

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO**

GEISEBEL DOS SANTOS PEZZI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO DA MATURIDADE
TECNOLÓGICA PARA A INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS
DA INDÚSTRIA 4.0 EM AMBIENTES INDUSTRIAIS**

CAXIAS DO SUL

2025

GEISEBEL DOS SANTOS PEZZI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE
TECNOLÓGICA PARA A INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS
DA INDÚSTRIA 4.0 EM AMBIENTES INDUSTRIAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Administração.

Orientador Prof. Dr. Gabriel Vidor

CAXIAS DO SUL

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

P522d Pezzi, Geisebel dos Santos

Desenvolvimento de um modelo de avaliação de maturidade tecnológica para a integração das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 em ambientes industriais [recurso eletrônico] / Geisebel dos Santos Pezzi. – 2025.

Dados eletrônicos.

Tese (Doutorado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Administração, 2025.

Orientação: Gabriel Vidor.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Indústria 4.0. 2. Big data. 3. Robótica. 4. Inovações tecnológicas. 5. Automação industrial. I. Vidor, Gabriel, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 658.562

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

GEISEBEL DOS SANTOS PEZZI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE
TECNOLÓGICA PARA A INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS HABILITADORAS
DA INDÚSTRIA 4.0 EM AMBIENTES INDUSTRIAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Administração.

Aprovado em 10 de dezembro de 2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Gabriel Vidor - Orientador
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Roberto Birch Golçalves
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Fábio Verruck
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. André Luís Korzenowski
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Prof. Dr. Néstor Fabián Ayala
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Dedico este trabalho à minha família, meu alicerce e maior inspiração. Em especial, aos meus pais Everaldo Jacob Pezzi e Ivone dos Santos Pezzi, aos meus irmãos Suélen e Willian, pelo amor e apoio incondicional. À minha avó Maria Manente dos Santos, exemplo de força e perseverança, minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me sustentar mesmo nos momentos mais difíceis, mostrando sua presença através do carinho dos meus familiares e amigos.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio concedido durante parte do período de realização do curso de doutorado, essencial para a continuidade desta jornada acadêmica.

À Universidade de Caxias do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Administração, agradeço pela oportunidade de ingresso no curso, pelo aprendizado proporcionado e pelas experiências enriquecedoras que contribuíram para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Prof. Dr. Gabriel Vidor, registro minha profunda gratidão pela orientação dedicada, pela atenção constante e pelas análises criteriosas que foram fundamentais para a construção desta pesquisa.

Aos professores do PPGA, agradeço pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso, assim como à equipe da secretaria do Programa, pela prestatividade e suporte em todas as etapas.

Aos integrantes da banca examinadora, agradeço pelas valiosas recomendações e análises que contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

Aos colegas do curso, minha gratidão pela parceria, pelo apoio mútuo e pelos momentos compartilhados que tornaram esta caminhada mais leve e significativa.

Por fim, agradeço a todos os participantes desta pesquisa, pela disponibilidade e receptividade, sem os quais este estudo não seria possível.

De forma especial, agradeço à minha família, pelo amor incondicional, paciência e incentivo em todos os momentos, mesmo nos mais desafiadores.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, deixo meu sincero muito obrigada.

*"A persistência é o caminho do êxito."
Charles Chaplin*

RESUMO

A Indústria 4.0 representa uma transformação profunda nos sistemas produtivos, marcada pela convergência entre tecnologias digitais avançadas, como Big Data Analytics, Internet das Coisas (IoT), manufatura aditiva, robôs autônomos, realidade aumentada, segurança cibernética e computação em nuvem. Inserida nesse contexto, esta tese tem como objetivo avaliar o grau de maturidade tecnológica em ambientes industriais por meio da construção e aplicação de um modelo de avaliação de maturidade baseada em modelos de capacidade. A metodologia adotada é a pesquisa-ação, que possibilita a investigação participativa da realidade organizacional ao mesmo tempo em que promove intervenções práticas e colaborativas voltadas à sua transformação. O modelo de avaliação de maturidade proposta estrutura-se em cinco níveis evolutivos e contempla dez dimensões tecnológicas, permitindo diagnosticar com profundidade o estágio de adoção e integração das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. O estudo foi aplicado em setores industriais de uma organização brasileira de grande porte, possibilitando a identificação de lacunas, potencialidades e caminhos para o avanço da maturidade digital. Entre os principais resultados, destacam-se o desenvolvimento de um instrumento diagnóstico aplicável e replicável, além da elaboração de planos de ação estratégicos voltados à evolução tecnológica das unidades analisadas, contribuindo para a gestão da transformação digital no setor industrial.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Big Data. Robótica Autônoma. Pesquisa-ação. Maturidade Tecnológica.

ABSTRACT

Industry 4.0 represents a paradigm shift in manufacturing systems, driven by the integration of advanced digital technologies such as Big Data Analytics, Internet of Things (IoT), additive manufacturing, autonomous robotics, augmented reality, cybersecurity, and cloud computing. This study aims to assess technological maturity in industrial environments through the development and application of a capability-based maturity assessment model. Employing an action research methodology, the approach enables participatory investigation while fostering practical interventions for organizational transformation. The proposed model comprises five evolutionary levels and ten technological dimensions, providing a comprehensive diagnosis of Industry 4.0 adoption and integration. Applied within a large Brazilian industrial organization, the study identifies gaps, opportunities, and strategic pathways for advancing digital maturity. Key contributions include a replicable diagnostic instrument and strategic action plans to support technological evolution and digital transformation management in the industrial sector.

Keywords: Industry 4.0. Big Data. Autonomous Robotics. Action Research. Technological Maturity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tecnologias Habilitadoras	20
Figura 2 - Modelo de Avaliação de Maturidade.....	71
Figura 3 - Modelo de Avaliação de Maturidade Ajustada	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Framework.....	36
Tabela 2 - Matriz de Maturidade da Transformação Digital	59
Tabela 3 - Matriz de Maturidade Digital Validada.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANPD	Autoridade Nacional de Proteção de Dados
BDA	Big Data Analytics
BI	Business Intelligence
CF	Centro de Fabricação
ERP	Enterprise Resource Plannign
IA	Inteligência Artificial
IIoT	Internet Industrial das Coisas
IoT	Internet das Coisas
MES	Manufacturing Execution System
OEE	Overall Equipment Effectiveness
QR	Quick Responsde (código QR)
RA	Realidadem Aumentada
ROI	Retorno Sobre o Investimento
SFM	Shop Floor Management
TI	Tecnologia da Informação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	QUESTÃO DE PESQUISA	18
1.4	OBJETIVOS	18
1.4.1	Objetivo geral.....	18
1.4.2	Objetivos Específicos.....	19
1.5	ALINHAMENTO DA TESE A LINHA DE PESQUISA.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	LITERATURA	20
2.1.1	Big Data and Analysis	20
2.1.2	Robôs Autônomos	22
2.1.3	Simulação	24
2.1.4	Integração de sistemas horizontais e verticais	25
2.1.5	A internet das coisas	27
2.1.6	Segurança Cibernética	28
2.1.7	A Nuvem	29
2.1.8	Manufatura Aditiva.....	31
2.1.9	Realidade Aumentada (RA).....	32
2.1.10	Digital Twin.....	34
2.2	ANÁLISE DO REFERENCIAL TEÓRICO.....	35
2.2.1	Big Data and Analysis	36
2.2.2	Robôs Autônomos	37
2.2.3	Simulação	37
2.2.4	Integração de sistemas horizontais e verticais	37
2.2.5	Internet das Coisas (IoT)	38
2.2.6	Segurança Cibernética	38
2.2.7	A Nuvem	38
2.2.8	Manufatura Aditiva.....	39
2.2.9	Realidade Aumentada	39
2.2.10	Digital Twin.....	39

2.2.11 Smart Manufacturing (Manufatura Inteligente)	40
2.2.12 Smart Working (Trabalho Inteligente)	41
2.2.13 Smart Supply Chain (Cadeia de Suprimento Inteligente)	42
2.2.14 Smart Products and Services (Produtos e Serviços Inteligentes)	42
3 MÉTODO	45
3.1 PESQUISA-AÇÃO	45
3.1.1 Característica da Pesquisa-ação	46
3.1.2 Etapas da Pesquisa-ação	46
3.2 MÉTODO DE TRABALHO	49
3.2.1 Modelo de avaliação de Maturidade	49
3.2.2 Etapas do processo de Construção da Tabela	50
3.2.3 Diagnóstico	52
3.2.4 Planejamento da Ação	53
3.2.5 Implementação das Ações	54
3.2.6 Avaliação	54
3.2.7 Reflexão e Replanejamento	55
4 RESULTADOS	57
4.1 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1.1 Procedimento do Diagnóstico	57
4.1.2 Validação, Descrição e execução da validação	58
4.1.1.1 Big Data and Analysis	59
4.1.1.2 Robôs Autônomos	60
4.1.1.3 Simulação	62
4.1.1.4 Integração de Sistemas	63
4.1.1.5 Internet das Coisas - IIoT	64
4.1.1.6 Segurança Cibernética	66
4.1.1.7 Computação em Nuvem	66
4.1.1.8 Manufatura Aditiva.....	67
4.1.1.9 Realidade Aumentada (RA).....	69

4.1.1.10	Digital Twin.....	70
4.4	RESULTADOS ORIGINAIS DA TESE <i>versus</i> LITERATURA	84
5	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 marca uma nova era na evolução dos sistemas produtivos, caracterizada pela convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas. Esse movimento, também denominado Quarta Revolução Industrial, tem provocado transformações profundas na maneira como as organizações produzem, operam e se relacionam com o mercado. Tecnologias como *Big Data Analytics*, Internet das Coisas (IoT), robótica avançada, realidade aumentada, manufatura aditiva, computação em nuvem e gêmeos digitais vêm redefinindo os paradigmas de eficiência, flexibilidade e customização nas cadeias de produção, consolidando novos modelos de negócios baseados na conectividade e na inteligência integrada (SCHWAB, 2016; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Apesar de seu potencial disruptivo, a adoção da Indústria 4.0 no contexto brasileiro avança de forma desigual. Muitas organizações, especialmente aquelas inseridas em cadeias tradicionais ou de médio porte, enfrentam obstáculos relacionados à cultura organizacional, infraestrutura tecnológica, qualificação da força de trabalho e nível de maturidade digital (DALENOGARE *et al.*, 2018; FRANK *et al.*, 2019a). Esses fatores dificultam a incorporação plena das tecnologias habilitadoras, comprometendo os benefícios esperados da digitalização industrial.

Nesse cenário, emerge a necessidade de instrumentos que possibilitem diagnosticar o grau de maturidade tecnológica das empresas de maneira estruturada, contextualizada e orientada à tomada de decisão. Ferramentas desse tipo permitem não apenas identificar lacunas no processo de transformação digital, mas também apoiar a definição de metas, a priorização de investimentos e a elaboração de planos de ação eficazes, baseados em evidências.

No campo teórico, a literatura tem se dedicado à formulação de modelos de maturidade digital baseados em frameworks multicritério, como o *Capability Maturity Model Integration* (CMMI), que oferecem uma visão estruturada da evolução organizacional em direção à Indústria 4.0 (CMMI INSTITUTE, 2010; SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016). No entanto, verifica-se uma escassez de modelos adaptados ao contexto das indústrias brasileiras, que considerem de forma integrada aspectos técnicos, organizacionais e estratégicos, bem como a realidade operacional de fábricas e linhas de produção.

Do ponto de vista prático, essa carência se traduz na dificuldade das empresas em avaliar de forma sistemática sua maturidade digital. A ausência de instrumentos aplicáveis à realidade local compromete a capacidade de planejamento e a efetividade das iniciativas de

transformação digital, resultando em ações fragmentadas, investimentos pouco direcionados e baixa escalabilidade das soluções implementadas.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Indústria 4.0 representa uma nova era de transformação nos sistemas produtivos globais, marcada pela convergência entre tecnologias digitais, físicas e biológicas. Essa revolução industrial tem promovido mudanças substanciais na forma como as organizações operam, com impacto direto sobre produtividade, flexibilidade e competitividade. Tecnologias como Big Data Analytics, Internet das Coisas (IoT), Gêmeos Digitais, Realidade Aumentada e Inteligência Artificial estão remodelando os paradigmas tradicionais da manufatura e permitindo novos modelos de negócios orientados por dados e conectividade.

No cenário internacional, diversas empresas têm liderado a transição para a manufatura inteligente, destacando-se casos como a John Deere, com uso intensivo de sensores e análise de dados para manutenção preditiva, e a Nestlé, que vem integrando cadeias globais de suprimentos com tecnologias digitais. Tais exemplos ilustram a emergência de novos modelos de gestão baseados em conectividade, automação e inteligência computacional. Essa tendência é acompanhada por iniciativas estratégicas como o programa “Made in China 2025” e os investimentos em smart manufacturing nos países do G7.

No Brasil, no entanto, a implementação da Indústria 4.0 enfrenta desafios significativos, sobretudo nas médias e grandes empresas inseridas em cadeias produtivas complexas. Barreiras como infraestrutura tecnológica limitada, falta de integração sistêmica, resistência cultural à mudança e escassez de competências digitais dificultam o avanço da digitalização plena. Diante disso, surge a necessidade de instrumentos que permitam diagnosticar o estágio de maturidade tecnológica das organizações e orientar ações estruturadas para sua transformação.

Nesse contexto, os quatro eixos estratégicos da transformação digital — Smart Manufacturing, Smart Working, Smart Supply Chain e Smart Products and Services — constituem uma estrutura analítica robusta para compreender o impacto das tecnologias emergentes nos sistemas industriais. A articulação dessas dimensões revela a complexidade do processo de digitalização, que não se limita à adoção de equipamentos, mas exige uma reconfiguração sistêmica dos processos, das competências humanas e dos modelos de governança organizacional.

A empresa Marcopolo, cenário desta pesquisa, representa um campo empírico estratégico para aplicação do conceito de maturidade tecnológica, por se tratar de uma das maiores

fabricantes de carrocerias de ônibus do mundo, com atuação global e forte presença em mercados nacionais e internacionais. Fundada em 1949, a Marcopolo mantém uma estrutura organizacional complexa, com múltiplas unidades fabris e diversos setores industriais interligados, o que oferece um ambiente propício para a análise dos diferentes estágios de adoção tecnológica em larga escala. A diversidade de processos, que abrange desde a fabricação de componentes até a montagem final dos ônibus, permite observar a maturidade tecnológica sob múltiplas perspectivas — técnicas, operacionais, estratégicas e humanas. Essa complexidade também se expressa na coexistência de linhas produtivas altamente automatizadas com setores em processo inicial de digitalização, tornando a empresa um verdadeiro laboratório vivo para investigação prática da Indústria 4.0.

A estrutura fabril da Marcopolo, composta por centros de fabricação, unidades de montagem, áreas de suporte e núcleos de engenharia, proporciona uma visão holística da transformação digital no setor automotivo. A pesquisa concentra-se na aplicação da metodologia de pesquisa-ação, distribuídos entre a área de fabricação de peças (Centro de Fabricação) e a unidade de montagem final de ônibus (Montadora). Esse arranjo metodológico viabiliza não apenas a avaliação das tecnologias habilitadoras em diferentes graus de maturidade, mas também a implementação prática de intervenções que visam elevar o nível de digitalização em cada setor analisado. A possibilidade de realizar diagnósticos contínuos, elaborar planos de ação customizados e acompanhar os resultados no campo confere à pesquisa um caráter transformador e de alto impacto organizacional.

Assim, esta tese está inserida no campo da manufatura inteligente (*smart manufacturing*), com foco na criação e aplicação de um modelo de avaliação de maturidade tecnológica que permita diagnosticar com precisão o grau de integração das tecnologias digitais em ambientes industriais reais. O modelo de avaliação de maturidade proposta foi estruturado com base em modelos internacionais de capacidade, adaptada às especificidades do setor industrial brasileiro, e contempla dez dimensões tecnológicas essenciais da Indústria 4.0. Ao empregar essa ferramenta no contexto empírico da Marcopolo, a pesquisa oferece subsídios relevantes para a gestão estratégica da transformação digital, contribuindo para o desenvolvimento de políticas internas mais assertivas, melhor direcionamento dos investimentos em tecnologia e fortalecimento da cultura organizacional voltada à inovação. Com isso, espera-se promover um avanço consistente na maturidade digital da organização, alinhado às exigências de um ambiente produtivo em constante evolução e alta competitividade global.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para justificar a realização desta pesquisa, vem apresentada em duas sessões como segue, a justificativa teórica com foco e embasamento na literatura e a justificativa prática com o objetivo de mostrar a relevância do estudo para a empresa. A escolha pelo tema da maturidade tecnológica em ambientes industriais se justifica pela crescente demanda por modelos capazes de orientar as organizações em sua jornada de transformação digital. Embora existam diversos frameworks teóricos, como o CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), observa-se uma lacuna significativa na literatura no que tange à aplicação prática desses modelos em realidades industriais brasileiras. Muitas escalas existentes são genéricas, orientadas a contextos internacionais, e não contemplam as especificidades de infraestrutura, cultura e estratégia das empresas do país.

Para investigar essa lacuna, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, com base em critérios de inclusão relacionados à relevância, atualidade e aderência ao tema da transformação digital na indústria. Foram analisados mais de 70 artigos científicos publicados nos últimos dez anos, provenientes de bases como Scopus, Web of Science e ScienceDirect. A análise permitiu identificar múltiplas abordagens de avaliação da maturidade digital, mas evidenciou a fragmentação das propostas e a ausência de instrumentos que integrem as dez principais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 de forma estruturada.

Além disso, a maior parte dos modelos de maturidade analisados concentra-se em aspectos tecnológicos ou operacionais, negligenciando dimensões estratégicas, organizacionais e humanas, que são essenciais para o sucesso da transformação digital. Outra limitação identificada refere-se à dificuldade de operacionalização das escalas propostas, que muitas vezes carecem de critérios objetivos, linguagem acessível e mecanismos de aplicação colaborativa. Esses elementos são essenciais para promover o engajamento das equipes e garantir a efetividade das ações de melhoria.

Portanto, esta pesquisa oferece uma contribuição significativa tanto para o avanço do conhecimento científico quanto para a prática gerencial aplicada à transformação digital na indústria. Do ponto de vista teórico, propõe uma estrutura de avaliação inovadora, alinhada aos desafios contemporâneos da digitalização, e capaz de preencher uma lacuna existente na literatura sobre modelos de maturidade adaptados ao contexto brasileiro. Do ponto de vista prático, disponibiliza uma ferramenta de diagnóstico contextualizada, acessível e replicável, que permite às organizações industriais compreenderem seu estágio atual, definir prioridades estratégicas, planejar investimentos com base em evidências e monitorar a evolução de sua

maturidade digital ao longo do tempo. Ao integrar teoria e prática por meio de uma metodologia participativa, a tese também contribui para o fortalecimento de uma cultura organizacional voltada à inovação contínua, à aprendizagem coletiva e à construção de capacidades internas essenciais para a competitividade na era da Indústria 4.0.

Neste contexto, a presente tese propõe um modelo de avaliação de maturidade tecnológica estruturada em cinco níveis e dez dimensões, baseada em literatura especializada e validada empiricamente por meio de pesquisa-ação. A metodologia adotada permite a construção participativa do conhecimento, combinando rigor científico com intervenção prática, o que garante a aplicabilidade do instrumento desenvolvido. A aplicação de modelo de avaliação de maturidade em diferentes áreas da empresa Marcopolo permite avaliar, com profundidade, o estágio de maturidade digital e propor planos de ação para sua evolução.

Portanto, esta pesquisa contribui de forma significativa tanto para o avanço teórico quanto para a prática gerencial no campo da transformação digital. Ao oferecer uma ferramenta de diagnóstico contextualizada, acessível e fundamentada cientificamente, a tese responde a uma demanda real das organizações industriais brasileiras, ampliando a capacidade de planejamento, priorização de investimentos e desenvolvimento de estratégias rumo à Indústria 4.0.

1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

Diante dos desafios da Indústria 4.0, esta pesquisa busca responder: como avaliar o grau de maturidade tecnológica de empresas industriais com base nas tecnologias habilitadoras, de modo a orientar estratégias eficazes de transformação digital?

1.4 OBJETIVOS

Nessa seção são apresentados os objetivos geral e específico do trabalho.

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar um modelo de avaliação de maturidade tecnológica para diagnosticar o grau de adoção e integração das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 em ambientes industriais, com base em modelos de capacidade e por meio da metodologia de pesquisa-ação.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) mapear as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, identificando critérios relevantes para a construção de modelos de maturidade tecnológica;
- b) aplicar um modelo de avaliação desenvolvida em ambientes industriais reais por meio da metodologia da pesquisa-ação;
- c) propor planos de ação direcionados à evolução da maturidade digital, contribuindo para a gestão estratégica da transformação digital nos ambientes industriais avaliados.

