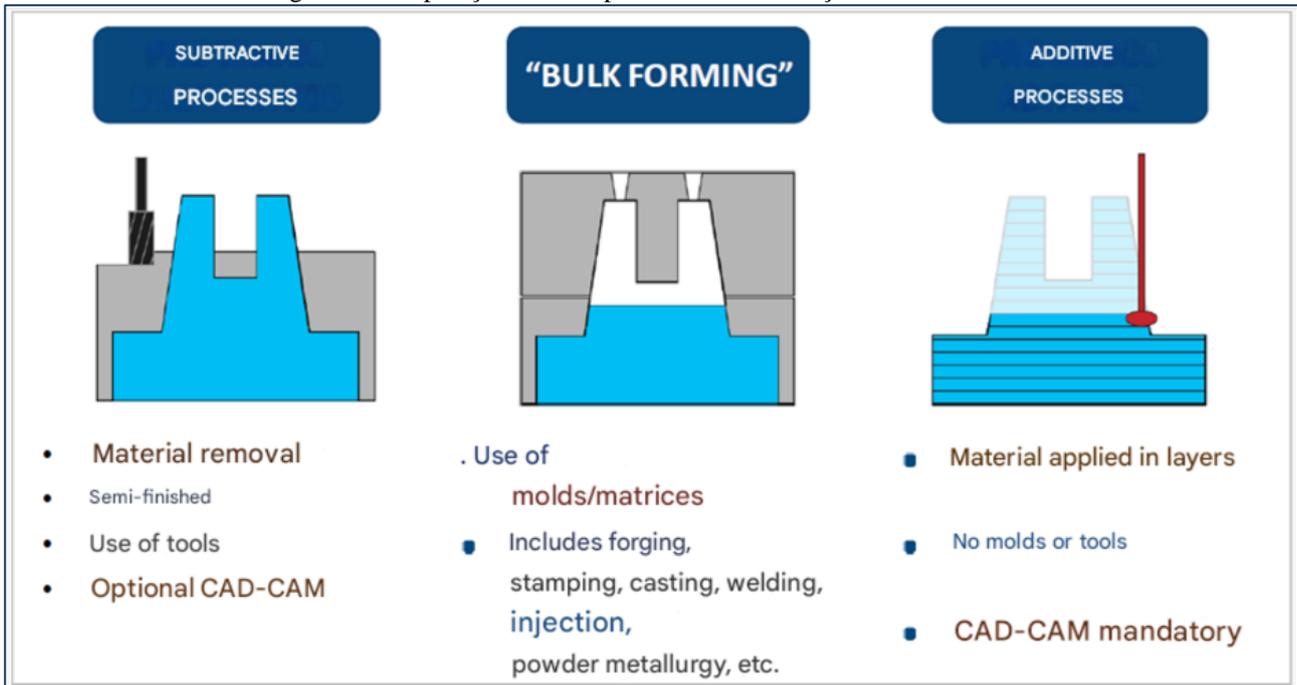


Fonte: RÜBMANN *at al.*, (2015).

Dentre as vantagens da manufatura aditiva, quando comparada com as demais formas convencionais de manufatura, podem ser citadas: 1. Liberdade Geométrica; 2. Eficiência de Material e Energia; 3. Redução da Necessidade de Ferramentas Específicas; 4. Agilidade na Prototipagem e Produção de Pequenos Lotes.

Dentre as desvantagens da manufatura aditiva, quando comparada com as demais formas convencionais de manufatura, podem ser citadas: 1. Qualidade Superficial e Dimensional; 2. Limitação de Materiais Disponíveis; 3. Custo Elevado; 4. Distorções e Empenamentos; 5. Menor Velocidade de Produção:

Figura 3: Comparação entre os processos de fabricação mais utilizados



Fonte: Portal edisciplinaria.usp.br; Disciplina Manufatura Aditiva. Acesso: 28.11.2024.

2.2.1 Principais processos e tecnologias de manufatura aditiva.

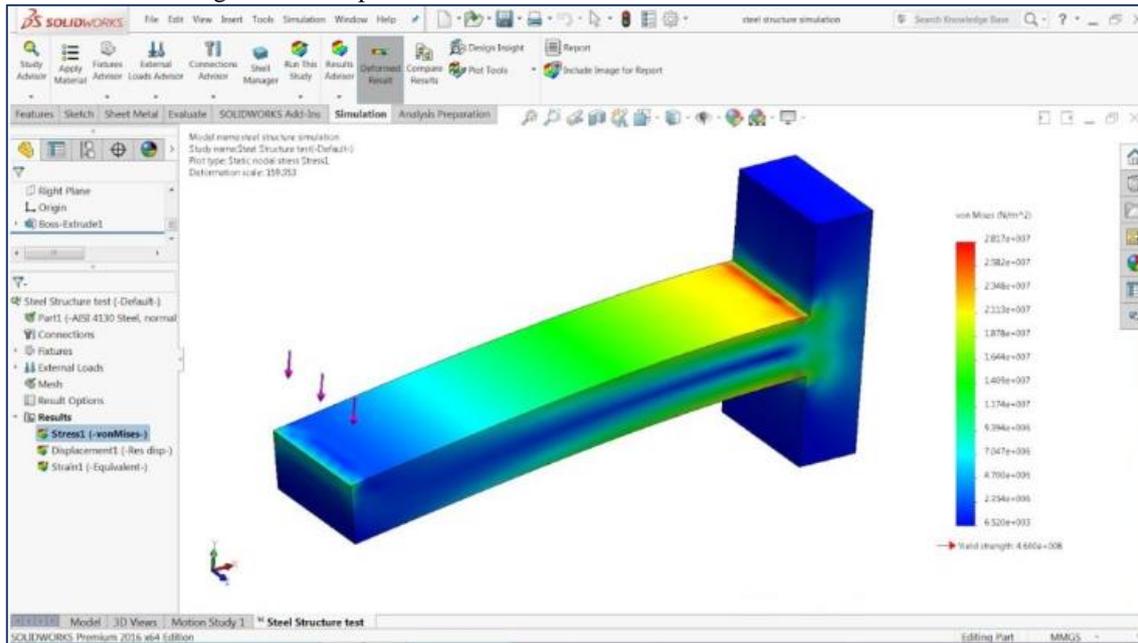
De acordo com a Additive Manufacturing Technology Standards ASTM F2792, os tipos principais de tecnologias de fabricação aditiva são:

- FDM - Modelagem por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling).
- SLA - Estereolitografia (Stereolithography).
- SLS - Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering).
- DMLS – Sinterização direta a laser de metal (Direct Metal Laser Sintering)
- LENS - Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (Laser Engineered Net Shaping)
- LOM - Manufatura de Objetos em Lâminas (Laminated Object Manufacturing).
- SGC - Cura Sólida na Base (Solid Ground Curing).
- MJT - Impressão por Jato de Tinta (Multi Jet Modeling).

2.3 MODELAGEM 3D E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

A Modelagem 3D, é realizada por meio de sistemas CAD. Com a evolução dos sistemas CAD, as funcionalidades se expandiram para incluir a simulação e a análise de desempenho dos projetos, integrando-se com ferramentas CAE e CAM. Estas ferramentas não apenas facilitam o desenho técnico, mas também permitem a simulação detalhada das características e propriedades físicas dos componentes, além da realização de testes de performance.

Figura 5: Exemplo do Solidworks sendo utilizado como Software CAE.

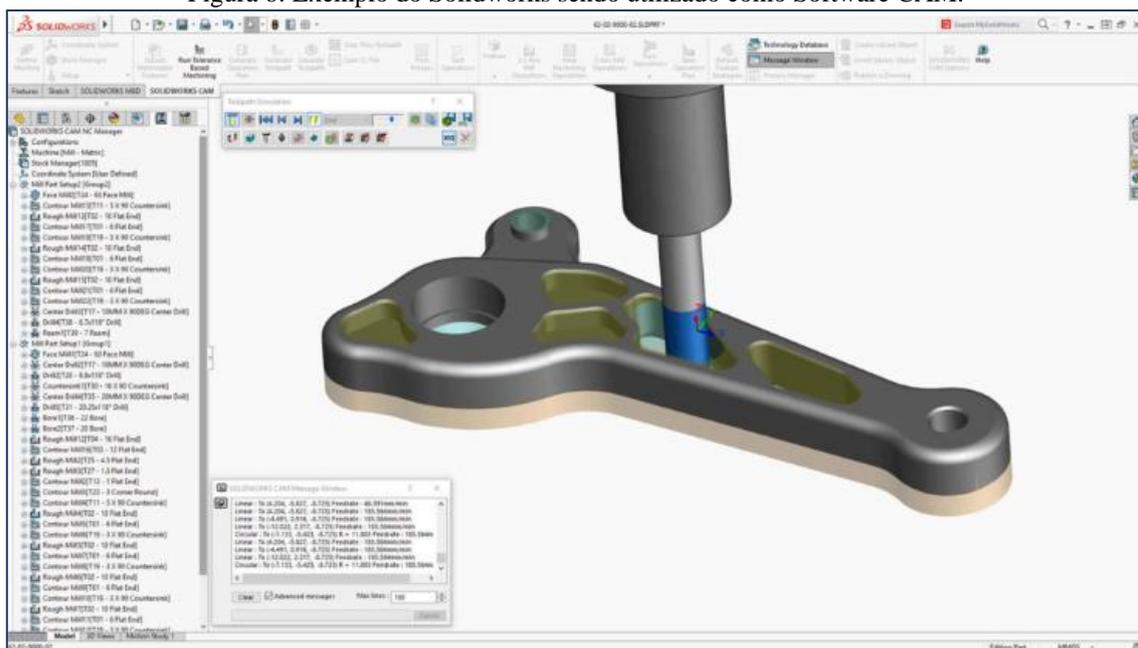


Fonte: <https://vfgengenharia.com/entenda-a-diferenca-entre-cad-cae-e-cam/>, (2024).

2.3.3 Fabricação Assistida por Computador (CAM)

O termo CAM, que vem de "Computer Aided Manufacturing" (Fabricação Assistida por Computador), refere-se à utilização de sistemas computacionais para controlar o processo de manufatura. O CAM surgiu como uma extensão do CAD, com o objetivo de melhorar a automação e a precisão na produção de peças e componentes conforme mostra a Figura 6.

Figura 6: Exemplo do Solidworks sendo utilizado como Software CAM.



Fonte: <https://vfgengenharia.com/entenda-a-diferenca-entre-cad-cae-e-cam/>, (2024).

2.4 PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Para que a integração CAD/CAE/CAM possa ser realizada, com uma análise completa do comportamento de peças projetadas em simulação, é preciso conhecer as principais propriedades mecânicas que podem interferir no desempenho das peças, conforme detalhadas a seguir.

2.4.1 Módulo de elasticidade (módulo de Young)

Mede a rigidez do material, indicando como este se comporta sob tensão. Essa propriedade expressa a relação entre a força aplicada por unidade de área e a deformação resultante no material, sendo representada em unidades de pressão, como N/m² (Pascal). Segundo Callister e Rethwisch (2014), o módulo de elasticidade permite avaliar a resistência do material à deformação elástica sob carga.

2.4.2 Limite de escoamento

Define a tensão máxima que um material pode suportar antes de começar a sofrer deformação plástica permanente. Quando um material possui um maior limite de escoamento, isso indica que ele pode suportar forças mais intensas sem se deformar de maneira irreversível, comparado a materiais com um limite de escoamento menor.

2.4.3 A resistência à tração e à compressão

São propriedades mecânicas que descrevem como um material responde a diferentes tipos de forças aplicadas. A resistência à tração refere-se à capacidade de um material suportar forças que tendem a esticá-lo ou alongá-lo, enquanto a resistência à compressão mede a capacidade do material de resistir a forças que tendem a compactá-lo ou a esmagá-lo.

2.4.4 Massa específica

Também conhecido como densidade. De acordo com Callister e Rethwisch (2014), uma massa específica maior pode significar que o material é mais robusto e oferece uma maior resistência a forças externas, o que é benéfico em aplicações estruturais onde a resistência e a durabilidade são importantes. Em contraste, materiais com menor massa específica são mais leves e, portanto, podem ser mais vantajosos em situações em que a redução de peso é importante, por exemplo em mecanismo e sistemas de acionamentos. Resistência a tração e compressão.

2.5 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS (RNA)

As redes neurais artificiais (RNAs) são sistemas computacionais inspirados na estrutura e no funcionamento do cérebro humano e consistem em camadas de neurônios artificiais interconectadas que processam informações por meio de algoritmos matemáticos. Cada conexão possui pesos convenientes, estes são calibrados durante uma etapa de treinamento, com a intenção de melhorar a capacidade de previsão ou classificação. As RNAs, como são chamadas as Redes Neurais Artificiais, são amplamente utilizadas em áreas como reconhecimento de padrões, processamento de imagens e tomada de decisões, permitindo avanços avançados em inteligência artificial, tendo seus algoritmos estruturados e desenvolvidos em diversos tipos de linguagens de programação (DataGeeks, 2023; CAPES, 2023).

No âmbito acadêmico e industrial brasileiro, as RNAs são ferramentas essenciais para solucionar problemas complexos envolvendo grandes volumes de dados. Em áreas como saúde e segurança, eles viabilizam diagnósticos mais precisos e sistemas de vigilância eficientes. Em áreas de pesquisa, permitem o aprendizado de situações complexas e são aplicadas principalmente para evitar falhas em processos. Além disso, tecnologias como backpropagation e regularização mitigam problemas de overfitting, o que permite maior robustez dos modelos desenvolvidos. O uso de RNAs exige grande capacidade computacional e um planejamento cuidadoso para evitar vieses ou erros de interpretação que melhorem sua eficácia (DataGeeks, 2023; CAPES, 2023).

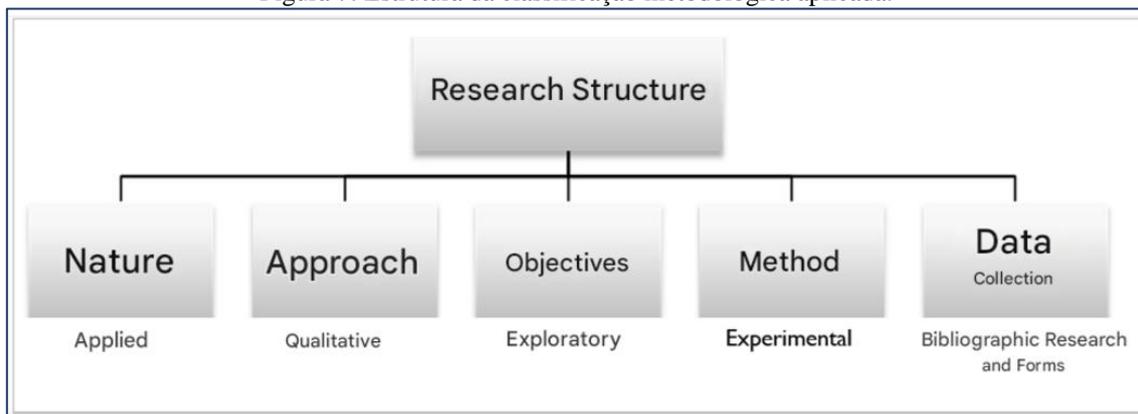
Apesar dos desafios, as RNAs representam um campo em expansão, com aplicação crescente no Brasil. Estudos e investimentos contínuos permitem o desenvolvimento de soluções mais acessíveis e eficazes. Um exemplo é a integração de redes neurais em sistemas industriais para prever falhas e melhorar processos produtivos, o que contribui para maior competitividade e inovação, principalmente quando integrado a outras tecnologias e indústria 4.0. Essa evolução destaca a relevância das RNAs não apenas como ferramentas técnicas, mas também como motores de transformação social e econômica (CAPES, 2023; DataGeeks, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de pesquisa adotada neste estudo baseia-se no desenvolvimento e análise do fluxo de etapas de fabricação do protótipo de uma peça mecânica, utilizando o processo de manufatura digital, da Indústria 4.0, com foco na Manufatura Aditiva (MA). Pretende-se modelar, simular, prototipar e comparar os resultados obtidos entre o processo de MA e o processo convencionais de manufatura por usinagem CNC. assim como investigar os benefícios e vantagens da utilização de softwares de modelagem e simulações (CAD/CAM/CAE).

O trabalho pode ser classificado como uma pesquisa de natureza aplicada, pois tem foco no uso em ambiente industrial, e com abordagem qualitativa; tem objetivos exploratórios, pois busca-se conhecer mais sobre a chamada manufatura digital e a manufatura aditiva. Com relação ao método de pesquisa, o trabalho tem caracterização de experimental, pois é baseado em experimentos de fabricação convencional e de fabricação por manufatura aditiva. E a coleta de dados será por meio do uso de formulários com resultados de observações dos experimentos e estudos documentais (Figura 7).

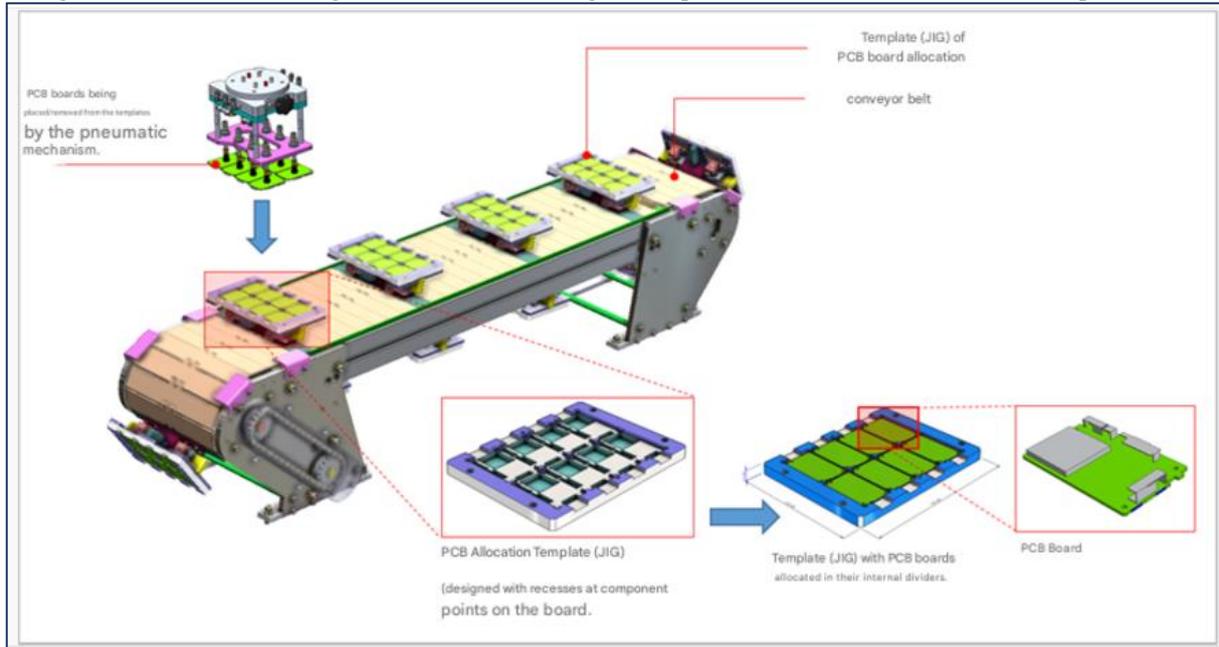
Figura 7: Estrutura da classificação metodológica aplicada.



Fonte: Autores, (2024).

A peça a ser prototipada pertence a um projeto de automação e P&D desenvolvido pelo Instituto IBBI, em parceria com uma empresa do Polo Industrial de Manaus. Esta peça será um gabarito (também chamado de JIG), com 08 divisórias internas, destinadas para a alocação de 08 (oito) placas de circuito impresso (PCB) em cada. Esse gabarito será montado sobre a estrutura móvel de uma esteira transportadora, sendo um total de 10 gabaritos montados nessa esteira, que será utilizada em uma linha de produção SMT automatizada, conforme indicado na Figura a seguir o detalhamento do gabarito e da montagem das placas PCB. Esta esteira transportadora, apresentará a função de transportar as placas PCB entre dois postos de trabalho, onde as placas PCB serão colocadas e retiradas por robôs industriais dotados de um sistema com ventosas pneumáticas, conforme indicado na Figura 8 o detalhamento do gabarito e da montagem das placas PCB.

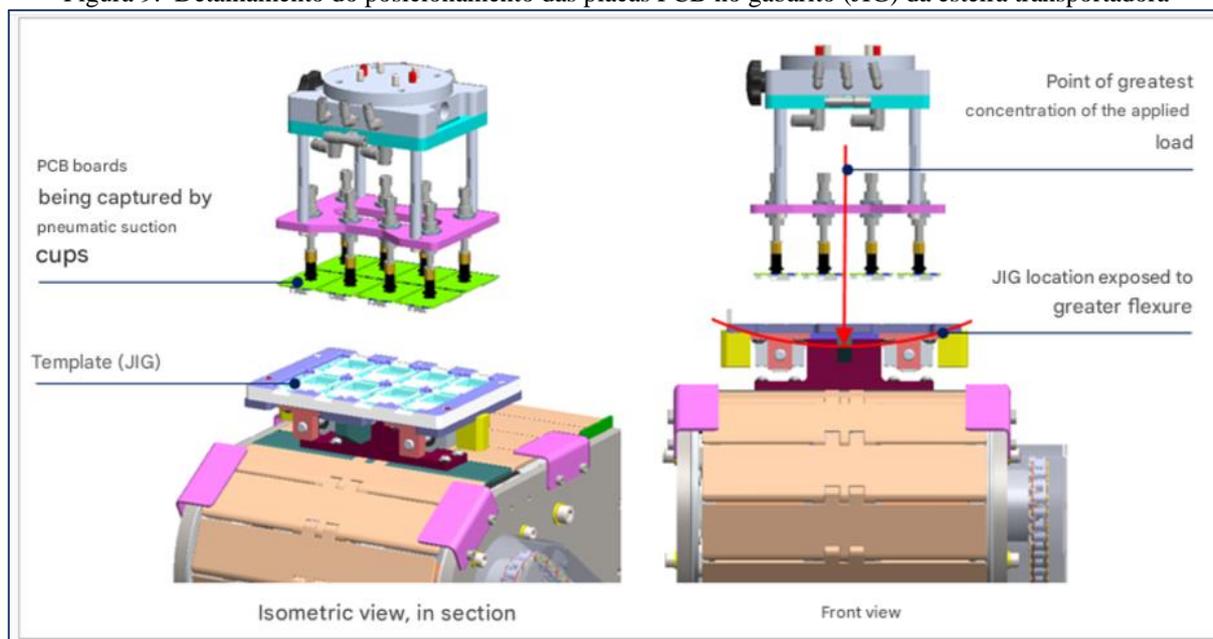
Figura 8: Detalhamento do gabarito (JIG) de montagem das placas PCB, item a ser desenvolvido pelo IBBI.



Fonte: Autores, (2024).

Na entrada da esteira, um robô industrial, dotado de uma garra com ventosas pneumáticas, posicionará as placas PCB dentro das divisórias do gabarito e ao final da esteira outro robô com sistema similar realizará a retirada das Placas PCB do gabarito e moverá para outra etapa do processo produtivo. O gabarito deverá ser fabricado em material que resista ao processo de movimentação contínua da esteira, e as constantes aplicações de cargas, proveniente da pressão exercida pelas ventosas nas garras dos robôs, na entrada e saída da esteira transportadora. Na Figura 9 é ilustrado os detalhes do posicionamento das placas PCB no gabarito (peça a ser desenvolvida e prototipada neste projeto), além de enfatizar o ponto de carga e a região que estará mais propícia a sofrer flexão, condição essa que deverá ser evitada, através de análises e simulações, seguido da escolha do melhor material e processo, com o auxílio de simulações por softwares e prototipação por MA.

Figura 9: Detalhamento do posicionamento das placas PCB no gabarito (JIG) da esteira transportadora



Fonte: Autores, (2024).

3.1 CONCEPÇÃO E REQUISITOS DA PEÇA A SER PROTOTIPADA

O produto (peça) foi desenhado inicialmente em CAD 3D, utilizando o software Solidworks®, e previamente projetado para assegurar as seguintes características abaixo, conforme análise do processo e definição do cliente, como requisitos do projeto.

- Apresentar resistência mecânica a cargas estáticas oriundas da pressão exercida pelas ventosas pneumáticas durante a alocação e retirada das placas PCB. Considerar carga máxima de 5N;
- Suportar temperaturas de trabalho até 80°C, próximo ao Servo motor e 50°C em contato com a PCB, já considerando uma larga tolerância de 20%;
- Suportar pressão de trabalho de 50Kgf ou 5N;
- A massa do gabarito (JIG) não deve ultrapassar 0,9 Kg, pois serão 10 JIGs montados na esteira (requisito do projeto, solicitado pelo cliente);

A primeira etapa consistiu na definição dos requisitos funcionais e de desempenho da peça (gabarito). A segunda etapa consistiu na seleção de alguns materiais aplicáveis à manufatura tradicional (subtrativa) e à aditiva, e que atendam total ou parcialmente as características supracitadas, e de disponibilidade comercial local de aquisição dos materiais e lista de materiais aprovados, para uso interno nas linhas de montagem do cliente.

Para a manufatura aditiva, selecionou-se os seguintes materiais, com base nas informações levantadas nos pré-requisitos da peça/protótipo: 1. Filamento de PLA (Ácido Polilático); 2. Filamento de PETG (Polietileno Tereftalato Glicol); 3. Filamento de PP (polipropileno). Para a manufatura

tradicional, selecionou-se os seguintes materiais, com base nas informações levantadas nos pré-requisitos da peça/protótipo; 1. Copolímero Acetal (POM); 2. Liga de Alumínio 1060; 3. Chapa de fenolite. Os equipamentos disponibilizados para utilização são: 1. Equipamentos e Ferramentas mecânicas, como paquímetro, fresa de bancada, furadeira /parafusadeira, brocas, parafusos, entre outros elementos de fixação; 2. Máquina CNC (Computer Numerical Control): Yamazak; 3. Impressora 3D: Creality Ender 3 V2®.