1.5 ALINHAMENTO DA TESE A LINHA DE PESQUISA

A tese está plenamente alinhada à linha de pesquisa Estratégia e Operações do Programa de Pós-Graduação em Administração da UCS, ao analisar a transformação dos sistemas produtivos a partir da incorporação estratégica das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. O trabalho articula decisões estratégicas, desenho organizacional e gestão das operações, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre maturidade tecnológica em ambientes industriais. A proposição e aplicação de um modelo de avaliação de maturidade tecnológica reforçam a integração entre estratégia e execução operacional, eixo central da linha. A adoção da metodologia de pesquisa-ação evidencia o compromisso do programa com pesquisas aplicadas, de alto impacto organizacional e social. A tese contribui, assim, para o fortalecimento da identidade do PPGA/UCS ao produzir conhecimento relevante, rigoroso e aderente às demandas contemporâneas da gestão estratégica das operações.

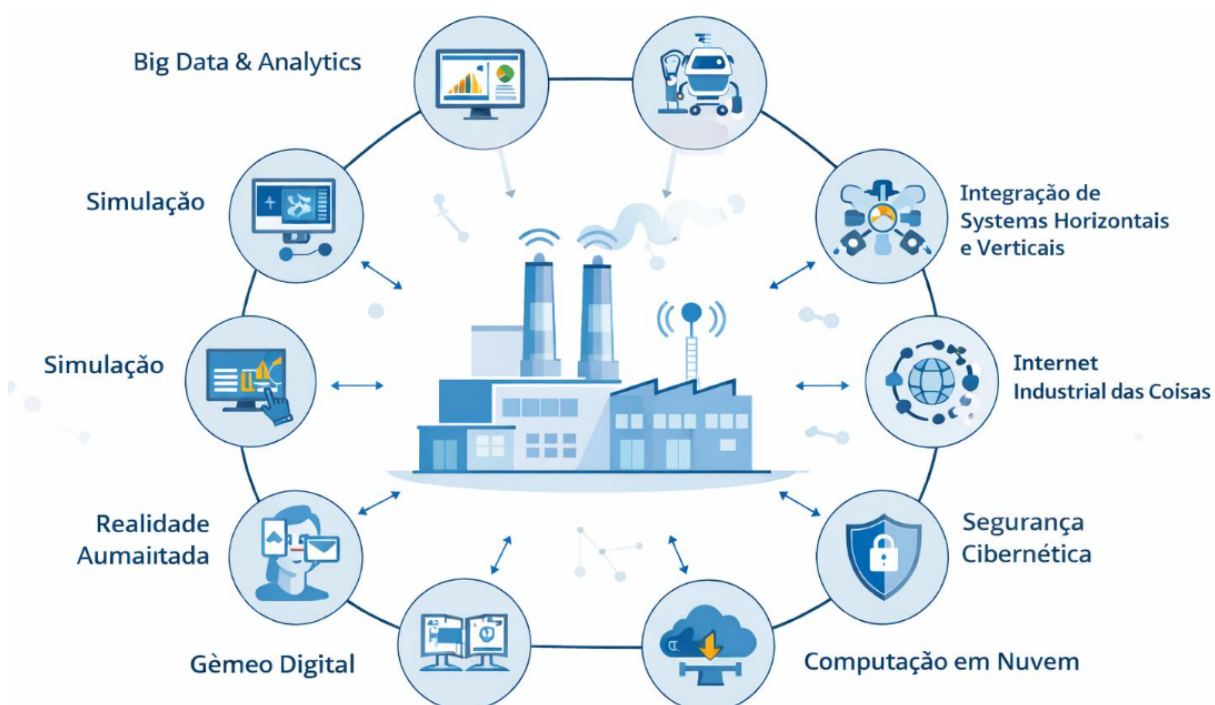
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo são apresentados os conceitos necessários para elaboração dessa tese.

2.1 TECNOLOGIAS HABILITADORAS

O presente capítulo apresenta o referencial teórico que fundamenta a pesquisa, com o objetivo de contextualizar os principais conceitos, modelos e abordagens relacionados à transformação digital na indústria. São abordados os fundamentos da Indústria 4.0, suas tecnologias habilitadoras, os modelos de avaliação de maturidade tecnológica e as bases conceituais da pesquisa-ação como metodologia aplicada. Essa fundamentação oferece suporte à construção da escala proposta e à compreensão das dinâmicas organizacionais envolvidas na jornada de digitalização das empresas industriais.

Figura 1 - Tecnologias Habilitadoras



Fonte: Adaptado de Kagermann, Wahlster e Helbig (2013; Zikopoulos et al. (2011); Grives e Vickers (2017).

2.1.1 Big Data and Analysis

A aplicação da análise baseada em grandes volumes de dados, conhecida como *Big Data Analytics*, constitui um desenvolvimento relativamente recente no setor manufatureiro. Essa

abordagem tem promovido avanços significativos na otimização da qualidade dos processos produtivos, na redução do consumo energético e na melhoria do desempenho de equipamentos (SHMUELI; KOPPIUS, 2011). O início do século XXI é caracterizado por uma explosão na geração de dados digitais, impulsionada pela crescente interconectividade proporcionada pelas redes de computadores. Nesse contexto, informações oriundas de estruturas organizacionais, institucionais e governamentais estão amplamente disponíveis em formatos digitais, favorecendo a realização de análises que buscam identificar padrões e fornecer subsídios mais precisos para a tomada de decisões estratégicas.

O termo *Big Data* não se restringe apenas ao volume de dados armazenados. Ele também abrange aspectos como a velocidade com que esses dados são gerados, processados e analisados, bem como a variedade de suas fontes e formatos (MCAFEE; BRYNJOLFSSON, 2012). Os dados podem ser classificados como estruturados, semiestruturados ou não estruturados, oriundos de múltiplas fontes heterogêneas, como redes sociais, blogs, dispositivos móveis e sensores de Internet das Coisas (IoT). Neste cenário, torna-se imperativo desenvolver reflexões mais profundas sobre os desafios inerentes à análise de dados no universo do Big Data (KAKHANI; KAKHANI; BIRADAR, 2013).

Embora o crescimento exponencial dos dados possa sugerir uma maior capacidade de extração de informações úteis, é importante destacar que o aumento do volume não implica, necessariamente, em maior relevância informacional. A presença de dados ambíguos, ruidosos ou atípicos é um fator limitante. Assim, a análise de dados em ambientes caracterizados por grande volume, velocidade e variedade exige a revisão de metodologias tradicionais, de forma a incorporar novas abordagens analíticas capazes de lidar com tais complexidades (BARANIUK, 2011).

Big Data pode, ainda, ser compreendido como a aplicação de técnicas estatísticas avançadas à comunicação eletrônica em larga escala. Esses conjuntos massivos de dados exigem não apenas estruturação adequada, mas também capacidade de análise em tempo real, permitindo, por exemplo, a previsão de comportamentos futuros com base em padrões identificados nos dados históricos (KACHE, 2015). Para atender a essas exigências, são necessárias arquiteturas escaláveis e robustas, que permitam o armazenamento, a manipulação e a análise de grandes volumes de dados com eficiência e precisão.

Nesse sentido, surgiu a necessidade de conceituar o Big Data com base nas chamadas dimensões “V”: Volume (quantidade de dados gerados), Velocidade (rapidez na geração e processamento), Variedade (diversidade de fontes e formatos), Variabilidade (consistência e coerência dos dados ao longo do tempo) e Valor (capacidade de extrair insights relevantes a

partir dos dados) (AZEVEDO, 2016).Essas características impõem desafios às arquiteturas tradicionais de dados, exigindo soluções escaláveis e sistemas robustos para análise em tempo real (GANDOMI; HAIDER 2015; SAGIROGLU, SINANC, 2013).

No âmbito da Indústria 4.0, o principal desafio consiste na coleta e no processamento de dados considerados estratégicos, transformando-os em conhecimento acionável. Essa tarefa demanda sistemas tecnologicamente avançados, equipados com algoritmos sofisticados e infraestrutura de processamento em tempo real. A capacidade de converter dados em sabedoria organizacional constitui, portanto, um dos principais motores da transformação digital e um dos pilares para o desenvolvimento da indústria do futuro (COELHO, 2016).

De acordo com McAfee e Brynjolfsson (2012), a análise de grandes volumes de dados vai além da questão do armazenamento, envolvendo também a necessidade de ferramentas capazes de processar rapidamente dados oriundos de fontes heterogêneas, como redes sociais, sensores industriais, multimídia e sistemas embarcados. Os dados, que podem ser estruturados, semiestruturados ou não estruturados, exigem metodologias analíticas inovadoras para serem compreendidos e utilizados de forma eficiente (KAKHANI; KAKHANI; BORADAR, 2013).

Apesar da promessa de uma maior capacidade de extração de conhecimento, o aumento no volume de dados não garante, por si só, uma melhoria na qualidade das informações extraídas. Dados ambíguos, incompletos ou inconsistentes podem comprometer os resultados das análises (Baraniuk, 2011). Por isso, torna-se essencial o desenvolvimento de sistemas de validação e curadoria de dados, bem como algoritmos sofisticados capazes de lidar com as complexidades envolvidas.

No âmbito da Indústria 4.0, a aplicação do *Big Data Analytics* representa um dos pilares da transformação digital. A capacidade de coletar, integrar e analisar dados em tempo real permite, por exemplo, a manutenção preditiva de equipamentos, a automação inteligente de processos e o aperfeiçoamento do controle de qualidade (INCORTA, 2004; ENTERBRIDGE, 2024). Segundo Coelho (2016), transformar dados em conhecimento estratégico é o motor da inovação e do progresso rumo à indústria do futuro.

2.1.2 Robôs Autônomos

Historicamente, os robôs industriais foram desenvolvidos com o propósito de executar tarefas repetitivas que demandam precisão ou força. As primeiras gerações desses dispositivos operavam com programação fixa, sendo capazes apenas de realizar funções previamente

definidas. Qualquer modificação nos processos exigia sua reprogramação, o que resultava em interrupções produtivas e perda de eficiência (ROMANO; DUTRA, 2016).

Com o avanço da tecnologia, a robótica autônoma emergiu como uma nova fronteira da automação, viabilizando a criação de robôs capazes de perceber o ambiente ao seu redor, operar por longos períodos sem supervisão humana direta e aprender novas funções por meio de algoritmos de inteligência artificial. Essa capacidade de adaptação e autoajuste permite sua aplicação em sistemas de produção flexíveis e responsivos (GARCIA, 2016).

Dentro do escopo da Indústria 4.0, os robôs autônomos têm se consolidado como uma das tecnologias centrais, ao permitirem a customização da produção em massa, a redução de custos operacionais e o aumento da flexibilidade dos processos. Com isso, torna-se possível atender à demanda por produtos personalizados e em lotes sob medida, com maior agilidade e menor desperdício (BARROS, 2016).

Embora o uso de robôs em ambientes industriais não seja um fenômeno recente, observa-se uma evolução importante no perfil dessas máquinas. Tradicionalmente empregados para lidar com tarefas complexas e repetitivas, os robôs industriais modernos destacam-se por sua crescente autonomia, capacidade de interação com seres humanos em ambientes compartilhados, menor custo de aquisição e maior variedade de aplicações (PEREIRA, DE OLIVEIRA SIMONETTO, 2018).

Essa transformação é evidenciada por Rübmann *et al.* (2015), que argumentam que os robôs estão se tornando mais cooperativos, sendo capazes de interagir entre si e com operadores humanos de maneira segura e eficiente. Tais sistemas, baseados em tecnologias cognitivas e conectividade avançada, estão abrindo caminho para ambientes produtivos altamente automatizados, inteligentes e adaptáveis. Entretanto, essa evolução tecnológica não ocorre sem impactos sobre o mercado de trabalho. A Indústria 4.0 tende a alterar significativamente a estrutura ocupacional, com a criação de novos modelos de trabalho e a obsolescência de funções tradicionais. Ainda que haja um debate quanto à extensão com que a automação substituirá o trabalho humano, há um consenso de que a robótica será empregada de forma crescente como ferramenta de apoio aos trabalhadores, potencializando suas capacidades ao invés de substituí-las completamente (RUBMANN *et al.*, 2015).

Apesar dos avanços, a implementação de robôs autônomos na manufatura apresenta desafios significativos. Questões relacionadas à segurança, interoperabilidade, escalabilidade e aceitação pelos trabalhadores são cruciais. É fundamental desenvolver padrões e protocolos que garantam a operação segura e eficiente desses sistemas, além de promover a

formação e adaptação da força de trabalho para colaborar efetivamente com tecnologias robóticas avançadas (FROHLICH *et al.*, 2020).

O futuro da robótica autônoma na manufatura aponta para uma maior colaboração entre humanos e robôs, desenvolvimento de robôs mais adaptáveis e inteligentes, e uma integração mais profunda com tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA). Essas tendências visam criar ambientes de produção mais resilientes, eficientes e personalizados, alinhados com os princípios da Indústria 4.0 (FROHLICH *et al.*, 2020).

2.1.3 Simulação

A simulação assume um papel estratégico no contexto da Indústria 4.0, pois permite aos gestores o desenvolvimento de cenários hipotéticos com base em modelos computacionais, o que proporciona uma compreensão antecipada das possíveis situações operacionais e subsidia a tomada de decisões (OLIVEIRA JUNIOR, 2023). Essa tecnologia se destaca por sua capacidade de representar virtualmente sistemas complexos, oferecendo suporte tanto à formulação de estratégias quanto à definição de roteiros operacionais em ambientes produtivos inteligentes (FERREIRA *et al.*, 2020).

Utilizando a modelagem computacional, a simulação permite a construção de representações parciais ou completas de processos industriais. Tais representações viabilizam a análise antecipada das etapas produtivas, facilitando a identificação de erros, a estimativa de custos e a otimização do tempo de execução. Desse modo, torna-se possível prever falhas e corrigi-las antes que atinjam a etapa real de produção, garantindo maior segurança e eficiência ao processo (SILVA, 2007).

Além disso, a simulação demonstra elevada eficácia na avaliação de mudanças propostas em sistemas já existentes ou no planejamento de novos sistemas produtivos. Um modelo bem construído pode fornecer estimativas detalhadas sobre o desempenho de um processo, incluindo indicadores como tempo de ciclo, utilização de recursos, formação de filas e tempos produtivos. Quando associada a recursos de animação gráfica, a simulação também permite a visualização dinâmica do fluxo de materiais, pessoas e equipamentos, o que amplia a compreensão do sistema como um todo (BATEMAN *et al.*, 2013).

Do ponto de vista didático e estratégico, a simulação transforma dados em conhecimento aplicado à tomada de decisões. Sua utilização oportuniza aprendizado prático, promovendo um raciocínio rápido e eficaz frente aos desafios do ambiente industrial. Para que esse processo seja eficiente, é fundamental que os profissionais envolvidos possuam conhecimento sobre os

diferentes tipos de modelos matemáticos de simulação. Esses modelos podem ser classificados como: estáticos (não dependem do tempo); dinâmicos (variáveis ao longo do tempo); discretos (ações ocorrem em momentos específicos); contínuos (ações contínuas no tempo); estocásticos (com variáveis aleatórias); e determinísticos (sem influência de probabilidades) (GAVIRA, 2003).

Para o desenvolvimento adequado de uma simulação, é necessário seguir uma metodologia estruturada, composta por etapas bem definidas: formulação do problema e planejamento do estudo; coleta de dados e definição do modelo; validação do modelo conceitual; construção do programa computacional; verificação e validação do modelo programado; execução de testes piloto; projeto e realização dos experimentos; análise dos resultados; documentação e implementação (GAVIRA, 2003).

Na Indústria 4.0, as simulações são aplicadas especialmente para a resolução de problemas operacionais, geralmente oriundos da engenharia de produção. Nessa perspectiva, a simulação técnica é parte integrante da chamada “fábrica digital”, podendo ser aplicada a linhas completas de produção ou focada em células específicas, como o controle de máquinas ou robôs. Em casos que envolvem interação entre robôs e operadores humanos, a simulação é essencial para a detecção de colisões e o aprimoramento da segurança operacional (LACHNMAIER *et al.*, 2017).

2.1.4 Integração de sistemas horizontais e verticais

Os sistemas de realidade aumentada destacam a visualização, sem preocupar-se como os usuários iriam interagir com esses sistemas. Alguns sistemas limitaram-se a reproduzir, no ambiente de realidade aumentada, as interfaces gráficas já conhecidas em sistemas 2D e 3D, como menus de tela, reconhecimento de gestos entre outros. A interface com dispositivos envolve os recursos de hardware (dispositivos) e software especializado (drivers de dispositivos), que dão suporte para as interações (AZUMA; 2001).

A realidade aumentada tende a utilizar dispositivos que o usuário não perceba, dando mais naturalidade as suas ações. Além de usar as interfaces gráficas, os sistemas de realidade aumentada vêm apresentando duas tendências: explorar diferentes tipos de visualizadores e dispositivos; e integrar o mundo virtual com o mundo real, usando interfaces tangíveis. Visualizadores alternativos, como “handheld”, e dispositivos de controle especiais, explorando interações multimodais, estão sendo testados como elementos de interação em sistemas de

realidade aumentada, permitindo a técnica de interação mundo em miniatura – “World In Miniature” (KIRNER, *et al.*; 2004).

Interfaces tangíveis permitem interações diretas com o mundo físico, através das mãos ou de objetos e ferramentas reais como uma pazinha, por exemplo. Uma das maneiras mais simples e populares de implementação de interfaces tangíveis é conseguida no ambiente de realidade aumentada. A presença de um cartão marcador em frente à câmera faz com que o objeto virtual associado a ele seja colocado sobre ele. A utilização do cartão com as mãos movimenta também o objeto virtual. Além do objeto virtual, sons podem ser iniciados, quando o cartão entra no campo de visão da câmera. Alguns cartões de controle podem ser implementados para interferir em objetos selecionados de outros cartões, fazendo alterações geométricas, troca de objetos, captura ou duplicação, deleção (BILLINGHURST; 2001).

A integração horizontal está relacionada com a conexão entre a fábrica e toda cadeia de valor externa à planta. Enquanto isso, a integração vertical permite que todos os níveis da fábrica estejam conectados, do chão de fábrica até os executivos. Nesse cenário por exemplo é possível se ter manufatura em rede, logística adaptativa, auto-organizada e uma engenharia integrada até o cliente, (KAGERMANN *et al.*, 2013).

A maioria dos sistemas de TI de hoje não está totalmente integrada. Empresas, fornecedores e clientes raramente estão intimamente ligados. Também não são os departamentos como engenharia, produção e serviço. As funções da empresa para o nível de chão de fábrica não estão totalmente integradas. Mesmo a engenharia, de produtos ou industrial, ou ainda de automação, não possui integração completa. Mas, com a Indústria 4.0, as empresas, departamentos, funções e capacidades se tornarão mais coesas, à medida que as redes de integração de dados universais cruzados evoluem e possibilitem cadeias de valor verdadeiramente automatizadas (RÜßMANN *et al.*, 2015).

A integração horizontal refere-se à interconexão entre diferentes partes da cadeia de suprimentos – fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes – por meio de sistemas de informação interoperáveis. Esse tipo de integração permite, por exemplo, a implementação de redes de manufatura distribuída, logística adaptativa e engenharia colaborativa com foco no cliente final. Por outro lado, a integração vertical busca unir todos os níveis da empresa, integrando departamentos como engenharia, produção, manutenção e gestão estratégica, em um fluxo contínuo de dados e decisões (KAGERMANN *et al.*, 2013; RUBMANN *et al.*, 2015).

Contudo, os sistemas de tecnologia da informação atualmente disponíveis, em sua maioria, não se encontram plenamente integrados. É comum observar falhas de conexão entre setores internos – como engenharia, produção e serviços – bem como a ausência de vínculos

diretos com clientes e fornecedores. Além disso, as áreas de engenharia de produto, engenharia industrial e automação ainda operam com pouca sinergia entre si. Com a chegada da Indústria 4.0, espera-se superar essas limitações, promovendo a integração plena por meio de redes universais de dados e sistemas interconectados, capazes de gerar cadeias de valor mais ágeis, automatizadas e inteligentes (RUBMANN *et al.*, 2015).

Essas tecnologias, quando inseridas em um ecossistema plenamente integrado, tornam-se catalisadoras da transformação digital nas fábricas. Elas não apenas melhoram a comunicação entre humanos e sistemas, mas também possibilitam o controle em tempo real, o treinamento imersivo, a visualização de processos e a tomada de decisões baseada em dados em múltiplos níveis da organização.