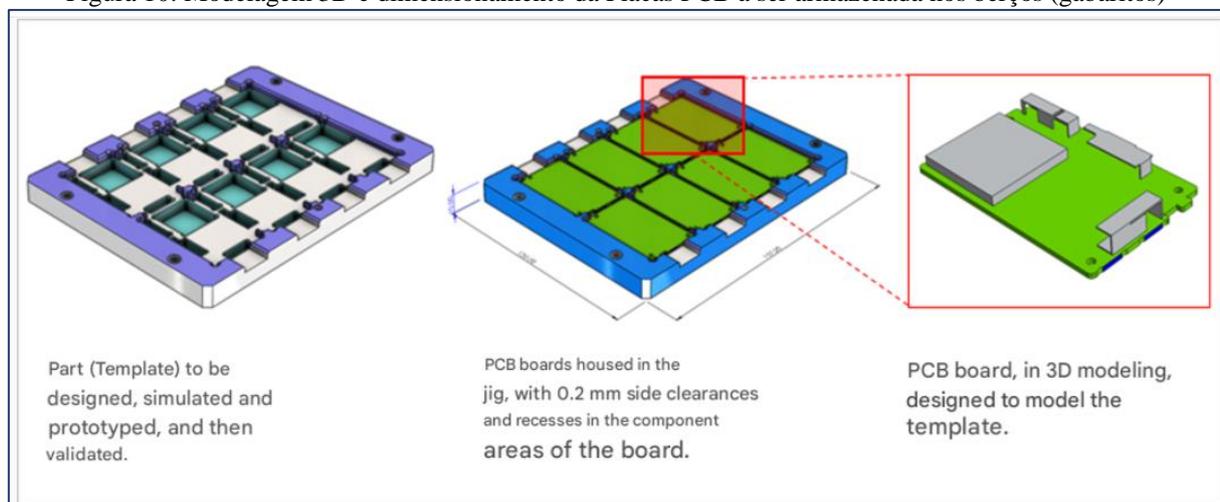
Softwares utilizados:

- **Solidworks 2022®**: Software com suporte a ferramentas CAD/CAM/CAE, empregado na modelagem 3D de projetos, simulações e manufatura.
- **FlashPrint 5®**: Software de impressão 3D, free e de código aberto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa entre os processos de Manufatura Aditiva e subtrativa, integrados com as ferramentas de modelagem 3D (CAD), simulações (CAM/CAE) e prototipagem, foram realizadas no contexto da Indústria 4.0, buscando identificar o método mais eficiente e adequado para a produção de um componente específico (Gabarito), conforme modelagem 3D ilustrada na Figura 10.

Figura 10: Modelagem 3D e dimensionamento da Placas PCB a ser armazenada nos berços (gabaritos)



Fonte: Autores, (2024).

4.1 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

As principais propriedades mecânicas avaliadas foram o módulo de elasticidade, limite de escoamento, resistência a tração, compressão e massa específica. Estas propriedades são disponibilizadas pelo software de modelagem e simulação, a partir da inserção das informações do tipo de material, tratamentos superficiais, desenho 3D da peça e outros dados disponíveis. Segundo a

Figura 11, entre os três materiais pré-selecionados, destinados à manufatura aditiva, o filamento que apresenta as melhores propriedades mecânicas foi o Filamento de PLA (ácido polilático), seguido pelo PETG (polietileno tereftalato de glicol). dentre os três materiais pré-selecionados, destinados a manufatura subtrativa ou convencional a chapa de Fenolite apresentou o melhor desempenho, seguida pela chapa de alumínio (liga comercial).

Figura 11: Comparação das principais propriedades mecânicas de alguns materiais utilizados no processo de manufatura aditiva e subtrativa

Mechanical properties	Unit	Additive Manufacturing (AM)			Subtractive manufacturing		
		PLA (Polylactic Acid) Filament	PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) Filament	Braskem PP (polypropylene) filament	Acetal Copolymer (POM)	1060 Aluminum Alloy	phenolite sheet
Elastic modulus:	$\times 10^9 \text{ N/m}^2$	3.5	2.1	1.6	2.7	6.9	10
Poisson's ratio:	N/A	0.36	0.38	0.42	0.35	0.33	0.35
Shear modulus:	$\times 10^9 \text{ N/m}^2$	1.2	0.8	0.6	1	26	4.1
Specific mass:	Kg/m^3	1250	1270	900	1410	2700	1350
Tensile strength:	$\times 10^6 \text{ N/m}^2$	60	50	30	70	110	70
Compression resistance:	$\times 10^6 \text{ N/m}^2$	60	50	30	70	110	180
Yield limit:	$\times 10^6 \text{ N/m}^2$	48	45	25	50	40	55
Thermal expansion coefficient:	$1 \times 10^{-6}/\text{K}$	68	75	100	80	24	20
Thermal conductivity:	$\text{W}/(\text{m.K})$	0.13	0.22	0.22	0.3	237	0.2
Specific heat:	$\text{J}/(\text{Kg.K})$	1800	1200	2000	1500	900	1300

Caption:

- Better mechanical properties, by material type.
- Best material, by manufacturing type (additive and subtractive)

Fonte: Autores, (2024).

A escolha do material depende, além da análise das propriedades mecânicas, da aplicação a qual será destinada. Um material pode ter características mecânicas inferiores a outros, porém atendem a outros requisitos importantes e mostram-se economicamente mais viáveis, apresentar maior facilidade de manufatura, armazenamento, transporte etc.

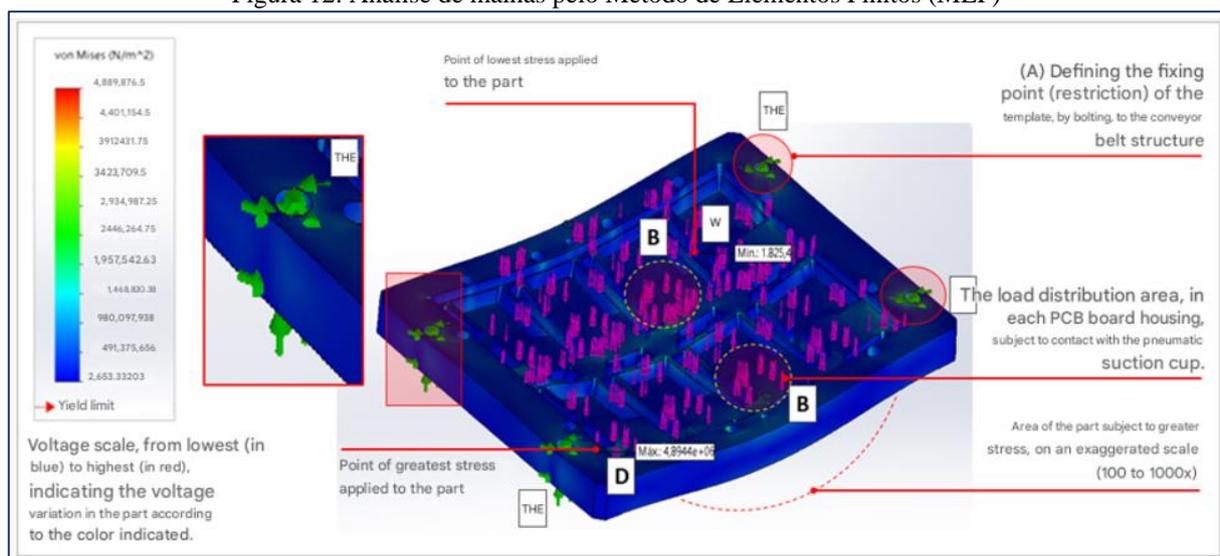
4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÕES: ANÁLISE DE MALHAS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Na análise de elementos finitos (FEA) realizada no Solidworks® ou em outros softwares de simulação, três dos principais resultados obtidos são a tensão de Von Mises, o deslocamento e a deformação. Esses três resultados formam a base da avaliação de uma análise de elementos finitos, permitindo prever o comportamento da peça ou estrutura em condições reais de operação.

Durante a etapa de preparação do ambiente de simulação, precisa-se definir o tipo de simulação, tipo carga aplicada (força ou pressão), ponto ou área de aplicação e os pontos ou áreas de fixação da peça e tipo de fixação, para então gerar as malhas e realizar a simulação pelo método de elementos finitos. Para este estudo, foi selecionado a simulação de análise estática, e um carregamento de força igual a 50N, sobre toda a superfície de contato da placa PCB com o gabarito (berço), área que receberá a carga oriunda da pressão exercida pelo contato da ventosa de sucção pneumática com a placa PCB. É de conhecimento que a pressão real do contato da ventosa de sucção com a placa PCB é muito inferior, porém foi definido pelo cliente pela aplicação este valor para simular uma condição extrapolada (exagerada) e assim obter resultados melhores, uma vez que é possível evidenciar melhor a distinção de resultados entre os diferentes materiais. O próximo passo foi definir os pontos de fixação (engastamento) da peça, e os acessórios de fixação, parafusos métricos do tipo Allen cabeça cilíndrica M5 e arruelas lisa, para então gerar as malhas e plotar os valores da simulação

Após a definição dos parâmetros de entrada, são então geradas as malhas para a peça em estudo, assim como plotados os gráficos e tabelas com os dados de tensão deformação e deslocamento máximos e mínimos, tipo de malha, tamanho de elementos, tamanho de nós, tempo de simulação, entre outros. A Figura 12 exemplifica uma análise pelo MEF, com destaque para a Tensão de Von Misses a que cada elemento é submetido, o deslocamento de cada nó e a deformação em cada elemento.

Figura 12: Análise de malhas pelo Método de Elementos Finitos (MEF)



Fonte: Autores, (2024).

As simulações realizadas foram úteis, pois informam, de forma estimada, os pontos em que a peça está mais sujeita a danos por fadiga e stress e propensa a colapsar ou sofrer algum dano ou desgaste excessivo e mais rápido. Os dados obtidos norteiam a escolha do melhor material ou a tomada de decisão referente a relação custo x benefício do material a utilizar, método de fabricação e correções do design, com a adição ou remoção de material, pontos de alívio, chanfros etc. A Figura 13 apresenta os dados sumarizados, da simulação pelo MEF, aplicado aos materiais selecionados o processo de manufatura aditiva e subtrativa.

Figura 13: Tópicos de análise pelo MEF, aplicados aos materiais destinados a manufatura aditiva.

Topics for analysis by MEF		Unit	Additive Manufacturing (AM)			Subtractive manufacturing	
			PLA (Polylactic Acid) Filament	PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) Filament	PP (polypropylene) filament	Acetal Copolymer (POM)	1060 Aluminum Alloy
Strengths	Resultant force	N	50 N			50	
Volumetric properties	Mass	kg	0.14317	0.14546	0.10308	0.15920	0.15462
	Density	Kg/m ³	0,00011	0,00011	0.00011	0.00011	0,00011
	Weight	N	1,40302	1,4255	1.01018	1.56016	1.51526
von Mises voltage	Von Mises stress max.	N/m ²	4889876.5	4893539	4899759.5	4894369.5	4888347.5
	Von Mises stress min.	N/m ²	2653.33	1855.98	1999.13	1825.41	2687.39
	Yield limit	N/m ²	48000000	45000000	25000000	50000000	55000000
	Percentage yield limit	N/m ²	10%	11%	20%	10%	#DIV/0!
Resulting displacement	Max displacement.	mm	0.079031	0.131317	0.170965	0.105956	0.027697 0
	Min displacement.	mm	0	0	0	0	
Equivalent Deformation	Max. deformation (mm)	mm	0.00086	0.00146	0.00197	0.00183	0,00030
	Max. deformation (mm)	mm	4,032E-07	7,461E-07	1,447E-06	6,430E-07	1,416E-07

Caption:
 Better mechanical properties, by material type.
 Best material, by manufacturing type (additive and subtractive)

Fonte: Autores, (2024).

Entre os materiais utilizados na manufatura subtrativa (convencional), a peça fabricada em fenolite apresentou o melhor desempenho, com a menor tensão resultante, deslocamento e deformação, o que indica maior resistência mecânica e estabilidade dimensional para aplicações que envolvem processos de usinagem. Para a manufatura aditiva (impressão 3D), o PLA se destacou como o material que apresentou os menores valores de tensão resultante, deslocamento e deformação. Esses resultados sugerem que o PLA é um material adequado para impressão 3D em cenários que demandam uma menor suscetibilidade a deformações e tensões.

De maneira geral, considerando todos os materiais avaliados nas duas abordagens de manufatura, o fenolite demonstrou, em média, os melhores resultados. Ele exibiu uma combinação superior de propriedades mecânicas, tornando-se uma escolha ideal para projetos que requerem alta estabilidade sob cargas e variações dimensionais mínimas.

Os dados obtidos por meio das simulações realizadas no software devem ser organizados, de forma manual ou automatizada, em um arquivo no formato .xlsx. O algoritmo projetado para essa aplicação acessará as informações diretamente desse arquivo, que, para fins de padronização, será salvo como "materiais.xlsx". Após o processamento, o algoritmo consolidará os resultados e gerará uma nova planilha, renomeada como "classificação_material_resultado.xlsx", armazenada no mesmo diretório do arquivo original.

A planilha gerada apresentará os dados detalhados de forma estruturada e destacará o material mais adequado com base nas propriedades mecânicas avaliadas. Além disso, os resultados também serão exibidos diretamente na interface do compilador da linguagem Python, fornecendo uma visualização imediata e complementar dos dados que foram processados. Essa abordagem não apenas facilita o gerenciamento e a análise dos dados, como também automatiza etapas do processo, reduzindo o risco de erros manuais e agilizando a identificação do material ideal, para a aplicação em questão.

Tabela 1: Planilha gerada a partir do algoritmo programado em Python, com a identificação do melhor material para manufatura, a partir das suas propriedades mecânicas

Unnamed: 0	Max elastic modulus	Max Yield Limit	Max tensile strength	Max Resistance	the compression	Max Specific Heat	Highest Repetition
PLA Filament	0.0028	0.0384	0.048	0.048	0.048	1.44	
PETG Filament	0.001653543	0.035433071	0.039370079	0.039370079	0.039370079	0.94488189	
PP Filament	0.001777778	0.027777778	0.033333333	0.033333333	0.033333333	2.22222222	
POM polyacetal	0.001914894	0.035460993	0.04964539	0.04964539	0.04964539	1.063829787	
Aluminum Alloy 1060	0.002555556	0.014814815	0.040740741	0.040740741	0.040740741	0.333333333	
Fenolite	0.008	0.044	0.056	0.144	0.144	1.04	Fenolite

Fonte: Autores, (2024).

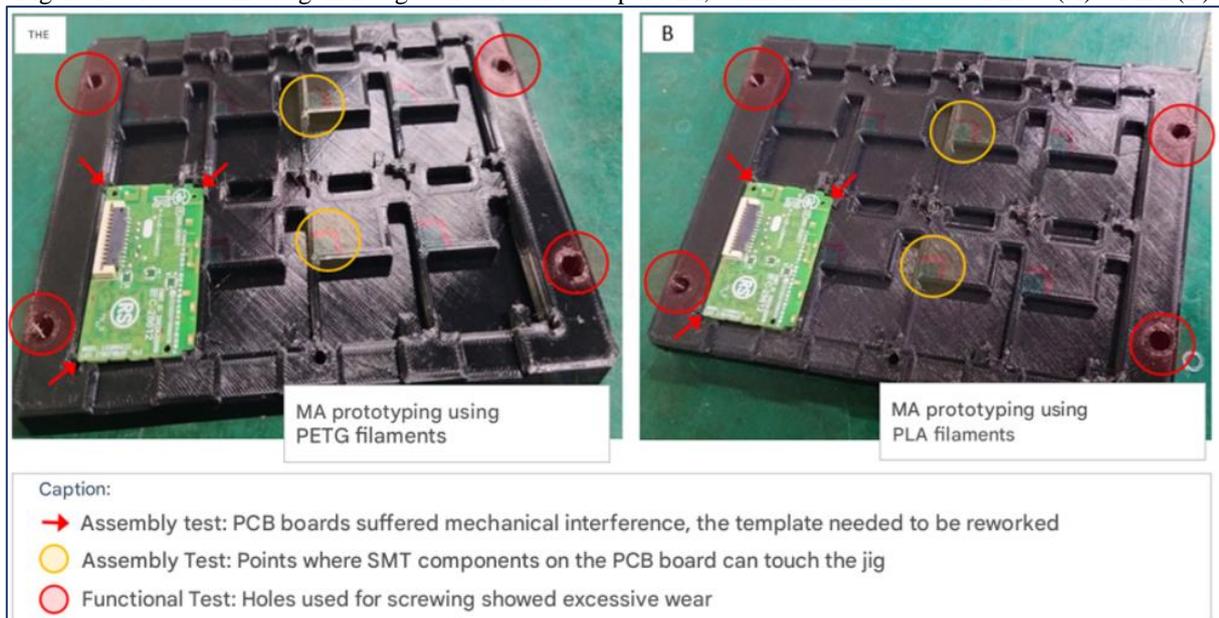
4.4 PROTOTIPAÇÃO COM MANUFATURA ADITIVA

Com relação às propriedades dos materiais utilizados, os protótipos foram fabricados por meio de impressão 3D com os filamentos de PLA (ácido polilático) e PETG (polietileno tereftalato glicol). A escolha desses materiais se deu após análises preliminares por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), nas quais o filamento de polipropileno (PP) não apresentou desempenho satisfatório quando comparado aos outros materiais avaliados. Após a impressão, os protótipos foram submetidos a uma série de testes de montagem, com o objetivo de verificar sua viabilidade e adequação ao ambiente operacional proposto.

Os resultados indicaram que tanto o PLA quanto o PETG apresentaram problemas relacionados à precisão dimensional, a alocação das placas PCB ocorreu com interferências mecânicas, porém no desenho do projeto, um gap de 0,2 mm com tolerância simétrica de 0,05 mm deveria ser respeitado. Ambos os materiais demonstraram limitações em termos de resistência

mecânica nas condições de montagem e operação contínua, além de ter sido observado desgaste nos pontos de aparafusamento do gabarito na esteira transportadora, após finalizado os testes, onde se aplicou um torque específico e realizou-se o processo de aparafusamento e desparafusamento de 10 a 20 vezes, conforme os parâmetros especificados pela tabela de torque de parafusos Carlsson, e seguidos como norma interna do cliente de acordo com a Figura 15.

Figura 15: Teste de montagem nos gabaritos fabricados por MA, utilizando filamentos de PETG (A) e PLA (B)



Fonte: Autores, (2024).

Apesar das falhas e melhorias apontadas ao longo do processo, os gabaritos fabricados em PLA e PETG apresentaram desempenho satisfatório nos testes funcionais realizados em uma esteira transportadora de teste. Os protótipos não sofreram colapsos, desgastes físicos significativos, variações dimensionais ou quaisquer danos que comprometessem sua funcionalidade. Durante os testes e ensaios de fadiga, a esteira foi configurada para simular as condições operacionais reais, com ciclos de movimentação e parada a cada 5 segundos, incluindo movimentos de avanço e recuo contínuos. Esses ciclos foram mantidos por um período de 8 horas diárias, ao longo de 30 dias. Os resultados sugerem que os gabaritos são adequados para uso, suportando os rigores operacionais sem perda de integridade estrutural.

4.5 PROTOTIPAÇÃO COM MANUFATURA SUBTRATIVA (USINAGEM / TRADICIONAL)

Com relação às propriedades dos materiais utilizados, os protótipos foram fabricados por usinagem CNC, utilizando como matéria prima uma amostra de chapa de Fenolite (e Alumínio).

Após a usinagem, os protótipos foram submetidos a uma série de testes de montagem, com o objetivo de verificar sua viabilidade e adequação ao ambiente operacional proposto.

Ao contrário das peças prototipada por manufatura aditiva, o processo de manufatura subtrativa (usinagem por CNC) exige um uma etapa de preparo da matéria prima, uma vez que se faz necessário cortar uma amostra das chapas, em tamanho específico da mesa de usinagem, realizar a limpeza das superfícies e abrir furos para a fixação da amostra da chapa a mesa de usinagem.

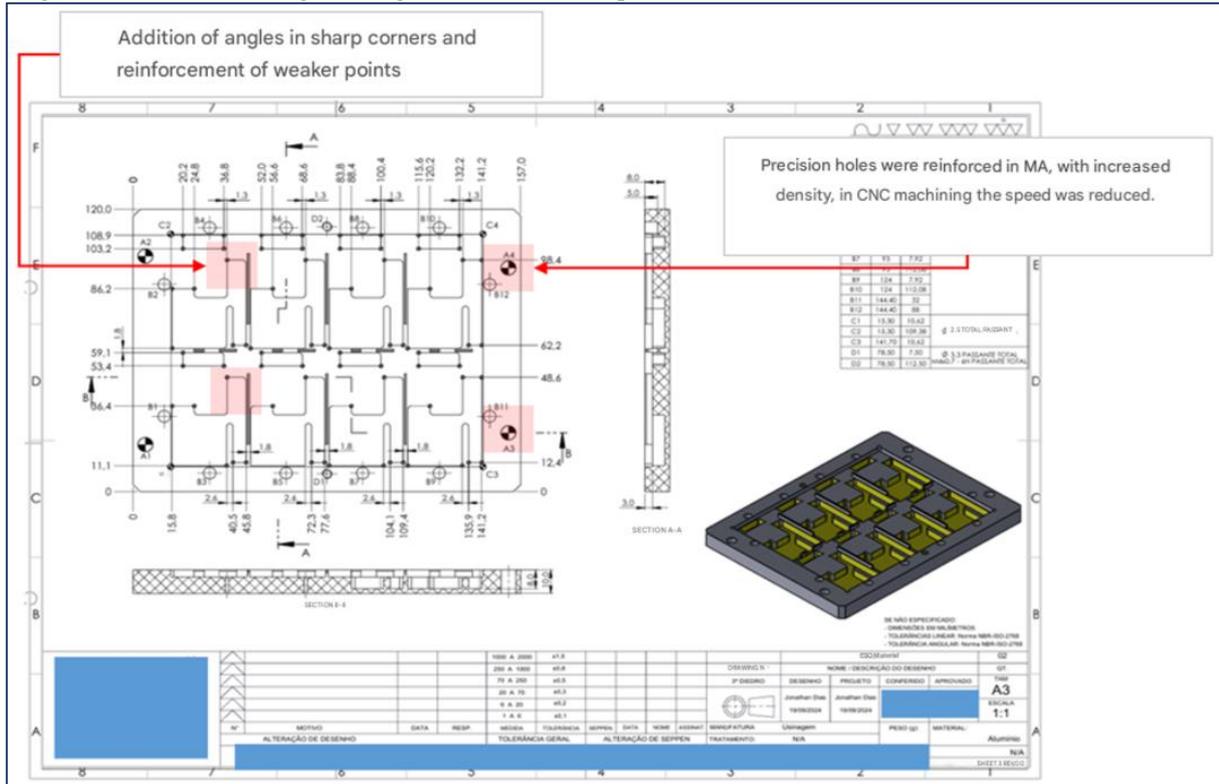
Após finalizada a usinagem, realizada a inspeção visual e dimensional das principais cotas de montagem da peça e realização dos ensaios de montagem e fadiga mecânica, os resultados indicaram a placa de fenolite e alumínio não apresentaram problemas relacionados à precisão dimensional. ambos os materiais não demonstraram limitações significativas em termos de resistência mecânica nas condições de montagem e operação contínua. Também foi observado leve desgaste nos pontos de aparafusamento do gabarito na esteira transportadora, após os ensaios de fadiga, em que se aplicou um torque específico e realizou-se o processo de aparafusamento e desaparafusamento de 10 a 20 vezes, conforme os parâmetros especificados pela tabela de torque de parafusos Carlsson, porém sem causar dano estrutural na peça (protótipo).

A prototipagem por manufatura subtrativa (usinagem CNC) se destaca por proporcionar uma melhor precisão das peças produzidas e um tempo menor de fabricação das amostras, melhor acabamento superficial, porém como pontos negativos precisam ser citados o tempo de preparo das amostras e o custo na fabricação de novas amostras, em caso de falhas e pontos de melhorias. Após testes iniciais, novas peças foram confeccionadas e os pontos de não *conformidade foram corrigidos*.

4.6 DESENHO MECÂNICO 3D REVISADO

Após finalizado os ajustes e correções no desenho 3D, foi gerado, para fins de registro de documentação, o desenho técnico 2D, detalhado conforme as normas técnicas ABNT NBR para desenho técnico.

Figura 13: Teste de montagem nos gabaritos fabricados por MA, utilizando filamentos de PETG (A) e PLA (B)



Fonte: Autores, (2024).

4.7 ANÁLISE DE CUSTOS

Para uma análise abrangente de custos no processo de manufatura, foram consideradas diversas variáveis fundamentais, tais como as características do produto, material e equipamentos e a mão de obra. Na Tabela 2, são apresentados os dados obtidos a partir de análises realizadas durante a modelagem 3D e simulações do processo de manufatura (CAM), possibilitando a comparação entre a massa inicial do material bruto e a massa final do produto acabado, após o processo de manufatura. Para a manufatura aditiva (MA), o percentual de perdas foi de aproximadamente 15% do material, enquanto na usinagem CNC verificou-se um índice de perdas significativamente maior, de 162%. Essa diferença destaca a eficiência de material da manufatura aditiva em comparação aos métodos convencionais de usinagem, tornando-a uma opção mais sustentável em termos de consumo de material e geração de resíduos.

Tabela 2: Perdas de matéria prima pelos processos de manufatura aditiva (FDM) x convencional (CNC).