2.1.5 A internet das coisas

A Internet das Coisas (IoT) é uma evolução do modelo atual da internet, caracterizando-se por sua capacidade de interconectar objetos físicos dotados de processamento computacional, sensores e conectividade em rede. Essa tecnologia permite que objetos do cotidiano sejam acessados remotamente e, além disso, atuem como prestadores de serviços autônomos, agregando inteligência ao ambiente ao qual pertencem (SANTOS *et al.*, 2016). Ao transformar objetos estáticos em agentes ativos na rede mundial de computadores, a IoT amplia significativamente as possibilidades de controle, automação e monitoramento em tempo real, tanto em contextos pessoais quanto industriais.

A IoT representa um novo paradigma computacional, no qual a interação se estende para além da comunicação entre humanos e dispositivos, incluindo também a comunicação entre objetos e entre objetos e seres vivos. Nessa nova configuração, os objetos passam a desempenhar funções de forma autônoma, assumindo tarefas rotineiras e operando com menor necessidade de intervenção humana direta (CONTE; ARAUJO, 2020).

Do ponto de vista estrutural, a IoT constitui uma rede dinâmica de informações, com alcance global, baseada em protocolos de comunicação padronizados. Essa rede é composta por entidades físicas e virtuais que utilizam interfaces inteligentes integradas. Sua principal contribuição está na geração de valor a partir das informações trocadas entre os elementos conectados, promovendo benefícios significativos à sociedade por meio do aumento da eficiência, da automação e da capacidade preditiva dos sistemas (WAKA, 2015).

No contexto industrial, a aplicação da IoT é comumente referida como Internet Industrial das Coisas (IIoT), uma das bases conceituais da chamada Indústria 4.0 ou Quarta

Revolução Industrial. A IIoT permite a conexão de equipamentos, sensores, máquinas e sistemas produtivos em uma rede digital altamente integrada e inteligente. Essa conectividade possibilita a comunicação direta entre máquinas (M2M – *Machine to Machine*), coleta e análise contínua de dados, automação de processos, manutenção preditiva e tomada de decisões em tempo real (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A origem do termo “Internet das Coisas” remonta a 1999, quando Kevin Ashton, um pesquisador britânico, utilizou a expressão para descrever um sistema no qual o mundo físico se conecta aos computadores por meio de sensores e dispositivos inteligentes (GIEREI, 2017). Desde então, a IoT tem ganhado destaque tanto na indústria quanto na academia, impulsionada pela proliferação de tecnologias móveis, computação em nuvem e infraestrutura de rede (AZEVEDO, 2017).

O avanço da IoT reflete um movimento em direção a ambientes inteligentes, nos quais objetos conectados são capazes de comunicar-se de forma autônoma, tomar decisões com base em dados contextuais e agir conforme necessidades, preferências ou comportamentos previamente aprendidos. Nesse cenário, o objetivo final da IoT é construir um ecossistema digital que emule aspectos da comunicação humana, promovendo eficiência, personalização e inteligência distribuída nos sistemas conectados (ZHANG *et al.*, 2015).

2.1.6 Segurança Cibernética

O conceito de ciberespaço é compreendido como uma metáfora para representar o ambiente não físico criado pelas redes digitais de comunicação, especialmente a internet. Trata-se de um espaço onde ocorre a interação entre pessoas, máquinas e sistemas por meio de múltiplos canais — como mensagens eletrônicas, fóruns, plataformas colaborativas e redes sociais — sem a necessidade de contato físico (CANONGIA; JUNIOR, 2009).

Em tempos da Indústria 4.0, com a presença dos sistemas ciberfísicos conectados em ambientes industriais, surgem os desafios da Segurança Cibernética (*SegCiber*). As estratégias de *SegCiber* devem estar integradas às estratégias organizacionais e de tecnologias da informação e comunicação, para assegurar a segurança dos dados, informações e conhecimento com o objetivo de impulsionar o desempenho de toda a cadeia de valor da manufatura (WALSO *et al.*, 2017).

A Segurança Cibernética assume, portanto, um papel central na proteção de ativos intangíveis, como dados, sistemas e conhecimento corporativo. Conforme aponta o Boston Consulting Group (2019), a Indústria 4.0 aumenta de maneira substancial a complexidade dos

sistemas industriais em relação ao modelo tradicional de manufatura. Essa complexidade deriva da interdependência entre elementos físicos e digitais, o que exige uma gestão mais robusta e multidisciplinar das ameaças e vulnerabilidades.

Muitas empresas ainda contam com sistemas de gerenciamento e produção que não estão conectados ou fechados, com maior conectividade e uso de protocolos de comunicação padrão que vêm com a Indústria 4.0, a necessidade de proteger sistemas industriais críticos e linhas de fabricação de ameaças à segurança cibernética aumenta dramaticamente (ANI *et al.*, 2016).

A segurança digital, que antes não figurava como preocupação central no setor industrial, tornou-se um dos principais desafios da era digital. O monitoramento remoto, o compartilhamento de dados em tempo real e a automação em rede criam oportunidades para ataques maliciosos e exploração de vulnerabilidades que podem comprometer desde a integridade dos dados até o funcionamento de linhas de produção inteiras (ANI; HE; TANG, 2016).

Nesse sentido, a Segurança Cibernética na Indústria 4.0 deve ser pensada como um sistema integrado e preventivo, alinhado com as boas práticas de governança de TI e segurança da informação. Estratégias como segmentação de redes, autenticação multifatorial, criptografia de dados, monitoramento contínuo, gestão de riscos e capacitação de equipes técnicas são algumas das medidas fundamentais para mitigar os riscos de segurança e garantir a resiliência dos sistemas industriais frente às ameaças cibernéticas (WALSO *et al.*, 2017; BCG, 2019).

2.1.7 A Nuvem

A Indústria 4.0, com foco na digitalização e na integração dos sistemas produtivos, demanda um crescente compartilhamento de dados entre diferentes unidades produtivas e ao longo de toda a cadeia de valor. Nesse cenário, as tecnologias de computação em nuvem desempenham papel central, proporcionando o armazenamento, o processamento e a análise de grandes volumes de dados de forma descentralizada e eficiente. A tendência é que o desempenho dessas tecnologias continue a melhorar, alcançando tempos de resposta de apenas alguns milissegundos. Como consequência, tanto os dados quanto as funcionalidades das máquinas serão, cada vez mais, migrados para a nuvem, o que permitirá a criação de serviços orientados por dados para os sistemas de produção (RUBMANN *et al.*, 2015).

O termo “nuvem” remete à ideia de um ambiente abstrato e invisível, no qual apenas suas interfaces de entrada e saída são percebidas pelo usuário. Tal metáfora é apropriada, pois,

nesse modelo, toda a infraestrutura e os recursos computacionais permanecem ocultos, sendo acessados apenas por meio de uma interface padronizada. A partir dela, o usuário pode utilizar um conjunto variado de aplicações e serviços, sem a necessidade de compreender ou gerenciar a infraestrutura subjacente (PEDROSA; NOGUEIRA, 2011).

A computação em nuvem, ou *cloud computing*, consiste em uma tecnologia que disponibiliza serviços e infraestruturas pela internet para suprir as demandas empresariais. Essa tecnologia viabiliza a execução de programas diretamente pela interface do sistema em nuvem. Embora o conceito tenha raízes antigas na história da computação, sua aplicação atual é viabilizada principalmente pela evolução da virtualização, que possibilita a oferta de infraestrutura como serviço (IaaS), por meio da criação de ambientes virtuais a partir de recursos físicos (DE PAULA; DE OLIVEIRA DIAN, 2021).

A virtualização permite a criação de múltiplos recursos computacionais sobre uma base física comum, simplificando a gestão e a configuração da infraestrutura digital. Com a crescente complexidade das estruturas tecnológicas e a necessidade de instalação, atualização e gerenciamento contínuo de sistemas, a computação em nuvem passou a ser uma solução estratégica. Ao permitir a contratação de serviços especializados por provedores externos, as empresas conseguem reduzir custos e otimizar processos sem demandar conhecimentos técnicos aprofundados (DE PAULA; DE OLIVEIRA DIAN, 2021).

A definição de computação em nuvem ainda pode variar, pois trata-se de uma tecnologia em constante evolução. Entretanto, de acordo com o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST), ela pode ser definida como um modelo que permite o acesso ubíquo e sob demanda a um conjunto compartilhado de recursos computacionais configuráveis como redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços que podem ser rapidamente provisionados e liberados com mínimo esforço de gerenciamento ou interação com o provedor (HEIDRICH *et al.*, 2017).

As empresas já utilizam soluções baseadas em nuvem para aplicações empresariais e analíticas, mas, com a consolidação da Indústria 4.0, espera-se que mais processos produtivos sejam migrados para esse ambiente. A capacidade da nuvem de permitir a integração entre sistemas distribuídos e o compartilhamento de dados em tempo real transforma a forma como as organizações operam. Até mesmo sistemas críticos, responsáveis por monitorar e controlar processos produtivos, podem ser migrados para a nuvem, viabilizando operações mais ágeis, conectadas e inteligentes (RUBMANN *et al.*, 2015).

A computação em nuvem tem se consolidado como uma das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, permitindo o armazenamento descentralizado, o acesso remoto e a análise em tempo real de grandes volumes de dados industriais. Essa capacidade é fundamental para

suportar aplicações inteligentes e sistemas ciberfísicos, que exigem processamento contínuo e escalável. De acordo com Velásquez, Estévez e Pesado (2018), a nuvem oferece suporte crítico às arquiteturas de referência da Indústria 4.0, viabilizando o funcionamento de serviços como Big Data, inteligência artificial e internet das coisas. Costa (2021) destaca que o uso da computação em nuvem nas indústrias promove maior flexibilidade operacional, reduz custos com infraestrutura física e facilita a integração de sistemas distribuídos. Além disso, Reznikov (2023) enfatiza que o impacto econômico da nuvem é significativo, pois permite a adoção de modelos de negócio baseados em serviço, contribuindo para a transformação digital das organizações. Em um estudo mais técnico, Hussain, Pakravan e Salehi (2020) analisam o desempenho de aplicações da Indústria 4.0 em ambientes baseados em nuvem, demonstrando a viabilidade de adoção mesmo em cenários com alta demanda por processamento e baixa latência. Portanto, a computação em nuvem não apenas sustenta, mas impulsiona o desenvolvimento de soluções inovadoras na era da digitalização industrial.

2.1.8 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, consiste em um processo de fabricação baseado na adição sequencial de camadas de material, orientadas a partir de um modelo geométrico tridimensional gerado digitalmente, geralmente por meio de sistemas CAD (*Computer Aided Design*). Esse método possibilita a construção de peças complexas de forma eficiente e precisa, sem a necessidade de moldes ou ferramentas específicas, o que reduz significativamente os ciclos de desenvolvimento de produtos (JUNIOR; COSTA, 2019).

As tecnologias de manufatura aditiva variam conforme os tipos de materiais e os processos aplicados em seus respectivos equipamentos. Essa diversidade tecnológica amplia suas aplicações, permitindo a substituição de métodos tradicionais para a fabricação de protótipos, especialmente metálicos, com ganhos relevantes em agilidade e custo (JUNIOR; COSTA, 2019). Além disso, a flexibilidade do processo viabiliza a produção de peças com geometrias complexas e inovadoras que seriam inviáveis ou extremamente custosas com técnicas convencionais.

Segundo Li (2019), as tecnologias aditivas têm se mostrado especialmente eficazes em setores de alta tecnologia, como a indústria aeroespacial, a fabricação de motores, a engenharia de foguetes e dispositivos eletrônicos modernos. A constante expansão do leque de materiais compatíveis com os processos aditivos contribui para sua incorporação progressiva na produção

em larga escala. Isso se deve, também, ao desenvolvimento contínuo de soluções científicas e técnicas que ampliam sua aplicabilidade e eficiência.

A manufatura aditiva representa uma abordagem revolucionária na produção industrial, pois permite a criação de peças mais leves, resistentes e funcionais. O processo, baseado na sobreposição de camadas de material guiadas por modelos digitais, oferece vantagens consideráveis sobre os métodos tradicionais, como a redução de desperdício de material, maior liberdade de design e a possibilidade de rápida prototipagem. Essa capacidade favorece o desenvolvimento e validação de protótipos funcionais em menor tempo, com custos reduzidos e maior precisão (HERDERICK, 2015).

A principal distinção entre a manufatura aditiva e os métodos tradicionais de produção está na forma como a peça é construída. Enquanto as técnicas convencionais, como a usinagem, envolvem a remoção de material de um bloco bruto, a manufatura aditiva emprega a adição controlada de material camada por camada, conforme especificações digitais. Essa característica permite não apenas a otimização de recursos, mas também a integração de diferentes materiais em uma mesma peça (RODRIGUES *et al.*, 2017).

De acordo com Rodrigues *et al.* (2017) destacam ainda que a manufatura aditiva reduz o número de etapas e processos necessários para a fabricação de objetos complexos. Enquanto a produção convencional de uma peça intrincada pode exigir múltiplas operações de usinagem, montagem e acabamento, a manufatura aditiva frequentemente realiza essa tarefa em uma única etapa, ou em um número significativamente menor de fases, o que representa uma vantagem.

2.1.9 Realidade Aumentada (RA)

A Realidade Aumentada (RA) surgiu nos anos 1960, por meio das contribuições do pesquisador Ivan Sutherland, que publicou um artigo visionário sobre a evolução da realidade virtual e desenvolveu um capacete de visão ótica direta com rastreamento para visualização de objetos tridimensionais no ambiente real. Contudo, apenas na década de 1980, a Força Aérea dos Estados Unidos desenvolveu o primeiro projeto prático de RA: um simulador de cockpit de avião que mesclava elementos virtuais com o ambiente físico do usuário (KIRNER; KIRNER, 2011).

No campo da Ciência da Computação, a Realidade Aumentada constitui uma linha de pesquisa que trata da integração entre o mundo real e elementos virtuais gerados computacionalmente. Sua aplicação é vasta e abrange áreas como a medicina, com simulação de cirurgias e diagnósticos, a educação, com o desenvolvimento de jogos interativos, o

entretenimento e o marketing, ao demonstrar produtos por meio de elementos virtuais interativos (CARDOSO *et al.*, 2014).

A RA e a realidade virtual permitem ao usuário interagir com cenários híbridos, que mesclam objetos reais e virtuais, tanto estáticos quanto dinâmicos. Isso possibilita a criação de representações digitais de ambientes reais, como casas, instituições de ensino, agências bancárias e até cidades inteiras. Esses ambientes podem ser explorados de forma imersiva, com interação direta por meio de gestos naturais, como o uso das mãos (KIRNER *et al.*, 2004).

Enquanto a Realidade Aumentada utiliza técnicas para gerar, posicionar e sobrepor objetos virtuais ao ambiente físico, a Virtualidade Aumentada opera de forma inversa, capturando objetos reais e integrando-os a mundos virtuais para interação digital. O ambiente de RA combina recursos de multimídia – como imagens e sons em alta qualidade – com técnicas de realidade virtual, promovendo uma experiência interativa e em tempo real (KIRNER; TORI, 2006).

Os sistemas de RA são compostos por software especializado que atua tanto na preparação quanto na execução da aplicação, permitindo ao usuário interagir com objetos virtuais, além de viabilizar a comunicação entre elementos reais e virtuais em tempo real (Kirner *et al.*, 2004). Isso é possível por meio da integração de tecnologias como rastreamento óptico, projeção digital e interfaces multimodais, cada vez mais comuns em aplicações modernas (KIRNER; KIRNER, 2011).

Diferentemente da realidade virtual, que normalmente exige ambientes fechados e equipamentos específicos como capacetes e projetores, a RA pode ser utilizada em qualquer local, seja ele aberto ou fechado. De acordo com Leite (2020), a RA representa uma extensão do mundo real, enriquecido com informações e objetos virtuais que são tridimensionalmente registrados e integrados ao ambiente físico, oferecendo uma experiência mais fluida e interativa ao usuário.

Na Indústria 4.0, a Realidade Aumentada tem sido aplicada para fornecer informações operacionais em tempo real aos trabalhadores, como orientações de montagem ou instruções de reparo, frequentemente por meio de dispositivos móveis. Embora esses sistemas ainda estejam em estágio inicial, espera-se um uso cada vez mais amplo da RA como ferramenta de apoio à tomada de decisão e aos procedimentos de trabalho nas indústrias inteligentes (RUBMANN *et al.*, 2015).

Fischer *et al.* (2016) reforçam que os processos manuais continuam sendo essenciais na produção atual, especialmente diante da alta variabilidade dos produtos e da necessidade de intervenção humana. A principal função da RA na Indústria 4.0 é orientar esses trabalhadores,

fornecendo instruções visuais e precisas durante a execução das tarefas, além de permitir a validação virtual de processos e treinamentos.

A Realidade Aumentada (RA) tem se consolidado como uma tecnologia essencial na Indústria 4.0, promovendo a integração entre o ambiente físico e elementos virtuais, o que resulta em processos produtivos mais eficientes e flexíveis. A RA oferece uma plataforma que facilita o registro e o acesso a informações, auxiliando na tomada de decisões e permitindo o treinamento simultâneo dos operadores durante a execução dos processos de produção. Isso contribui para o aumento da velocidade e precisão do trabalho, trazendo benefícios econômicos significativos para as empresas (ZIAEE; HAMED, 2021).

2.1.10 Digital Twin

O conceito de Gêmeo Digital (*Digital Twin*) tem se consolidado como um dos pilares tecnológicos da Indústria 4.0. Trata-se de uma representação digital de um ativo físico, sistema ou processo, que permite o monitoramento, a simulação e a análise de seu comportamento em tempo real. Essa tecnologia promove uma integração entre os mundos físico e virtual, utilizando sensores, sistemas ciberfísicos e algoritmos inteligentes para espelhar digitalmente operações e funcionalidades de equipamentos e processos reais (GRIEVES; VICKERS, 2017).

Segundo Kritzinger *et al.* (2018), o Gêmeo Digital permite que empresas realizem simulações preditivas, antecipando falhas e otimizando processos com base em dados reais. Essa funcionalidade o torna uma ferramenta estratégica para manutenção preditiva, planejamento de produção, personalização em massa e gestão de ativos. Além disso, os gêmeos digitais oferecem suporte à tomada de decisão em tempo real, possibilitando a redução de custos e o aumento da eficiência operacional.

Na prática, os Gêmeos Digitais têm sido aplicados em diversos setores industriais, como aeronáutica, automotivo, saúde e energia. Em ambientes fabris, permitem a modelagem digital de linhas de produção inteiras, possibilitando testes e simulações sem a necessidade de interromper o funcionamento das operações físicas. Essa capacidade é fundamental para o desenvolvimento de ambientes produtivos inteligentes e flexíveis (FULLER *et al.*, 2020).

Para Tao *et al.* (2019), os Gêmeos Digitais também exercem um papel fundamental na servitização da indústria, transformando produtos em plataformas que fornecem serviços baseados em dados. Com isso, empresas podem oferecer soluções personalizadas, monitorar o desempenho de produtos em campo e aprimorar continuamente seus projetos com base no uso real dos clientes.

Apesar das inúmeras vantagens, a adoção de Gêmeos Digitais ainda enfrenta desafios, como o alto custo de implementação, a complexidade de integração com sistemas legados e a necessidade de padronização de dados e protocolos. No entanto, com a evolução das tecnologias digitais, espera-se que a sua utilização se torne cada vez mais comum, impulsionando a transformação digital nas cadeias produtivas (JONES *et al.*, 2020).

2.2 ANÁLISE DO REFERENCIAL TEÓRICO

O termo Indústria 4.0 foi introduzido em 2011, no contexto de uma iniciativa conjunta entre os setores público e privado na Alemanha, com o propósito de estabelecer uma diretriz estratégica para a digitalização da manufatura. Essa nova fase do desenvolvimento industrial é caracterizada pela convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas, culminando na criação de sistemas ciberfísicos interligados, inteligentes e autônomos (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHWAB, 2016). De acordo com Meindl *et al.* (2021), a Indústria 4.0 representa um estágio avançado de maturidade tecnológica, sustentado por ferramentas como a Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, Big Data e inteligência artificial. Tais tecnologias viabilizam não apenas elevados níveis de automação, mas também a integração dinâmica e em tempo real dos processos organizacionais, promovendo maior eficiência operacional, personalização em larga escala e sustentabilidade nos sistemas produtivos.

O presente modelo de avaliação de maturidade foi estruturado com base em dez dimensões tecnológicas que compõem o arcabouço da Indústria 4.0. Cada dimensão foi descrita segundo cinco níveis de maturidade, representando uma progressão contínua desde a ausência ou aplicação inicial da tecnologia (nível 1), até sua integração plena e otimizada nos processos produtivos (nível 5). As descrições foram fundamentadas em literatura especializada, permitindo a elaboração de critérios objetivos para diagnóstico organizacional (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Com base na literatura e referencial teórico e o suporte necessário para o desenvolvimento da tese foi criado um framework para analisar o impacto das tecnologias habilitadoras sobre cinco níveis de maturidade, conforme tabela a seguir:

Tabela 1 - Framework

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Big Data and Analysis	Conhecimento conceitual básico, sem aplicação prática. (Zikopoulos et al., 2011)	Iniciativas isoladas de coleta e armazenamento de dados, sem análise estruturada. (Kakhani et al., 2013)	Uso de ferramentas de análise básica para apoio à decisão em áreas específicas. (Shmueli; Koppius, 2011)	Análise de dados integrada à operação, com dashboards e relatórios preditivos. (McAfee; Brynjolfsson, 2012)	Big Data totalmente integrado à cadeia de valor com automação de decisões baseada em dados. (Azevedo, 2016)
Robôs Autônomos	Conhecimento básico sobre automação, sem uso de robôs no ambiente produtivo. (Romano; Dutra, 2016)	Uso de robôs com programação fixa e funções limitadas, sem autonomia. (Garcia, 2016)	Implantação de robôs com sensores e capacidade de adaptação parcial ao ambiente. (Barros, 2016)	Robôs autônomos colaborativos operando junto a humanos com segurança e eficiência. (Pereira; Simonetto, 2018)	Integração total de robôs autônomos com sistemas ciberfísicos e aprendizado contínuo. (Rübmann et al., 2015)
Simulação	Conhecimento básico sobre simulação, sem aplicação prática. (Silva, 2007)	Uso de simulações estáticas ou demonstrativas, sem integração aos processos reais. (Gavira, 2003)	Simulações aplicadas a processos específicos com apoio à tomada de decisão. (Ferreira et al., 2020)	Modelagem dinâmica e em tempo real integrada aos sistemas de produção. (Bateman et al., 2013)	Simulação avançada com gêmeos digitais, análise de desempenho e otimização contínua. (Oliveira Junior, 2023)
Integração de sistemas horizontais e verticais	Estrutura organizacional isolada, com sistemas sem comunicação entre si. (Kagermann et al., 2013)	Início de integração entre departamentos internos ou parceiros externos, com baixa interoperabilidade. (Rübmann et al., 2015)	Integração parcial entre sistemas operacionais, engenharia e cadeia de suprimentos. (Pérez-Lara et al., 2018)	Integração consistente entre níveis organizacionais e parceiros externos, com troca de dados em tempo real. (Chukalov, 2017)	Integração total entre sistemas internos e externos, suportada por arquiteturas escaláveis e dados compartilhados. (Doleški, 2015)
A Internet Industrial das Coisas	Conhecimento conceitual sobre IoT, sem aplicação prática no ambiente industrial. (Santos et al., 2016)	Implementação inicial de sensores e coleta de dados em áreas-piloto, com baixa integração. (Conte; Araujo, 2020)	Integração parcial de dispositivos com redes industriais e análise de dados local. (Azevedo, 2017)	Aplicações de IIoT em larga escala com conectividade entre máquinas, sistemas e nuvem. (Oliveira et al., 2016)	Ecosistema digital inteligente, com IIoT totalmente integrado à operação, análise preditiva e decisão autônoma. (Zhang et al., 2015)
Segurança Cibernética	Ausência de políticas de segurança; foco apenas na operação dos sistemas. (Canongia; Junior, 2009)	Iniciativas pontuais de segurança digital com foco em rede ou antivírus isolados. (Ani; He; Tang, 2016)	Segurança cibernética implementada em áreas críticas com controles técnicos e operacionais. (Walso et al., 2017)	Gestão integrada de segurança da informação com foco em prevenção e resposta a incidentes. (BCG, 2019)	Cultura organizacional orientada à cibersegurança com monitoramento contínuo e arquitetura resiliente. (Walso et al., 2017)
A Nuvem - The Cloud	Conhecimento conceitual sobre computação em nuvem; sem uso prático. (Pedrosa; Nogueira, 2011)	Utilização básica de serviços em nuvem para armazenamento ou e-mails. (De Paula; De Oliveira Dian, 2021)	Uso de nuvem em aplicações empresariais específicas, com integração parcial. (Heidrich et al., 2017)	Integração de sistemas industriais à nuvem com serviços de análise e controle em tempo real. (Rübmann et al., 2015)	Infraestrutura digital inteligente baseada em nuvem com tomada de decisão autônoma e escalabilidade. (Costa, 2021)
Manufatura Aditiva	Conhecimento teórico sobre impressão 3D, sem aplicações industriais. (Junior; Costa, 2019)	Uso de manufatura aditiva para prototipagem simples, com materiais limitados. (Li, 2019)	Produção de peças funcionais com aplicação em setores específicos e integração parcial. (Herderick, 2015)	Uso consolidado em processos produtivos com redução de etapas e personalização de produtos. (Rodrigues et al., 2017)	Manufatura aditiva integrada estrategicamente à cadeia de valor e ao ciclo de vida do produto. (Rodrigues et al., 2017)
Realidade Aumentada (RA)	Conhecimento conceitual sobre RA, sem aplicação prática. (Kirner; Kirner, 2011)	Uso experimental em treinamentos ou apresentações, com baixa interação. (Cardoso et al., 2014)	Aplicação em áreas específicas, como montagem ou manutenção, com integração parcial. (Kirner et al., 2004)	RA integrada ao ambiente industrial com dados em tempo real e interação multimodal. (Ziaee; Hamed, 2021)	RA amplamente aplicada em processos industriais com tomada de decisão orientada por visualização aumentada. (Fischer et al., 2016)
Digital Twin	Conhecimento conceitual sobre gêmeo digital, sem aplicações práticas. (Grieves; Vickers, 2017)	Modelos digitais utilizados de forma estática para visualização ou documentação. (Kritzinger et al., 2018)	Uso de gêmeos digitais em áreas-piloto com dados operacionais parciais. (Tao et al., 2019)	Gêmeos digitais integrados aos sistemas de produção com monitoramento em tempo real. (Fuller et al., 2020)	Gêmeo digital totalmente conectado ao ciclo de vida do produto, com simulação preditiva e otimização contínua. (Jones et al., 2020)

Fonte: Autor (2025)

2.1.1 Bid Data and Analysis

Esta dimensão refere-se à capacidade de coletar, tratar e utilizar grandes volumes de dados para apoio à tomada de decisão. A estruturação dos níveis teve como base autores como McAfee e Brynjolfsson (2012), Shmueli e Koppius (2011), Azevedo (2016) e Zikopoulos *et al.* (2011), que apontam a análise de dados como elemento central para a competitividade na Indústria 4.0.

- Nível 1** – Conhecimento conceitual básico, sem aplicação prática de análise de dados.
- Nível 2** – Iniciativas isoladas de coleta e armazenamento de dados, sem integração sistêmica.
- Nível 3** – Uso de ferramentas de análise básica, voltadas à interpretação de dados históricos.
- Nível 4** – Análise integrada com dashboards em tempo real, suportando decisões operacionais.
- Nível 5** – Integração total do Big Data à cadeia de valor, com análises preditivas e uso de inteligência artificial.

2.1.2 Robôs Autônomos

A maturidade robótica foi descrita a partir da evolução do controle manual à atuação autônoma e colaborativa. Barros (2016), Pereira e Simonetto (2018) e Rüßmann *et al.* (2015) fundamentam os critérios desta dimensão.

- a) **Nível 1** – Conhecimento básico sobre automação, sem robôs em operação.
- b) **Nível 2** – Robôs com programação fixa e atuação limitada.
- c) **Nível 3** – Robôs com sensores e capacidades adaptativas em áreas específicas.
- d) **Nível 4** – Robôs colaborativos integrados ao ambiente produtivo.
- e) **Nível 5** – Robôs totalmente autônomos, operando de forma sinérgica com sistemas e trabalhadores.

2.2.3 Simulação

Com base em Ferreira *et al.* (2020), Oliveira Junior (2023) e Gavira (2003), esta dimensão avalia o grau de aplicação de simulações computacionais na modelagem de processos produtivos.

- a) **Nível 1** – Conhecimento conceitual, sem uso prático de simulação.
- b) **Nível 2** – Simulações demonstrativas, sem integração com processos reais.
- c) **Nível 3** – Simulação aplicada a processos específicos, com dados reais.
- d) **Nível 4** – Simulações dinâmicas em tempo real, conectadas a sensores.
- e) **Nível 5** – Simulação avançada por gêmeos digitais com análise preditiva integrada.

2.2.4 Integração de sistemas horizontais e verticais

A dimensão foi embasada em Pérez-Lara *et al.* (2018) e Chukalov (2017), tratando da interoperabilidade entre sistemas de diferentes níveis organizacionais e setores.

- a) **Nível 1** – Sistemas isolados e falta de integração entre setores.
- b) **Nível 2** – Integração incipiente entre departamentos internos.
- c) **Nível 3** – Integração parcial entre sistemas operacionais e gerenciais.
- d) **Nível 4** – Integração consistente entre áreas e plataformas.
- e) **Nível 5** – Integração total com parceiros externos e internos, em tempo real.

2.2.5 Internet das Coisas (IoT)

A estruturação desta dimensão considera os trabalhos de Azevedo (2017), Conte e Araújo (2020) e Zhang *et al.* (2015), que destacam a conectividade como elemento-chave da Indústria 4.0.

- a) **Nível 1** – Conhecimento teórico, sem dispositivos conectados.
- b) **Nível 2** – Implantação inicial de sensores com coleta de dados básica.
- c) **Nível 3** – Dispositivos parcialmente conectados com sistemas locais.
- d) **Nível 4** – Aplicações em larga escala, com conectividade entre máquinas.
- e) **Nível 5** – Ecossistema inteligente com comunicação autônoma entre dispositivos.

2.2.6 Segurança Cibernética

De acordo com Walso *et al.* (2017) e Canongia e Júnior (2009), esta dimensão trata das políticas e práticas de proteção da infraestrutura digital industrial.

- a) **Nível 1** – Ausência de mecanismos de segurança digital.
- b) **Nível 2** – Ações reativas com softwares antivírus isolados.
- c) **Nível 3** – Adoção de protocolos e controle de acesso estruturado.
- d) **Nível 4** – Monitoramento ativo de ameaças e resposta automatizada.
- e) **Nível 5** – Sistema cibernético resiliente com inteligência de ameaças em tempo real.

2.2.7 A Nuvem

Baseando-se em Costa (2021) e De Paula e Dian (2021), a dimensão avalia o uso da nuvem para armazenamento e integração de sistemas.

- a) **Nível 1** – Ausência de uso de soluções em nuvem.
- b) **Nível 2** – Armazenamento remoto de documentos e dados administrativos.
- c) **Nível 3** – Integração parcial de dados produtivos com plataformas em nuvem.
- d) **Nível 4** – Processos gerenciais e operacionais conectados à nuvem.
- e) **Nível 5** – Integração completa, com cloud híbrida e uso estratégico da nuvem na produção.

2.2.8 Manufatura Aditiva

O modelo de avaliação de maturidade desta dimensão foi baseado em Rodrigues *et al.* (2017) e Herderick (2015), avaliando o uso de tecnologias como impressão 3D.

- a) **Nível 1** – Ausência de manufatura aditiva na empresa.
- b) **Nível 2** – Aplicações experimentais para prototipagem.
- c) **Nível 3** – Uso regular para peças de baixa complexidade.
- d) **Nível 4** – Aplicação em componentes funcionais no processo produtivo.
- e) **Nível 5** – Integração plena da manufatura aditiva à linha de produção.

2.2.9 Realidade Aumentada

Com base em Fischer *et al.* (2016) e Kirner e Kirner (2011), a RA foi avaliada quanto ao suporte visual aos processos industriais.

- a) **Nível 1** – Ausência de RA ou conhecimento apenas teórico.
- b) **Nível 2** – Aplicações pontuais para treinamentos.
- c) **Nível 3** – Uso de RA em manutenção ou inspeções específicas.
- d) **Nível 4** – RA integrada ao suporte técnico em tempo real.
- e) **Nível 5** – RA aplicada em processos produtivos com interação virtual constante.

2.2.10 Digital Twin

A última dimensão foi construída com base em Grieves e Vickers (2017), Tao *et al.* (2019) e Fuller *et al.* (2020), refletindo a maturidade do uso de gêmeos digitais na simulação e controle produtivo.

- a) **Nível 1** – Inexistência de modelos digitais conectados.
- b) **Nível 2** – Modelos digitais isolados para documentação ou visualização.
- c) **Nível 3** – Gêmeos digitais com dados em tempo real, mas sem integração total.
- d) **Nível 4** – Gêmeo digital conectado com o sistema físico para monitoramento constante.
- e) **Nível 5** – Digital Twin atuando de forma preditiva, controlando processos em tempo real.

A Indústria 4.0 representa uma transformação paradigmática nos sistemas de produção, marcada pela integração de tecnologias digitais avançadas com os processos físicos de manufatura. Seu surgimento remonta a 2011, por meio de uma iniciativa estratégica do governo alemão voltada à modernização industrial, tendo como marco o relatório técnico da plataforma *Industrie 4.0* (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013).

Schwab (2016) destaca que a Indústria 4.0 não se limita à introdução de novas tecnologias, mas implica uma mudança estrutural nos modelos de negócio, na força de trabalho e nas relações de produção. O conceito de sistemas ciberfísicos, por exemplo, evidencia a fusão entre os mundos físico e digital, por meio de sensores inteligentes, algoritmos e conectividade em tempo real.

Além disso, autores como Dalenogare *et al.* (2018) e Frank *et al.* (2019) apontam que a Indústria 4.0 proporciona ganhos significativos em termos de eficiência operacional, flexibilidade produtiva, customização em massa, qualidade e sustentabilidade. Por outro lado, sua implementação requer elevados investimentos, reestruturação organizacional e desenvolvimento de competências técnicas e digitais, o que representa um desafio para empresas de diferentes portes.

O modelo das “quatro dimensões inteligentes”, inicialmente desenvolvido por Frank *et al.* (2019a) e posteriormente expandido por Meindl *et al.* (2021), constitui uma estrutura analítica robusta para compreender a forma como as tecnologias associadas à Indústria 4.0 são aplicadas de maneira articulada nas organizações. Esse arcabouço conceitual contempla quatro eixos principais de transformação digital — *Smart Manufacturing*, *Smart Working*, *Smart Supply Chain* e *Smart Products and Services* — os quais sintetizam os domínios centrais de aplicação das tecnologias emergentes no cenário industrial contemporâneo.

2.2.11 Smart Manufacturing (Manufatura Inteligente)

A dimensão denominada *Smart Manufacturing* diz respeito à incorporação de tecnologias digitais avançadas nos processos produtivos, com vistas à sua conversão em sistemas ciberfísicos interconectados e inteligentes. Considerada o eixo central da Indústria 4.0, essa dimensão abrange desde a automação tradicional até soluções sofisticadas baseadas em inteligência artificial, como manutenção preditiva e planejamento dinâmico da produção em tempo real (KUSIAK, 2018; BUENO *et al.*, 2020). Entre as tecnologias que compõem esse escopo, destacam-se a realidade aumentada aplicada ao design de produtos, os gêmeos digitais, os sensores inteligentes e os robôs colaborativos, que contribuem de forma decisiva para o

aprimoramento da produtividade e da adaptabilidade dos sistemas industriais (DALENOGARE *et al.*, 2018; FRANK *et al.*, 2019a). A integração sinérgica entre os domínios de engenharia e manufatura, proporcionada por tais recursos, potencializa ganhos significativos em termos de eficiência, flexibilidade e qualidade nos processos industriais.

A manufatura inteligente é profundamente impactada por tecnologias como sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, inteligência artificial (IA), realidade aumentada, robótica colaborativa e Big Data. Tais tecnologias promovem a automação autônoma, o planejamento preditivo da produção, a manutenção inteligente e o controle em tempo real dos processos industriais (Kusiak, 2018; Dalenogare *et al.*, 2018). Essas tecnologias habilitadoras formam a espinha dorsal do sistema produtivo digital, permitindo que ativos industriais, pessoas e informações sejam integrados em uma estrutura inteligente, com maior capacidade de resposta e adaptabilidade (MEINDL *et al.* 2021).

2.2.12 Smart Working (Trabalho Inteligente)

A dimensão denominada *Smart Working* compreende a utilização de tecnologias digitais com o propósito de ampliar as capacidades humanas nas atividades industriais, promovendo uma relação sinérgica entre operadores e sistemas tecnológicos. Em oposição à lógica de substituição do trabalho humano, essa abordagem prioriza o empoderamento dos trabalhadores por meio de dispositivos como exoesqueletos, realidade aumentada, inteligência artificial aplicada à tomada de decisão, tecnologias vestíveis (*wearables*) e interfaces homem-máquina adaptativas (ROMERO *et al.*, 2020; COHEN *et al.*, 2019). Tal dimensão ressalta a centralidade estratégica dos profissionais operacionais e gerenciais, ao buscar melhorias significativas em aspectos como ergonomia, segurança, flexibilidade e cognição no desempenho das funções, tanto no ambiente fabril quanto em atividades remotas (KAASINEN *et al.*, 2020; FANTINI *et al.*, 2020).

No contexto do *Smart Working*, as tecnologias habilitadoras não visam substituir, mas empoderar os trabalhadores. São mencionadas no artigo tecnologias como realidade aumentada, inteligência artificial, realidade virtual, óculos inteligentes, biossensores, exoesqueletos e robôs colaborativos. Essas tecnologias permitem o apoio cognitivo e físico aos operadores, ampliando sua segurança, eficiência e bem-estar. A IA, por exemplo, facilita a análise de dados em tempo real para decisões operacionais, enquanto a realidade aumentada projeta informações úteis no ambiente de trabalho. O conceito do “Operador 4.0” emerge dessa perspectiva, articulando a relação homem-máquina em sistemas produtivos avançado.

2.2.13 Smart Supply Chain (Cadeia de Suprimento Inteligente)

A dimensão denominada *Smart Supply Chain* refere-se à integração inteligente dos elos da cadeia de suprimentos por meio de tecnologias digitais que possibilitam conectividade contínua e utilização de dados em tempo real. Essa abordagem visa integrar, de forma dinâmica e responsiva, fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes, promovendo uma gestão mais eficiente e adaptativa dos fluxos logísticos. Soluções como Big Data, Internet das Coisas (IoT), blockchain, veículos autônomos e plataformas digitais desempenham papel central na otimização da logística, na rastreabilidade de insumos e produtos, na previsão de demanda e na mitigação de riscos operacionais. Com isso, a cadeia torna-se mais transparente e ágil, capaz de responder rapidamente a flutuações do mercado e a eventos disruptivos. Além disso, essa dimensão está intimamente vinculada à adoção de modelos de negócios inovadores, como a logística sob demanda e a produção descentralizada, os quais reforçam a flexibilidade e a personalização no atendimento ao consumidor final (FREDERICO *et al.*, 2019; STRANDHAGEN *et al.*, 2017).

A cadeia de suprimentos inteligente é potencializada por conectividade em tempo real, analytics, IA, blockchain, AGVs (veículos guiados automaticamente) e robôs móveis autônomos. O artigo destaca que essas tecnologias melhoram a visibilidade de ponta a ponta, o gerenciamento de riscos e a capacidade de resposta a disrupções logísticas. Além disso, a integração de plataformas digitais com dispositivos IoT possibilita serviços sob demanda, rastreamento preciso, customização e previsão de demanda por meio de aprendizado de máquina. A manufatura aditiva também é apontada como ferramenta para produção rápida e localizada, reduzindo estoques e otimizando a logística.

2.2.14 Smart Products and Services (Produtos e Serviços Inteligentes)

A dimensão *Smart Products and Services* abrange tanto os produtos inteligentes — caracterizados por sua conectividade e capacidade de coleta, transmissão e análise de dados — quanto os serviços digitais que são concebidos a partir desses produtos, como manutenção remota, personalização por meio de aplicativos e modelos de negócio baseados no uso, como o “produto como serviço” (PORTER; HEPPELMANN, 2014; AYALA *et al.*, 2017). A interligação entre produtos e serviços, viabilizada por tecnologias digitais emergentes, impulsiona a criação de soluções inovadoras e aumenta significativamente o valor percebido pelo cliente. Nesse contexto, a servitização da manufatura consolida-se como um diferencial

competitivo, ao permitir interações contínuas entre usuários e fabricantes e possibilitar a retroalimentação em tempo real dos processos produtivos, promovendo ciclos de melhoria contínua e maior aderência às necessidades do mercado (PASCHOU *et al.*, 2020; FRANK *et al.*, 2019).

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 têm impacto transversal e sistêmico nas quatro dimensões do modelo de Meindl *et al.* (2021). Elas não apenas transformam os processos produtivos, mas também redefinem o papel do trabalhador, revolucionam as cadeias logísticas e viabilizam novos modelos de produtos e serviços. A aplicação eficaz dessas tecnologias exige visão estratégica integrada, capacitação contínua e capacidade de adaptação organizacional.