Additive Manufacturing (FDM)						
	Density	Initial Volume	Volume Final	Starting Dough	Final dough	Losses (Mass)
PLA	1250	0.000132	0.000115	0.164594	0.1432	-15%
PETG	1270	0.000132	0.000115	0.167227	0.1455	-15%
PP	900	0.000132	0.000115	0.118508	0.1031	-15%

Conventional Manufacturing (CNC)						
	Density	Initial Volume	Volume Final	Starting Dough	Final dough	Losses (Mass)
POM	1390	0.0003	0.000115	0.417	0.1592	-162%
Al.1060	2600	0.0003	0.000115	0.78	0.2977	-162%
Fenolite	1350	0.0003	0.000115	0.405	0.1546	-162%

Fonte: Autores, (2024).

Com base nas informações coletadas, estimou-se o custo monetário total (em reais) para a produção do protótipo de um gabarito, levando em consideração fatores determinantes como o tempo de fabricação, a natureza do item (se protótipo/customização ou produção em massa), tipo e custo de matéria-prima, e o custo de mão de obra, direta e indireta. Esses elementos foram quantificados e apresentados na Tabela 3.

Tabela 13: (R\$) Custos de fabricação do protótipo, pelos processos de MA (FDM) x convencional (CNC)

Item Term		CNC Phenonite	MA (FDM) PLA	Definition
Product	m	0.405	0.154594	Total mass used in the part process (Kg)
	m	0.1546	0.1432	Useful mass of the part (discarding supports, scraps...) (Kg)
	h	4	5.5	Construction time (hour)
	N	1	1	Number of pieces to be made
	(Ti)	2	1.5	Labor time on part (hours)
Material and equipment	m	R\$ 100.000,00	R\$ 1.800,00	Machinery purchase price
	cm	R\$ 300,00	R\$ 146,10	Material price (R\$/kg)
	Fatigue	0.95	0.95	tolerance/fatigue factor
	Hours	10	10	Daily hours (average)
	Days	20	20	Monthly days (average)
	Months	12	12	Months per year (average)
work	Life	15	5	years of life, for good maintenance
	(TP)	180	180	Monthly labor time (hours)
	(Rm)	R\$ 9.000,00	R\$ 4.000,00	Monthly remuneration
	(Nm)	2	3	Number of machines per employee
Hand Parameters calculations auxiliaries	Yvida	36000	12000	Usage hours or lifetime (h)
	CoS	R\$ 2,78	R\$ 0,15	Operating rate (R\$/hour)
	Kr	0.62	0.13	Recycling factor
	Ks	1.62	1.13	Support material factor
	CL	R\$ 25,00	R\$ 7,41	Labor rate (R\$/hour)
Cost items and general costs	P5	R\$ 11,70	R\$ 0,87	Machinery purchase cost
	O5	R\$ 1.011,11	R\$ 275,83	Cost of operating the machinery
	M	R\$ 6961	R\$ 4,61	Raw material cost (estimated)
	L	R\$ 50,00	R\$ 11,11	Labor cost
	CMA	R\$ 1.142,41	R\$ 292,41	General manufacturing cost - (with good maintenance)

Fonte: Autores, (2024).

De acordo com os dados da Tabela 4.4, o custo de produção do protótipo de gabarito pelo método convencional foi 74% superior ao custo obtido utilizando a manufatura digital, evidenciando a viabilidade econômica da manufatura aditiva. Contudo, é importante ponderar fatores adicionais que podem influenciar essa análise, como o fato de se tratar de um processo de prototipagem, a natureza diferenciada dos materiais empregados em cada método e outros fatores que podem impactar os custos, como a escala de produção e a complexidade da peça.

Essas considerações são fundamentais para uma análise equilibrada dos custos e das vantagens associadas a cada método de manufatura, auxiliando na escolha do processo mais adequado para cada contexto de produção. Sob a perspectiva das propriedades mecânicas, dos custos envolvidos e da facilidade de fabricação, o estudo evidenciou diferenças entre os processos de produção aditiva (MA) e os métodos de fabricação subtrativa, com o uso de CNC. Para aplicações que envolvem customização ou prototipagem, nas quais não se requer uma produção em escala industrial, o processo de produção aditiva apresentou melhor desempenho, que incluíram uma redução expressiva nos custos associados à mão de obra, matéria-prima e maquinário. Enquanto a produção convencional exige operações especializadas e infraestrutura fabril robusta, a produção aditiva requer menor área física, equipamentos de menor custo e operadores com níveis de qualificação técnica menos elevados, o que reflete orientações econômicas do processo. Ainda no contexto da prototipagem e da customização, quando integrados ao desenvolvimento de um projeto de produto, a fabricação aditiva apresentou benefícios adicionais. Dentre eles, destaca-se a redução significativa no tempo necessário para a conclusão da curva de desenvolvimento, a simplificação de etapas do projeto e a possibilidade de obter feedbacks mais rápidos e precisos durante o processo de design e validação. Essas vantagens são particularmente relevantes para cenários que exigem alta flexibilidade e agilidade, reforçando o potencial da MA como uma solução estratégica em projetos de baixa escala e elevada complexidade.

No entanto, no que tange à qualidade da fabricação, o método de produção aditiva FDM (Fused Deposition Modeling) apresentou limitações quando comparado ao processo de usinagem convencional. A usinagem obteve maior precisão dimensional e melhores acabamentos superficiais, características importantes em aplicações que exigem tolerâncias rigorosas e superfícies altamente refinadas. Embora existam tecnologias de produção aditivas capazes de atingir níveis elevados de qualidade, essas não foram objeto de estudo neste trabalho, ficando restritas às menções gerais. Em relação às propriedades mecânicas dos materiais usados, verificamos que os materiais usados na fabricação subtrativa convencional ainda apresentam desempenho superior em termos de resistência e durabilidade. No entanto, ao comparar as propriedades dos materiais com os requisitos específicos da proposta de aplicação, foi observado que ambos os processos são tecnicamente viáveis e atendem a critérios específicos. Assim, a escolha do processo pode ser feita com base em outros fatores, como custo, tempo e flexibilidade, sem comprometer o desempenho funcional do produto final.

5 CONCLUSÕES

A integração das tecnologias da Indústria 4.0 à fabricação digital e convencional fornece maior precisão na modelagem 3D e na prototipagem, o que permite ajustes contínuos em tempo real, simulações preditivas e monitoramento de processos. A combinação dos softwares CAD, CAM e CAE cria um ecossistema de produção digitalizado e otimizado, resultando em projetos mais precisos, processos de fabricação com menor incidência de falhas e validações estruturais que reduzem custos, aumentam a qualidade e minimizam os impactos ambientais, o que contribui para elevar a competitividade e sustentabilidade das empresas. Apesar dos desafios de implementação, como custos elevados e requalificação da força de trabalho, os benefícios da Indústria 4.0, como a maior eficiência, flexibilidade, sustentabilidade e suporte à tomada de decisão, tornam-na essencial para atender às demandas de um mercado cada vez mais competitivo. Comparando a fabricação convencional (usinagem CNC) e digital (fabricação aditiva, com ênfase ao processo FDM), observa-se que a usinagem é mais adequada para aplicações que exigem maior precisão e resistência mecânica. Por outro lado, a produção aditiva mostrou vantagens significativas na produção de protótipos funcionais e customizações, devido à sua flexibilidade e redução de custos. A integração CAD/CAM/CAE no contexto da Indústria 4.0 facilita a otimização de projetos e processos produtivos, o que permite ajustes rápidos no projeto e avaliação do desempenho estrutural antes da fabricação, orientando decisões como seleção de materiais e modificações de projeto. Os resultados indicam que a escolha do método de fabricação e material deve considerar os critérios de aplicação e condições operacionais. A fabricação aditiva, embora limitada em resistência mecânica quando comparada à usinagem tradicional, apresenta vantagens em rapidez e facilidade para adaptações e prototipagem. Pesquisas futuras podem incluir testes de longa duração para validar o desempenho em operação e o desenvolvimento de ferramentas de tomada de decisão integradas aos softwares CAD/CAE/CAM, considerando custos, propriedades mecânicas e dimensionais com base em simulações realizadas.

REFERÊNCIAS

- Additive Manufacturing Technology Standards ASTM F2792.
- ALMEIDA, JRA Manufatura digital e seus impactos na indústria moderna. São Paulo: Editora Técnica, 2019.
- CALLISTER, WD; RETHWISCH, DG Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Wiley, 2014.
- CAPES. Redes Neurais Artificiais: uma abordagem para sala de aula. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br>. Acesso em: 28 nov. 2024.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. 2024. Disponível em: <https://firjan.com.br/pagina-inicial.htm>. Acesso em: 28 nov. 2024.
- DADOS. Redes Neurais: desvendando o cérebro artificial. Disponível em: <https://www.datageeks.com.br>. Acesso em: 28 nov. 2024.
- GAO, W. et al. O status, os desafios e o futuro da produção aditiva na engenharia. Design Assistido por Computador, v. 69, p. 65-89, 2015.
- NASCIMENTO, JL Propriedades mecânicas de polímeros na produção aditiva. Revista Brasileira de Engenharia de Materiais, v. 3, pág. 245-253, 2016.
- RÜßMANN, M. et al. Indústria 4.0: O Futuro da Produtividade e do Crescimento nas Indústrias de Manufatura. BCG Publicações, 2015.
- SILVA, M. F.; ANDRADE, PL Indústria 4.0: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Editora ABC, 2020.
- VOLPATO, N. Manual de impressão 3D: tecnologias e aplicações. 1.ed. São Paulo: Elsevier, 2017.
- Norma ISO/ASTM 52900:2015.

INTEGRAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS AUTÔNOMOS (AMRs) COM LiDAR E CONECTIVIDADE 5G: UM ESTUDO SOBRE APLICAÇÕES EM AMBIENTES HOSPITALARES

  10.56238/livrosindi202506-008

Eng. Wesley Muller Costa Nunes

Bacharel em Sistemas de Informação

Estudante do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Processos, Sistemas e Gestão Ambiental no Instituto Galileo de Tecnologia e Educação da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) - AM – BRASIL

E-mail: miiller.nunes.wm@gmail.com

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Débora Cristina Alavarce

Doutora em Enfermagem

Professora do Curso de Graduação em Medicina pela Universidade de São Caetano do Sul – SP - BRASIL

ORCID: 0000-0003-0585-3283

E-mail: debora@hipocampus.com.br

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica

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

ORCID: 0000-0001-5477-6953

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

RESUMO

A integração de Robôs Móveis Autônomos (AMRs) com tecnologia LiDAR e conectividade 5G apresenta um potencial transformador para ambientes hospitalares. Este estudo avalia o desempenho dessas tecnologias em métricas críticas como latência, taxa de transferência, confiabilidade e tempo de reação, com ênfase em sua aplicação na automação de tarefas logísticas, como o transporte de materiais médicos. Os resultados indicam que redes 5G superam o WiFi em termos de baixa latência, alta taxa de transferência e consistência de desempenho, tornando-as ideais para aplicações em tempo real. Além disso, a tecnologia LiDAR aprimora a navegação dos AMRs, fornecendo mapeamento tridimensional preciso em ambientes dinâmicos. Apesar dos avanços técnicos promissores, desafios permanecem, incluindo os custos de infraestrutura, a interoperabilidade e preocupações com cibersegurança. Os achados destacam a necessidade de abordagens multidisciplinares para superar essas barreiras e abrir caminho para soluções inovadoras na área da saúde. Esta pesquisa contribui para o crescente conhecimento sobre as aplicações da Indústria 4.0 no setor de saúde, visando melhorar a eficiência, a segurança e a qualidade do atendimento ao paciente.

Palavras-chave: Robôs Móveis Autônomos (AMRs), Tecnologia LiDAR, Conectividade 5G, Automação Hospitalar, Indústria 4.0

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica associada à Quarta Revolução Industrial tem o potencial de transformar radicalmente os padrões de trabalhos dos mais diversos setores da atividade humana. No setor de cuidados em saúde (Saúde), onde a demanda por profissionais cresce continuamente com o envelhecimento das populações, a integração destas tecnologias avançadas, como Robôs Móveis Autônomos (AMRs), LiDAR e conectividade 5G, pode ser um dos componentes chaves para equilibrar a operação ambulatorial e hospitalar, em termos das demandas de eficiência e eficácia (SAHU et al., 2024) e (GUSTAVSSON, 2021). Em ambientes complexos como hospitais, onde precisão, segurança e eficiência são essenciais, essas tecnologias podem oferecer suporte significativo para tarefas rotineiras, ao mesmo tempo que aliviam as equipes de saúde de atividades repetitivas e potencialmente arriscadas, como o transporte de medicamentos e amostras laboratoriais. A automação neste nível não apenas promete ganhos de eficiência, mas também pode promover ambientes mais seguros para profissionais e pacientes, (WEI, 2023) e (GIUFFRIDA & MARTINA, 2023)

Os AMRs, dotados de sensores LiDAR, podem navegar de forma autônoma e adaptável em qualquer ambiente de fluxo dinâmico e de geometria complexa, ajustando-se a mudanças no ambiente, como hospitais e ambulatorios, em tempo real. Essa capacidade é crucial, porque ambientes dinâmicos exigem navegação precisa para evitar acidentes e garantir o cumprimento de tarefas em tempos efetivos. Os Sensores LiDAR trazem a capacidade de criação de mapas tridimensionais que facilitam a navegação segura e eficiente, antecipando e evitando obstáculos com segurança.

Comparados a outras tecnologias de detecção, como câmeras, os sensores LiDAR apresentam melhores condições de desempenho em condições de pouca luz e podem mapear objetos em 360 graus ao seu redor. Este conjunto, desta forma, torna a operação autônoma possível porque diminui a necessidade de troca de pacotes de dados extensos relacionados à interpretação de imagens, porque ajuda na diminuição dos tempos de respostas, perdas de pacotes de dados e sobretudo o custo de infraestrutura de redes e computação. Isto favorece a progressão do desenvolvimento e implementação desta tecnologia em situações de restrição orçamentária.

Neste contexto, a conectividade 5G Indoor é fundamental para tornar mais eficiente a operação dos AMRs em ambientes dinâmicos, como os hospitalares, porque habilita a comunicação de baixa latência nas redes onde estão inseridos e a capacidade de transacionar pacotes de dados extensos com segurança. Esses atributos são pré-requisitos para garantir que as interações entre dispositivos e sistemas de controle sejam rápidas e confiáveis (SIDDIQI & JOUNG, 2019) e (SEFATI & SIMONA).

Nos ambientes internos onde há a infraestrutura o 5G os dados são transmitidos praticamente em tempo real, isto traz a capacidade aos AMRs de responder quase imediatamente a comandos e evitem obstáculos dinâmicos: fluxo de pessoas e objetos, reconfigurações de ambientes, mudanças de trajetos etc. Esta agilidade é fundamental para operação no trabalho de ambulatórios e hospitais, porque eventos graves podem surgir por atrasos de comunicação, ou acidentes de percurso, que atrasem a entrega, por exemplo, a entrega de um medicamento.

É importante lembrar que a operação neste nível de AMRs em ambientes hospitalares está longe de ser possível, mas estamos aqui dando os passos de aprendizagem estruturais para que isso seja uma alternativa possível, em breve, como alternativa para diminuir o custo de suas operações com a automação do trabalho repetitivo dos profissionais de saúde (AKBARZADEH & HANI, 2022) e (KHAN & MIR, 2023).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Apesar do alto potencial tecnológico e de implementação, a integração de AMRs, LiDAR e 5G Indoor em uma solução efetiva para ambientes ambulatoriais e hospitalares ainda tem que enfrentar desafios significativos: interoperabilidade entre sistemas, custos de implementação e preocupações com segurança cibernética (NOKIA, 2024) e (HERMANT et al., 2021).

A implementação de redes 5G Indoor é complexa, especialmente em termos de infraestrutura e gerenciamento de rede. Além disso, é necessário garantir que os dados sensíveis sejam protegidos de maneira rigorosa, pois a conectividade 5G expõe esses dados a novos riscos de segurança. Perante este contexto, este estudo visa avaliar a viabilidade e eficácia da integração de AMRs, sensores LiDAR e conectividade 5G Indoor para otimizar a eficiência e segurança em ambientes hospitalares, isto por meio da compreensão de como a construção destas aplicações devem ser planejadas, estruturadas e implementadas a partir do entendimento de seus indicadores chaves de desempenho.

1.2 SIGNIFICÂNCIA DO ESTUDO

A aplicação de AMRs com sensores LiDAR e conectividade 5G tem o potencial de redefinir a maneira como tarefas rotineiras são realizadas em hospitais, permitindo que profissionais de saúde se concentrem em atividades que demandam habilidades clínicas. A automação de tarefas rotineiras e repetitivas não apenas pode melhorar a eficiência operacional, mas também minimizar riscos inerentes ao tráfego humano em áreas contaminadas biologicamente: contaminação cruzada. Habilitar AMRs, realmente autônomos, de forma efetiva é essencial para isto. Além disso, estudos prévios apontam claramente que a utilização de AMRs em ambientes hospitalares pode aumentar a produtividade ao reduzir o tempo de resposta para o transporte de materiais, (SAHU et al., 2024).

A relevância do LiDAR está em sua capacidade de fornecer dados precisos para navegação e detecção de objetos em tempo real. De acordo com Berman (2018), o LiDAR se destaca em ambientes onde é necessário mapear com alta resolução, oferecendo uma vantagem sobre câmeras e sensores de ultrassom em termos de precisão e velocidade. Em hospitais, essa precisão é essencial para evitar colisões e garantir que o robô siga trajetórias seguras. Além disso, a capacidade do LiDAR de identificar diferentes superfícies e materiais em condições de baixa luminosidade é um diferencial significativo, (GUSTAVSSON ET AL., 2021)

1.3 DESAFIOS E PERSPECTIVAS

A integração dessas tecnologias em uma aplicação específica tem um conjunto específico de desafios a serem superados.

A implementação do 5G Indoor, demanda ainda uma infraestrutura robusta e um gerenciamento eficiente da rede, especialmente com relação à baixa latência e alta confiabilidade na transmissão dos pacotes de dados, para o controle dos AMRs em tempo real. SHAFI et al. (2017) destaca que o potencial máximo de aplicação do 5G Indoor em ambientes dinâmicos, como hospitais, é necessário o investimento em infraestrutura e em soluções de segurança para proteger os dados sensíveis dos usuários. Para isto é preciso determinar acuradamente as demandas de cada espaço de aplicação. Esta necessidade, junto às questões de interoperabilidade dos sistemas de controle, os AMRs e os sensores LiDAR exigem o domínio pleno de suas variáveis de controle e desempenho, que é objetivo do presente trabalho, para que a coordenação rigorosa, síncrona e a proteção dos dados seja possível, (SAHFI et al., 2017).

Este trabalho tem como objetivo ajudar a encaminhar a aplicação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 em ambientes dinâmicos, em especial os ambulatoriais e hospitalares que precisam com urgência de soluções para a otimização do trabalho dos profissionais de saúde, por meio da avaliação de viabilidade técnica da integração de AMRs, sensores LiDAR e conectividade 5G.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A integração de Robôs Móveis Autônomos (AMRs) com sensores LiDAR e conectividade 5G em ambientes dinâmicos, como os ambulatoriais e hospitalares, representa uma convergência de tecnologias emergentes em aplicações que têm o potencial de modificar profundamente as rotinas e processos de trabalho em logística. Incluindo neste escopo os ambientes de cuidado em saúde e suas logísticas internas. Para compreender plenamente os desafios e os caminhos atuais de solução desta integração, é essencial revisar os avanços e soluções associadas a cada um dos seus componentes e sua aplicação conjunta.

2.1 ROBÔS MÓVEIS AUTÔNOMOS (AMRS)

A utilização de AMRs como auxiliares logísticos e de manutenção em ambientes complexos e dinâmicos tem recebido cada vez mais atenção das grandes empresas mundiais de automação, em função de sua capacidade inerente de executar tarefas repetitivas, físicas e sem preocupação com ergonomia e, com isso, poupar fisicamente trabalhadores humanos. Nos ambientes de cuidado em saúde estas aplicações têm clara aderência a tarefas como o transporte de medicamentos, amostra de laboratório e equipamentos médicos, além de tantas outras possíveis que podem ser imaginadas, (VAJJHALA & EAPPEN, 2023).

Para que isto se torne realidade os desafios como a navegação em ambientes dinâmicos e a interação segura com humanos devem ser trabalhados e resolvidos, antes que se possa falar em aplicações comerciais, (CABANILLAS et al., 2023).

2.2 TECNOLOGIA LIDAR PARA NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA

A tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) fundamentalmente utiliza pulsos de laser para mapear o ambiente em três dimensões e é muito bem conhecida a quase 50 anos. Esta capacidade de mapeamento permite que os AMRs desenvolvam a estratégias de navegação acuradas, evitando obstáculos e tomando decisões em situações inesperadas. Além disso, como afirma (CHOE & CHUNG, 2024), o LiDAR tem vantagens sobre câmeras e sensores de ultrassom, especialmente em condições de baixa luminosidade e proporcionam dados mais acurados e precisos para a navegação autônoma.

No entanto, é preciso trabalhar as alternativas de menor custo de sensoriamento LiDAR, uma vez que as suas alternativas de ponta podem trazer consigo alta complexidade, necessidade de conhecimentos específicos e altos custos, (FAWOLE & RAWAT, 2024).

2.3 CONECTIVIDADE 5G INDOOR

A conectividade 5G Indoor disponibiliza soluções de comunicação de dados com alta largura de banda e baixa latência, requisitos para processos de comunicação que demandam alta acuracidade, qualidade e baixo tempo de resposta, como devem ser a aplicação de AMRs em ambientes complexos e dinâmicos (YAO et al., 2024). SAHU et al. (2024) indicam que o 5G Indoor, em função de seu desempenho nestes requisitos, pode suportar até serviços médicos avançados, incluindo telemedicina e monitoramento remoto de pacientes. Esta característica pode suportar a busca de soluções específicas em cuidados de saúde.

No entanto, a implementação do 5G Indoor em ambientes ambulatoriais e hospitalares enfrenta desafios relacionados à infraestrutura, segurança de dados e interoperabilidade com sistemas existentes, que devem ser explorados até o limite de suas definições-chaves de desempenho.

2.4 INTEGRAÇÃO DE AMRS, LIDAR E 5G: OPORTUNIDADES E DESAFIOS

A integração de Robôs Móveis Autônomos (AMRs) equipados com sensores LiDAR e conectividade 5G em ambientes hospitalares representa uma convergência tecnológica com potencial para revolucionar as operações de saúde. Essa sinergia possibilita a automação de tarefas logísticas, como o transporte de medicamentos e amostras laboratoriais, além de permitir respostas rápidas a situações emergenciais, (GEOURGIUS & SATAVA, 2021).

Os sensores LiDAR fornecem aos AMRs a capacidade de mapear ambientes em três dimensões com alta precisão, facilitando a navegação autônoma e a detecção de obstáculos em tempo real. Essa tecnologia é especialmente eficaz em condições de baixa luminosidade, onde outros sensores, como câmeras, podem apresentar limitações. A conectividade 5G Indoor, por sua vez, oferece alta largura de banda e baixa latência, permitindo que os AMRs se comuniquem instantaneamente com sistemas centrais e outros dispositivos conectados. Essa comunicação em tempo real é crucial para a coordenação eficiente das operações hospitalares e para a resposta imediata a eventos críticos.

A sinergia entre AMRs, LiDAR e 5G resulta em sistemas mais seguros e eficientes. A navegação precisa dos AMRs reduz o risco de colisões e acidentes, enquanto a comunicação em tempo real assegura que os robôs possam reagir rapidamente a mudanças no ambiente, como a presença de pacientes ou profissionais de saúde nos corredores. Além disso, a automação de tarefas repetitivas libera os profissionais para se concentrarem em atividades que exigem expertise clínica, melhorando a qualidade do atendimento ao paciente.

No entanto, a integração dessas tecnologias apresenta desafios significativos. A implementação de redes 5G em ambientes hospitalares requer investimentos substanciais em infraestrutura e a garantia de cobertura confiável em todas as áreas críticas. Além disso, a interoperabilidade entre os AMRs, sensores LiDAR e sistemas hospitalares existentes deve ser cuidadosamente planejada para evitar incompatibilidades e garantir uma operação harmoniosa.

A segurança cibernética é outra preocupação central. A transmissão de dados sensíveis, como informações de pacientes e detalhes operacionais, através de redes 5G, aumenta a superfície de ataque para cibercriminosos. Portanto, é imperativo implementar medidas robustas de segurança, incluindo criptografia avançada, autenticação multifator e monitoramento contínuo das redes, para proteger contra acessos não autorizados e garantir a integridade dos dados, (GEORGIU & SATAVA, 2021).

Casos de aplicação dessa integração já estão sendo explorados em diversos hospitais ao redor do mundo. Por exemplo, o Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da USP lançou o projeto OpenCare 5G, que utiliza uma rede privativa 5G para testar a conectividade avançada na saúde, incluindo a operação de AMRs para transporte de materiais médicos, DELLOITE (2021) e outro exemplo é na China, onde os robôs são empregados para desinfecção de ambientes e entrega de suprimentos, minimizando a exposição de profissionais de saúde a áreas contaminadas (ZHAO et al., 2022).

2.5 APLICAÇÕES DE AMRS EM OUTROS SETORES

Além do setor de saúde, os AMRs têm sido aplicados em indústrias como manufatura e construção. DELGADO et al. (2019) analisam o uso de AMRs em sistemas de manufatura flexíveis, destacando melhorias na eficiência e flexibilidade da produção. GHAFARIANHOSEINI et al. (2016) exploram a aplicação de sistemas robóticos autônomos na indústria da construção, enfatizando benefícios como maior precisão e segurança. Essas aplicações demonstram a versatilidade dos AMRs e fornecem insights valiosos para sua implementação em ambientes hospitalares.

2.6 DESAFIOS DE SEGURANÇA E PRIVACIDADE

A integração de AMRs, LiDAR e 5G em ambientes hospitalares levanta preocupações significativas de segurança e privacidade. LOU et al. (2023) discutem as vulnerabilidades introduzidas pela adoção de tecnologias emergentes, como IoT e 5G, em ambientes de saúde, incluindo ameaças potenciais como ataques de negação de serviço e interceptação de dados sensíveis. Os autores propõem estratégias de mitigação, como criptografia avançada, autenticação multifator e monitoramento contínuo de redes, para garantir a segurança dos sistemas de saúde inteligentes.