A transformação digital pode ser compreendida como um processo contínuo e sistêmico de adoção de tecnologias digitais voltado à reformulação estrutural de organizações, modelos de negócio, processos operacionais e formas de geração de valor (Bharadwaj *et al.*, 2013; Vial, 2019). Diferentemente de iniciativas pontuais de digitalização, a transformação digital implica mudanças profundas nos pilares estratégicos, culturais e tecnológicos das organizações (Westerman; Bonnet; McAfee, 2014).

A implementação de estratégias digitais eficazes requer uma abordagem integrada, que considere simultaneamente a infraestrutura tecnológica, a reconfiguração de processos, o desenvolvimento de competências digitais e o alinhamento estratégico. Nesse sentido, Reis *et al.* (2018) afirmam que a transformação digital bem-sucedida depende não apenas da adoção de tecnologias emergentes — como Internet das Coisas (IoT), Big Data, computação em nuvem e inteligência artificial —, mas também da capacidade organizacional de conduzir mudanças estruturais com base em liderança digital, agilidade organizacional e inovação orientada por dados (MATT; HESS; BENLIAN, 2015).

Segundo Matt, Hess e Benlian (2015), o papel das tecnologias habilitadora é duplo: (i) criar infraestruturas digitais flexíveis e escaláveis; e (ii) ampliar a capacidade de resposta das organizações frente a ambientes de alta volatilidade. Assim, elas não apenas suportam tecnicamente as inovações, mas também habilitam a transformação estratégica das empresas.

No modelo das quatro dimensões proposto por Meindl *et al.* (2021), as tecnologias habilitadoras atuam diretamente sobre:

- a) **Smart Manufacturing**, ao viabilizar automação avançada, manutenção preditiva e sistemas ciberfísicos interligados;
- b) **Smart Working**, ao promover a interação segura e eficiente entre operadores humanos e máquinas inteligentes (ex.: wearables, RA, IA);

- c) **Smart Supply Chain**, ao permitir visibilidade em tempo real e rastreabilidade por meio de IoT, blockchain e analytics;
- d) **Smart Products and Services**, ao transformar produtos físicos em plataformas inteligentes e conectadas, capazes de gerar serviços digitais personalizados.

Portanto, a função das tecnologias habilitadoras vai além da eficiência operacional: elas são catalisadoras da inovação, possibilitando o alinhamento entre capacidades técnicas e estratégias organizacionais no processo de transformação digital (SEBASTIAN *et al.*, 2017; VERHOEF *et al.*, 2021).

3 MÉTODO

Nesta seção apresenta-se o método de pesquisa adotado para o desenvolvimento do estudo, detalhando a abordagem metodológica, os procedimentos de coleta e análise dos dados, bem como as etapas de aplicação do artefato proposto. O método foi estruturado de modo a garantir rigor científico e aderência ao contexto organizacional investigado.

3.1 PESQUISA-AÇÃO

A pesquisa-ação, segundo Michel Thiollent (2011), é uma metodologia de caráter participativo e transformador, que se propõe a integrar a produção do conhecimento com a ação prática em contextos sociais concretos. Essa abordagem é particularmente útil em ambientes que requerem mudanças estruturais ou processuais, como organizações, comunidades, escolas e indústrias, pois não se limita à interpretação da realidade, mas visa intervir para transformá-la.

A pesquisa-ação é um tipo de investigação social com base empírica, que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo, no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (THIOLLENT, 2011).

Esta pesquisa caracteriza-se como qualitativa e aplicada, orientada pela metodologia de pesquisa-ação. Segundo Thiollent (2011), a pesquisa-ação é uma metodologia de caráter participativo e transformador, que se propõe a integrar a produção do conhecimento com a ação prática em contextos sociais concretos. Essa abordagem é particularmente útil em ambientes que requerem mudanças estruturais ou processuais, como organizações, comunidades, escolas e indústrias, pois não se limita à interpretação da realidade, mas visa intervir para transformá-la.

A pesquisa-ação é um tipo de investigação social com base empírica, concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo, no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (Thiollent, 2011). Essa abordagem justifica-se pela necessidade de compreender, intervir e transformar uma realidade concreta, por meio da colaboração entre pesquisador e sujeitos da pesquisa. Tal abordagem é particularmente adequada quando se busca não apenas compreender fenômenos, mas também gerar mudanças no contexto estudado (Tripp, 2005).

A escolha da pesquisa-ação justifica-se pela necessidade de compreender, intervir e transformar uma realidade concreta, por meio da colaboração entre pesquisador e sujeitos da pesquisa. Tal abordagem é particularmente adequada quando se busca não apenas compreender fenômenos, mas também gerar mudanças no contexto estudado (TRIPP, 2005).

Thiollent (2011) define a pesquisa-ação como um tipo de investigação social com base empírica, concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Esse processo se dá em cooperação entre os pesquisadores e os participantes, que atuam como coautores das transformações pretendidas.

3.1.1 Característica da Pesquisa-ação

Entre as principais características da pesquisa-ação, segundo Thiollent (2011), destacam-se:

- a) **Participação ativa dos sujeitos envolvidos:** os participantes não são meros informantes ou objetos de estudo, mas atuam de forma colaborativa em todas as fases da pesquisa;
- b) **Compromisso com a transformação da realidade:** o objetivo não é apenas compreender uma situação, mas agir sobre ela;
- c) **Articulação entre teoria e prática:** a produção de conhecimento é inseparável da prática transformadora;
- d) **Flexibilidade metodológica:** o processo é adaptável às condições do campo e às dinâmicas emergentes;
- e) **Caráter cíclico:** a pesquisa-ação se desenvolve em ciclos contínuos de diagnóstico, planejamento, ação, avaliação e replanejamento.

Esse processo dialógico e recursivo é o que diferencia a pesquisa-ação de outras abordagens tradicionais, que costumam priorizar a distância e a neutralidade entre o pesquisador e o objeto de estudo.

3.1.2 Etapas da Pesquisa-ação

A pesquisa-ação desenvolve-se por meio de um processo cíclico e participativo, organizado em cinco etapas principais: diagnóstico, planejamento, ação, avaliação e reflexão. Essas fases são interdependentes e recursivas, ou seja, a conclusão de um ciclo frequentemente

leva ao início de outro, promovendo um processo de aprendizagem contínua e ajuste progressivo das intervenções em cinco etapas: (THIOLLENT, 2011).

- a) Diagnóstico inicial;
- b) Planejamento da ação;
- c) Implementação das Ações;
- d) Avaliação;
- e) Reflexão e Replanejamento.

Diagnóstico Inicial: A primeira etapa consiste na realização de um diagnóstico participativo da realidade estudada. O objetivo é identificar os principais problemas, desafios e oportunidades no contexto em questão, com o envolvimento direto dos sujeitos participantes.

Conforme Thiollent (2011), essa fase é essencial para a compreensão das práticas cotidianas dos atores sociais, de seus saberes tácitos e das condições concretas de trabalho e organização. É nesse momento que se inicia a construção da confiança entre pesquisador e participantes, elemento indispensável para a legitimidade do processo.

Outros autores corroboram a importância dessa etapa como ponto de partida para intervenções transformadoras. A pesquisa-ação deve começar por uma escuta ativa e sensível das experiências dos sujeitos, de modo a compreender os sentidos que atribuem à sua realidade (TRIPP, 2005). "O diagnóstico visa captar os aspectos fundamentais de uma situação insatisfatória, como é percebida pelos atores sociais que dela participam" (THIOLLENT, 2011, p. 43).

Planejamento da Ação: Com base no diagnóstico realizado, a segunda etapa consiste na elaboração de um plano de ação cooperativo, no qual são discutidas e definidas as intervenções a serem implementadas. Nesse momento, são acordadas metas, estratégias, cronogramas e responsabilidades, sempre com a participação ativa dos sujeitos envolvidos.

O planejamento deve ser construído coletivamente e fundamentado na realidade prática, evitando soluções impostas ou meramente teóricas. Esse caráter colaborativo visa não apenas garantir maior efetividade das ações, mas também promover a autonomia dos participantes (THIOLLENT, 2011).

Segundo Kemmis e McTaggart (1988), essa etapa marca o compromisso dos participantes com a transformação da realidade, pois é a partir dela que se inicia o movimento de ação coordenada. "O planejamento é uma atividade que envolve negociação e deliberação,

exigindo que todos os envolvidos contribuam para a definição das ações a serem empreendidas” (THIOLLENT, 2011, p. 47).

Implementação das Ações: Na terceira etapa ocorre a execução das ações planejadas, ou seja, a intervenção direta no campo empírico, com o objetivo de transformar aspectos específicos da realidade diagnosticada. Essa fase é marcada pela ação colaborativa e pelo acompanhamento sistemático do pesquisador, que deve registrar os acontecimentos, as dificuldades encontradas e os ajustes realizados em tempo real.

O pesquisador atua como mediador e facilitador, incentivando o protagonismo dos envolvidos e promovendo uma cultura de diálogo e corresponsabilidade (FREIRE, 1996). Thiollent (2011) enfatiza que essa fase não é puramente operacional; ela é também um momento de aprendizagem prática, onde os conhecimentos científicos e empíricos se encontram e se modificam mutuamente. Durante a execução, os participantes não apenas aplicam soluções, mas também reformulam concepções e testam hipóteses de modo crítico. “A execução da ação constitui o núcleo da pesquisa-ação. Não se trata de aplicar uma receita, mas de construir soluções a partir da experiência vivida” (THIOLLENT, 2011, p. 50).

Avaliação: A quarta etapa corresponde à avaliação dos resultados das ações implementadas. Essa avaliação deve ser feita em conjunto com os participantes, buscando compreender os efeitos da intervenção, tanto em termos objetivos (eficiência, produtividade, qualidade) quanto subjetivos (satisfação, engajamento, aprendizado).

A avaliação na pesquisa-ação não se restringe à verificação de metas cumpridas. Ela é, acima de tudo, um processo reflexivo que busca identificar as mudanças ocorridas, os fatores que facilitaram ou dificultaram a ação, e os aprendizados gerados ao longo do processo (KEMMIS & MCTAGGART, 1988). Para o autor Thiollent (2011) recomenda o uso de múltiplas fontes de dados — como entrevistas, observações, indicadores de desempenho e registros documentais — para garantir uma análise abrangente e confiável. “A avaliação é um momento essencial de verificação, mas também de aprendizagem coletiva e de reformulação das estratégias futuras” (Thiollent, 2011, p. 52).

Reflexão e Replanejamento: A última etapa consiste na reflexão crítica sobre todo o processo, considerando os resultados obtidos, os desafios enfrentados e as possibilidades de melhoria. Essa etapa pode levar à formulação de novas hipóteses e estratégias, reiniciando o ciclo da pesquisa-ação.

Essa fase é central para a consolidação de uma postura investigativa contínua por parte dos participantes, que se tornam mais conscientes de sua capacidade de intervir e transformar a realidade (TRIPP, 2005). A pesquisa-ação é um processo aberto e cíclico, no qual cada ciclo

aprofunda o anterior, promovendo mudanças mais duradouras e estruturalmente integradas à cultura da organização (THIOLLENT, 2011). “O replanejamento é o resultado de um processo de aprendizagem coletiva. A cada ciclo, as intervenções tornam-se mais complexas e articuladas com os objetivos de transformação” (THIOLLENT, 2011, p. 55).

3.2 MÉTODO DE TRABALHO

Esta seção tem o objetivo de apresentar o modelo de avaliação de maturidade criada, bem como detalhar a aplicação da pesquisa-ação conforme as etapas descritas anteriormente.

3.2.1 Modelo de avaliação de Maturidade

O conceito de modelo de maturidade emergiu como uma abordagem estruturada para avaliar a evolução dos processos organizacionais e orientar o aprimoramento contínuo. Esses modelos fornecem uma escala progressiva que representa diferentes níveis de desenvolvimento de capacidades, práticas e desempenho em determinada área ou sistema (PAULK *et al.*, 1993).

Um dos modelos mais influentes é o Capability Maturity Model Integration (CMMI), originalmente desenvolvido pelo Software Engineering Institute (SEI) da Carnegie Mellon University. O CMMI tem como propósito melhorar a capacidade organizacional por meio de práticas estruturadas, servindo como um guia para melhoria contínua de processos em áreas como engenharia de software, desenvolvimento de sistemas e gestão organizacional (CMMI Institute, 2010).

Segundo o CMMI Product Team (2010), o modelo apresenta cinco níveis de maturidade, os quais representam estágios crescentes de sofisticação dos processos organizacionais:

- a) **Nível 1 – Inicial:** Processos são imprevisíveis, mal controlados e reativos;
- b) **Nível 2 – Gerenciado:** Processos são planejados, monitorados e controlados;
- c) **Nível 3 – Definido:** Os processos são documentados e padronizados em toda a organização;
- d) **Nível 4 – Gerenciado quantitativamente:** A organização utiliza métricas para controlar os processos e melhorar o desempenho;
- e) **Nível 5 – Em otimização:** Foco em melhoria contínua com base em inovação e análise de causas raízes.

Esses níveis servem como referenciais diagnósticos, permitindo às organizações identificar seu estágio atual e traçar estratégias para alcançar um grau mais elevado de maturidade. A

maturidade, nesse sentido, representa não apenas o domínio de técnicas, mas também o grau de integração e estabilidade das práticas organizacionais (VISURE SOLUTIONS, 2023).

Modelos de maturidade têm sido amplamente utilizados em diferentes áreas, como tecnologia da informação, manufatura, gestão de projetos e transformação digital. A principal vantagem desses modelos é sua capacidade de estruturar o progresso organizacional em termos mensuráveis e comparáveis, promovendo um caminho claro para evolução contínua (BECKER; KNACKSTEDT; POPPELBUB, 2009).

Além do CMMI, outras escalas de maturidade vêm sendo desenvolvidas para avaliar dimensões específicas, como transformação digital, adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (Schumacher, Erol e Sihm, 2016), cibersegurança (ENISA, 2019), e sustentabilidade organizacional (Silva *et al.*, 2020). Esses modelos compartilham uma estrutura comum de múltiplos níveis hierárquicos, mas adaptam suas dimensões às especificidades dos contextos em que são aplicados.

3.2.2 Etapas do processo de Construção da Tabela

A seleção dos temas foi baseada nos principais pilares tecnológicos reconhecidos pela literatura acadêmica e industrial (Kagermann *et al.*, 2013; Hermann *et al.*, 2016). Os seguintes tópicos foram escolhidos:

- a) Big Data and Analytics;
- b) Robôs Autônomos;
- c) Simulação;
- d) Integração de Sistemas Horizontais e Verticais;
- e) Internet Industrial das Coisas (IIoT);
- f) Segurança Cibernética.
- g) Computação em Nuvem;
- h) Manufatura Aditiva;
- i) Realidade Aumentada;
- j) Digital Twin (Gêmeo Digital).

Com base em modelos de maturidade já existentes (como RAMI 4.0, IMPULS, e cervos técnicos da BCG e McKinsey), foram definidos cinco níveis de maturidade para cada tecnologia, com base em critérios como:

- a) Presença e uso da tecnologia;
- b) Grau de integração nos processos;
- c) Nível de automação e inteligência;
- d) Impacto estratégico.

Os níveis foram definidos da seguinte forma:

- a) **Nível 1:** Conhecimento conceitual básico, sem aplicação prática
- b) **Nível 2:** Adoção inicial e pontual da tecnologia
- c) **Nível 3:** Uso moderado com integração parcial
- d) **Nível 4:** Integração funcional em múltiplas áreas
- e) **Nível 5:** Aplicação estratégica, automatizada e integrada em toda a organização

Para cada tecnologia, foram elaboradas descrições específicas para os cinco níveis de maturidade, utilizando uma linguagem técnico-científica. As descrições foram organizadas conforme APÊNDICE A. A tabela dos modelos de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 foi desenvolvida com base em uma revisão sistemática da literatura científica voltada para o diagnóstico da transformação digital em ambientes industriais. Foram analisados 38 artigos científicos, selecionados a partir de bases como Scopus, Web of Science e ScienceDirect, utilizando palavras-chave como *Industry 4.0*, *maturity model*, *digital transformation* e *enabling technologies*. A filtragem considerou produções publicadas entre 2015 e 2024, priorizando artigos com foco em metodologias aplicadas à avaliação da adoção tecnológica.

A Tabela sintetiza o modelo de avaliação de Maturidade Tecnológica aplicada à Indústria 4.0, estruturada com base em cinco níveis progressivos de desenvolvimento: Inicial, Gerenciado, Definido, Gerenciado Quantitativamente e em Otimização. Cada nível representa um estágio evolutivo quanto à adoção e à integração das tecnologias habilitadoras, considerando desde o conhecimento conceitual até a incorporação plena e estratégica no ambiente industrial. O modelo de avaliação da maturidade foi aplicado a dez tecnologias-chave, entre elas Big Data and Analysis, Robôs Autônomos, Simulação, Integração de Sistemas, Internet das Coisas (IoT), Segurança Cibernética, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e Digital Twin. A construção dessa tabela foi fundamentada em uma revisão bibliográfica abrangente, que considerou 49 referências provenientes de artigos científicos, periódicos especializados e relatórios técnicos. Essa estrutura permite avaliar o grau de maturidade tecnológica em distintos contextos industriais, servindo como instrumento diagnóstico e orientador para estratégias de transformação digital.

Com base na tabela que foi construída conforme método do descrito nas seções anteriores, vai ser aplicada em 2 casos de análise, no caso de análise de montadora e no caso de análise de peças. A pesquisa-ação será conduzida na empresa Marcopolo, empresa referência no setor de mobilidade, com foco na avaliação do grau de maturidade digital de seus processos industriais. O objetivo principal é analisar o nível de maturidade em transformação digital com base em dez tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, identificar lacunas e implementar ações práticas

que promovam avanços reais no ambiente industrial. A metodologia segue as cinco etapas clássicas da pesquisa-ação: (1) Diagnóstico Inicial, (2) Planejamento da Ação, (3) Implementação das Ações, (4) Avaliação e (5) Reflexão e Replanejamento.

3.2.3 Diagnóstico

A primeira etapa consiste na realização de um diagnóstico participativo da realidade da empresa Marcopolo, em dois contextos, fabricante de peças e montadora de ônibus. O objetivo é identificar os principais problemas, desafios e oportunidades no contexto da organização, com o envolvimento direto da gestão e colaboradores da empresa. Nesta fase será realizada uma análise das condições atuais de maturidade digital.

Será realizada uma análise exploratória das condições atuais de maturidade digital nos casos selecionados. A coleta de dados será realizada por meio de instrumento de avaliação, observação direta dos processos produtivos, análise documental e aplicação de um instrumento estruturado de avaliação baseado em um modelo de avaliação de maturidade com cinco níveis: (1) inicial, (2) gerenciado, (3) definido, (4) gerenciamento (5) otimização.

O instrumento de avaliação será aplicado para medir o nível de maturidade de dez dimensões tecnológicas:

- a) Big Data and Analytics
- b) Robôs Autônomos
- c) Simulação
- d) Integração de Sistemas Horizontais e Verticais
- e) Internet das Coisas (IoT)
- f) Segurança Cibernética
- g) Computação em Nuvem
- h) Manufatura Aditiva
- i) Realidade Aumentada
- j) Digital Twin (Gêmeo Digital)

Cada dimensão será avaliada individualmente em cada unidade de análise, com base em evidências empíricas coletadas no ambiente fabril. Será realizado encontros com gestores, operadores e analistas de cada área para contextualização dos dados coletados, observação

direta dos processos produtivos e uma realizado uma análise documental de relatórios operacionais e de desempenho dos processos.

No processo de fabricação de peças o foco está nos processos de corte, conformação, soldagem, montagem e abastecimento. Serão analisadas questões de integração entre máquinas e sistemas (ERP, MES), uso de sensores, controle em tempo real e coleta automática de dados. No processo de montadora de ônibus o foco estará em montagem estrutural, elétrica, hidráulica, pintura e acabamento. Será avaliado o nível de digitalização de instruções de trabalho, rastreabilidade de componentes, automação e comunicação entre áreas. Os resultados dessa fase serão consolidados em relatórios de maturidade para cada caso analisado, permitindo uma visão clara das lacunas existentes.

3.2.4 Planejamento da Ação

Com base nos resultados do diagnóstico, será realizado a segunda etapa, que consiste no planejamento colaborativo das ações de intervenção. Esta fase contará com a participação ativa dos líderes, supervisores e gestores das áreas envolvidas e suas respectivas áreas de apoio à produção.

Nesta etapa de planejamento das ações serão realizados encontros para uma análise dos relatórios sobre a maturidade digital, identificação de dimensões de desempenho, definição das ações corretivas e evolutivas a serem implementadas, após isto será criado um cronograma das atividades para acompanhamento da evolução das ações e criado métrica de acompanhamento dos itens e definido um indicador de acompanhamento e report dos itens.

O planejamento será adaptado as duas especificações da empresa, sendo fabricação de peças e de montadora de veículos, considerando os recursos e processos de cada setor. Será necessária uma priorização de dimensões com maior impacto e menor nível de maturidade. Definição das ações corretivas ou evolutivas a serem implementadas, como: melhoria de infraestrutura digital, integração de sistemas, capacitação de colaboradores, padronização de dados ou implementação de sensores. Elaboração de um cronograma de atividades, definição de responsáveis, metas e indicadores de acompanhamento. O planejamento será adaptado à realidade de cada setor, respeitando os recursos disponíveis e as restrições operacionais.

3.2.5 Implementação das Ações

A terceira etapa consiste na implementação prática das ações planejadas. A execução ocorrerá em parceria com as equipes da Marcopolo, respeitando o plano de ação acordado. Nesta etapa, as ações planejadas serão colocadas em prática, em formato piloto. A implementação será conduzida com apoio direto do pesquisador, que atuará como facilitador dos gestores e envolvidos nos processos. A execução será acompanhada por registros sistemáticos, relatórios parciais e reuniões de alinhamento para ajustes em tempo real.

Conforme cronograma nesta fase as ações serão implementadas com apoio técnico do pesquisador, monitoramento e ajustes das atividades. Além disto o acompanhamento em campo durante a execução, coleta de registros, feedbacks e eventuais dificuldades encontradas. As ações serão aplicadas em formato piloto, permitindo correções ao longo da execução. Na fabricação de peças poderão ser implementadas ações como digitalização de ordens de produção, instalação de sensores, controles visuais em tempo real. Com isto, na montadora de ônibus, as ações poderão incluir introdução de QR Codes nos kits de montagens, dashboards em tempo real. As ações serão aplicadas em formato piloto, permitindo correções ao longo da execução.

3.2.6 Avaliação

Após a aplicação das ações, será conduzida a avaliação dos seus impactos por meio da reaplicação da tabela de avaliação, comparação entre os níveis de maturidade, análise de indicadores e entrevistas avaliativas com os participantes. Essa etapa permitirá verificar os avanços conquistados e validar as hipóteses de melhoria, com base nos objetivos e indicadores definidos previamente.

Neste processo será necessária uma comparação entre dados do diagnóstico inicial e os dados pós-intervenção, com esta avaliação é possível reavaliar a tomada de decisão e direcionamento. Através de entrevistas/ reuniões é possível coletar percepções sobre o efeito da transformação e mudanças culturais associadas e a partir disto uma análise de indicadores de desempenho, como retrabalho, setup de máquinas, aderência ao planejamento. Essa etapa permitirá verificar o grau de avanço alcançado, os benefícios percebidos e as dificuldades enfrentadas em cada unidade.

3.2.7 Reflexão e Replanejamento

A etapa de reflexão e replanejamento constitui o momento de síntese e aprendizagem coletiva dentro do ciclo da pesquisa-ação, em que os resultados obtidos ao longo das fases anteriores são analisados criticamente e utilizados como base para decisões futuras. Mais do que um encerramento, essa etapa marca o início de um novo ciclo de aprimoramento contínuo, essencial para consolidar uma cultura de transformação digital sustentável nas organizações (THIOLLENT, 2011).

Para tanto, serão realizadas reuniões conclusivas com os grupos participantes de cada unidade analisada, com o propósito de apresentar os principais avanços obtidos, os indicadores de maturidade tecnológica evoluídos e os aspectos que ainda requerem atenção. A dinâmica dessas reuniões incluirá momentos de diálogo estruturado, técnicas de retrospectiva e priorização colaborativa, visando o envolvimento ativo dos colaboradores e a valorização do conhecimento tácito desenvolvido durante a intervenção (NONAKA; TAKEUCHI, 2008).

Na sequência, será promovida uma análise estratégica sobre a viabilidade da expansão das ações, considerando variáveis como:

- a) Capacidade de replicação do modelo em outros setores;
- b) Grau de maturidade organizacional para absorção de mudanças;
- c) Recursos disponíveis (tecnológicos, humanos e financeiros);
- d) Aderência ao planejamento estratégico da empresa.

Como produto concreto dessa etapa, será construído um plano de ação estruturado, que consolidará as principais recomendações resultantes da pesquisa-ação. Esse plano funcionará como um instrumento de governança e controle, alinhado a ferramentas consagradas da gestão da qualidade, como o PDCA (Plan-Do-Check-Act) e o MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) (PALADINI, 2012; FONSECA, 2015). Tal documento conterá:

- a) Objetivos estratégicos das ações futuras;
- b) Responsáveis designados;
- c) Prazos de execução;
- d) Recursos necessários;
- e) Indicadores de desempenho (KPIs);
- f) Métricas financeiras como ROI e payback estimado para cada ação (PARMENTER, 2015).

O follow-up das ações propostas será feito de forma sistemática, com encontros periódicos de acompanhamento e reavaliação. Essa abordagem visa garantir que os aprendizados sejam

incorporados às rotinas organizacionais e que as ações não se percam com o tempo, reforçando o ciclo de aprendizagem organizacional e a capacidade adaptativa da empresa frente aos desafios da Indústria 4.0.

Além disso, essa etapa favorece a identificação de boas práticas que possam ser documentadas, disseminadas e replicadas em outros contextos internos. Também permite a identificação de barreiras persistentes, servindo como insumo para o replanejamento de intervenções e para o início de novos ciclos de pesquisa-ação, com foco em outras dimensões da maturidade tecnológica ou em áreas ainda não contempladas.

Por fim, esta fase é estratégica para reforçar o protagonismo dos colaboradores no processo de transformação, ao reconhecer e valorizar suas contribuições, consolidando uma cultura organizacional orientada à inovação, à melhoria contínua e à sustentabilidade digital. Esse engajamento é vital para que a transformação digital vá além da adoção tecnológica e se traduza em mudanças duradouras nas práticas, processos e na mentalidade corporativa.

4 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta a descrição e a análise dos resultados obtidos a partir do diagnóstico das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 nos ambientes de Fabricação de Peças e Montagem de Ônibus da Marcopolo. O objetivo é demonstrar, de forma sistemática e fundamentada, como foi conduzido o processo de levantamento, classificação e interpretação dos níveis de maturidade tecnológica, seguindo a lógica da pesquisa-ação.

Inicialmente, são detalhados os procedimentos adotados para a coleta de dados, em uma abordagem semelhante a processos de auditoria, envolvendo visitas *in loco*, observações diretas, entrevistas com colaboradores e análise de documentos e sistemas internos. Em seguida, apresentam-se os resultados consolidados por tecnologia habilitadora, comparando os dois ambientes e discutindo as evidências encontradas. Dessa forma, o capítulo busca não apenas registrar a situação atual, mas também oferecer subsídios críticos para a reflexão e o planejamento de ações futuras no contexto da transformação digital.

4.1 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1.1 Procedimento do Diagnóstico

O diagnóstico das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 foi realizado seguindo uma metodologia estruturada em etapas sequenciais, de forma semelhante a um processo de auditoria. O primeiro passo consistiu no planejamento, no qual foram definidos os objetivos da avaliação — mensurar o nível de maturidade digital em dois ambientes fabris distintos (Fabricação de Peças e Montagem de Ônibus) — e selecionar as dez tecnologias habilitadoras a serem avaliadas: Big Data & Analytics, Robôs Autônomos, Simulação, Integração de Sistemas, IIoT, Segurança Cibernética, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e Digital Twin.

Em seguida, estabeleceu-se o instrumento de apoio, representado pelos modelos de avaliação de maturidade em cinco níveis, inspirada no modelo CMMI (PAULK *et al.*, 1993; HUMPHREY, 1989) e fundamentada em autores da Indústria 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHWAB, 2016; FRANK *et al.*, 2019; MEINDL *et al.*, 2021). Esse modelo de avaliação de maturidade descreve a evolução da tecnologia desde a ausência (nível 1) até a integração plena e otimização (nível 5).

A coleta de evidências foi realizada por **múltiplas fontes**, seguindo quatro etapas práticas:

- a) **Observação in loco:** visitas às áreas fabris, acompanhando rotinas, processos e fluxos produtivos.
- b) **Análise documental:** verificação de relatórios internos do SAP (COOIS, ZPP06, MB52, PM), registros do MES, dashboards em Power BI, planilhas de controle e quadros de gestão visual (SFM).
- c) **Entrevistas e conversas com colaboradores:** interação com gestores, técnicos e operadores, buscando compreender como as tecnologias estão presentes (ou ausentes) no dia a dia.
- d) **Registro e classificação:** preenchimento dos modelos de avaliação da maturidade, comparando as evidências observadas com as descrições dos níveis estabelecidos.

Esse encadeamento garantiu a rastreabilidade dos achados e possibilitou que o processo fosse replicável em outros contextos industriais.

4.1.2 Validação, Descrição e execução da validação

Após a coleta inicial, foi conduzida a etapa de validação interna dos resultados preliminares. Essa fase teve como objetivo confirmar a coerência das classificações atribuídas às tecnologias, reduzir vieses interpretativos e assegurar legitimidade social ao diagnóstico.

A validação ocorreu por meio de três movimentos complementares:

- a) **Descrição das evidências:** cada tecnologia foi documentada com exemplos concretos observados em campo (ex.: robôs de solda em operação no CF, uso de dashboards de OEE em Power BI, controles manuais em Excel na montagem).
- b) **Comparação com o modelo de avaliação de maturidade:** verificou-se se os exemplos se enquadravam nas descrições de cada nível, evitando classificações arbitrárias.
- c) **Discussão coletiva:** os resultados foram apresentados em reuniões de validação com representantes das áreas, que tiveram a oportunidade de confirmar, ajustar ou complementar as informações levantadas.

Esse processo de checagem fortaleceu a consistência metodológica e garantiu que o diagnóstico refletisse não apenas a perspectiva do pesquisador, mas também a percepção dos atores diretamente envolvidos, em consonância com a lógica da pesquisa-ação (THIOLLENT, 2011). Com base na estrutura determinada chegou-se como resultado a matriz abaixo, onde tem um retrato da maturidade digital nas dez tecnologias habilitadoras.

Tabela 2- Matriz de Maturidade da Transformação Digital

Tecnologias Habilitadoras	Fabricante de Peças	Montadora de Veículos
Big Data and Analysis	Nível 3	Nível 2
Robôs Autônomos	Nível 3	Nível 1
Simulação	Nível 3	Nível 2
Integração de Sistemas	Nível 3	Nível 2
Internet das Coisas (IoT)	Nível 3	Nível 2
Segurança Cibernética	Nível 2	Nível 2
Computação em Nuvem	Nível 3	Nível 3
Manufatura Aditiva	Nível 2	Nível 1
Realidade Aumentada (RA)	Nível 2	Nível 1
Digital Twin (Gêmeo Digital)	Nível 2	Nível 1

Autor (2025)

4.1.1.1 Big Data and Analysis

Fabricação de Peças – Nível 3

O ambiente do Centro de Fabricação (CF) utiliza ferramentas de análise básica com suporte a dashboards e indicadores de produção. Os dados coletados por sensores de algumas máquinas são analisados para fins de produtividade e qualidade. Embora não haja uma integração completa à cadeia de valor nem uso avançado de Big Data, há uso consistente de dados operacionais e suporte à tomada de decisão.

Na prática, as principais evidências estão nos dashboards de OEE, que consolidados em telas de acompanhamento, apresentam métricas como disponibilidade, performance e qualidade. Esses indicadores são extraídos a partir de apontamentos no MES (Manufacturing Execution System) e complementados por relatórios do SAP módulo PP (Planejamento da Produção).

Exemplos:

- a) Tela SAP ZAS002: utilizada para análise de falhas em garantia, com dados sobre reincidência de problemas e custos associados.
- b) SAP COOISPI: relatórios de ordens de produção, tempos de operação e sequenciamento de processos.

- c) Dashboards Power BI: consolidam dados de sensores de máquinas (dobradeiras, prensas, soldas robotizadas) para acompanhar paradas, gargalos e índices de refugo em tempo real.
- d) Históricos de manutenção preventiva e corretiva: acessados no SAP PM, permitem análises de reincidência de falhas e custos associados às máquinas do CF.

Esses exemplos demonstram que, embora exista uso consistente de dados estruturados e integração parcial entre sistemas, ainda não há aplicação de técnicas avançadas de Big Data, como análise preditiva ou mineração de dados em larga escala.

Montagem de Ônibus – Nível 2

A área de montagem ainda está em fase de transição digital. Existem iniciativas pontuais de coleta de dados, geralmente feitas por sistemas de apontamento e planilhas, mas com uso limitado para análises gerenciais. O uso de dashboards é mais restrito e, muitas vezes, desvinculado da operação em tempo real.

Exemplos:

- a) Apontamentos manuais em planilhas Excel: controles de produtividade e registros de horas trabalhadas por equipe.
- b) Sistema MES: utilizado de forma parcial, principalmente para registrar início e fim de atividades, sem integração direta com o SAP.
- c) Relatórios SAP MB52 e MB51: aplicados para controle de materiais consumidos na linha de montagem, mas sem vinculação a indicadores em tempo real.

Quadros de gestão visual atualizados de maneira manual, utilizados na fábrica para acompanhamento de produção, absentéismo e qualidade, que depois são transferidos manualmente para relatórios mensais. Com isso, o uso de dados ainda está restrito a análises pontuais e reativas. Não há, por exemplo, integração automatizada entre indicadores de retrabalho do MES e relatórios de qualidade no SAP, o que limita a possibilidade de cruzamento de informações e de análises preditivas.

4.1.1.2 Robôs Autônomos

Fabricação de Peças – Nível 3

O CF já conta com robôs instalados em células específicas (ex.: solda e dobradeira automatizada), com sensores e programação adaptável. Essas máquinas possuem funções reprogramáveis e estão integradas aos processos produtivos com certo nível de padronização e

documentação operacional. Na prática, é possível identificar essa maturidade pelas seguintes evidências:

- a) Robôs de solda presentes em células do CF, que operam com programação reconfigurável conforme o tipo de peça;
- b) Dobradeiras automatizadas equipadas com CNC, que realizam ajustes de ângulos e pressão de forma automática, gerando relatórios de produtividade e qualidade;
- c) Registros de produção no MES: cada ciclo do robô é contabilizado e vinculado às ordens de produção no SAP (COOIS, ZPP06), permitindo rastreabilidade;
- d) Histórico de manutenção preventiva/corretiva registrado no SAP PM, incluindo horas de funcionamento dos robôs, falhas recorrentes e custos associados;

Esses exemplos demonstram que, embora exista automação em setores específicos, o uso ainda não está disseminado em todas as etapas do processo, permanecendo em nível intermediário.

Montagem de Ônibus – Nível 1

A montagem de ônibus ainda é predominantemente manual, com uso limitado de automação robótica. Não há aplicação de robôs autônomos nas linhas de montagem, com conhecimento básico sobre automação, sem uso efetivo de robôs autônomos. As evidências mais claras estão em:

- a) Processos manuais de solda estrutural e acabamento, que ainda dependem da mão de obra especializada;
- b) Planilhas Excel e apontamentos no MES para registrar tempos de operação e produtividade por equipe, sem interface com robôs ou equipamentos autônomos;
- c) Quadros de SFM que destacam produtividade e qualidade, mas sem indicadores vinculados a células robotizadas;
- d) Ausência de registros no SAP PM relacionados a manutenção de robôs na montagem, uma vez que não há equipamentos desse tipo em operação.

Essa realidade justifica a classificação em nível inicial, onde a automação é praticamente inexistente, e a produção depende fortemente de recursos manuais.

4.1.1.3 Simulação

Fabricação de Peças (Nível 3)

O CF utiliza ferramentas de simulação para apoiar decisões de layout, fluxo de materiais e capacidade produtiva, especialmente em processos de corte, dobra e solda. Os modelos gerados ajudam a antecipar gargalos e avaliar alternativas produtivas antes da implementação. Embora a simulação não seja integrada em tempo real ao processo, ela é aplicada com consistência nas fases de planejamento e melhorias contínuas. Na prática, é possível identificar esse nível de maturidade pelas seguintes evidências:

- a) Softwares de simulação de layout fabril (ex.: AutoCAD, Preactor), usados para testar arranjos físicos de máquinas e otimizar fluxos de materiais;
- b) Modelos de capacidade produtiva: simulações feitas pela Engenharia de Processos para definir o número de máquinas e operadores necessários em células de corte e conformação;
- c) Relatórios de tempos de ciclo e gargalos obtidos no SAP (COOIS, ZPP06) e complementados por dados de sensores via MES, que servem de insumo para validação das simulações;
- d) Projetos de melhoria contínua: evidenciados em apresentações internas e nos quadros de SFM, onde resultados de simulações são discutidos com líderes de célula antes da execução de mudanças físicas;
- e) Estudos de soldagem robotizada: simulação de tempos e trajetórias dos robôs para avaliar viabilidade de padronização antes da programação definitiva.

Esses exemplos demonstram que a simulação já é utilizada como ferramenta de apoio a decisões, mas ainda carece de integração automática com dados em tempo real para atingir níveis mais avançados de maturidade.

Montagem de Ônibus (Nível 2)

A área de montagem faz uso pontual de simulações, principalmente em softwares de engenharia para planejamento de produção ou layout. No entanto, essas aplicações são desconectadas da operação diária e sem retroalimentação com dados reais do processo, o que limita sua aplicação estratégica. Evidências observáveis incluem:

- a) Softwares de CAD/CAE utilizados por Engenharia Industrial para simular sequenciamento de montagem, espaço físico e ergonomia dos operadores;

- b) Planilhas de capacidade de linha: cálculos manuais baseados em tempos padrões (cronometragem), que servem como simulações simplificadas;
- c) Simulações de protótipos de veículos realizadas em fase de projeto, mas sem interface com os indicadores reais do SAP ou MES;
- d) Quadros de SFM: discutem produtividade e atrasos, mas as decisões de alteração de layout ou balanceamento de linha ainda dependem de análises manuais, sem uso sistemático de simulação digital integrada;
- e) Ausência de integração com dados reais: os tempos coletados no MES não retroalimentam os softwares de simulação, o que impede a validação dinâmica dos cenários simulados.

Assim, a montagem se mantém em nível inicial-intermediário, pois a simulação existe, mas ainda de forma isolada e pouco conectada com a rotina operacional.

4.1.1.4 Integração de Sistemas

Fabricação de Peças (Nível 3)

O ambiente possui integração entre o ERP e sistemas operacionais como o MES, o que permite visibilidade dos dados de produção em tempo quase real. Essa integração facilita o acompanhamento por dashboards e promove certa padronização na coleta e uso das informações, embora ainda existam pontos de interface manuais em áreas específicas. Na prática, é possível observar:

- a) Integração SAP–MES: as ordens de produção lançadas no SAP (COOIS, ZPP06) alimentam automaticamente o MES, que registra início e fim de operações em máquinas de corte, dobra e solda;
- b) Dashboards em Power BI: atualizados a partir dos dados do MES, mostrando OEE, produtividade, disponibilidade e refugo em células específicas do CF;
- c) Apontamentos de paradas de máquina: realizados no MES e consolidados no SAP PM, permitindo cruzamento entre disponibilidade do equipamento e custos de manutenção;
- d) Quadros de SFM: utilizam dados extraídos do SAP/MES para acompanhamento diário da produção e tratativas de desvios;
- e) Interfaces manuais ainda presentes: em atividades como controle de setups e ajustes de lote, onde operadores precisam inserir informações complementares em planilhas Excel para posterior carga no SAP.

Esses exemplos demonstram que há integração parcial robusta, mas que não é plena, pois ainda coexistem sistemas digitais e controles manuais paralelos.

Montagem de Ônibus (Nível 2)

Na montagem, os sistemas ainda operam de forma parcial ou isolada. Há presença de ERP e sistemas de apontamento, mas a conexão entre eles e com o chão de fábrica é frágil. A ausência de comunicação fluida entre áreas limita a tomada de decisão baseada em dados integrados. As principais evidências são:

- a) ERP SAP: utilizado para emissão de ordens de produção e requisições de materiais (transações MB51, MB52), mas sem integração direta com apontamentos de produtividade do chão de fábrica;
- b) MES em uso limitado: parte dos apontamentos de tempo de operação e retrabalhos são feitos no MES, mas sem comunicação automática com o SAP, exigindo consolidação manual;
- c) Planilhas Excel: utilizadas como ponte entre sistemas, principalmente para registrar produtividade da linha, absenteísmo e balanceamento de equipes;
- d) Quadros de SFM: trazem indicadores coletados manualmente (produção diária, horas extras, qualidade), que posteriormente são transcritos para relatórios mensais;
- e) Ausência de integração horizontal: os dados de montagem não retroalimentam Engenharia ou Logística em tempo real, prejudicando ajustes rápidos em materiais, sequenciamento e capacidade produtiva.

Esse cenário justifica o nível intermediário-baixo, com sistemas existentes, mas pouco comunicantes e dependentes de controles manuais.