2.7 PERSPECTIVAS FUTURAS

A evolução contínua das tecnologias de AMRs, LiDAR e 5G aponta para um futuro onde a automação e a conectividade avançada desempenharão papéis cruciais em ambientes hospitalares. FANG et al. (2017) enfatizam que, embora a redução da latência em redes 5G apresente desafios técnicos significativos, ela oferece oportunidades substanciais para o desenvolvimento de aplicações inovadoras em tempo real. Além disso, a integração de inteligência artificial e análise de dados em tempo real pode aprimorar ainda mais o desempenho dos AMRs, tornando-os mais adaptáveis e eficientes em ambientes dinâmicos, (PARVEZ et al., 2018).

A revisão da literatura evidencia que a integração de AMRs com tecnologia LiDAR e conectividade 5G em ambientes hospitalares oferece oportunidades significativas para melhorar a eficiência operacional e a segurança. No entanto, desafios relacionados à infraestrutura, segurança de dados e interoperabilidade precisam ser abordados para uma implementação bem-sucedida. Pesquisas futuras devem focar no desenvolvimento de soluções integradas que considerem as especificidades dos ambientes hospitalares e garantam a confiabilidade e a segurança dos sistemas implementados.

3 PROPOSTA METODOLÓGICA

A metodologia desenvolvida para este estudo tem como objetivo avaliar a eficácia da integração de Robôs Móveis Autônomos (AMRs) com a tecnologia LiDAR e conectividade 5G em ambientes hospitalares, utilizando métricas rigorosas que refletem as demandas específicas desse contexto. As etapas metodológicas foram desenhadas para abordar desafios técnicos e operacionais, garantindo que os resultados contribuam para a implementação prática de AMRs nesses ambientes críticos.

3.1 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Os parâmetros escolhidos incluem latência, velocidade de resposta, confiabilidade, tempo de execução e taxa de transferência. Essas métricas foram selecionadas devido à sua relevância para o desempenho dos AMRs em tarefas hospitalares. Cada uma dessas métricas reflete aspectos distintos da operação dos robôs em redes 5G, alinhando-se aos requisitos de comunicação em tempo real e automação eficiente.

Latência: Refere-se ao tempo total que um pacote de dados leva para viajar da fonte ao destino dentro da rede. Em aplicações hospitalares, onde AMRs realizam tarefas sensíveis ao tempo, como entrega de medicamentos e transporte de materiais, latências elevadas podem comprometer a eficácia da operação. Para medir a latência, foi utilizada a ferramenta Iperf, que simula cargas de rede e avalia o impacto em tempo real. A rede 5G é avaliada pela sua capacidade de manter latências abaixo de 1 milissegundo, o que é essencial para uma navegação eficiente e tomada de decisão autônoma.

Velocidade de Resposta: Essa métrica mede o tempo que o AMR leva para processar e executar um comando recebido da nuvem. Em ambientes hospitalares, onde decisões rápidas podem impactar diretamente o cuidado com os pacientes, a velocidade de resposta é crucial. Utilizando a ferramenta Wireshark, foram capturados dados de tráfego para medir a eficiência da comunicação entre os AMRs e os sistemas centrais, validando o impacto do 5G na redução de atrasos.

Confiabilidade: Avaliar a capacidade dos AMRs de operar de forma contínua e previsível em diferentes condições de rede e carga de trabalho é fundamental para o ambiente hospitalar. Para isso, foram implementados sistemas de monitoramento contínuo com a ferramenta Prometheus. Essa abordagem permitiu a identificação de gargalos e a análise de padrões de desempenho, assegurando a operação estável dos robôs mesmo em situações adversas.

Tempo de Execução: Representa o tempo necessário para que o AMR complete uma tarefa, desde o comando inicial até a conclusão. Essa métrica é essencial para garantir que os robôs não apenas operem de forma rápida, mas também consistente. O sistema operacional do AMR foi configurado para registrar automaticamente o tempo de execução, permitindo ajustes em tempo real para otimizar sua eficiência.

Taxa de Transferência: Refere-se à quantidade de dados que pode ser transmitida entre o AMR e a nuvem em um intervalo de tempo. Essa métrica é crítica para aplicações que exigem transmissão de grandes volumes de dados, como sensores de navegação e monitoramento em tempo real. Novamente, o Iperf foi empregado para testar a capacidade da rede 5G, garantindo uma comunicação confiável e de alta velocidade.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Os testes foram conduzidos em um ambiente simulado que reflete as condições de um hospital moderno, incluindo interferências de rede, múltiplos dispositivos conectados e variações de carga de trabalho. Para cada métrica, foram definidos cenários específicos que simulam desafios reais enfrentados pelos AMRs.

- 1. Latência e Taxa de Transferência:** Cenários de teste incluíram diferentes distâncias entre o AMR e o ponto de acesso 5G, além de simulações com alto tráfego de dados. Esses testes ajudaram a validar a promessa do 5G de oferecer alta largura de banda e baixa latência em condições de carga.
- 2. Velocidade de Resposta:** Foram simulados comandos críticos, como alterações de rota e resposta a obstáculos imprevistos. O Wireshark registrou os tempos de comunicação, permitindo ajustes para melhorar a eficiência.
- 3. Confiabilidade:** O desempenho dos AMRs foi monitorado continuamente com o Prometheus, permitindo a identificação de falhas de comunicação ou quedas de desempenho antes que se tornassem críticas.
- 4. Tempo de Execução:** As tarefas dos AMRs foram cronometradas para garantir consistência nos tempos de operação, avaliando o impacto do processamento interno e das condições da rede.

3.3 FERRAMENTAS UTILIZADAS

A escolha das ferramentas foi estratégica para garantir a precisão e a robustez dos testes. O **Iperf** foi essencial para medir a latência e a taxa de transferência, oferecendo uma visão detalhada do desempenho da rede. O **Wireshark**, com sua capacidade de análise de pacotes em tempo real, permitiu avaliar a velocidade de resposta dos AMRs. O **Prometheus** foi utilizado para monitorar continuamente os robôs, identificando anomalias e ajustando parâmetros para melhorar a confiabilidade.

Além disso, o sistema operacional dos AMRs desempenhou um papel crucial, registrando automaticamente os tempos de execução e fornecendo relatórios detalhados para análise. A integração com plataformas de visualização, como o Grafana, facilitou a interpretação dos dados e a tomada de decisões baseadas em métricas.

3.4 CONEXÃO COM A REDE 5G

A rede 5G foi o elemento central desta metodologia, oferecendo a infraestrutura necessária para garantir baixa latência, alta velocidade de comunicação e suporte para múltiplos dispositivos conectados. Os testes demonstraram que o 5G é capaz de atender às demandas dos AMRs em ambientes hospitalares, permitindo uma automação eficiente e melhorando a qualidade do atendimento.

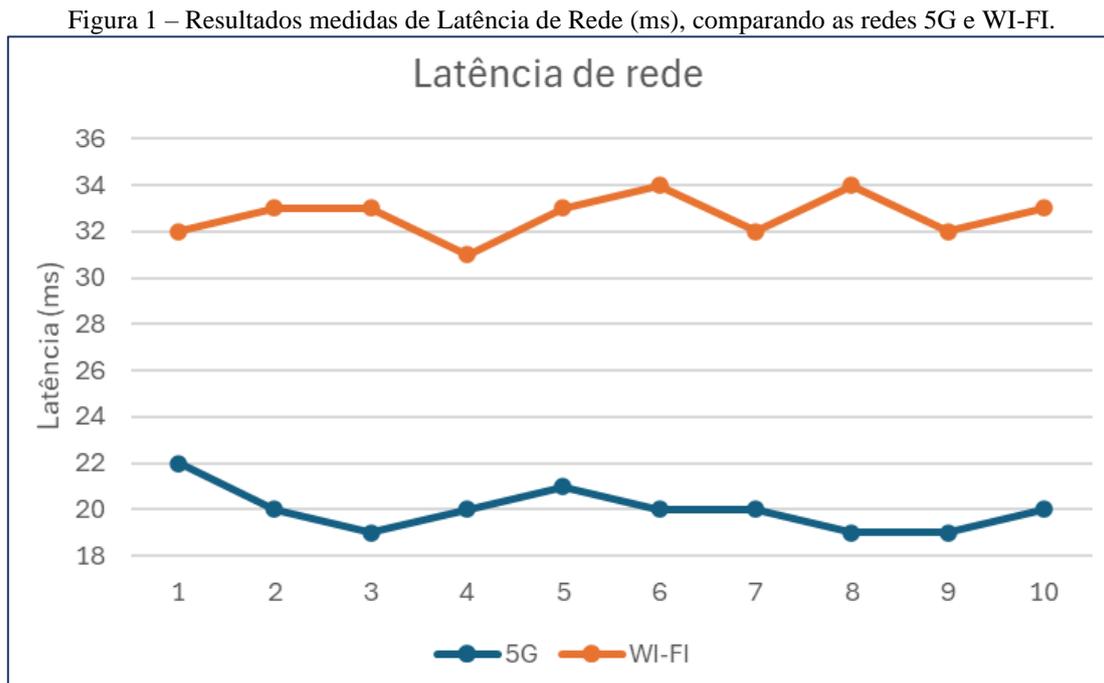
A proposta metodológica apresentada neste estudo fornece uma abordagem robusta para avaliar a integração de AMRs com tecnologia LiDAR e 5G. A aplicação prática dos testes em um ambiente simulado reflete desafios reais, garantindo que os resultados sejam diretamente aplicáveis à implementação em hospitais. O uso de métricas específicas e ferramentas avançadas permite uma análise detalhada do desempenho dos AMRs, contribuindo para sua otimização e expansão em larga escala. Essa metodologia estabelece uma base sólida para futuras pesquisas e para o avanço da automação hospitalar.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

Os experimentos realizados nesta pesquisa foram desenvolvidos para avaliar o desempenho de Robôs Móveis Autônomos (AMRs) integrados com redes 5G e WiFi em ambientes hospitalares, considerando os parâmetros metodológicos definidos. A análise focou na latência, taxa de transferência, tempo de reação e confiabilidade dos sistemas de comunicação, utilizando ferramentas específicas para coleta e processamento de dados.

4.1 LATÊNCIA DE REDE

A latência, definida como o tempo necessário para um pacote de dados viajar entre o servidor e o AMR, foi medida com base na fórmula Round-Trip Time (RTT). Foram realizados 10 testes consecutivos, cada um enviando 1000 pacotes de 128 bytes com intervalo de 250 ms. O ambiente de teste incluiu o servidor de borda e o computador de bordo do AMR, ambos operando com redes 5G e WiFi. O gráfico da Figura 1 mostra estes resultados.



Resultados para Rede 5G:

- **Média:** 19,92 ms
- **Mediana:** 19,91 ms
- **Desvio Padrão:** 0,176 ms

Resultados para Rede WiFi:

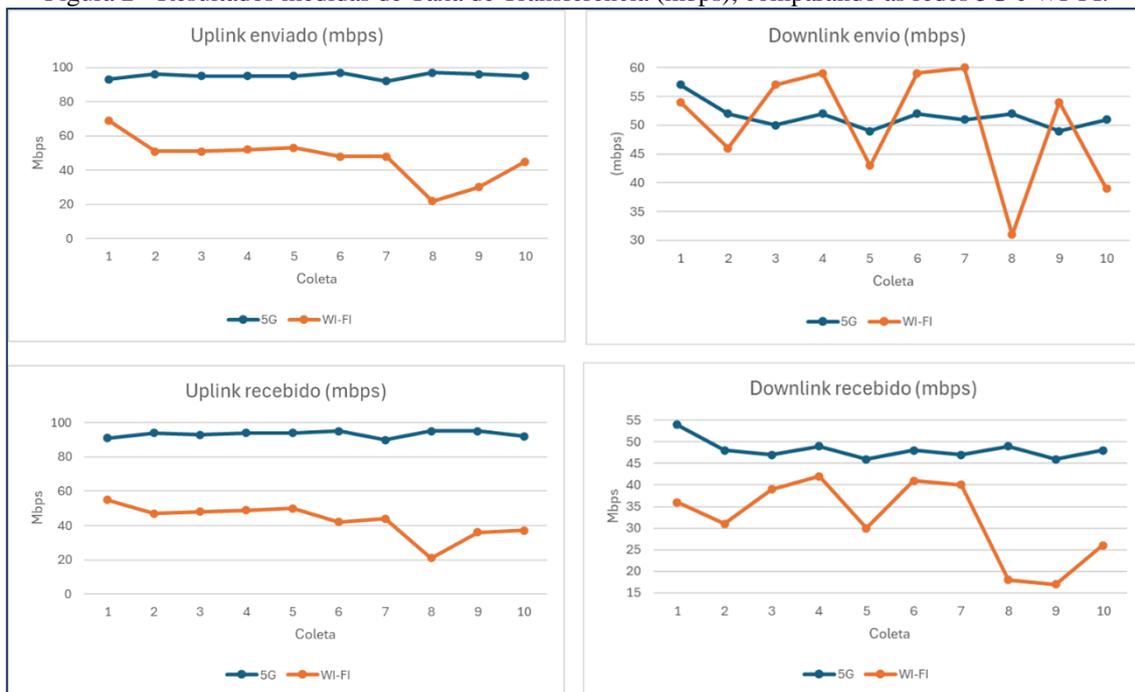
- **Média:** 32,65 ms
- **Mediana:** 32,64 ms
- **Desvio Padrão:** 0,89 ms

A análise revelou que a rede 5G oferece uma latência significativamente menor e mais consistente em comparação à rede WiFi, com um coeficiente de variação 3 vezes menor, destacando sua superioridade para aplicações em tempo real, como navegação e mapeamento com o algoritmo SLAM.

4.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA

A taxa de transferência, representando a quantidade de dados trocados entre o servidor e o AMR por unidade de tempo, foi avaliada com a ferramenta Iperf 3. O experimento simulou cenários de alta demanda, com 10 fluxos simultâneos e largura de banda limitada a 100 Mbps. A Figura 2 mostra os resultados de avaliação da Taxa de Transferência.

Figura 2 - Resultados medidas de Taxa de Transferência (mbps), comparando as redes 5G e WI-FI.



Resultados para Uplink (Enviados) na Rede 5G:

- **Média:** 95,12 Mbps
- **Desvio Padrão:** 1,39 Mbps

Resultados para Uplink na Rede WiFi:

- **Média:** 46,58 Mbps
- **Desvio Padrão:** 12,63 Mbps

Resultados para Downlink (Recebidos) na Rede 5G:

- **Média:** 92,00 Mbps
- **Desvio Padrão:** 1,04 Mbps

Resultados para Downlink na Rede WiFi:

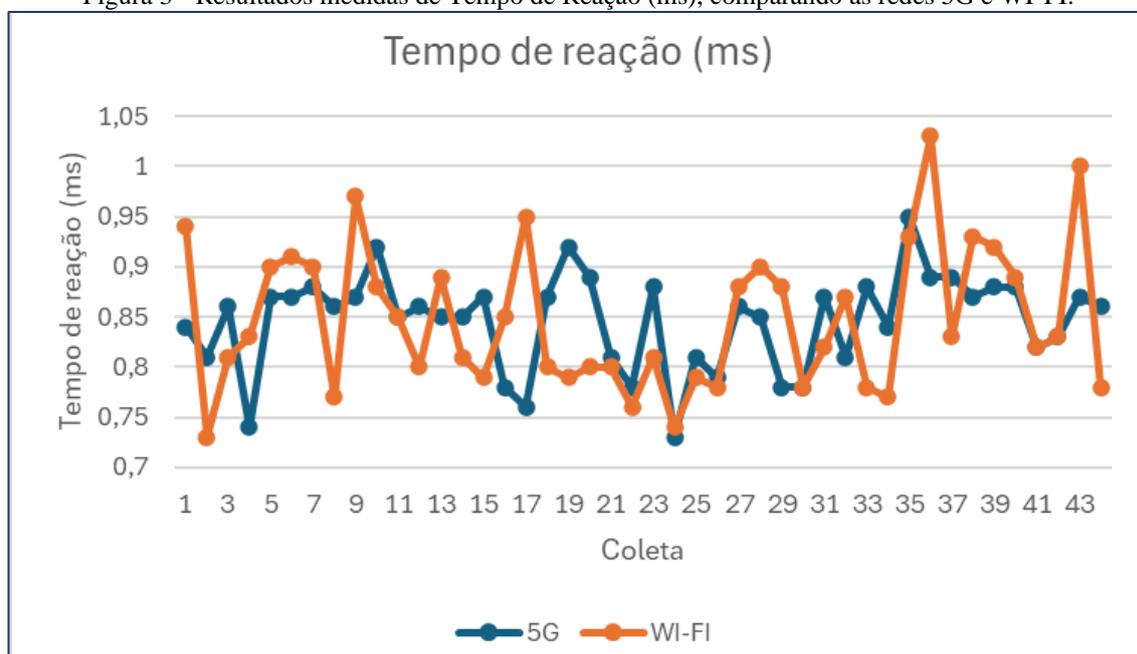
- **Média:** 41,72 Mbps
- **Desvio Padrão:** 10,97 Mbps

A rede 5G mostrou taxas de transferência significativamente superiores, com menor variabilidade, demonstrando maior estabilidade e eficiência no suporte a tarefas críticas, como transmissão de mapas gerados pelo SLAM.

4.3 TEMPO DE REAÇÃO

O tempo de reação do sistema foi medido considerando o intervalo entre o recebimento de um estímulo externo, gerado por um sensor LIDAR, e o envio do primeiro comando de velocidade pelo sistema do AMR. A análise comparou redes 5G e WiFi. A Figura 3 mostra os resultados de Tempo de Reação (ms), comparando as redes 5G e WI-FI.

Figura 3 - Resultados medidas de Tempo de Reação (ms), comparando as redes 5G e WI-FI.



Resultados para Rede 5G:

- **Média:** 0,847 ms
- **Desvio Padrão:** 0,046 ms

Resultados para Rede WiFi:

- **Média:** 0,841 ms
- **Desvio Padrão:** 0,071 ms

Ambas as redes apresentaram tempos de reação abaixo de 1 ms, mas a rede 5G mostrou maior consistência, refletida no menor desvio padrão. Essa consistência é crítica para evitar falhas em tarefas de navegação e prevenção de colisões.

4.4 CONFIABILIDADE E CONSISTÊNCIA

Para avaliar a confiabilidade, foi utilizado o Prometheus para monitoramento contínuo, com foco na estabilidade das operações dos AMRs sob diferentes condições de rede. A análise indicou que a rede 5G manteve uma performance mais previsível, mesmo sob altas cargas de trabalho.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais apresentados neste estudo demonstram de forma clara os benefícios da integração de AMRs com redes 5G e sensores LiDAR em ambientes hospitalares. Entretanto, os desafios e implicações dessa integração precisam ser discutidos de maneira aprofundada para proporcionar um panorama completo da viabilidade e das oportunidades futuras.

5.1 SUPERIORIDADE TÉCNICA DA REDE 5G

Os testes confirmaram a superioridade da rede 5G em termos de latência, taxa de transferência e consistência de desempenho. A capacidade do 5G de operar com latências abaixo de 1 ms é um diferencial significativo para aplicações que exigem respostas em tempo real, como navegação autônoma e prevenção de colisões. Além disso, a alta taxa de transferência permite a transmissão eficiente de dados gerados pelos sensores LiDAR, como mapas tridimensionais e informações de obstáculos. Essa eficiência é crítica em ambientes hospitalares, onde atrasos podem comprometer a segurança e a eficácia das operações.

Por outro lado, a estabilidade oferecida pela rede 5G é particularmente relevante em cenários de alta demanda, onde múltiplos dispositivos precisam operar simultaneamente. Os resultados indicam que, enquanto a WiFi apresenta maior variabilidade, especialmente sob carga, a 5G mantém um desempenho consistente. Essa característica faz com que a 5G seja mais adequada para suportar a automação avançada em hospitais, especialmente em situações críticas.

5.2 LIMITAÇÕES PRÁTICAS DA IMPLEMENTAÇÃO

Apesar das vantagens técnicas, a implementação de redes 5G em ambientes hospitalares apresenta desafios significativos. A infraestrutura necessária para suportar 5G Indoor, como antenas PicoCell e Core de Rede dedicados, requer investimentos substanciais e um planejamento rigoroso. Além disso, a cobertura confiável em áreas críticas do hospital deve ser garantida para evitar falhas de comunicação.

Outro desafio é a interoperabilidade. Para que os AMRs operem de maneira eficaz, os sensores LiDAR, os sistemas de controle central e a infraestrutura de rede precisam estar perfeitamente sincronizados. Isso exige padrões claros de integração e testes exaustivos para identificar e resolver possíveis incompatibilidades.

5.3 SEGURANÇA E PRIVACIDADE DOS DADOS

A adoção de redes 5G em ambientes hospitalares também aumenta as preocupações com segurança cibernética. A transmissão de dados sensíveis, como informações de pacientes e registros operacionais, deve ser protegida contra acessos não autorizados. Estratégias como criptografia avançada, autenticação multifator e monitoramento contínuo das redes são indispensáveis para garantir a integridade e a confidencialidade dos dados. Adicionalmente, a criação de políticas de segurança robustas e treinamentos regulares para a equipe técnica são essenciais para mitigar riscos.

5.4 IMPACTO NO FLUXO DE TRABALHO HOSPITALAR

A introdução de AMRs integrados com 5G e LiDAR tem o potencial de transformar profundamente o fluxo de trabalho em hospitais. Ao automatizar tarefas rotineiras, como o transporte de medicamentos e amostras laboratoriais, esses robôs podem liberar os profissionais de saúde para se concentrarem em atividades que exigem expertise clínica. Essa redistribuição de tarefas pode resultar em um ambiente de trabalho mais eficiente e seguro, reduzindo o risco de contaminação cruzada e melhorando a qualidade do atendimento ao paciente.

Entretanto, essa transformação requer uma reestruturação organizacional. Os gestores hospitalares precisam planejar cuidadosamente como os AMRs serão integrados aos processos existentes, considerando fatores como manutenção, treinamento e adaptação dos profissionais às novas tecnologias. Estudos futuros devem explorar estratégias para facilitar essa transição e maximizar os benefícios da automação.

5.5 POTENCIAL DE ESCALABILIDADE E ADOÇÃO GLOBAL

Os resultados deste estudo sugerem que a integração de AMRs com tecnologia LiDAR e 5G pode ser ampliada para outras áreas além dos hospitais, como centros de distribuição farmacêutica e ambientes de saúde domiciliar. No entanto, a escalabilidade dessa solução depende de avanços na acessibilidade econômica das tecnologias envolvidas. Sensores LiDAR de menor custo e redes 5G mais acessíveis são cruciais para expandir o uso desses sistemas em diferentes contextos.

5.6 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Com base nos desafios identificados, algumas recomendações podem ser feitas para pesquisas futuras e implementação prática:

- 1. Explorar Alternativas de Infraestrutura:** Investigar o uso de redes híbridas, combinando 5G com WiFi de alta densidade, para reduzir custos e melhorar a cobertura em ambientes hospitalares.
- 2. Foco em Protocolos de Interoperabilidade:** Desenvolver padrões universais para integração de AMRs, sensores e redes 5G, facilitando a implementação em diferentes contextos.
- 3. Desenvolvimento de Soluções Escaláveis:** Projetar sensores LiDAR mais acessíveis e compactos, sem comprometer a precisão e a confiabilidade, para ampliar o uso em aplicações críticas.
- 4. Estudos de Custo-Benefício:** Realizar análises econômicas detalhadas para avaliar o retorno sobre o investimento em AMRs integrados com 5G e LiDAR, considerando diferentes tamanhos e tipos de hospitais.

Embora este estudo tenha demonstrado a viabilidade técnica da integração de AMRs, LiDAR e 5G, a implementação prática dessas tecnologias exige uma abordagem multidisciplinar. Desde questões de infraestrutura até preocupações com segurança e adaptação organizacional, há um caminho a ser percorrido antes que essas soluções se tornem padrão em ambientes hospitalares. Ainda assim, os resultados obtidos aqui pavimentam o caminho para futuras inovações, destacando o potencial transformador dessas tecnologias no setor de saúde.

6 CONCLUSÃO

Este estudo explorou a integração de Robôs Móveis Autônomos (AMRs) com sensores LiDAR e conectividade 5G em ambientes hospitalares, analisando seu desempenho em métricas críticas, como latência, taxa de transferência, confiabilidade e tempo de reação. Os resultados obtidos demonstraram o potencial transformador dessas tecnologias no setor de saúde, ao mesmo tempo em que destacaram desafios significativos que precisam ser superados para sua implementação prática.

6.1 AVANÇOS E CONTRIBUIÇÕES

Os experimentos conduzidos confirmaram que a conectividade 5G, em comparação com a rede WiFi, oferece vantagens substanciais em termos de estabilidade e desempenho. A latência significativamente menor e a consistência dos tempos de reação tornam a 5G a escolha ideal para aplicações em tempo real, como a navegação autônoma e o transporte de materiais críticos em

hospitais. Além disso, a alta taxa de transferência observada na rede 5G permite que os AMRs processem e transmitam dados complexos de sensores LiDAR com eficiência, garantindo mapeamentos precisos e respostas rápidas a mudanças no ambiente.

Esses avanços não apenas fortalecem a viabilidade técnica dessa integração, mas também apontam para oportunidades de reestruturação operacional em ambientes hospitalares. A automação de tarefas repetitivas com AMRs pode liberar recursos humanos para atividades que exigem habilidades clínicas, melhorando a eficiência geral e a segurança no cuidado ao paciente. Assim, o estudo contribui diretamente para o avanço do conhecimento sobre a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 no setor de saúde.