4.1.1.5 Internet das Coisas - IIoT

Fabricação de Peças (Nível 3)

Diversas máquinas estão equipadas com sensores que capturam dados como temperatura, ciclos, pressão e vibração. Esses dados alimentam sistemas internos, permitindo análises sobre condições operacionais e manutenção. A conectividade é parcial, mas com bom uso em ambientes críticos e com foco em eficiência. Na prática, as evidências desse nível de maturidade incluem:

- a) Sensores em máquinas de corte e dobra: monitoram temperatura, ciclos e consumo de energia, enviando dados ao MES para acompanhamento de produtividade e falhas;

- b) Prensas e soldas robotizadas: possuem sensores de pressão e vibração que geram alertas de anomalias, registrados no SAP PM como ordens de manutenção preventiva;
- c) Dashboards em Power BI: consolidação de dados de sensores para monitoramento em tempo quase real de paradas, tempos de ciclo e indicadores de qualidade;
- d) Histórico de alarmes de máquinas: acessado via MES e relatórios técnicos da Manutenção, utilizado como insumo para análises de confiabilidade;
- e) Quadros de SFM: exposição visual de indicadores derivados dos sensores (ex.: paradas não programadas, eficiência de equipamentos críticos), discutidos nas rotinas diárias com líderes e operadores.

Embora já exista coleta automatizada e uso parcial em análises operacionais, ainda não há conectividade plena entre todas as máquinas e sistemas centrais, limitando a visão integrada.

Montagem de Ônibus (Nível 2)

Existem iniciativas pontuais de coleta de dados, como em testes de qualidade e inspeções finais, mas ainda há pouca infraestrutura de IIoT conectando os equipamentos ao sistema. A coleta manual predomina, e a automação distribuída ainda é incipiente. As evidências práticas nesse ambiente são:

- a) Equipamentos de teste de estanqueidade e sistemas elétricos: alguns possuem sensores que registram resultados automaticamente, mas os dados ficam restritos ao próprio equipamento;
- b) Registros manuais em planilhas Excel e no MES: apontamentos de inspeções finais, ajustes de linha e índices de retrabalho são feitos manualmente e posteriormente digitados no sistema;
- c) Quadros de SFM: expõem indicadores de qualidade e produtividade, mas alimentados por dados coletados manualmente pelos supervisores;
- d) SAP QM (Gestão da Qualidade): utilizado em parte para registrar resultados de inspeção, porém sem integração direta com sensores ou dispositivos de chão de fábrica;
- e) Ausência de conectividade entre estações: cada área coleta dados de forma isolada, sem retroalimentação em tempo real para o ERP ou sistemas analíticos.

Esse cenário reforça o nível 2, no qual existem iniciativas isoladas, mas sem a infraestrutura robusta de IIoT para conectar máquinas, sistemas e operadores em tempo real.

4.1.1.6 Segurança Cibernética

Ambos (Nível 2)

Ambos os ambientes contam com proteção básica, como antivírus, firewalls e controle de acesso. No entanto, a segurança digital ainda é tratada como uma responsabilidade exclusiva da área de TI, sem envolvimento sistemático das áreas produtivas. A conscientização sobre ameaças digitais e boas práticas de cibersegurança ainda está em fase inicial. Na prática, as evidências desse nível incluem:

- a) Proteções básicas de rede: presença de firewalls corporativos, softwares antivírus instalados em todos os computadores e estações de trabalho, além de monitoramento centralizado pela equipe de TI;
- b) Controle de acessos no SAP: usuários possuem perfis de acesso restritos (por exemplo, produção acessa COOIS, ZPP06; manutenção acessa SAP PM), mas o controle de senhas é definido apenas pela TI, sem política clara de renovação periódica aplicada de forma rígida;
- c) Backups realizados periodicamente: evidenciados em relatórios de TI, mas sem integração transparente com áreas operacionais (produção não participa da definição de criticidade de dados);
- d) Gestão de e-mails corporativos: filtros de spam e bloqueios automáticos de anexos suspeitos, porém a capacitação dos colaboradores em identificar phishing e ameaças digitais ainda é pontual;
- e) Auditorias internas ISO 9001 e 14001: incluem itens relacionados à segurança de dados, mas ainda de forma superficial, sem adoção de normas específicas de segurança da informação como a ISO 27001.

Esse conjunto de práticas demonstra que a empresa possui uma proteção básica estruturada, mas ainda distante de níveis mais elevados de maturidade, que exigiriam envolvimento das áreas operacionais, políticas de conscientização contínua e integração entre TI e chão de fábrica na prevenção de incidentes cibernéticos.

4.1.1.7 Computação em Nuvem

Ambos (Nível 3)

A computação em nuvem é utilizada para armazenamento e acesso a dashboards de indicadores, integrando informações de produção em plataformas como Power BI e Office 365.

Há uso de servidores híbridos, o que permite acesso remoto e colaboração entre áreas. A prática está consolidada para fins analíticos e administrativos. Na prática, as evidências observadas incluem:

- a) Power BI em nuvem: dashboards de OEE, produtividade, disponibilidade e qualidade alimentados por dados do SAP e do MES, disponíveis para acesso remoto por gestores e líderes;
- b) SharePoint e OneDrive (Office 365): utilizados para versionamento de documentos administrativos e relatórios de produção, garantindo colaboração simultânea entre diferentes áreas;
- c) Google Drive: suporte complementar para compartilhamento de apresentações e planilhas entre equipes de Engenharia, Produção e Qualidade;
- d) Servidores híbridos: combinação de infraestrutura local (on-premise) para sistemas críticos, como o ERP SAP, com integração a servidores em nuvem para relatórios analíticos e backups;
- e) Backups em nuvem: implementados pela área de TI para documentos de engenharia e registros críticos, assegurando recuperação de dados em caso de falha de servidores internos;
- f) Quadros de SFM: alguns indicadores expostos nos quadros têm origem em dashboards hospedados em nuvem, evidenciando que o uso já ultrapassa a esfera administrativa e começa a chegar ao nível operacional.

Esses exemplos reforçam que a computação em nuvem já está consolidada como prática administrativa e analítica, permitindo colaboração entre áreas e acesso remoto. Entretanto, ainda não se observa integração plena com sistemas produtivos em tempo real, característica de níveis mais avançados de maturidade.

4.1.1.8 Manufatura Aditiva

Fabricação de Peças (Nível 2)

Há impressoras 3D operando para produção de protótipos, suportes e gabaritos. O uso é limitado a finalidades de apoio e engenharia, sem produção em escala nem aplicação direta em componentes estruturais ou funcionais do produto. Na prática, é possível identificar evidências como:

- a) Impressoras 3D na ferramentaria e engenharia de processos, utilizadas para fabricar gabaritos de montagem, dispositivos de fixação e protótipos de peças plásticas;

- b) Projetos de engenharia documentados em CAD (ex.: SolidWorks, AutoCAD), convertidos em prototipagem rápida para validação dimensional;
- c) Registros de uso em relatórios internos da Engenharia: análises de tempo e custo de desenvolvimento comparando prototipagem 3D com métodos tradicionais;
- d) Aplicação em treinamentos internos: utilização de peças impressas em 3D para simulação de montagens e ensaios de ergonomia;
- e) Quadros de SFM e apresentações de Kaizen: algumas melhorias de processo são registradas destacando o uso de gabaritos criados por impressão 3D.

Essas evidências demonstram que a tecnologia já está presente como apoio e inovação localizada, mas sem integração direta ao fluxo produtivo principal ou aplicação em peças estruturais.

Montagem de Ônibus (Nível 1)

O conhecimento sobre a tecnologia existe, mas não há aplicação prática. A manufatura aditiva ainda não faz parte do cotidiano da área, permanecendo como uma inovação em fase de observação. Os exemplos práticos que reforçam essa condição são:

- a) Ausência de impressoras 3D no ambiente da montagem: eventuais peças produzidas em 3D chegam apenas por demanda da engenharia, mas não são aplicadas na rotina da linha;
- b) Projetos de prototipagem centralizados no CF ou Engenharia, sem desdobramento para a área de montagem;
- c) Quadros de SFM: não exibem indicadores ou resultados vinculados ao uso da manufatura aditiva;
- d) Registros em planilhas e SAP: inexistentes para manufatura aditiva na montagem, confirmando que a tecnologia ainda não foi incorporada aos processos;
- e) Conhecimento limitado dos operadores e líderes da área: a aplicação da tecnologia é reconhecida como tendência, mas ainda distante da prática diária.

Assim, a manufatura aditiva encontra-se em nível inicial na montagem, restrita ao conhecimento conceitual e sem experimentação operacional.

4.1.1.9 Realidade Aumentada (RA)

Fabricação de Peças (Nível 2)

São conduzidos testes e pilotos com o uso de RA em treinamentos técnicos e instruções operacionais digitais. Embora ainda restrito a iniciativas pontuais, há reconhecimento do potencial da tecnologia para acelerar o aprendizado e reduzir falhas humanas. As evidências desse nível incluem:

- a) Pilotos de RA em treinamentos técnicos: utilização de tablets e óculos de RA para instruções passo a passo em processos de solda e dobra;
- b) Instruções digitais de trabalho: carregadas em dispositivos móveis e vinculadas ao MES, permitindo acesso visual a procedimentos durante a operação;
- c) Registros em relatórios de Engenharia de Processos: documentação de projetos-piloto de RA para suporte ao treinamento de novos operadores;
- d) Feedback dos operadores em workshops de melhoria contínua: relatos sobre usabilidade dos dispositivos de RA e seu impacto na padronização operacional.

Apesar de já existirem aplicações experimentais, o uso da RA ainda não está difundido no cotidiano da fábrica, permanecendo em caráter de testes controlados.

Montagem de Ônibus (Nível 1)

Não há aplicações ativas de RA. O conhecimento está limitado à engenharia, com iniciativas ainda não implantadas no ambiente fabril. As evidências que justificam esse estágio são:

- a) Ausência de dispositivos de RA (óculos ou tablets dedicados) na linha de montagem: procedimentos ainda baseados em instruções impressas e treinamentos presenciais;
- b) Engenharia com conhecimento conceitual: áreas de projeto e desenvolvimento acompanham tendências de RA, mas sem implementação prática na montagem;
- c) Planilhas de treinamento: registros de capacitação dos operadores demonstram que o processo é feito por métodos tradicionais, sem suporte de RA;
- d) SAP HR/Training: não há registros de treinamentos vinculados a ferramentas de RA, reforçando a inexistência de aplicação prática.

Dessa forma, a RA encontra-se em estágio inicial na montagem, com reconhecimento conceitual, mas ainda sem iniciativas concretas.

4.1.1.10 Digital Twin

Fabricação de Peças (Nível 2)

Existem modelos digitais estáticos que representam equipamentos e layouts do chão de fábrica, usados principalmente para planejamento e engenharia. No entanto, esses modelos não são atualizados em tempo real e não há interação contínua com o processo, limitando a caracterização como gêmeo digital completo. As evidências que sustentam esse nível incluem:

- a) Modelagem 3D de layouts: realizada em softwares CAD/CAE (AutoCAD, SolidWorks), utilizados pela Engenharia de Processos para planejar arranjos de corte, dobra e solda;
- b) Modelos de equipamentos: representações digitais de células robotizadas de solda e máquinas CNC, usadas para simulação de capacidade produtiva;
- c) Relatórios de Engenharia: documentam cenários de simulação e projetos de balanceamento de linhas, mas sem vínculo dinâmico com dados reais de operação;
- d) MES e SAP (COOIS, ZPP06): fornecem dados de produtividade e ordens de produção, porém os indicadores não são retroalimentados nos modelos digitais;

Isso demonstra que há representação digital estática, mas não um gêmeo digital com atualização em tempo real e bidirecionalidade de dados.

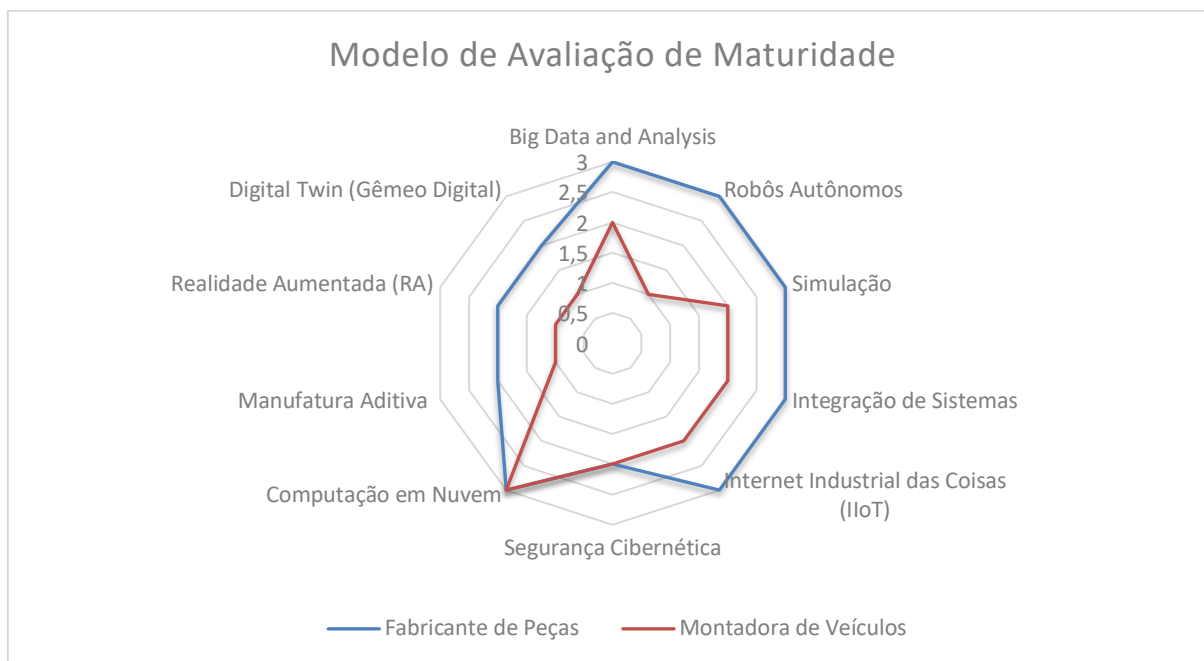
Montagem de Ônibus (Nível 1)

A tecnologia de gêmeo digital ainda não é aplicada na montagem. Não há coleta contínua de dados nem integração com modelos digitais representativos da operação. Trata-se de uma lacuna tecnológica identificada. As evidências observadas incluem:

- a) Ausência de modelos digitais de linhas de montagem: o planejamento é feito em plantas físicas e planilhas de balanceamento, sem representação 3D dinâmica;
- b) SAP e MES: utilizados apenas para apontamentos de produção e consumo de materiais, sem integração a modelos digitais da linha;
- c) Planilhas Excel: continuam sendo a principal ferramenta para estudos de capacidade e balanceamento, reforçando a falta de conexão digital;
- d) Quadros de SFM: indicadores de produtividade e qualidade apresentados manualmente, sem suporte de simulações digitais;
- e) Projetos conceituais em Engenharia: limitados à fase de prototipagem de veículos, sem reflexo direto na operação de montagem.

Esse cenário exemplifica uma lacuna tecnológica, na qual o setor de montagem ainda não iniciou a transição para gêmeos digitais.

Figura 2 - Modelo de Avaliação de Maturidade



Autora (2025)

O diagnóstico das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 nesta pesquisa foi construído a partir de um modelo de avaliação de maturidade em cinco níveis, estruturada com base em referenciais consolidados da literatura (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; SCHWAB, 2016; FRANK *et al.*, 2019; MEINDL *et al.*, 2021) e inspirada em modelos de capacidade, como o CMMI (PAULK *et al.*, 1993; HUMPHREY, 1989). Os cinco estágios do modelo de avaliação de maturidade descrevem a progressão desde uma condição inicial, caracterizada pelo uso inexistente ou incipiente da tecnologia, até um estágio de otimização, em que há integração plena, monitoramento em tempo real e foco em inovação contínua. A construção deste diagnóstico ocorreu dentro da lógica da pesquisa-ação, que, segundo Thiollent (2011), pressupõe a interação entre pesquisador e participantes, de modo que o conhecimento seja produzido conjuntamente com aqueles que vivenciam a realidade organizacional.

Dessa forma, o levantamento dos níveis de maturidade não se limitou à aplicação de um questionário ou à análise documental, mas envolveu observação direta nas áreas da fábrica, conversas com gestores e operadores, análise de relatórios do SAP e MES, verificação de dashboards em Power BI, leitura de planilhas de controle, consulta a registros de manutenção e observação de quadros de SFM. Esse caráter participativo garantiu que a classificação das tecnologias habilitadoras refletisse não apenas uma perspectiva técnica, mas também a

experiência prática e a percepção dos colaboradores que utilizam esses sistemas no dia a dia. Assim, o diagnóstico se consolidou como um instrumento de aprendizagem organizacional, reforçando um dos princípios da pesquisa-ação: a produção de conhecimento voltada à transformação da realidade (KEMMIS; McTAGGART, 2007; TRIPP, 2005).

É importante destacar que a aplicação deste modelo de avaliação de maturidade não exige conhecimentos avançados em tecnologia ou sistemas de gestão. Mesmo um avaliador leigo pode utilizá-la de maneira prática, desde que siga passos simples: observar como as tecnologias estão presentes no cotidiano da organização; registrar exemplos concretos de sua utilização (seja em sistemas automatizados, seja em planilhas e controles manuais); comparar essas evidências com as descrições de cada nível do modelo; e validar as conclusões junto aos responsáveis pela operação. Assim, mesmo empresas de menor porte ou com baixo nível de digitalização podem se beneficiar da metodologia, substituindo sistemas robustos como SAP ou MES por registros equivalentes, tais como planilhas de Excel, controles visuais, relatórios de manutenção ou quadros de gestão.

O mais importante é que o diagnóstico seja construído de maneira colaborativa e fundamentada, a fim de permitir não apenas a mensuração do estágio atual, mas também o engajamento da organização em trajetórias de transformação digital. Portanto, o diagnóstico aqui desenvolvido não deve ser visto como um exercício isolado de avaliação, mas como parte de um processo cíclico da pesquisa-ação, no qual o conhecimento produzido serve de base para reflexão, planejamento, implementação de melhorias, avaliação e replanejamento. Dessa forma, o estudo contribui tanto para a compreensão acadêmica da maturidade digital quanto para a prática organizacional, ao oferecer um caminho estruturado e participativo para a evolução das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

4.1.2 Execução com gestores

Na sequência, o diagnóstico foi submetido a uma execução conjunta com os gestores dos dois ambientes e áreas que tem interface direta com as tecnologias habilitadoras. Essa etapa teve caráter de validação executiva, em que os níveis de maturidade atribuídos foram discutidos em reuniões formais com os gestores da empresa Marcopolo, que correspondem as áreas de Produção, Engenharias, Logística, e Tecnologia da Informação.

Durante esses encontros, foram apresentados os resultados consolidados em tabelas comparativas e gráficos de nível de maturidade, permitindo uma visualização clara dos pontos fortes e das lacunas. Os gestores puderam questionar a classificação de determinadas

tecnologias, trazer exemplos adicionais e propor ajustes. Essa interação foi fundamental não apenas para legitimar os resultados, mas também para engajar as lideranças na construção de planos de ação futuros.

Dessa forma, a execução com gestores assegurou que o diagnóstico não se restringisse a uma análise externa, mas se configurasse como um instrumento de aprendizagem organizacional, incorporando tanto a visão técnica do pesquisador quanto a experiência prática de quem vivencia os processos diariamente (KEMMIS; McTAGGART, 2007; TRIPP, 2005).

Evidenciou-se a necessidade de estabelecer critérios técnicos mais objetivos para a classificação dos níveis de maturidade atribuídos a cada tecnologia habilitadora. Diante desse contexto, foi desenvolvido um Manual Técnico de Aplicação localizado na Apêndice B, com o objetivo de padronizar e tornar explícitos os critérios mínimos necessários para o enquadramento de cada tecnologia habilitadora em determinado nível. Esse manual atua como um instrumento complementar ao artefato principal, assegurando maior rigor metodológico, reprodutibilidade do diagnóstico e coerência entre as aplicações realizadas em diferentes contextos organizacionais.

O manual estrutura, para cada tecnologia habilitadora e para cada nível de maturidade, um conjunto de requisitos técnicos, organizacionais e operacionais que devem ser atendidos de forma cumulativa. Assim, a progressão entre os níveis não ocorre apenas pela presença isolada de soluções tecnológicas, mas pela consolidação de práticas, integração sistêmica, uso efetivo dos dados e alinhamento aos processos decisórios, conforme pressupostos dos modelos de maturidade e capacidade adotados como base teórica deste estudo.