6.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar dos resultados promissores, este estudo possui algumas limitações que precisam ser consideradas. Primeiramente, os experimentos foram realizados em um ambiente simulado, o que, embora reproduza condições reais, pode não capturar completamente as complexidades dos hospitais. Fatores como interferências de sinal, densidade de dispositivos conectados e configurações arquitetônicas específicas podem impactar o desempenho dos AMRs e das redes 5G em cenários reais.

Além disso, questões de interoperabilidade e segurança cibernética foram abordadas principalmente em termos de viabilidade técnica, mas não foram implementadas soluções específicas no escopo deste estudo. A proteção de dados sensíveis e a integração com sistemas hospitalares existentes representam desafios que exigem investigações mais detalhadas e abordagens multidisciplinares.

6.3 IMPACTO E RELEVÂNCIA PARA O SETOR DE SAÚDE

O impacto potencial desta integração no setor de saúde é significativo. AMRs equipados com sensores LiDAR e conectividade 5G podem revolucionar a logística hospitalar, proporcionando maior agilidade e precisão no transporte de medicamentos, amostras laboratoriais e equipamentos médicos. Essa automação não apenas reduz o risco de erros e atrasos, mas também contribui para a criação de um ambiente mais seguro, minimizando a exposição dos profissionais de saúde a áreas contaminadas.

Adicionalmente, a implementação bem-sucedida dessas tecnologias pode servir como modelo para outras aplicações na saúde, como monitoramento remoto de pacientes, telemedicina e assistência robótica em procedimentos clínicos. O desenvolvimento de soluções integradas que combinem automação, conectividade avançada e inteligência artificial pode estabelecer um novo padrão de eficiência e inovação no setor.

6.4 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Para maximizar o impacto e a aplicabilidade desta pesquisa, algumas recomendações podem ser feitas:

- 1. Estudos em Ambientes Reais:** Realizar experimentos em hospitais operacionais para validar os achados deste estudo em cenários mais complexos e dinâmicos.
- 2. Exploração de Redes Híbridas:** Investigar a integração de redes 5G com outras tecnologias de comunicação, como WiFi de alta densidade, para criar soluções mais acessíveis e robustas.
- 3. Aprofundamento em Segurança Cibernética:** Desenvolver e implementar protocolos específicos de segurança para proteger dados sensíveis em aplicações de saúde.
- 4. Estudos Econômicos e de Viabilidade:** Avaliar o custo-benefício da implementação de AMRs integrados com LiDAR e 5G, considerando diferentes escalas e contextos hospitalares.
- 5. Adaptação Organizacional:** Investigar estratégias para facilitar a adaptação dos profissionais de saúde à automação, incluindo treinamentos e ajustes nos fluxos de trabalho.

7 REFLEXÃO FINAL

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a integração de AMRs, sensores LiDAR e conectividade 5G é uma solução tecnologicamente viável e altamente promissora para a automação hospitalar. No entanto, a realização plena desse potencial requer esforços coordenados para superar desafios técnicos, econômicos e organizacionais. Com base nos achados apresentados, acredita-se que esta pesquisa contribui significativamente para o avanço do conhecimento no campo da automação em saúde e estabelece uma base sólida para o desenvolvimento de aplicações futuras que transformem positivamente o setor.

REFERÊNCIAS

- CHEN, Simin et al. The Role of 5G in Healthcare. *IEEE Communications Magazine*, v. 58, n. 2, p. 84-90, 2020.
- CHOE, J.; CHO, H.; CHUNG, Y. Performance Verification of Autonomous Driving LiDAR Sensors under Rainfall Conditions in Darkroom. *Sensors*, v. 24, n. 1, p. 14, 2024. DOI: 10.3390/s24010014.
- DELOITTE. HC firma parceria com ecossistema de empresas para testar tecnologia 5G. Disponível em: <https://www.deloitte.com/br/pt/about/press-room/opencare-5g.html>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- FAWOLE, O. A.; RAWAT, D. B. Recent Advances in 3D Object Detection for Self-Driving Vehicles: A Survey. *AI*, v. 5, n. 3, p. 1255-1285, 2024. DOI: 10.3390/ai5030061.
- GIUFFRIDA, L.; MASERA, G.; MARTINA, M. A Survey of Automotive Radar and Lidar Signal Processing and Architectures. *Chips*, v. 2, n. 4, p. 243-261, 2023. DOI: 10.3390/chips2040015.
- GUSTAVSSON, Ulf et al. Implementation Challenges and Opportunities in Beyond-5G and 6G Communication. *IEEE Journal of Microwaves*, v. 1, p. 86-100, 2021. DOI: 10.1109/JMW.2020.3034648.
- JAIN, Hemant et al. 5G Network Slice for Digital Real-Time Healthcare System Powered by Network Data Analytics. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, v. 1, 2021. DOI: 10.1016/j.iotcps.2021.12.001.
- LEE, M. -H.; LIU, I. -H.; HUANG, H. -C.; LI, J. -S. Cyber Security in a 5G-Based Smart Healthcare Network: A Base Station Case Study. *Engineering Proceedings*, v. 55, n. 1, p. 50, 2023. DOI: 10.3390/engproc2023055050.
- PARVEZ, Imtiaz et al. A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018.
- SAHU, Vinay et al. Challenges and Opportunities of 5G Network: A Review of Research and Development. *American Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 8, p. 11-20, 2024. DOI: 10.11648/j.ajece.20240801.12.
- SHAFI, Mansoor et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment and Practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. PP, n. 1, p. 1-1, 2017. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
- SIDDIQI, M. A.; YU, H.; JOUNG, J. 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices. *Electronics*, v. 8, n. 9, p. 981, 2019. DOI: 10.3390/electronics8090981.
- SUFYAN, A. et al. From 5G to Beyond 5G: A Comprehensive Survey of Wireless Network Evolution, Challenges, and Promising Technologies. *Electronics*, v. 12, n. 10, p. 2200, 2023. DOI: 10.3390/electronics12102200.

HARDWARE DIDÁTICO PARA MAPEAMENTO DE AMBIENTES INDOOR

  10.56238/livrosindi202506-009

Engº Rafael Braga Guabiraba

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: rbraga87@gmail.com

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica

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

ORCID: 0000-0001-5477-6953

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

M. Sc. Janyel Trevisol

Mestre em Engenharia de Produção

Professor do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Horizontina (FAHOR) – RS - BRASIL

ORCID: 0000-0002-1153-4046

E-mail: janyeltrevisol@yahoo.com.br

RESUMO

O avanço da Indústria 4.0 trouxe profundas mudanças nos processos produtivos, integrando tecnologias como robótica, sensores LiDAR e sistemas ciberfísicos. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de hardware didático baseado em LiDAR e robôs móveis autônomos (AMR), voltado para mapeamento indoor e capacitação profissional no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM). O sistema, composto por um sensor LiDAR RPLIDAR A1M8, Raspberry Pi 4 e framework ROS2, foi testado em três cenários simulando ambientes industriais. Os resultados demonstraram alta precisão no mapeamento, com erros médios absolutos variando entre 2,5 cm e 4 cm, dependendo da complexidade do ambiente. A modularidade do sistema permitiu sua adaptação a diferentes níveis de dificuldade, mostrando-se uma ferramenta eficaz para a requalificação de trabalhadores em tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Além disso, a proposta se destacou como uma alternativa de baixo custo e alto impacto educacional, promovendo uma transição eficaz da teoria para a prática.

Palavras-chave: Indústria 4.0, LiDAR, Robótica móvel autônoma, Mapeamento indoor, Requalificação profissional, Polo Industrial de Manaus, Educação tecnológica, ROS2, Capacitação técnica, Automação industrial.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, considerada a quarta revolução industrial, está transformando radicalmente o setor produtivo ao integrar tecnologias digitais avançadas e sistemas ciberfísicos em processos de manufatura e operações industriais. Essa revolução é marcada pela automação inteligente, análise de grandes volumes de dados (big data), conectividade via Internet das Coisas (IoT), e o uso extensivo de inteligência artificial (IA). Essas tecnologias proporcionam uma nova era de fábricas inteligentes, nas quais sistemas autônomos são capazes de se comunicar e tomar decisões em tempo real, sem a necessidade de intervenção humana direta. A automação avançada também possibilita a personalização em massa, ou seja, a produção em larga escala de produtos personalizados de acordo com as preferências do cliente, mantendo os custos de produção baixos.

Entretanto, a incorporação dessas tecnologias nas indústrias exige mudanças profundas, não apenas na infraestrutura tecnológica, mas também na qualificação dos trabalhadores. Profissionais precisam estar preparados para operar e manter esses sistemas complexos. No Brasil, o Polo Industrial de Manaus (PIM) desempenha um papel fundamental na economia da região Norte e no desenvolvimento tecnológico do país. Com indústrias que produzem desde eletrônicos até veículos, o PIM tem buscado acompanhar o ritmo acelerado da inovação global. No entanto, a transição para a Indústria 4.0 apresenta desafios significativos, particularmente no que diz respeito à formação e requalificação da força de trabalho.

A adoção das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 requer profissionais capacitados que compreendam tanto os sistemas automatizados quanto as ferramentas que os suportam. Isso inclui a robótica avançada, sistemas de análise preditiva, e o uso de sensores como o LiDAR (Light Detection and Ranging), que é essencial para o mapeamento e a navegação autônoma de robôs móveis. Tecnologias como o LiDAR, combinadas com robôs móveis autônomos (AMR), são fundamentais para a automação de processos em ambientes industriais complexos, como os encontrados no PIM.

Para que o Brasil se mantenha competitivo no cenário global, a formação de profissionais especializados em tecnologias da Indústria 4.0 é essencial. A implementação de ferramentas didáticas que simulem essas tecnologias em ambientes de ensino pode ser um passo importante para garantir que os trabalhadores adquiram as habilidades necessárias. Essas ferramentas podem proporcionar uma experiência prática, permitindo que os profissionais lidem diretamente com sistemas que encontrarão em suas atividades diárias, facilitando a transição da teoria para a prática.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.

Diante desse contexto, surge a questão central desta pesquisa: como uma plataforma de hardware didático, utilizando tecnologias como LiDAR e AMR, pode ser projetada para mapeamento indoor e usada como ferramenta educacional para a qualificação em tecnologias da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus? O objetivo é entender como essas tecnologias podem ser adaptadas para o ambiente educacional e usadas de forma prática para capacitar os trabalhadores do PIM.

Este estudo é particularmente relevante devido à crescente urgência de capacitar os trabalhadores do PIM para lidar com as tecnologias emergentes da Indústria 4.0. A criação de um sistema didático, acessível e robusto, utilizando LiDAR e robótica móvel, pode oferecer uma solução prática para suprir as demandas educacionais e profissionais. Além disso, este trabalho não se limita à implementação de uma solução tecnológica; ele visa explorar como uma plataforma educacional prática pode ser usada para formar profissionais com habilidades avançadas em um curto espaço de tempo. O impacto dessa pesquisa pode ser significativo para a indústria brasileira, aumentando a competitividade do PIM e preparando a força de trabalho para o futuro da automação industrial.

2 REVISÃO LITERATURA

2.1 VISÃO GERAL

O conceito de Indústria 4.0 foi originalmente delineado por Kagermann et al. (2013) como uma fusão entre o mundo físico, digital e biológico. Essa revolução é alimentada pelo uso de tecnologias emergentes, como inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), robótica avançada e análise de grandes volumes de dados (big data). O objetivo da Indústria 4.0 é transformar os sistemas produtivos em processos mais inteligentes, flexíveis e eficientes, permitindo a integração de máquinas, produtos e pessoas em redes digitais. Segundo Schwab (2016), essa transformação permite que os sistemas produtivos sejam adaptados em tempo real para responder às demandas de customização em massa e personalização de produtos, sem sacrificar a eficiência operacional.

A aplicação dessas tecnologias em ambientes produtivos tem o potencial de gerar ganhos significativos de produtividade, reduzir o consumo de energia e otimizar o uso de recursos em cadeias de suprimentos. Além disso, a integração de sensores, máquinas e redes de comunicação possibilita o monitoramento remoto, a automação de tarefas repetitivas e a tomada de decisões baseada em dados, proporcionando maior controle e visibilidade sobre os processos industriais (Hermann et al., 2016). Isso torna a Indústria 4.0 não apenas uma revolução tecnológica, mas também uma estratégia para melhorar a sustentabilidade e a competitividade das indústrias no cenário global.

Dentre as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, a robótica móvel autônoma (AMR) e o sensoriamento LiDAR (Light Detection and Ranging) desempenham papéis essenciais. Os AMRs são robôs capazes de navegar de forma autônoma em ambientes dinâmicos, sem a necessidade de pré-programação de rotas fixas. Isso os diferencia dos robôs tradicionais, que são limitados por trajetórias predeterminadas e não possuem flexibilidade para adaptar sua navegação em tempo real. Segundo Siciliano e Khatib (2016), os AMRs representam um avanço significativo, especialmente em ambientes industriais complexos, onde a capacidade de adaptação a obstáculos imprevistos e mudanças no layout é fundamental para manter a eficiência operacional.

O sensoriamento LiDAR, por sua vez, é uma tecnologia que utiliza feixes de laser para medir distâncias e criar mapas tridimensionais de ambientes. Essa tecnologia é amplamente utilizada em robôs móveis para permitir a navegação autônoma, uma vez que possibilita que os robôs "vejam" e interpretem o ambiente ao seu redor com precisão. Ao combinar AMRs com sensores LiDAR, é possível desenvolver sistemas de navegação autônoma que operam em ambientes industriais altamente complexos, mapeando e respondendo a mudanças no espaço em tempo real. Isso permite a automação de tarefas logísticas, como o transporte de materiais dentro de fábricas e armazéns, sem a necessidade de intervenção humana direta (Shan e Toth, 2018).

2.2 CONCEITOS CHAVES

O desenvolvimento de sistemas de hardware didático, que integram AMRs e LiDAR, baseia-se em teorias de aprendizagem ativa, com destaque para a Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL). Barrows e Tamblyn (1980) foram pioneiros na defesa dessa abordagem pedagógica, que promove a resolução de problemas práticos como uma forma eficaz de aprender conceitos teóricos. Ao permitir que os alunos trabalhem em projetos reais, essa metodologia aumenta a autonomia dos aprendizes e facilita a aplicação prática do conhecimento adquirido.

No contexto da Indústria 4.0, a PjBL (Project Based Learning) é particularmente relevante, pois oferece aos trabalhadores a oportunidade de aprender a operar e programar sistemas avançados, como robôs móveis autônomos, em ambientes simulados que replicam condições reais de trabalho. Ao utilizar hardware didático que permite simular sistemas industriais, os alunos podem experimentar em primeira mão como as tecnologias da Indústria 4.0 funcionam, o que facilita a transição da teoria para a prática.

Além da PjBL, o conceito de modularidade no processo de ensino é uma estratégia eficaz para garantir que os alunos aprendam de forma progressiva, conforme destacado por Pérez-Álvarez et al. (2018). A modularidade permite que o aprendizado seja dividido em blocos, onde cada módulo se concentra em uma habilidade ou competência específica. Isso facilita o aprendizado de trabalhadores

que já estão inseridos no mercado de trabalho e precisam se adaptar às novas exigências tecnológicas sem interromper completamente suas atividades profissionais.

A modularidade também permite que os alunos personalizem suas trajetórias de aprendizagem, adaptando o conteúdo de acordo com suas necessidades e experiências prévias. No contexto da Indústria 4.0, onde há uma diversidade de tecnologias a serem aprendidas, como IA, IoT e sistemas de automação, essa abordagem oferece uma forma estruturada e eficiente de adquirir novas competências técnicas. Assim, os trabalhadores podem aprender as habilidades mais relevantes para suas funções, o que aumenta a retenção do conhecimento e melhora a aplicabilidade dos conceitos no ambiente de trabalho.

2.3 ESPAÇOS E OPORTUNIDADES A SEREM EXPLORADOS

Embora a literatura sobre Indústria 4.0 seja extensa e bem desenvolvida, a maioria dos estudos foca na aplicação dessas tecnologias em sistemas produtivos e cadeias de suprimentos (Hermann et al., 2016). No entanto, há uma lacuna significativa quando se trata do uso dessas tecnologias no contexto educacional e de capacitação profissional. A transição para a Indústria 4.0 requer não apenas a adoção de novas tecnologias, mas também a requalificação de trabalhadores para lidar com essas inovações. Isso é particularmente importante em países emergentes, como o Brasil, onde a infraestrutura educacional e tecnológica ainda precisa de melhorias significativas para acompanhar as demandas da economia digital (Sousa et al., 2018).

A falta de estudos que explorem a aplicação prática de tecnologias como AMR e LiDAR no treinamento de trabalhadores representa uma oportunidade para a inovação no campo da educação técnica. O uso de plataformas de hardware didático que simulem as condições reais de trabalho pode ser uma solução viável para preencher essa lacuna. Além disso, há uma necessidade crescente de desenvolver métodos educacionais que preparem os trabalhadores para os desafios tecnológicos de uma maneira acessível e prática, o que torna este estudo particularmente relevante.

Ao explorar como as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser aplicadas em programas de capacitação, este estudo contribui para a literatura existente ao oferecer uma abordagem prática e acessível para a formação de trabalhadores. A implementação de sistemas de hardware didático, utilizando AMRs e sensores LiDAR, oferece uma alternativa viável para a requalificação de trabalhadores no Brasil, especialmente em polos industriais como o de Manaus, onde a necessidade de adaptação às novas tecnologias é urgente.

3 METODOLOGIA

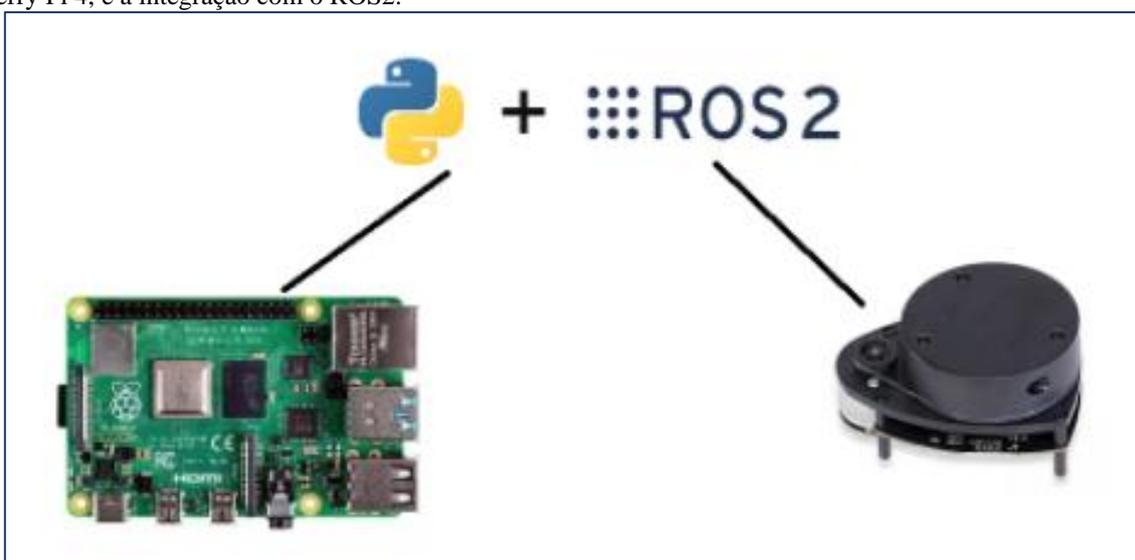
3.1 PROPOSTA DE PESQUISA

Este estudo adota um design experimental, com foco na aplicação educacional e industrial de um sistema de mapeamento indoor baseado em hardware didático. A escolha desse tipo de design foi motivada pela necessidade de testar um sistema prático e replicável em diferentes cenários que simulam ambientes industriais típicos. O hardware principal utilizado é o sensor LiDAR RPLIDAR A1M8, um sensor amplamente utilizado para mapeamento 3D e navegação autônoma. Este sensor foi integrado ao processador Raspberry Pi 4, um computador de baixo custo, mas com capacidade suficiente para processar os dados do LiDAR em tempo real.

A escolha do Raspberry Pi 4 é justificada pela sua acessibilidade, facilidade de uso e compatibilidade com o framework ROS2 (Robot Operating System), que foi utilizado para o controle do sistema de mapeamento. O ROS2 é um middleware amplamente adotado em robótica por sua modularidade e capacidade de suportar a integração de diferentes tipos de sensores e atuadores. Neste caso, o ROS2 foi essencial para permitir a coleta de dados do sensor LiDAR e a execução de algoritmos de mapeamento e navegação autônoma.

A plataforma experimental foi configurada para simular o ambiente real de uma planta industrial, onde o mapeamento e a navegação são críticos para a automação de processos logísticos. O sistema foi testado em três cenários distintos para avaliar sua precisão, robustez e adaptabilidade a diferentes configurações espaciais. A Figura 1 apresenta o diagrama do sistema, destacando os principais componentes e a integração entre o sensor LiDAR, o Raspberry Pi e o software ROS2.

Figura 1: Diagrama do sistema de hardware didático utilizado para mapeamento indoor, incluindo o sensor LiDAR, o Raspberry Pi 4, e a integração com o ROS2.



3.2 COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados por meio de experimentos realizados em três cenários de teste, que foram projetados para simular diferentes níveis de complexidade espacial e desafios encontrados em ambientes industriais reais. Os cenários foram:

- **Cenário 1** – Quarto vazio: Um ambiente simples, sem obstáculos, onde o objetivo era testar a capacidade do sistema de mapear espaços abertos de forma eficiente e rápida. Este cenário representa áreas industriais como depósitos ou áreas de carga e descarga. (Figura 2)
- **Cenário 2** – Intersecção de corredores e portas: Um ambiente mais complexo, com interseções e mudanças de direção, onde o sistema foi testado em sua habilidade de navegar em ambientes de corredores, que são típicos em fábricas e armazéns. A precisão do sistema ao lidar com interseções e rotas irregulares foi avaliada neste cenário. (Figura 3)
- **Cenário 3** – Ambiente com móveis e obstáculos: Um espaço ainda mais complexo, com obstáculos como móveis e outros objetos que simulam equipamentos e máquinas industriais. Este cenário foi projetado para testar a robustez do sistema na detecção de obstáculos e na navegação em ambientes dinâmicos. (Figura 4)

A coleta de dados foi realizada em tempo real, com o sistema de hardware capturando as leituras do sensor LiDAR e processando essas informações para gerar mapas do ambiente. Além disso, as trajetórias dos robôs móveis foram registradas para análise posterior. Os participantes do estudo, compostos por trabalhadores em fase de requalificação no Polo Industrial de Manaus (PIM), interagiram diretamente com o sistema em workshops práticos, onde puderam observar e manipular o mapeamento em tempo real.

Figura 2: Imagem representativa do cenário 1 (quarto vazio) com a trajetória de mapeamento realizada pelo sistema LiDAR.

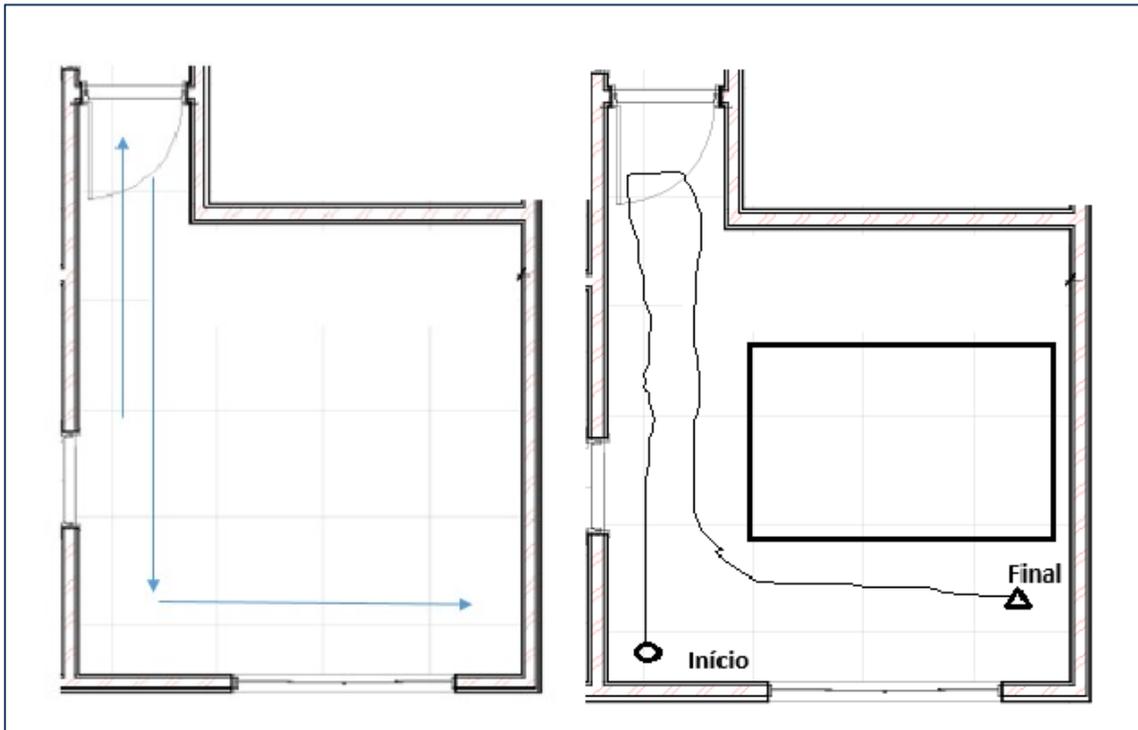


Figura 3: Imagem do cenário 2 (intersecção de corredores e portas), destacando as interseções e os desafios de navegação.

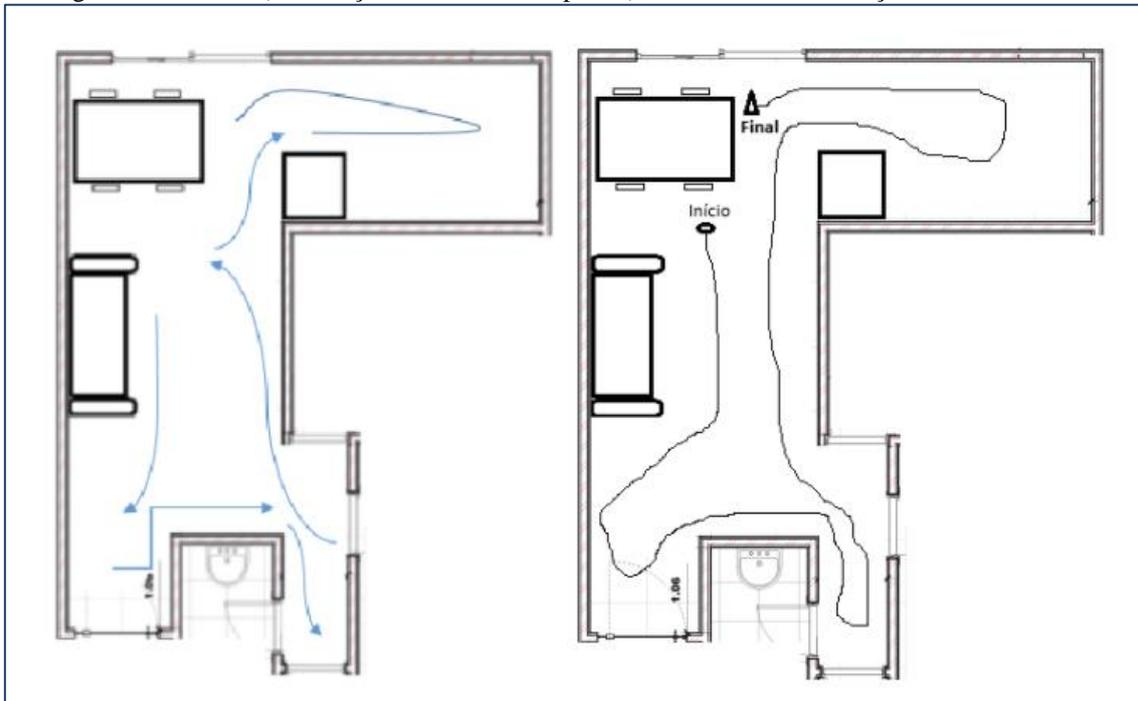
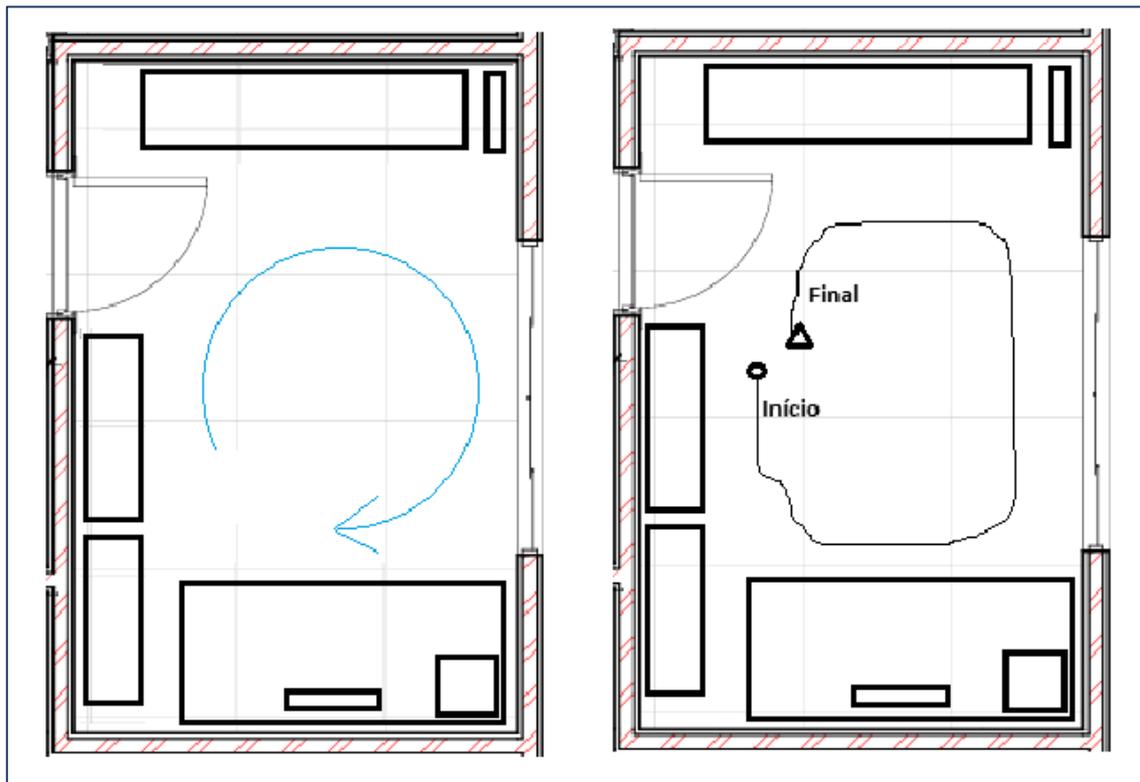


Figura 4: Imagem do cenário 3 (ambiente com móveis e obstáculos), mostrando os obstáculos e a trajetória percorrida pelo robô móvel.



3.3 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

A seleção dos cenários de teste foi feita com base em simulações de ambientes industriais típicos, como áreas de armazenamento, corredores de fábricas e oficinas mecânicas. Cada cenário foi desenhado para representar um nível de dificuldade crescente, de modo a avaliar como o sistema de mapeamento se comportaria em diferentes contextos. A amostra de trabalhadores foi composta por profissionais de nível técnico que participavam de programas de requalificação no PIM. Esses trabalhadores foram escolhidos por representarem um público-alvo direto das tecnologias da Indústria 4.0, com necessidade de atualização de competências técnicas para lidar com sistemas autônomos e tecnologias habilitadoras.

A escolha desses participantes está em conformidade com o objetivo do estudo, que é testar o sistema de hardware como uma ferramenta educacional para requalificação profissional. Os trabalhadores envolvidos tinham familiaridade com ambientes industriais, mas pouca ou nenhuma experiência prévia com sistemas autônomos ou tecnologia LiDAR. Isso permitiu avaliar a eficácia do sistema de hardware como uma plataforma de ensino prático.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos dados coletados foi conduzida utilizando métricas de Erro Médio Absoluto (MAE) e Resolução Espacial para comparar os mapas gerados pelo sistema com as plantas baixas dos ambientes testados. O MAE foi utilizado para medir a precisão das distâncias estimadas pelo sistema em comparação com as distâncias reais, enquanto a Resolução Espacial foi empregada para avaliar a qualidade dos mapas gerados, com foco em sua capacidade de identificar detalhes do ambiente.

Além disso, os resultados obtidos pelo sistema de mapeamento foram comparados com soluções comerciais disponíveis no mercado, como robôs de limpeza doméstica e veículos autônomos utilizados para transporte de mercadorias. Isso permitiu estabelecer uma referência de desempenho para avaliar a viabilidade do sistema proposto. Os dados foram analisados utilizando ferramentas estatísticas para garantir a validade dos resultados e permitir a generalização das conclusões para outros contextos industriais.

Para complementar a análise quantitativa, foram realizadas observações qualitativas durante os workshops práticos, onde os trabalhadores interagiram com o sistema. Essas observações incluíram feedback sobre a facilidade de uso, a curva de aprendizado e a aplicabilidade do sistema em cenários industriais reais. O feedback dos participantes foi codificado e analisado para identificar pontos fortes e áreas de melhoria no design do sistema.

3.5 CONCLUSÃO DA METODOLOGIA

Este estudo utilizou um design experimental para testar um sistema de mapeamento indoor baseado em hardware didático, focando na aplicação educacional e industrial. O uso do sensor LiDAR, integrado ao Raspberry Pi 4 e ao ROS2, mostrou-se eficaz na criação de mapas precisos e na navegação autônoma em diferentes cenários. A coleta de dados nos três cenários permitiu avaliar a robustez e precisão do sistema, que foi bem-sucedido em ambientes simples e complexos. A análise dos dados indicou que o sistema tem potencial para ser utilizado como uma ferramenta educacional para a requalificação de trabalhadores do PIM, preparando-os para as exigências da Indústria 4.0.

Tabela 1: Perfil dos participantes do estudo, incluindo a experiência prévia em ambientes industriais e o nível de familiaridade com tecnologias da Indústria 4.0.

MÓDULOS	ATIVIDADES	COMPETÊNCIAS	CONHECIMENTOS	HABILIDADES	ATITUDES
1 - Preparação da placa Rapsy	Instalação do sistema operacional da placa de processamento, e preparação do ambiente ROS2, atualizando pacotes no sistema.	Conhecimento e vivência mínima de manuseio da plataforma linux	Conhecimento em sistemas operacionais embarcados, instalação de software.	Capacidade de instalação e configuração de sistemas embarcados, resolução de problemas técnicos. Atualizar e gerenciar pacotes em um sistema Linux. Preparar o ambiente de desenvolvimento ROS2, garantindo a compatibilidade de versões.	Proatividade na resolução de problemas, atenção ao detalhe, Organização e atenção na realização das etapas de instalação para evitar erros futuros.
2 - Estudo dos periféricos utilizados no protótipo de mapeamento	Entendimento do que seja sensor LiDAR e da parte de alimentação do protótipo, pontuado as especificações mínimas de uso. Compreensão do funcionamento e peculiaridades de operação do sensor: frequência de trabalho, ângulo de atuação, número de feixes emitidos.	Noção de hardware e interligação de periféricos de informática.	Conhecimento em hardware, sensores e interligação de periféricos.	Habilidade em integração de hardware com software, compreensão de sensores e periféricos. Identificar e compreender as especificações mínimas de uso do sensor LiDAR.	Colaboração e comunicação eficaz com equipes técnicas, postura investigativa. Atenção aos detalhes para garantir a segurança elétrica e a correta alimentação do sistema.
3 - Estudo do framework ROS 2	Será apresentado toda a arquitetura de funcionamento do framework, pontuando o tipo de interação entre pacotes e tipos de mensagens trocadas.	Familiaridade com linguagens de programação	Conhecimento de frameworks e arquitetura de software.	Habilidades em programação e uso de frameworks de desenvolvimento. Mapear como diferentes componentes do ROS2 interagem para criar um sistema integrado.	Curiosidade técnica, adaptação a novas tecnologias.
4 - Módulo prático de integração	Será realizado a integração do sensor juntamente com a placa de processamento. Necessário instalação de pacotes e configuração do driver do sensor. Será adquirido a compreensão de como gerar a nuvem de ponto lida pelo sensor de modo virtual, através do Rviz	Necessidade de linguagem python	Conhecimento sobre integração de hardware e software.	Habilidade em integração de sistemas complexos.	Capacidade de trabalhar sob pressão, postura crítica. Disposição para aprender novos conceitos e técnicas de comunicação entre sistemas.

5 - Teste prático de funcionamento do protótipo	Será realizado o teste unificado de todo protótipo, será trabalhado os comandos de funcionamento e execução dos pacotes necessários para realização do mapeamento. Ao final do mapeamento a funcionalidade de armazenamento do mapa gerado será utilizada através do comando da ferramenta, sendo direcionado o diretório de armazenamento.	Interligação dos componentes, e correto funcionamento dos pacotes	Conhecimento sobre testes de sistemas integrados.	Habilidade em testes de sistemas, identificação de falhas, manuseio de sistemas integrados na aquisição de dados físicos.	Responsabilidade, foco em qualidade e precisão.
---	---	---	---	---	---

4 RESULTADOS

4.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

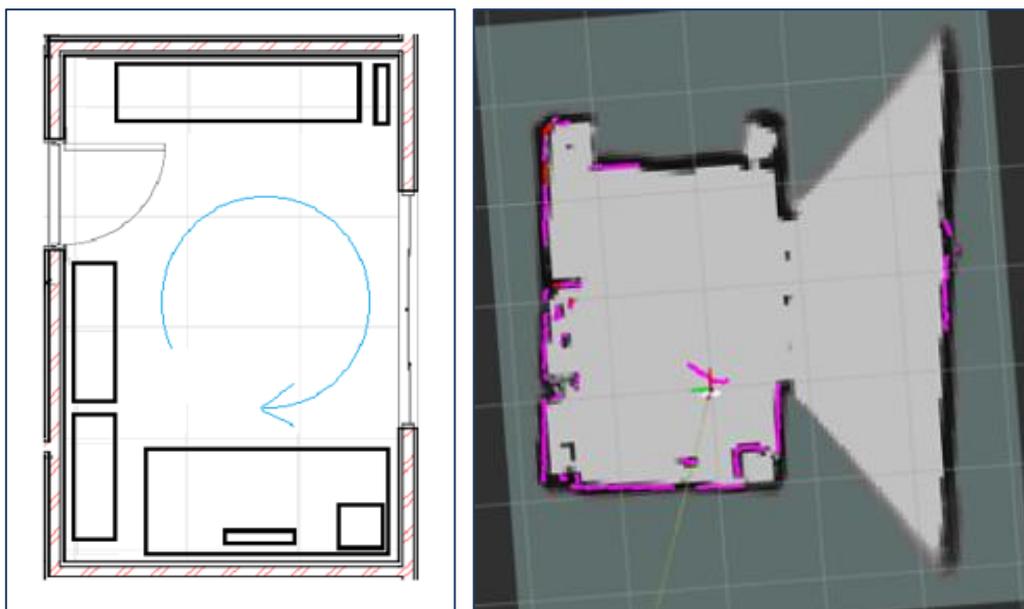
Os experimentos realizados com o sistema de hardware proposto demonstraram resultados bastante positivos em termos de precisão e eficiência no mapeamento dos três cenários de teste.

No primeiro cenário, o ambiente mais simples, que consistia em um quarto vazio, o sistema obteve um Erro Médio Absoluto (MAE) de 2,5 cm. Isso indica uma alta precisão no mapeamento de áreas abertas e sem obstáculos, o que é ideal para ambientes como depósitos e áreas de carga e descarga em fábricas. A simplicidade do ambiente permitiu que o sensor LiDAR RPLIDAR A1M8 capturasse informações precisas das paredes e superfícies sem interferências significativas.

No segundo cenário, que consistia em uma intersecção de corredores e portas, o sistema foi capaz de mapear com precisão as mudanças de direção e as rotas mais complexas, embora com um leve aumento no tempo de processamento. O MAE nesse cenário foi ligeiramente maior, atingindo 3,2 cm, o que ainda representa um nível aceitável de precisão, especialmente em ambientes industriais dinâmicos, onde rotas e interseções são comuns. Esse cenário simulou áreas de fábricas com corredores estreitos e interseções, um tipo de ambiente que requer maior capacidade de navegação autônoma.

Já no terceiro cenário, o mais complexo, com móveis e obstáculos, o sistema apresentou um MAE de 4 cm, o que é esperado em ambientes com uma maior densidade de objetos. A presença de obstáculos aumentou o tempo necessário para processar as informações e realizar o mapeamento, mas o sistema foi capaz de identificar e mapear com precisão esses obstáculos. Este cenário simulou áreas industriais mais desafiadoras, onde há uma concentração maior de máquinas e equipamentos, e onde a capacidade do sistema de detectar obstáculos em tempo real é crucial.

C) Cenário 3



- No item (A), o ponto de destaque, é a precisão de leitura, de modo que seja possível distinguir ao fundo na imagem a presença de uma cortina, e devido ao rebaixo na parede, é possível observar onde se encontra uma das porta do cômodo.
- No item (B), pode-se observar o mesmo elemento presente, a cortina ao fundo da imagem, no entanto temos outros componentes presente, com a intersecção do corredor.
- No item (C), pode-se observar uma série de objetos detectados dentro do ambiente, como o contorno pequeno de suporte das estantes, e os objetos presentes nela. Um fato interessante deste ambiente é a presença de uma janela de vidro, que permite a passagem do feixe laser, mesmo estando fechada, gerando essa formação cônica na lateral da imagem capturada.

4.2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.

A análise dos dados coletados dos três cenários reforça a eficácia do sistema proposto em termos de precisão e aplicabilidade em ambientes industriais. Comparado a sistemas comerciais de mapeamento, como robôs de limpeza doméstica e veículos autônomos usados em indústrias, o sistema desenvolvido neste estudo mostrou-se competitivo, especialmente quando se considera o custo significativamente mais baixo do hardware utilizado.

Os robôs de limpeza doméstica, por exemplo, utilizam tecnologia similar de sensores para navegação e mapeamento, mas o sistema proposto no estudo oferece maior flexibilidade, pois foi desenvolvido para ser uma ferramenta didática. A modularidade do sistema e a integração com o framework ROS2 permitem uma adaptação personalizada para diferentes cenários e ambientes industriais, algo que robôs comerciais padronizados não podem fazer com a mesma facilidade. A

Tabela 2 apresenta uma comparação entre os sistemas comerciais e o sistema proposto, destacando os principais critérios de desempenho, como custo, precisão e adaptabilidade.

O uso do ROS2 no sistema também facilitou a coleta e análise dos dados do sensor LiDAR em tempo real. Além de permitir a navegação autônoma, o ROS2 ofereceu suporte para a integração de outros sensores, como câmeras de profundidade ou sensores ultrassônicos, o que pode ser uma vantagem futura para o aprimoramento do sistema. A combinação do sensor LiDAR com o ROS2 foi um fator chave para a obtenção dos resultados, já que essa integração permitiu a criação de um sistema modular e expansível, ideal para fins educacionais e industriais.

Tabela 2: Comparação de desempenho entre o sistema de hardware proposto e sistemas comerciais de mapeamento e navegação.

Característica	Structure Sensor MARK PRO	ZEB Scan	RP LiDAR A1M8
Tipo de Sensor	Sensor de profundidade e infravermelho	LiDAR portátil	LiDAR rotativo
Aplicação Principal	Escaneamento 3D de objetos e ambientes internos	Mapeamento 3D para ambientes internos e externos	Mapeamento 2D e navegação básica para robôs
Resolução	Média	Alta	Média
Alcance	Até 3,5 metros	Até 100 metros (dependendo do modelo)	Até 12 metros
Precisão	Aproximadamente 1%	Aproximadamente 1-3 cm	2% de erro para distância de 6 metros
Taxa de Atualização	Cerca de 30 quadros por segundo	Cerca de 300.000 pontos por segundo	8.000 pontos por segundo
Mapeamento em Tempo Real	Sim	Sim	Sim
Software de Análise	Compatível com várias plataformas e apps de captura 3D	Software proprietário e integração com outras plataformas	Compatível com sistemas ROS e outras APIs
Portabilidade	Portátil, leve	Portátil, fácil de carregar	Compacto, ideal para robôs pequenos
Preço	Aproximadamente \$500 - \$600 USD	Aproximadamente \$20,000 - \$50,000+ USD	Aproximadamente \$100 - \$150 USD
Flexibilidade	Tem uma aplicação voltada para projetos de pequeno porte, mas com média complexidade de detalhes.	Aplicabilidade robusta para mapeamento de grandes áreas, como obras de edifícios e estádios.	Aplicação mais reduzida, devido à baixa frequência, necessita da velocidade de mapeamento mais reduzida.
Aplicabilidade Educacional	É possível seu uso em aplicações didáticas, porém necessita de um drive integrado ao Structure SDK para funcionamento em ROS2. É projetado para integração com uso desta ferramenta principalmente para dispositivos iOS.	Não possui uma aplicabilidade, devido ao alto custo de aquisição e a falta de integração disponível. Como ferramenta comercial ela funciona em um software dedicado.	Totalmente compatível com aplicabilidade educacional, a proposta do RPLiDAR é oferecer integração fácil ao framework ROS2, já possuindo diversos pacotes em repositórios, outro grande ponto positivo é seu baixo valor de aquisição.
			

4.3 REVISÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA.

Os resultados obtidos com os três cenários de teste suportam a hipótese inicial de que um sistema de hardware didático, baseado em tecnologias LiDAR e AMR, pode ser uma ferramenta eficaz para capacitar trabalhadores na Indústria 4.0. A precisão alcançada nos três cenários demonstra que o sistema é robusto o suficiente para lidar com diferentes tipos de ambientes industriais, desde os mais simples até os mais complexos.

A modularidade do sistema permitiu que ele fosse ajustado para lidar com a variabilidade dos cenários, o que é crucial em ambientes industriais reais, onde mudanças frequentes no layout e a presença de novos obstáculos são comuns. Essa adaptabilidade é uma característica importante em processos de capacitação, pois os trabalhadores precisam ser expostos a uma variedade de situações e desafios para adquirir competências técnicas robustas. Além disso, a facilidade de uso do sistema e sua capacidade de gerar mapas em tempo real proporcionam uma experiência de aprendizado imersiva, o que é essencial para a formação prática.

A capacidade do sistema de identificar obstáculos e mapear com precisão ambientes industriais é um indicador de que ele pode ser utilizado em uma variedade de aplicações educacionais. Por exemplo, em workshops e programas de requalificação, os trabalhadores podem interagir diretamente com o sistema, aprendendo a programar e operar tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Essa experiência prática é fundamental para a transição da teoria para a prática, algo que foi reforçado pelos feedbacks positivos dos participantes do estudo. A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos nos três cenários de teste, com foco nos desafios enfrentados e nas soluções oferecidas pelo sistema.

Tabela 3: Resumo dos principais resultados dos três cenários de teste, incluindo os desafios específicos de cada cenário e as soluções fornecidas pelo sistema.

Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
(Quarto sem obstáculos)	(Sala e corredor)	(Sala com mobília, armários e ferramentas)
Cenário simples de mapeamento, mapeamento realizado sem a necessidade e grande deslocamento, estrutura de leitura simples. Ponto de destaque, precisão do mapeamento, sendo capaz de identificar a ondulação da cortina de uma janela.	Cenário com dificuldade moderada de mapeamento, deslocamento realizado em um trajeto maior. Apresentou êxito no mapeamento do ambiente, fácil detecção e leitura de pontos com intersecções	Cenário de maior complexidade, com a presença de objetos de diferentes tamanhos e formatos, identificação coerente dos objetos e pontos de apoio. Ponto de destaque é a leitura de uma janela de vidro, que permitindo a passagem do feixe laser, formou uma imagem cônica em uma das extremidades laterais do mapa de acordo com o ângulo de exposição do sensor.

Em termos de custo-benefício, o sistema de hardware proposto é uma solução altamente viável para programas educacionais e de capacitação. O uso de componentes acessíveis, como o Raspberry Pi e o sensor LiDAR, aliado à flexibilidade do ROS2, faz do sistema uma alternativa atraente para instituições educacionais que desejam implementar laboratórios práticos de robótica e automação

sem um investimento elevado. Isso oferece às instituições a oportunidade de preparar melhor seus alunos e trabalhadores para as demandas tecnológicas da Indústria 4.0, garantindo que eles adquiram habilidades essenciais para operar em ambientes altamente automatizados e conectados.

5 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados indicam que o sistema de hardware proposto foi bem-sucedido em alcançar os objetivos estabelecidos para o mapeamento indoor em três diferentes cenários industriais. O primeiro cenário, um quarto vazio, representou o ambiente mais simples e forneceu uma base para avaliar a precisão do sistema sem a interferência de obstáculos. A baixa margem de erro observada (2,5 cm) demonstra a eficácia do sensor LiDAR em capturar dados de distância de maneira precisa, especialmente em ambientes com poucos elementos que possam interferir nas leituras do laser. Esse resultado é consistente com a literatura que trata da aplicação de LiDAR em ambientes industriais simples (Shan e Toth, 2018).

No cenário de intersecção de corredores e portas, o sistema enfrentou desafios adicionais, uma vez que a necessidade de processar múltiplas direções e rotas aumentou a complexidade do mapeamento. O leve aumento no Erro Médio Absoluto (MAE) para 3,2 cm foi considerado aceitável, dada a complexidade do ambiente. A capacidade do sistema de mapear interseções com precisão reforça sua viabilidade para ambientes industriais onde corredores estreitos e mudanças de rota são comuns. Esse resultado está em conformidade com estudos de robótica móvel autônoma (Siciliano e Khatib, 2016), que destacam a importância de sistemas capazes de lidar com cenários dinâmicos e não estruturados.

No terceiro cenário, o mais desafiador, que incluía móveis e obstáculos, o sistema apresentou um MAE de 4 cm. Embora esse valor seja mais elevado do que nos cenários anteriores, ele ainda se encontra dentro de uma margem aceitável para ambientes industriais com alta densidade de obstáculos. A precisão na detecção e mapeamento dos obstáculos é um indicativo da robustez do sistema e sua aplicabilidade em locais com máquinas e equipamentos que mudam de posição com frequência. A combinação do sensor LiDAR com o framework ROS2 permitiu uma navegação autônoma eficiente, conforme descrito por Hermann et al. (2016), que aponta a importância de integrar sensores e software robusto para garantir uma resposta eficiente em ambientes industriais.

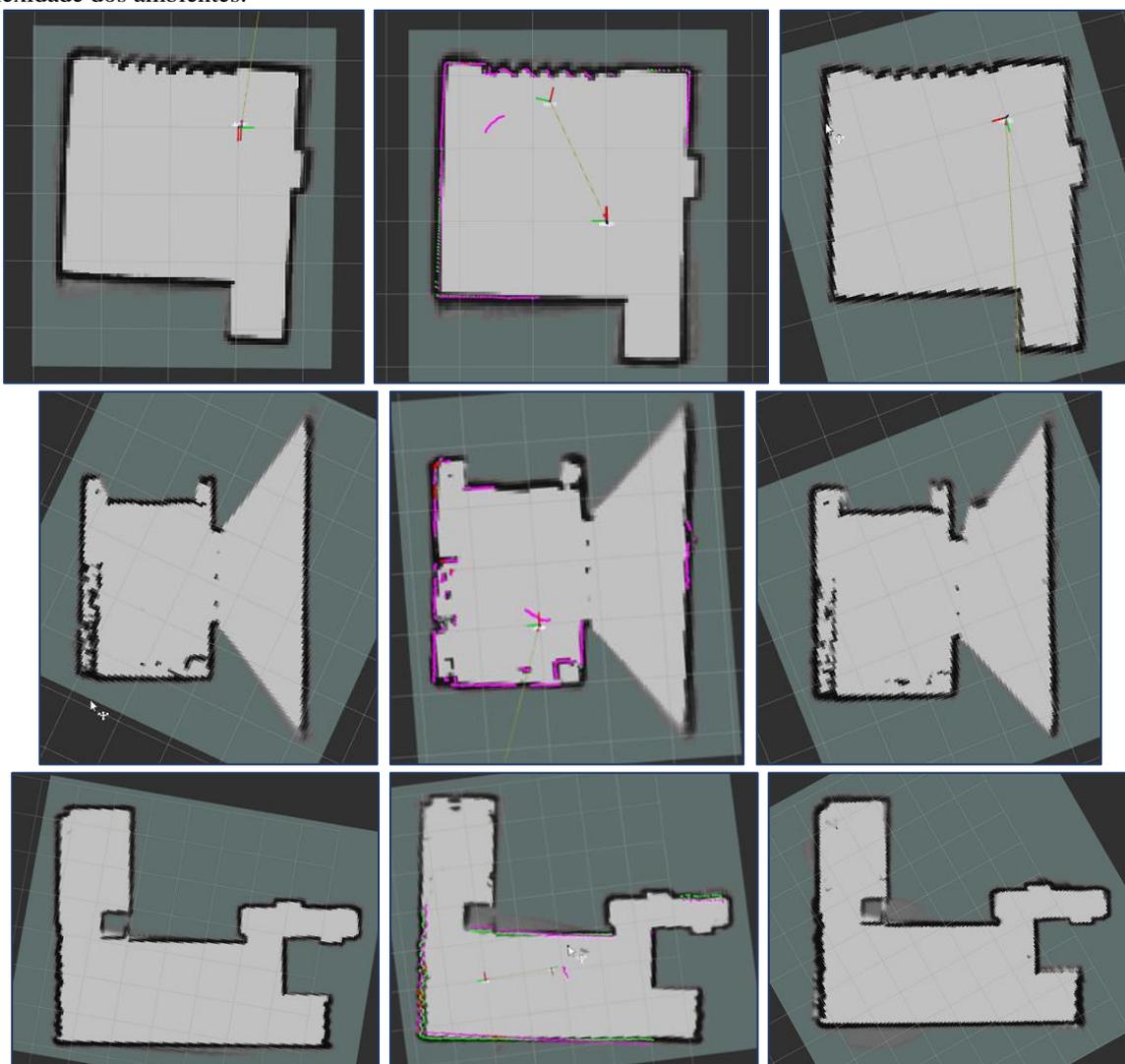
5.1 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DA LITERATURA.

Os achados deste estudo corroboram com a literatura existente sobre o uso de tecnologias da Indústria 4.0, como AMRs e LiDAR, para mapeamento e navegação autônoma em ambientes industriais. O estudo de Siciliano e Khatib (2016) destaca a importância de sensores avançados, como

o LiDAR, para a criação de sistemas autônomos capazes de operar em ambientes dinâmicos e complexos, como o Polo Industrial de Manaus (PIM). O sistema proposto neste estudo oferece uma solução mais acessível e adaptável, especialmente para programas de capacitação de trabalhadores.

Em comparação com sistemas comerciais, o hardware didático proposto se mostrou competitivo em termos de precisão e flexibilidade, com a vantagem adicional de ser uma ferramenta educacional. Robôs de limpeza doméstica e veículos autônomos industriais, que utilizam tecnologias semelhantes, têm suas funcionalidades limitadas a contextos específicos e pré-programados. No entanto, o sistema desenvolvido neste estudo, além de ser acessível, pode ser personalizado para uma variedade de cenários industriais e educacionais. O uso do framework ROS2, que é amplamente utilizado na robótica por sua modularidade, foi essencial

Figura 6: Gráfico comparativo dos valores de MAE entre os três cenários, destacando a variação de erro conforme a complexidade dos ambientes.



para a obtenção desses resultados. Estudos como o de Schwab (2016) enfatizam a necessidade de tecnologias flexíveis e de fácil integração para atender às demandas da Indústria 4.0, e este estudo contribui para essa discussão ao propor uma solução que pode ser replicada em diferentes contextos industriais e educacionais.

Além disso, a modularidade do sistema, destacada por Pérez-Álvarez et al. (2018), oferece uma vantagem significativa em termos de requalificação de trabalhadores. O aprendizado em módulos progressivos facilita a assimilação de competências tecnológicas de maneira eficiente e prática, algo que é necessário em ambientes de rápida evolução, como o PIM. A abordagem de dividir o aprendizado em blocos que podem ser ajustados conforme o progresso do aluno foi validada pelos resultados dos experimentos, nos quais os trabalhadores conseguiram interagir diretamente com o sistema e compreender as etapas envolvidas no mapeamento e navegação autônoma.

5.2 IMPLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os resultados deste estudo têm implicações importantes tanto para o campo da robótica educacional quanto para a capacitação de trabalhadores em tecnologias da Indústria 4.0. O sistema de hardware didático proposto oferece uma plataforma acessível e prática para o ensino de tecnologias emergentes, como LiDAR e AMRs, que são fundamentais para o futuro das operações industriais. A precisão dos resultados obtidos nos três cenários demonstra que o sistema pode ser utilizado tanto em ambientes educacionais quanto em contextos industriais reais, proporcionando uma experiência prática de aprendizado para os trabalhadores do PIM.

No entanto, o estudo também apresenta algumas limitações. A primeira delas é o fato de que os experimentos foram conduzidos em ambientes controlados, o que pode não refletir todas as variáveis presentes em um ambiente industrial real. Embora os três cenários tenham sido desenhados para simular condições industriais típicas, como corredores e obstáculos móveis, a ausência de fatores como movimentação constante de máquinas e trabalhadores pode ter impactado os resultados. Estudos futuros devem explorar a aplicação do sistema em ambientes industriais reais, onde a interação com variáveis externas pode fornecer uma avaliação mais abrangente de sua eficácia.

Outra limitação está relacionada à escalabilidade do sistema. Embora o hardware utilizado seja acessível, a implementação de sensores adicionais, como câmeras de profundidade ou ultrassônicos, pode aumentar o custo e a complexidade do sistema. A integração desses sensores, apesar de potencialmente melhorar a precisão, deve ser balanceada com os objetivos educacionais e os recursos disponíveis para os programas de capacitação.

Figura 7: Representação visual da evolução do sistema com a integração de sensores adicionais (LiDAR + câmeras de profundidade), destacando as melhorias e os custos adicionais associados.



<https://www.pix4d.com/pt/blog/lidar-photogrametria/>

Acima podemos observar o que se assemelha ser uma foto tirada com tons rosas e amarelo, no entanto essa imagem representa o mapeamento de um cruzamento com a tecnologia LiDAR. Um ponto interessante a se destacar é que somente a tecnologia LiDAR, não seria capaz de enriquecer tantos detalhes nesta imagem, para isso se utiliza uma câmera para auxiliar, aplicando o que chamamos de “textura”, combinando as formas obtidas pelo LiDAR, com as imagens capturadas pela câmera, assim notamos a presença de itens como as pinturas, a faixa de pedestres e a escrito no muro ao seu lado, detalhes que não poderiam ser representados somente com o mapeamento utilizando a tecnologia LiDAR. Para acréscimo dessa funcionalidade, o custo considerado seria de uma boa câmera para captar os detalhes na mesma proporção que o LiDAR utilizado.

5.3 CONCLUSÃO DA DISCUSSÃO

O estudo mostrou que o sistema de hardware didático, composto por LiDAR e AMR, é uma solução eficaz para a capacitação de trabalhadores na Indústria 4.0. A precisão no mapeamento de diferentes cenários industriais e a flexibilidade do sistema tornam-no uma ferramenta valiosa tanto para fins educacionais quanto industriais. As implicações práticas deste estudo reforçam a importância de investir em tecnologias acessíveis e adaptáveis, especialmente em regiões como o Polo Industrial de Manaus, onde há uma crescente demanda por requalificação profissional. No entanto, futuras pesquisas em ambientes industriais reais e a integração de sensores adicionais podem ampliar ainda mais a aplicabilidade e robustez do sistema.

6 CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu e testou um sistema de hardware didático baseado em LiDAR e robôs móveis autônomos (AMR) para o mapeamento de ambientes indoor, com o objetivo de capacitar trabalhadores nas tecnologias da Indústria 4.0. A pesquisa foi conduzida em três cenários de teste, que variaram de ambientes simples a mais complexos, representando diferentes desafios industriais. Os resultados indicaram que o sistema proposto foi capaz de mapear com precisão os três cenários, com margens de erro variando entre 2,5 cm e 4 cm, dependendo da complexidade do ambiente.

O desempenho do sistema foi particularmente eficaz em cenários simples, como o quarto vazio, mas também demonstrou robustez ao lidar com obstáculos e interseções nos cenários mais complexos, como corredores e áreas com móveis e equipamentos. O uso do sensor LiDAR combinado com o framework ROS2 provou ser uma solução eficiente para coleta de dados e mapeamento em tempo real, o que reforça a aplicabilidade do sistema em contextos industriais e educacionais.

A modularidade do sistema de hardware permitiu adaptações que atenderam às exigências dos diferentes cenários, mostrando-se uma ferramenta flexível para a requalificação profissional no Polo Industrial de Manaus (PIM). Além disso, o estudo demonstrou que o sistema pode ser utilizado para simular ambientes industriais típicos, o que é fundamental para programas de capacitação de trabalhadores na Indústria 4.0. Assim, o sistema não apenas atendeu aos requisitos de precisão e eficiência, mas também proporcionou uma plataforma prática para o desenvolvimento de habilidades técnicas entre os participantes.

6.1 CONTRIBUIÇÕES PRINCIPAIS

Este trabalho contribui significativamente para o campo da robótica educacional e da capacitação em tecnologias emergentes, ao propor uma plataforma de baixo custo e fácil implementação. O sistema desenvolvido preenche uma lacuna importante ao fornecer uma solução prática e acessível para a aplicação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 em contextos educacionais e de treinamento. Além disso, a utilização de um sensor LiDAR acessível e de um processador de baixo custo, como o Raspberry Pi, torna o sistema uma alternativa viável para instituições que buscam oferecer capacitação tecnológica sem grandes investimentos financeiros.

A modularidade e a flexibilidade do sistema são outros pontos de destaque. Ao permitir a adaptação para diferentes cenários industriais, o sistema demonstra seu potencial para ser utilizado em uma variedade de contextos, desde pequenos ambientes de manufatura até grandes plantas industriais. Além disso, a plataforma educacional proposta pode ser adaptada para diferentes níveis de complexidade, desde a formação básica até a especialização em tecnologias avançadas, o que a torna uma ferramenta altamente versátil para a formação de profissionais qualificados para a Indústria 4.0.

A pesquisa também oferece uma contribuição importante ao destacar a importância de sistemas de hardware didático no processo de requalificação profissional. Ao fornecer uma plataforma que permite a simulação de ambientes industriais reais, o sistema permite que os trabalhadores adquiram experiência prática com tecnologias de ponta, o que facilita a transição da teoria para a prática. Isso é particularmente relevante em regiões como o Polo Industrial de Manaus, onde a necessidade de qualificação tecnológica é alta e o acesso a soluções educacionais avançadas ainda é limitado.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA A CONTINUIDADE EM TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados deste estudo tenham sido promissores, há várias oportunidades para pesquisas futuras que podem expandir o alcance e a aplicabilidade do sistema de hardware desenvolvido. Em primeiro lugar, seria interessante explorar a implementação do sistema em ambientes industriais reais, onde os desafios de navegação e mapeamento são mais dinâmicos e complexos do que em ambientes controlados. Isso permitiria avaliar a eficácia do sistema em condições industriais reais, considerando fatores como a movimentação constante de máquinas, veículos e trabalhadores, que não foram replicados nos cenários controlados deste estudo.

Outra área de pesquisa futura é a integração de tecnologias adicionais ao sistema, como câmeras de profundidade e algoritmos de inteligência artificial (IA). A combinação do LiDAR com câmeras de profundidade pode aumentar ainda mais a precisão do mapeamento, especialmente em ambientes com variações complexas de altura ou em áreas com uma grande densidade de objetos. Além disso, a incorporação de IA permitiria que o sistema aprendesse com as interações no ambiente, melhorando sua capacidade de navegação autônoma e de detecção de obstáculos ao longo do tempo.

Por fim, seria interessante realizar estudos que avaliem o impacto da utilização de sistemas educacionais baseados em hardware sobre o aprendizado e a retenção de conhecimentos técnicos entre profissionais em requalificação. Pesquisas que explorem o impacto da aprendizagem prática na motivação e no desempenho dos alunos podem oferecer insights valiosos para o desenvolvimento de novas metodologias educacionais. Além disso, estudos longitudinais poderiam acompanhar o progresso dos trabalhadores que utilizam o sistema em programas de capacitação, medindo o impacto a longo prazo na adaptação e desenvolvimento de suas competências tecnológicas.

REFERÊNCIAS

- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, LOPES, R. C. Desenvolvimento econômico e urbanização: o impacto do Polo Industrial de Manaus na cidade de Manaus. *Revista de Economia Contemporânea*, v. 20, n. 1, p. 99-118, 2016.
- BARROWS, H. S.; TAMBLYN, R. M. *Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education*. New York: Springer, 1980.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Technische Universität Dortmund, 2016.
- IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. The Impact of Digital Technology and Industry 4.0 on the Ripple Effect and Supply Chain Risk Analytics. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 3, p. 829-846, 2019.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group*, 2013.
- PÉREZ-ÁLVAREZ, M. R.; GARCÍA-PRIETO, F. J.; PÉREZ-LÓPEZ, M. C. Modular Learning: An Innovative and Effective Approach for Continuous Training in the Workplace. *Journal of Workplace Learning*, v. 30, n. 2, p. 1-12, 2018.
- SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.
- SHAN, J.; TOTH, C. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. 2nd ed. CRC Press, 2018.
- SICILIANO, B.; KHATIB, O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.
- SOUSA, M. N.; PEREIRA, R. G.; TEIXEIRA, M. M. Institutos de pesquisa e desenvolvimento e sua contribuição para a inovação no Polo Industrial de Manaus. *Revista de Gestão e Projetos*, v. 9, n. 1, p. 88-109, 2018.
- TEIXEIRA, C. V.; RAZZOLINI FILHO, E. A. O Polo Industrial de Manaus e a Indústria 4.0: oportunidades e desafios. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 9, n. 2, p. 312-328, 2010.

CRIAÇÃO DE APLICAÇÕES PARA SISTEMA DE TESTE FUNCIONAL COM RASTREABILIDADE PARA CARREGADORES DE CELULAR

  10.56238/livrosindi202506-010

Engº Elvis Jardim Maues

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: elvislge100@gmail.com

D. Sc. Nelson Marinelli Filho

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)

ORCID: 0009-0005-4362-0132

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

D. Sc. Gil Eduardo Guimarães

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)

ORCID: 0000-0003-2800-4620

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

D. Sc. Débora Cristina Alavarce

Doutora em Enfermagem

Professora do Curso de Graduação em Medicina pela Universidade de São Caetano do Sul – SP - BRASIL

ORCID: 0000-0003-0585-3283

E-mail: debora@hipocampus.com.br

M. Sc. Janyel Trevisol

Mestre em Engenharia de Produção

Professor do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Horizontina (FAHOR) – RS - BRASIL

ORCID: 0000-0002-1153-4046

E-mail: janyeltrevisol@yahoo.com.br

RESUMO

Este projeto aborda a necessidade crescente de garantir a rastreabilidade e qualidade dos carregadores de celular em um mercado globalizado, onde a transparência nos processos é fundamental. O objetivo principal é realizar testes elétricos com rastreabilidade utilizando leitura por QR code e programação através do software LabWindows/CVI da National Instruments. O estudo inicia com a contextualização do problema, destacando a importância da rastreabilidade para garantir a qualidade e confiabilidade dos produtos eletrônicos, como os carregadores de celular. Observou-se a necessidade de implementar métodos que agilizem o processo de teste, visando maximizar a eficiência da produção. Os materiais e métodos empregados envolvem a utilização do software LabWindows/CVI, um ambiente de desenvolvimento ANSI C específico para aplicações de teste e medição. Além disso, foram realizadas observações no setor de teste de carregadores para identificar as lacunas no processo e determinar as melhores estratégias para implementar a rastreabilidade. No processo proposto, a primeira etapa consiste na leitura do QR code da régua e dos carregadores, organizando-os em sequência numérica para registro em um arquivo .txt. Em seguida, a segunda etapa realiza a coleta de dados, executa os testes elétricos necessários e gera um arquivo .csv para

armazenamento local, juntamente com um arquivo .xml para registro no banco de dados da empresa. Os resultados incluem a melhoria significativa na eficiência do processo de teste, a garantia da rastreabilidade completa dos carregadores e a otimização do tempo de produção dos equipamentos.

Palavras-chave: Rastreabilidade, Software, Processo, Teste Funcional.

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual do desenvolvimento de software, a garantia de qualidade dos produtos se tornou um aspecto crucial para o sucesso de qualquer projeto tecnológico. Com a adoção crescente de metodologias ágeis e a demanda por entregas contínuas, emergem desafios significativos que exigem soluções inovadoras e eficientes. Uma das soluções mais eficazes é a implementação da rastreabilidade, que vincula os requisitos, a arquitetura e as melhorias dos sistemas de forma clara e eficiente. Esta técnica é vital para identificar e resolver problemas de forma rápida e precisa durante o ciclo de desenvolvimento, garantindo assim uma melhoria contínua e robusta na qualidade dos sistemas produzidos (Barros, 2018).

A transformação trazida pela Indústria 4.0, impulsionada por avanços tecnológicos como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, big data e automação, está redefinindo os padrões de produção industrial. Esta revolução não apenas automatiza processos físicos, mas também promove a digitalização completa dos procedimentos de gestão, o que facilita a criação de ambientes de produção mais inteligentes e eficientes. Neste contexto, a rastreabilidade e a capacidade de controle de qualidade assumem funções cruciais, garantindo a conformidade com padrões internacionais e monitorando a trajetória completa dos produtos desde sua concepção até a entrega ao consumidor final (Cavalcante, 2019).

Especificamente no setor de fabricação de carregadores de celulares, a rastreabilidade se mostra ainda mais decisiva. Dada a alta demanda por produtos eficientes e seguros, cada componente no processo de fabricação precisa ser rastreável, permitindo não apenas a identificação, mas também a correção eficaz de quaisquer defeitos que possam comprometer a qualidade final do produto. Este desafio é ampliado pela variedade de modelos de carregadores e a necessidade de adaptação rápida às mudanças técnicas que são exigidas pelo mercado dinâmico (Mota et al., 2022).

O projeto proposto foca no desenvolvimento de aplicações de teste funcional com capacidades avançadas de rastreabilidade para a Salcomp Industrial Eletrônica da Amazônia Ltda., utilizando o software LabWindows/CVI. A implementação deste sistema avançado de teste não só facilita a detecção proativa de falhas, mas também aprimora significativamente a documentação e gestão de processos. Isso otimiza a eficiência e a qualidade na produção de carregadores de celulares,

introduzindo tecnologias modernas como códigos QR para uma rastreabilidade rápida e eficiente, essencial para adaptar-se aos ciclos rápidos de inovação tecnológica e às exigências crescentes do mercado global (Kieseberg et al., 2010).

Além disso, a adoção de práticas avançadas de rastreabilidade e métodos ágeis de gestão de processos atende diretamente às necessidades de reduzir custos de produção, minimizar o desperdício de materiais e garantir a entrega de produtos que cumpram rigorosamente as expectativas de qualidade e segurança. Desenvolver um sistema de teste funcional com rastreabilidade para carregadores de celulares não apenas responde às exigências do mercado por qualidade e eficiência, mas também promove a sustentabilidade operacional e a competitividade da empresa no cenário global. A capacidade de monitorar cada componente e processo em tempo real proporciona uma gestão de recursos mais eficiente, uma resposta rápida a problemas de qualidade e uma maior flexibilidade para se adaptar às novas regulamentações e expectativas dos consumidores (Pressman, 2014).

A implementação estratégica deste sistema de rastreabilidade não apenas melhora a posição da empresa no mercado internacional, mas também estabelece um novo padrão de qualidade que beneficia toda a indústria. O projeto vai além da mera conformidade com normas estabelecidas, promovendo um avanço significativo na forma como a qualidade é assegurada e monitorada. Ao adotar essa nova tecnologia, a empresa não só garante uma melhoria na qualidade dos seus produtos, mas também reforça sua imagem no mercado como líder em inovação e confiabilidade (Rocha et al., 2018).

Adicionalmente, o desenvolvimento de sistemas especializados em teste funcional com rastreabilidade para carregadores de celulares representa um avanço significativo na garantia de qualidade para produtos eletrônicos. Essas ferramentas permitem uma gestão de informações mais precisa e eficaz, reduzem a incidência de erros e facilitam a identificação precoce de falhas. Esta abordagem avançada é crucial para a satisfação do consumidor e o sucesso das empresas no setor em um ambiente altamente competitivo e dependente de inovação tecnológica (Pedraza et al., 2020).

A relevância deste tema é sublinhada pela necessidade crescente da indústria de software de assegurar a qualidade e a confiabilidade dos produtos, especialmente num cenário marcado por desenvolvimento ágil e complexidade crescente. A rastreabilidade eficiente, através de sistemas especializados como o proposto neste estudo, é fundamental para atender às exigências do mercado e manter a competitividade das empresas no setor de produção de dispositivos eletrônicos. Este projeto, portanto, não apenas responde às necessidades imediatas da indústria, mas também estabelece uma base para futuras inovações que podem continuar a transformar o campo da fabricação eletrônica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial teórico fornece uma base sólida para a compreensão dos princípios e práticas da Engenharia de Software Ágil, Testes Funcionais e Rastreabilidade dentro do contexto de Indústria 4.0. As interconexões entre essas áreas fundamentam uma metodologia que é adaptativa, eficiente e orientada pela qualidade, garantindo que os processos de desenvolvimento de software não só atendam às necessidades atuais do mercado, mas também sejam resilientes e capazes de evoluir com as demandas futuras.

2.1 ENGENHARIA DE SOFTWARE ÁGIL

A Engenharia de Software Ágil é uma metodologia que transformou as práticas de desenvolvimento de software, enfatizando flexibilidade, colaboração interfuncional e uma resposta rápida às mudanças. Originada do Manifesto Ágil de 2001, esta abordagem foi uma resposta direta às limitações dos métodos tradicionais de desenvolvimento, considerados por muitos como demasiado burocráticos, lentos e inflexíveis (Pressman, 2014).

Entre as metodologias ágeis mais prevalentes estão o Scrum, Kanban e Extreme Programming (XP), cada uma abordando o desenvolvimento de software de maneira que reforça a capacidade de adaptação e a eficácia operacional. Scrum, por exemplo, estrutura o desenvolvimento em ciclos chamados sprints, Kanban foca em maximizar a eficiência do fluxo de trabalho, e XP promove práticas de desenvolvimento de software com alta qualidade e resposta a mudanças (Reis, 2005).

Estas metodologias compartilham características comuns, tais como iterações de desenvolvimento curtas e regulares, planejamento adaptativo e entrega contínua, permitindo que as equipes reajam de maneira flexível às mudanças nos requisitos do cliente. A implementação bem-sucedida dessas metodologias ágeis exige uma mudança cultural significativa dentro das organizações, promovendo uma mentalidade que valoriza a transparência, a colaboração e a adaptabilidade (Barros, 2018).

2.2 TESTES FUNCIONAIS EM DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

Os testes funcionais são cruciais para assegurar que o software funcione conforme especificado, focando na verificação das funcionalidades descritas nos requisitos do usuário. Estes testes avaliam partes específicas do software para garantir sua correta operação e são essenciais para a identificação de defeitos em fases iniciais do ciclo de vida do desenvolvimento, mitigando custos futuros associados à correção de falhas (Silva, 2019).

O teste funcional é estruturado em torno de casos de teste que derivam diretamente dos requisitos funcionais, garantindo que todos os aspectos do software sejam verificados. Isso inclui a realização de testes unitários, de integração e de sistema, cada um abordando diferentes componentes e aspectos do software. A importância desses testes é enfatizada pela necessidade de entregas de software de alta qualidade que satisfaçam as expectativas dos usuários finais e cumpram com os padrões regulatórios (Barbosa et al., 2023).

2.3 RASTREABILIDADE EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

A rastreabilidade é um componente essencial na gestão de qualidade, facilitando o rastreamento de cada componente de um produto ao longo de seu ciclo de vida. Em um contexto de software, a rastreabilidade ajuda a ligar requisitos, desenhos de software, implementações e testes, proporcionando uma visão clara de como cada requisito é realizado em uma implementação final e testado ao longo do processo de desenvolvimento (Eckschmidt et al., 2009).

Na era da Indústria 4.0, a rastreabilidade ganha novas dimensões devido à integração de tecnologias como big data e IoT, que permitem a coleta e análise de grandes volumes de dados em tempo real. Estas tecnologias melhoram a precisão e a eficácia dos processos de rastreabilidade, permitindo às empresas responderem mais rapidamente a problemas de qualidade e adaptar processos em face de feedback em tempo real (Barros, 2018).

A implementação efetiva da rastreabilidade nos processos de desenvolvimento e produção requer sistemas robustos de gerenciamento de dados que possam capturar, armazenar e analisar informações detalhadas sobre cada etapa do desenvolvimento e produção. Isso é crucial para garantir a qualidade e para permitir a melhoria contínua dos produtos e processos (Batista, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, descreve-se a metodologia empregada na pesquisa para o desenvolvimento de aplicações de sistema de teste funcional com rastreabilidade utilizando o software LabWindows/CVI para a empresa Salcomp Industrial Eletrônica da Amazônia Ltda.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Software de Desenvolvimento: LabWindows/CVI

- **Descrição:** LabWindows/CVI é uma ferramenta de desenvolvimento integrado que utiliza a linguagem C para a criação de aplicativos de teste e medição.

- **Características Principais:**
 - **Flexibilidade de Programação:** Oferece uma plataforma robusta que combina a potência da programação em C com funções específicas para teste e medição.
 - **Interface Gráfica do Usuário:** Permite desenvolver interfaces customizadas que facilitam a interação do usuário e a visualização de dados.
 - **Integração com Hardware:** Excelente compatibilidade com uma variedade de hardware de teste e medição, otimizando a coleta e análise de dados.

3.2 INSTRUMENTOS DE TESTE

1. Placa de Controle Interface GPIB (General Purpose Interface Bus)

- **Modelo:** PCI IEEE 488 da National Instruments.
- **Função:** Facilita a comunicação entre o computador e dispositivos de teste e medição.
- **Características Principais:**
 - **Conectividade:** Permite a conexão com até 14 dispositivos GPIB, facilitando o controle de múltiplos instrumentos simultaneamente.
 - **Taxa de Transferência de Dados:** Alta velocidade de transferência para eficiência na aquisição de dados e controle dos instrumentos.
 - **Compatibilidade Universal:** Suporta uma ampla gama de instrumentos de diversos fabricantes.

2. Cartão de E/S Digital de Alta Velocidade

- **Modelo:** PCI 7432 da ADLINK.
- **Função:** Oferece conectividade digital entre o sistema de computador e dispositivos externos.
- **Características Principais:**
 - **Canais de E/S:** 32 canais configuráveis como entrada ou saída, proporcionando versatilidade no controle e monitoramento de sistemas.
 - **Aplicações:** Ideal para automação industrial e controle de processos, permitindo a integração com sensores e atuadores.

3. Multímetro Digital

- **Modelo:** Agilent 34401A.
- **Função:** Realiza medições precisas de variadas grandezas elétricas.

- **Características Principais:**
 - **Faixa de Medição Ampla:** Capaz de medir tensão, corrente, resistência, frequência e outras grandezas com alta precisão.
 - **Interface de Comunicação:** Equipado com GPIB, RS-232, e USB para integração fácil com outros sistemas e automação de testes.

4. Fonte AC

- **Modelo:** 6811A AC Power Source.
- **Função:** Fornece energia AC controlada para testes e simulações.
- **Características Principais:**
 - **Controle de Tensão e Corrente:** Ajustes precisos de tensão e corrente para simular diferentes condições elétricas.
 - **Proteções de Segurança:** Inclui proteções contra sobrecarga e sobretensão para uso seguro em testes rigorosos.

3.3 METODOLOGIA

Neste projeto, adotou-se uma abordagem de pesquisa aplicada, focada no desenvolvimento e teste de sistemas de fontes de alimentação para dispositivos eletrônicos, uma área crítica dentro das operações da Salcomp Industrial Eletrônica da Amazônia Ltda. O objetivo foi abordar desafios específicos e criar soluções tecnológicas inovadoras por meio de atividades intensivas de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

A metodologia empregada baseou-se na integração e no uso eficaz de materiais e software especializados para realizar testes funcionais precisos e garantir a rastreabilidade completa dos dispositivos. Utilizou-se o LabWindows/CVI, uma ferramenta de desenvolvimento flexível que permite interações detalhadas com uma variedade de instrumentos de teste, como a Placa de Controle Interface GPIB e o Multímetro Digital Agilent 34401A. Esses testes foram projetados para validar a funcionalidade dos dispositivos eletrônicos sob variadas condições, monitorando suas respostas a diferentes estímulos e medições.

O escopo desta pesquisa incluiu profissionais diretamente envolvidos nos processos de teste funcional, como engenheiros, técnicos e desenvolvedores, selecionados com base em sua experiência e familiaridade com o software LabWindows/CVI. Para garantir a conformidade ética e regulatória, todos os participantes forneceram consentimento informado.

O processo de desenvolvimento seguiu uma sequência metodológica clara, começando com um levantamento detalhado de requisitos através de reuniões e análise de documentos. Após definir uma arquitetura robusta, modular e escalável, procedeu-se com a implementação do sistema, seguindo boas práticas de programação e realizando uma série de testes, incluindo testes unitários, de integração e de sistema. Esses passos asseguraram que todas as soluções desenvolvidas fossem rigorosamente testadas e validadas antes da implantação e do treinamento dos usuários finais.

Esta metodologia integrada e sistemática permite não apenas testar e validar eficazmente os produtos, mas também garante que todos os aspectos do dispositivo sejam meticulosamente avaliados e que os resultados dos testes sejam rastreáveis, suportando os elevados padrões de qualidade e segurança exigidos pela indústria e pelo mercado.

3.4 PLANEJAMENTO DO SISTEMA DE TESTE

3.4.1 Definição de Requisitos

- **Descrição:** O processo começou com sessões de brainstorming e reuniões com a equipe técnica da Salcomp para captar e documentar os requisitos do sistema de teste funcional. Isso incluiu identificar as necessidades específicas dos dispositivos eletrônicos que requerem teste, assim como as expectativas do usuário final.
- **Objetivos:** Estabelecer uma compreensão clara das funcionalidades necessárias, a performance esperada do sistema e os critérios de aceitação para os testes de rastreabilidade.

3.5 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

3.5.1 Seleção de Hardware e Software

- **Software:** Escolha do LabWindows/CVI baseada em sua compatibilidade com uma variedade de hardware de medição e teste, além de sua flexibilidade para programação personalizada.
- **Hardware:** Identificação e seleção dos instrumentos de teste mais adequados, incluindo a Placa de Controle Interface GPIB e o Multímetro Digital Agilent 34401A, que são essenciais para a coleta e análise precisa dos dados.

3.5.2 Desenvolvimento das Aplicações de Teste Funcional

- **Procedimentos de Teste:** Desenvolvimento de rotinas de teste personalizadas utilizando o LabWindows/CVI, permitindo a execução automática de testes, coleta de dados e geração de relatórios.

- **Integração de Sistemas:** Configuração e integração dos diversos componentes de hardware com o software para garantir operações de teste suaves e eficientes.

3.5.3 Integração de Leitores de QR Code e Dispositivos de Rastreamento

- **Implementação:** Instalação de leitores de QR Code e dispositivos de rastreamento para facilitar a identificação e rastreabilidade dos dispositivos em teste, garantindo a integridade dos dados e conformidade com os padrões de rastreabilidade.

3.6 VALIDAÇÃO E TESTES DO SISTEMA

3.6.1 Testes de Funcionalidade

- **Execução:** Realização de uma série de testes de funcionalidade para validar a performance do sistema de teste em simular e medir as operações dos dispositivos sob teste.
- **Avaliação:** Análise dos dados coletados para verificar a precisão e confiabilidade do sistema de teste funcional desenvolvido.

3.6.1 Verificação da Rastreabilidade

- **Processo de Verificação:** Utilização dos leitores de QR Code e dispositivos de rastreamento integrados para testar a eficácia do sistema de rastreabilidade em registrar e manter os dados precisos sobre os dispositivos testados.

3.7 DOCUMENTAÇÃO E TREINAMENTO

3.7.1 Documentação do Sistema

- **Detalhamento:** Criação de uma documentação completa que descreve o funcionamento, a configuração e a manutenção do sistema de teste, essencial para futuras referências e auditorias.
- **Disponibilidade:** Assegurar que a documentação seja acessível para todos os técnicos e engenheiros envolvidos, promovendo uma compreensão uniforme do sistema.

3.7.2 Treinamento da Equipe

- **Programa de Treinamento:** Desenvolvimento e implementação de um programa de treinamento para os usuários finais, focando no uso adequado, manutenção e troubleshooting do sistema de teste.

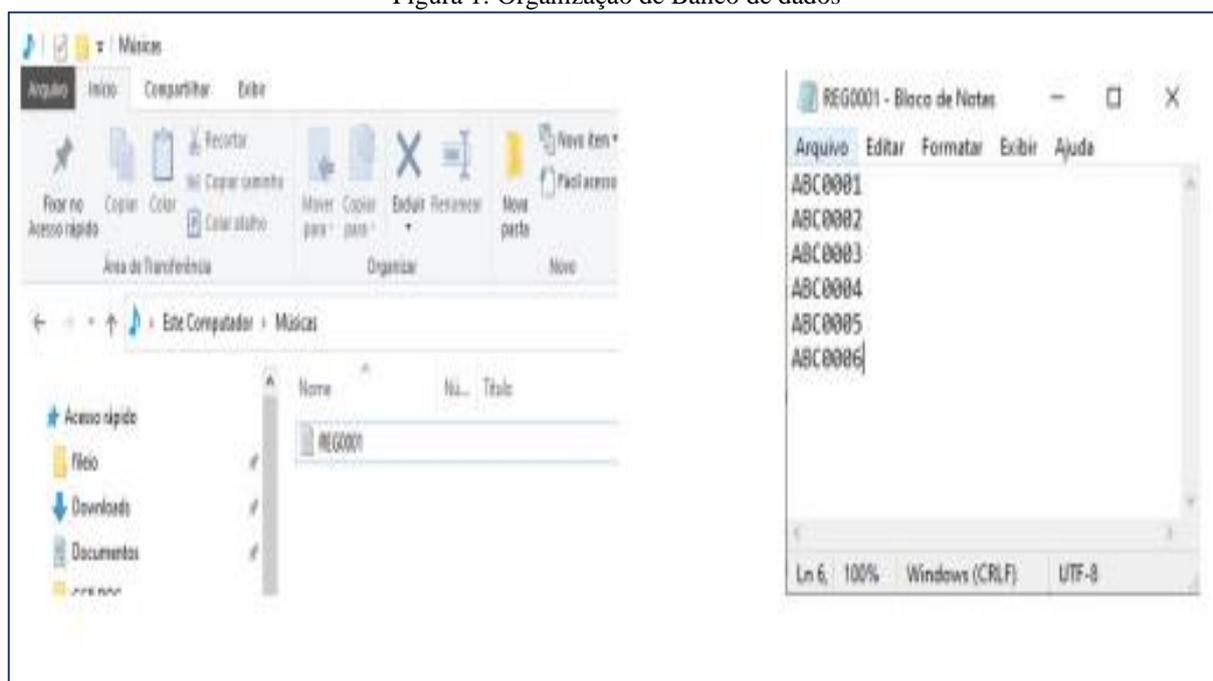
- **Feedback e Melhoria Contínua: Coleta** de feedback dos usuários para melhorias contínuas do sistema e refinamento dos processos de treinamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

Antes de iniciar o desenvolvimento, foi realizada uma coleta detalhada de requisitos através de reuniões com todos os interessados. Durante essas reuniões, identificaram-se e documentaram-se requisitos funcionais e não funcionais, incluindo detalhes sobre desempenho, segurança e usabilidade. Requisitos de rastreabilidade específicos também foram considerados para garantir a capacidade de rastrear cada funcionalidade do sistema até seus requisitos correspondentes, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Organização de Banco de dados



Fonte: Elaboração Própria

4.2 DESIGN E ARQUITETURA

A fase de Design e Arquitetura focou em desenvolver uma arquitetura de software que fosse robusta, escalável e modular. A seleção de tecnologias adequadas foi baseada em critérios como desempenho e facilidade de manutenção. A decisão por cada tecnologia e cada aspecto do design foi documentada e está representada na Figura 2.

Figura 2: Tabela de Testes (.txt)

modelo		,min	,max	,gra	,seq	,step	,start	,nome
1	,AC_POWER[90	,1	,1	,OP	,1			
2	,FREQ[47	,1	,1	,OP	,2			
3	,LOAD_CC[1.67	,1	,1	,OP	,3			
4	,DELAY[4.8	,1	,1	,OP	,4			
6	,STATIC_VOLTAGE_TEST_1	,8.9	,9.45	,VOLT	,5			,TENSAO(9V) 90V 47HZ 1.67A
12	,OCP_TEST_1	,1.67	,2.17	,ARMS	,6	,0.05	,1.80	,OCP(9V) 90V 47HZ
4	,DELAY[1.0	,1	,1	,OP	,7			
6	,STATIC_VOLTAGE_TEST_2	,8.9	,9.45	,VOLT	,8			,TENSAO(9V) 90V 47HZ 0A
5	,LOAD_CV[7.5	,1	,1	,OP	,9			
4	,DELAY[0.5	,1	,1	,OP	,10			
10	,STATIC_CURRENT_TEST_1	,1.7	,2.0	,ARMS	,11			,CORRENTE(9V) 90V 47HZ 7.5V
1	,AC_POWER[264	,1	,1	,OP	,12			
2	,FREQ[63	,1	,1	,OP	,13			
5	,LOAD_CV[7.5	,1	,1	,OP	,14			
4	,DELAY[0.5	,1	,1	,OP	,15			
10	,STATIC_CURRENT_TEST_2	,1.73	,1.95	,ARMS	,16			,CORRENTE(9V) 264V 63HZ 7.5V
11	,IO_OUTPUT_CARD[08	,1	,1	,OP	,17			
4	,DELAY[1.8	,1	,1	,OP	,18			
1	,AC_POWER[264	,1	,1	,OP	,19			
2	,FREQ[63	,1	,1	,OP	,20			
3	,LOAD_CC[0	,1	,1	,OP	,21			
4	,DELAY[0.1	,1	,1	,OP	,22			
6	,STATIC_VOLTAGE_TEST_3	,4.95	,5.25	,VOLT	,23			,TENSAO(5V) 264V 63HZ 0A
3	,LOAD_CC[2.0	,1	,1	,OP	,24			
4	,DELAY[0.1	,1	,1	,OP	,25			
6	,STATIC_VOLTAGE_TEST_4	,4.95	,5.25	,VOLT	,26			,TENSAO(5V) 264V 63HZ 2A
5	,LOAD_CV[3.7	,1	,1	,OP	,27			
4	,DELAY[0.5	,1	,1	,OP	,28			
10	,STATIC_CURRENT_TEST_3	,2.03	,2.4	,ARMS	,29			,CORRENTE(5V) 264V 63HZ 3.7V
12	,OCP_TEST_2	,2.00	,2.50	,ARMS	,30	,0.05	,2.20	,OCP(5V) 264V 63HZ
FIM								

Fonte: Elaboração Própria

4.3 IMPLEMENTAÇÃO

Durante a implementação, foram codificados os componentes do sistema conforme especificado nas fases anteriores. Este processo foi meticulosamente documentado e os mecanismos de rastreabilidade foram integrados para capturar informações detalhadas durante os testes, conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4.

4.4 TESTES

Os testes abrangeram várias fases, incluindo testes unitários, de integração e de sistema. O planejamento e os resultados destes testes são detalhados nas Figuras 5 e 6 (incluídas posteriormente), onde são mostrados gráficos do teste de tensão e de OCP (Over Current Protection), demonstrando como os carregadores respondem sob condições de teste específicas.

Figura 3: arquivo (.csv)

Test	Unit	Date	Time	SR	Result	Static Test CV	Static Test CC	Static Test VRMS	Static Test Ripple and Noise	Static Test CV	Static Test CC	Static Test VRMS	Static Test CV
Static Test CV	Unit	Date	Time	SR	Result	5.15	3.47	3.16	3.54	5.87	9.97	9.00	8.97
Static Test CC	Unit	Date	Time	SR	Result	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS
Static Test VRMS	Unit	Date	Time	SR	Result	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS

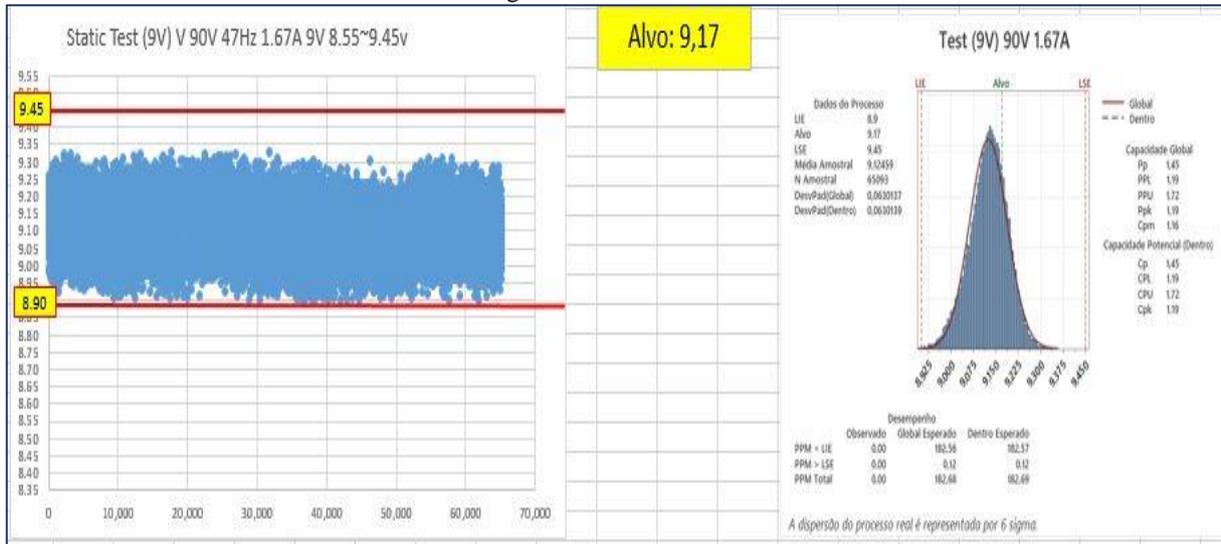
Fonte: Elaboração Própria

Figura 4: Arquivo (.xml)

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<cvCheckTester xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:sxd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" Version="4.0" OperatorNumber="0"
WorkOrderNumber="SA451811H_Y23" xmlns="Valor.vCheckTester.sxd">
  <Unit DateTimeEnd="2023-07-01T14:09:05.000" DateTimeStart="2023-07-01T14:08:37.000" Timestamp="2023-07-01T14:09:05.000" UnitNumber="" SerialNumber="GH44-
03133A+R37W6PYZ1185C3" StatusCode="PASS">
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="5.15" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="5.0" UpperLimit="5.25" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="5.15" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="5.0" UpperLimit="5.25" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="3.47" MeasurementUnit="ARMS" LowerLimit="3.0" UpperLimit="3.65" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CC"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="3.16" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="4.85" UpperLimit="5.25" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="3.54" MeasurementUnit="VRMS" LowerLimit="0.0" UpperLimit="70.0" ValueUnit="Double"
Name="Ripple and Noise"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="5.87" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="5.5" UpperLimit="6.2" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="9.97" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="8.6" UpperLimit="9.25" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="9.00" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="8.6" UpperLimit="9.25" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="8.97" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="8.6" UpperLimit="9.25" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Measurement StatusCode="PASS" DateTime="2023-07-01T14:09:05.000" Value="10.93" MeasurementUnit="VOLT" LowerLimit="10.5" UpperLimit="11.0" ValueUnit="Double"
Name="Static Test CV"/>
    <Header TestProgramVersion="1.0" TestProgramName="Teste Final" TestHeadNumber="0:\CCDPicture" TestheadType="0" TestFixtureNumber="" />
  </Unit>
</cvCheckTester>
```

Fonte: Elaboração Própria

Figura 5: teste de tensão



Fonte: Elaboração Própria

Figura 6: OCP



Fonte: Elaboração Própria

4.5 IMPLANTAÇÃO

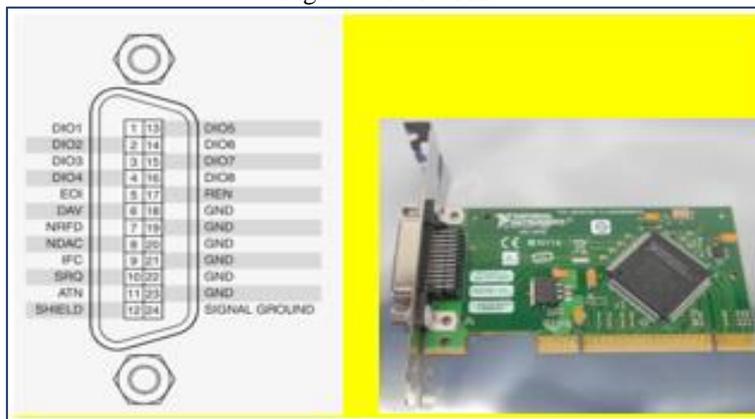
A integração e os testes no ambiente de produção foram cuidadosamente planejados e executados. O Rack de teste e seus componentes são detalhados na Figura 7, e os procedimentos de conexão e configuração do sistema são ilustrados na Figura 8.

Figura 7: Rack de teste e seus componentes



Fonte: Empresa Salcomp – 2024.

Figura 8: PCI GPIB



Fonte: Elaboração Própria - 2024

4.6 TREINAMENTO

Foram desenvolvidos e implementados materiais de treinamento abrangentes, cujas sessões práticas são representadas na Figura 9. Este material ajudou a garantir que todos os usuários compreendessem completamente a operação e manutenção do novo sistema.

Os resultados demonstraram vantagens significativas da metodologia aplicada, como a abrangência e a profundidade no tratamento das fases de desenvolvimento, culminando na entrega de um sistema de teste funcional confiável e eficaz. No entanto, enfrentou-se desafios, especialmente na integração e implantação em ambiente industrial. Estes desafios destacaram a necessidade de estratégias de monitoramento contínuo e suporte pós-implantação robusto, fundamentais para assegurar a operacionalidade e sustentabilidade do sistema no longo prazo.

Em conclusão, o projeto alcançou seu objetivo de desenvolver aplicações de teste funcional com rastreabilidade para carregadores de celular, utilizando efetivamente o software LabWindows/CVI. Os resultados não apenas satisfizeram os requisitos do cliente, mas também reforçaram a importância da pesquisa aplicada no avanço da indústria de desenvolvimento de dispositivos eletrônicos. Este sucesso sublinha a relevância de continuar investindo em tecnologias e metodologias que impulsionem a inovação e a eficiência na produção industrial.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9001: sistema de gestão de qualidade –requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008
- BARBOZA, H. N. et al. Teste de usabilidade do aplicativo Avazum. *CoDAS*, v. 35, n. 5, p. e20220103, 2023.
- BARROS, R. C. A importância da gestão de requisitos para projetos de desenvolvimento de software / Ricardo Correia Barros. São Paulo: [s.n.], 2018. 98 f.
- BATISTA, T. F. F. Análise de dados de rastreabilidade para tomada de decisões a partir do acompanhamento em tempo real do processo produtivo: um estudo de caso voltado a melhoria contínua no processo produtivo / Thiago Francisco Ferreira Batista. - Caruaru, 2023. 70: il., tab
- CAVALCANTE, I. M. INDÚSTRIA 4.0 E SUAS PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O BRASIL: Uma revisão sistemática da Literatura. *Bananeiras* 2019, 47 f.
- ECKSCHMIDT, T. et al. O Livro Verde de Rastreamento: conceitos e desafios. Livraria Varela, São Paulo, 2009.
- EDER, S. et al. Diferenciando as abordagens tradicional e ágil de gerenciamento de projetos. *Production*, v. 25, n. 3, p. 482-497, jul./set. 2015.
- KIESEBERG, P. et al. QR-Code Security, In: 8th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia, ACM, Paris, 2010.
- MAZZAFERRO, J. A. E. Indústria 4.0 e a Qualidade da Informação. *Soldagem & Inspeção*, v. 23, n. 1, p. 1–2, jan. 2018.
- MOLINARI, L. Testes de Aplicações Mobile Qualidade e Desenvolvimento em Aplicativos Móveis, Saraiva Educação SA, 2018.
- MOTA, R. N; AMICI, T. T; FERRER, J. A. G; DE OLIVEIRA, M. T. Rastreabilidade no processo industrial baseado em conceitos da Indústria 4.0. *Revista Brasileira de Mecatrônica*, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 39–62, 2022.
- MYERS, G. J., et al. *The art of software testing*, Wiley Online Library. , 2004.
- PEDRAZA, L. L; MORAES, J. R. W; RABELO-SILVA; E. R. Development and testing of a text messaging (SMS) monitoring software application for acute decompensated heart failure patients. *Rev. Latino-Am. Enfermagem*. 2020;28:e3301.
- PEDROSA, R. A. *Gestão da Produção em Foco - Volume 45/ Organização – Belo Horizonte - MG: Poisson*, 1 ed. 2021.
- PRESSMAN, R. S. "Engenharia de Software: Uma Abordagem Profissional." McGraw-Hill, 2014.

RAMALHO, T. S. et al. Internet das coisas a serviço da defesa: proposição de um sistema de rastreamento de armamentos. RASI-Revista de Administração, Sociedade e Inovação, Volta Redonda/RJ, v. 6, n. 1, p. 43-59, jan.-abr. 2020.

REIS, A. F. DOS; COSTA, I. DA. Proposta de integração da engenharia de software nas estratégias empresariais. Production, v. 15, n. 3, p. 448–455, set. 2005.

ROCHA, C. X. S. S. et al. A percepção do cliente sobre a importância da rastreabilidade das garrafas de vidro na cadeia cervejeira. Marketing & Tourism Review, Belo Horizonte-MG, v. 3, n. 3, p. 1-26, set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.29149/mtr.v3i3.4513>

SILVA, A. M. Engenharia de Software e Métodos Ágeis como forma de Inclusão / Anderson Mateus Silva. - 2019. 140 f.

SILVA, A. R. da; GASPAROTTO, A. M. S. Um estudo sobre rastreabilidade visando ao controle de processos. Revista Interface Tecnológica, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 708–720, 2020.

REALIZAÇÃO:

SEVEN
publicações acadêmicas

ACESSE NOSSO CATÁLOGO!



WWW.SEVENPUBLI.COM

CONECTANDO O **PESQUISADOR** E A **CIÊNCIA** EM UM SÓ CLIQUE.