A inserção do Manual Técnico de Aplicação no processo de avaliação contribui diretamente para reduzir a subjetividade do diagnóstico, fortalecer a comparabilidade entre ambientes distintos, como os de Fabricação de Peças e Montagem de Ônibus e apoiar a tomada de decisão, uma vez que explicita de forma clara os elementos necessários para a evolução da maturidade digital. Dessa forma, o manual reforça o caráter aplicado do artefato desenvolvido e amplia sua utilidade prática como ferramenta de gestão da transformação digital no contexto industrial.

Durante o processo de validação da matriz de maturidade tecnológica, realizou-se uma reunião específica com o gerente da área de Tecnologia da Informação (TI), uma vez que esta área possui papel estratégico na sustentação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 na organização. A partir de suas contribuições, alguns ajustes foram considerados necessários para refletir de forma mais fiel a realidade tecnológica da empresa.

No que se refere à dimensão Big Data and Analytics, o gestor indicou que, diferentemente da classificação inicial atribuída, a Montadora de Veículos deveria ser posicionada no Nível 3, em função do uso de Business Intelligence (BI) e da existência de governança de dados estruturada para suporte a análises corporativas. Ele destacou que a empresa faz uso de ferramentas como Qlik Sense e Sigma, que permitem consolidação de dados e geração de indicadores gerenciais, além do início da adoção de recursos de Inteligência Artificial para análises preditivas.

Em relação à Integração de Sistemas, foi sugerida a reclassificação de ambos os ambientes – Fabricação de Peças e Montadora de Veículos – para o Nível 4. Segundo o gestor, já existe um grau significativo de integração entre sistemas corporativos como SAP, MES e soluções internas da área de TI, possibilitando fluxo de informações entre diferentes áreas produtivas e administrativas. Ainda que essa integração não seja totalmente automatizada, ela já permite um nível consistente de conectividade operacional.

Na dimensão de Segurança Cibernética, o gestor também recomendou a revisão do diagnóstico para Nível 4 em ambos os ambientes, argumentando que a empresa possui políticas formais de segurança da informação, gestão de acessos, monitoramento contínuo, bem como contingência e procedimentos de resposta a incidentes. Essas práticas reforçam a maturidade tecnológica frente aos riscos associados à transformação digital.

Apesar dos avanços identificados, o gestor ressaltou que o principal desafio não está nas tecnologias disponíveis, mas na cultura organizacional. Segundo ele, “as ferramentas existem, porém os resultados dependem da plena adesão das pessoas”. Tal observação evidencia que o desenvolvimento tecnológico precisa ser acompanhado de gestão da mudança e elevação da maturidade digital humana, o que está alinhado com a literatura que enfatiza o papel das competências e do engajamento das pessoas na Indústria 4.0 (SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016; FRANK *et al.*, 2019).

Durante a continuidade do processo de validação da matriz de maturidade tecnológica, também foi realizada uma rodada de análise com dois coordenadores da Engenharia de Produto, com o objetivo de revisar criticamente as tecnologias habilitadoras sob responsabilidade ou interface direta desta área. Nessa etapa, foram avaliadas especificamente as dimensões Simulação, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e Digital Twin, mantendo-se a coerência metodológica da pesquisa-ação ao promover a participação colaborativa dos atores organizacionais na construção do diagnóstico (THIOLLENT, 2011).

Os coordenadores confirmaram que, de modo geral, os níveis previamente atribuídos a Simulação e Manufatura Aditiva permanecem coerentes com a realidade atual da empresa,

não havendo necessidade de alteração na matriz. Contudo, destacaram que a adoção de Simulação vem evoluindo gradualmente em alguns projetos de desenvolvimento de produto, embora seu uso ainda seja restrito a análises pontuais e não esteja disseminado como prática sistemática entre as áreas de engenharia e manufatura.

No que se refere à Realidade Aumentada (RA), os participantes ressaltaram que sua utilização ainda é incipiente, ocorrendo de forma pontual na Montadora, especialmente para suporte técnico remoto e atividades de inspeção ou conferência de montagem. Apesar disso, confirmaram que o nível de maturidade atribuído inicialmente permanece adequado, visto que ainda não há integração estruturada da RA aos processos produtivos.

A principal revisão identificada nesta etapa ocorreu na dimensão Digital Twin (Gêmeo Digital). Os gestores argumentaram que, embora a aplicação dessa tecnologia ainda seja limitada, já existem iniciativas alinhadas ao conceito de representação virtual do produto na Montadora, especialmente durante a fase de preparação do chassi e desenvolvimento de layouts digitais. Para essas atividades, são utilizadas ferramentas de engenharia como CATIA e SolidWorks, que permitem a modelagem e simulação virtual de componentes. Em função disso, foi sugerida a reclassificação do nível de maturidade para Nível 2 na Montadora, uma vez que a organização demonstra etapas iniciais de aplicação prática e entendimento conceitual da tecnologia, mesmo que ainda sem integração com o ambiente físico em tempo real. Para o ambiente de Fabricação de Peças, a avaliação inicial foi mantida, pois ainda não há iniciativas de Digital Twin aplicadas ao processo produtivo.

Por fim, os gestores ressaltaram a importância de estender essa etapa de validação à Engenharia de Processos, uma vez que diversas tecnologias discutidas – especialmente Simulação e Digital Twin – possuem interfaces diretas com a definição de processos industriais e desenvolvimento de layout fabril. Essa recomendação reforça o caráter colaborativo e iterativo adotado na construção do diagnóstico nesta pesquisa, confirmando o alinhamento com a abordagem participativa proposta pela pesquisa-ação.

Com o objetivo de complementar o diagnóstico da maturidade tecnológica e garantir maior robustez ao processo de avaliação, foi conduzida uma nova rodada de validação com dois Coordenadores da Engenharia de Processos. Nesta etapa, analisaram-se especificamente as tecnologias habilitadoras Robôs Autônomos, Simulação, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e Digital Twin, considerando evidências práticas e o nível real de utilização na empresa. Os principais apontamentos foram os seguintes:

No que se refere aos Robôs Autônomos, houve sugestão de ajuste para o ambiente de Fabricação, que passou a ser classificado no nível 4 de maturidade. A justificativa apresentada

baseou-se na presença de robôs colaborativos, bem como na aplicação de gabaritos automatizados e sistemas intermitentes de apoio ao processo produtivo. Essas práticas evidenciam um estágio avançado de automação integrada, com operações parcialmente inteligentes e conectadas.

A tecnologia de Simulação e Realidade Aumentada permaneceram em concordância com o nível inicialmente atribuído na matriz, não sendo indicada necessidade de alteração. Segundo o coordenador, a simulação já está consolidada como instrumento de apoio a decisões industriais, especialmente em análises de layout e balanceamento de linha.

Para Manufatura Aditiva, houve recomendação de elevação do nível de maturidade da Fabricação para o nível 4 e fabricante de ônibus para o nível 3, considerando que a ferramentaria já utiliza essa tecnologia de forma sistemática, especialmente para construção de gabaritos, dispositivos e protótipos funcionais. Além de otimizar tempo e custo, essa prática está consolidada como suporte aos processos produtivos, o que caracteriza uso avançado e integrado.

Por fim, para Digital Twin, houve recomendação de ajuste para que Fabricação e Montagem sejam classificadas no nível 3 de maturidade. Embora não exista um gêmeo digital completo implementado, já é possível monitorar gargalos produtivos, realizar avaliações de tempo de ciclo e simular cenários operacionais em células de produção específicas, o que representa um uso intermediário da tecnologia, com potencial de expansão futura.

A matriz inicial de avaliação do nível de maturidade tecnológica foi submetida a uma rodada de validação com os gestores 2 gerentes e 2 coordenadores da área industrial (produção e logística), com o objetivo de confirmar ou ajustar os níveis previamente atribuídos às tecnologias habilitadoras. Esses gestores analisaram a classificação proposta à luz da realidade operacional das áreas de Fabricação de Peças e Montagem de Veículos, considerando evidências práticas de uso das tecnologias no ambiente produtivo. Após discussão crítica, confirmaram as alterações previamente sugeridas pelas áreas técnicas, especialmente Tecnologia da Informação e Engenharia, reconhecendo maior aderência dos níveis ajustados ao estágio atual de evolução tecnológica da empresa.

Entre os principais ajustes confirmados pelos gestores industriais, destaca-se a elevação do nível de maturidade da tecnologia Robôs Autônomos na Fabricação de Peças, que passou do nível 2 para o nível 4, devido à utilização de robôs colaborativos e células robotizadas em processos de soldagem e dobra. A tecnologia de Simulação também foi reclassificada de nível 3 para nível 4, em função do uso recorrente de estudos de layout e fluxo produtivo para análise de gargalos e aumento de produtividade. Em relação à Integração de Sistemas, tanto Fabricação

quanto Montagem foram posicionadas no nível 4, considerando a integração efetiva entre sistemas como SAP, MES e plataformas de monitoramento operacional. Manufatura Aditiva avançou para o nível 4 na Fabricação devido ao uso consolidado de impressão 3D na ferramentaria para prototipação e construção de dispositivos. Por fim, tecnologias como Big Data and Analytics, Computação em Nuvem e Segurança Cibernética permaneceram em níveis superiores na matriz final em razão da crescente adoção de sistemas analíticos, governança de dados e arquitetura de TI segura.

Ao final do processo, os gestores da área industrial declararam concordância com a matriz ajustada, validando a classificação final como representativa do cenário tecnológico atual da organização. Essa etapa foi essencial para consolidar a avaliação de maturidade de forma participativa e alinhada ao método da pesquisa-ação, garantindo legitimidade prática aos resultados obtidos.

Após a etapa de validação junto aos gestores das áreas de Tecnologia da Informação, estratégia, Engenharias, Logística e Manufatura, consolidou-se a matriz de maturidade tecnológica apresentada a seguir. Este instrumento sintetiza a percepção conjunta sobre o nível de adoção e integração das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 nos dois ambientes analisados — o de fabricação de peças e o de montagem de veículos. A definição dos níveis resultou de um processo dialógico, em que a aplicação prática do modelo de avaliação de maturidade permitiu revisar e aprimorar o diagnóstico inicial, evidenciando a evolução do método e o alinhamento das interpretações entre os diferentes setores organizacionais.

A matriz representa, portanto, a materialização do consenso alcançado nas rodadas de conversa, refletindo tanto os avanços já consolidados quanto os desafios ainda presentes na trajetória de transformação digital da empresa. A comparação entre os dois contextos produtivos evidencia diferentes estágios de maturidade tecnológica, permitindo observar, de forma estruturada, as potencialidades e lacunas que orientam as ações de melhoria contínua. Essa consolidação fortalece o caráter participativo da pesquisa-ação e confere legitimidade ao framework de avaliação proposto, segue resultado da matriz sobre o nível de maturidade.

Tabela 3 -Matriz de Maturidade Digital Validada

Tecnologias Habilitadoras	Fabricante de Peças	Montadora de Veículos
Big Data and Analysis	Nível 3	Nível 3
Robôs Autônomos	Nível 4	Nível 1
Simulação	Nível 3	Nível 2
Integração de Sistemas	Nível 4	Nível 4
Internet das Coisas (IoT)	Nível 3	Nível 2
Segurança Cibernética	Nível 4	Nível 4
Computação em Nuvem	Nível 3	Nível 3
Manufatura Aditiva	Nível 4	Nível 3
Realidade Aumentada (RA)	Nível 2	Nível 1
Digital Twin (Gêmeo Digital)	Nível 3	Nível 2

Fonte: Autora (2025)

4.2 Análise dos Pontos Fortes e Fracos – Framework

Partindo do método aplicado, elaborou-se o framework final de maturidade tecnológica, consolidando os resultados em dois eixos principais: pontos fortes e pontos fracos.

a) Pontos fortes:

- Uso consistente de dados no Centro de Fabricação: dashboards de OEE, indicadores extraídos do SAP e MES e relatórios em Power BI demonstram capacidade consolidada de transformar dados em informações úteis para a tomada de decisão.
- Automação intermediária em células produtivas: presença de robôs de solda e dobradeiras CNC garante ganhos em padronização, qualidade e rastreabilidade, ainda que restrita a setores específicos.
- Integração parcial entre SAP e MES: mesmo que não seja plena, essa conexão já possibilita visibilidade quase em tempo real da produção e cruzamento com dados de manutenção e custos.
- Adoção de soluções em nuvem: utilização de Power BI, SharePoint e OneDrive evidencia maturidade digital no armazenamento, compartilhamento e análise de informações, favorecendo colaboração entre áreas.
- Aplicação de simulação em decisões estratégicas: uso de softwares de layout e capacidade produtiva no Centro de Fabricação mostra maturidade em antecipar cenários, evitando desperdícios e apoiando melhorias contínuas.

b) Pontos fracos:

- Baixa difusão de tecnologias emergentes: Digital Twin, Realidade Aumentada e Manufatura Aditiva encontram-se em estágios iniciais ou ausentes, limitando o avanço para níveis mais altos de maturidade.
- Dependência de controles manuais na Montagem de Ônibus: apontamentos em planilhas, quadros atualizados manualmente e integração restrita de sistemas revelam forte vulnerabilidade a erros e retrabalhos.
- Integração limitada de sistemas: embora haja esforços de conexão, ainda existem interfaces manuais e barreiras entre ERP, MES e controles auxiliares, restringindo análises dinâmicas e decisões ágeis.
- Conectividade parcial em IIoT: sensores estão presentes em máquinas críticas, mas a falta de integração ampla reduz a capacidade de monitoramento em tempo real e análises preditivas.
- Cibersegurança básica: restrita a antivírus, firewalls e backups conduzidos pela TI, sem políticas robustas de conscientização e participação das áreas operacionais, o que fragiliza a proteção frente a ameaças digitais.

Esse balanço crítico mostra que o framework desenvolvido não se limita a medir o estágio atual de maturidade, mas também atua como guia estratégico. Ao evidenciar as lacunas, ele indica caminhos para o fortalecimento da digitalização, destacando a necessidade de ampliar a conectividade, reduzir a dependência de controles manuais e avançar na adoção de tecnologias emergentes, ao mesmo tempo em que consolida os avanços já obtidos em automação, uso de dados e integração parcial de sistemas.

4.3 Discussão dos Resultados

Na discussão dos resultados, o framework construído foi comparado com modelos consolidados da literatura (CMMI, RAMI 4.0, Acatech). Identificaram-se diferenciais positivos, como:

- a) Simplicidade de aplicação, mesmo em ambientes com baixa digitalização;
- b) Caráter participativo, envolvendo operadores e gestores;
- c) Foco prático em evidências reais (dashboards, relatórios, registros de manutenção).

Também foram reconhecidas limitações:

- a) Dependência do contexto específico da Marcopolo, o que pode restringir a generalização imediata;
- b) Maior ênfase em tecnologias do que em dimensões organizacionais e humanas;
- c) Caráter qualitativo e interpretativo do processo, que pode incorporar subjetividade.

Assim, conclui-se que o framework oferece uma contribuição relevante para a prática organizacional e para a literatura, ao propor uma metodologia de fácil replicação e que integra teoria e prática em um processo colaborativo de diagnóstico e reflexão.

Com base na matriz de maturidade ajustada e validada pelos gestores, foi possível descrever a situação atual das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 nos dois ambientes avaliados — Fabricação de Peças e Montadora de Veículos. Na dimensão de Big Data e Análise de Dados, ambos os contextos foram classificados no nível 3, evidenciando o uso estruturado de informações para o acompanhamento de indicadores produtivos e apoio às decisões operacionais. Ferramentas como Power BI, Qlik Sense e SIGMA são amplamente utilizadas na Fabricação de Peças, consolidando dados oriundos do chão de fábrica e permitindo análises comparativas. Na Montadora de Veículos, o mesmo nível reflete a utilização consistente de dashboards e relatórios de desempenho, ainda que a cultura analítica esteja em processo de fortalecimento e a integração preditiva de dados em fase de evolução.

Em relação aos Robôs Autônomos, a Fabricação de Peças foi classificada no nível 4, devido à consolidação do uso de robôs de solda, dobradeiras CNC, gabaritos automatizados e manipuladores colaborativos, o que demonstra um grau elevado de automação e flexibilidade produtiva. Já na Montadora, o nível 3 representa a presença de equipamentos robotizados em etapas específicas da montagem, sem integração total entre as células produtivas. Essa diferença reflete maior maturidade na automação do processo de fabricação, enquanto a montagem ainda opera com autonomia parcial das máquinas.

A tecnologia de Simulação foi avaliada no nível 4 na Fabricação de Peças, pois há o uso sistemático de softwares de modelagem e análise para validação de fluxos produtivos e estudo de cenários antes da implementação física. Essa prática tem sido aplicada principalmente nas decisões de layout e balanceamento de linha, contribuindo para a otimização de processos e a redução de desperdícios. Na Montadora, o nível 3 indica uso mais pontual, restrito ao planejamento de processos e à engenharia de produto, com ferramentas como Catia e SolidWorks utilizadas para prever interferências e aperfeiçoar o desempenho operacional.

No que se refere à Integração de Sistemas, ambos os ambientes atingiram o nível 4, caracterizando um estágio avançado de maturidade digital. A interconexão entre SAP, MES e plataformas de Business Intelligence possibilita a rastreabilidade das informações e o monitoramento quase em tempo real das operações. Essa integração contribui para uma gestão mais eficiente e colaborativa entre as áreas de produção e gestão, embora ainda existam oportunidades para ampliar a interoperabilidade entre sistemas, máquinas e pessoas.

A Internet das Coisas (IoT) foi classificada no nível 3 na Fabricação de Peças e no nível 2 na Montadora. O primeiro ambiente apresenta conectividade parcial entre equipamentos e sistemas supervisórios, com sensores e coletores integrados ao MES, permitindo o acompanhamento remoto de indicadores de disponibilidade, performance e qualidade. Na Montadora, o uso da IoT ainda é inicial e caracterizado por iniciativas isoladas de coleta de dados, sem padronização e integração efetiva entre dispositivos.

Quanto à Segurança Cibernética, tanto a Fabricação de Peças quanto a Montadora foram classificadas no nível 4, o que demonstra a consolidação de práticas de governança de dados e controle de acessos. Há políticas formais de segurança, rotinas de backup, monitoramento constante e atualização de sistemas, o que garante confiabilidade às informações corporativas. A maturidade nessa dimensão é essencial, especialmente diante da crescente integração entre sistemas digitais e plataformas em nuvem.

A Computação em Nuvem apresentou classificação de nível 3 em ambos os contextos, representando uso intermediário da tecnologia. As soluções em nuvem são empregadas para armazenamento, integração de relatórios e compartilhamento de dados entre diferentes áreas, favorecendo o trabalho colaborativo e a agilidade na gestão das informações. No entanto, a migração de sistemas críticos ainda está em andamento, o que limita a adoção plena dessa tecnologia.

No que tange à Manufatura Aditiva, a Fabricação de Peças foi classificada no nível 4, devido ao uso consolidado da impressão 3D na ferramentaria para a criação de gabaritos, protótipos e componentes auxiliares. Essa prática resulta em ganhos significativos de tempo e redução de custos no desenvolvimento de ferramentas. Já na Montadora, a classificação no nível 2 indica que a tecnologia ainda se encontra em fase inicial, restrita a projetos pontuais de prototipagem, sem integração sistemática às atividades produtivas.

A Realidade Aumentada foi avaliada no nível 3 na Fabricação de Peças, sendo utilizada em treinamentos, manutenção e setups de máquinas, especialmente para apoio visual às instruções operacionais. Na Montadora, o nível 1 evidencia o uso incipiente da tecnologia, ainda restrito a testes e demonstrações experimentais, sem incorporação às rotinas diárias de montagem.

Por fim, o Digital Twin foi classificado no nível 3 na Fabricação de Peças e no nível 2 na Montadora de Veículos. No primeiro caso, existem células produtivas que já realizam simulações de gargalos, tempos de ciclo e cenários de produção, permitindo análises preditivas de desempenho. No segundo, a aplicação ocorre principalmente nas etapas de engenharia de chassi e preparação de layout, com o uso de modelos virtuais que ainda não estão integrados ao ambiente físico. Essa tecnologia representa uma oportunidade estratégica de avanço para ambos os setores, especialmente pela capacidade de integrar o mundo real e digital no monitoramento dos processos.

Em síntese, a análise dos níveis de maturidade evidencia que a Fabricação de Peças apresenta um estágio mais avançado de adoção das tecnologias habilitadoras, com destaque para Robôs Autônomos, Simulação, Manufatura Aditiva e Integração de Sistemas. A Montadora, por sua vez, encontra-se em processo de consolidação, com práticas promissoras em Big Data, Computação em Nuvem e Segurança Cibernética, mas com espaço para evolução em tecnologias emergentes, como IoT, Realidade Aumentada e Digital Twin. Essa diferenciação reflete não apenas a natureza distinta dos processos produtivos, mas também a trajetória de transformação digital de cada ambiente dentro da organização.

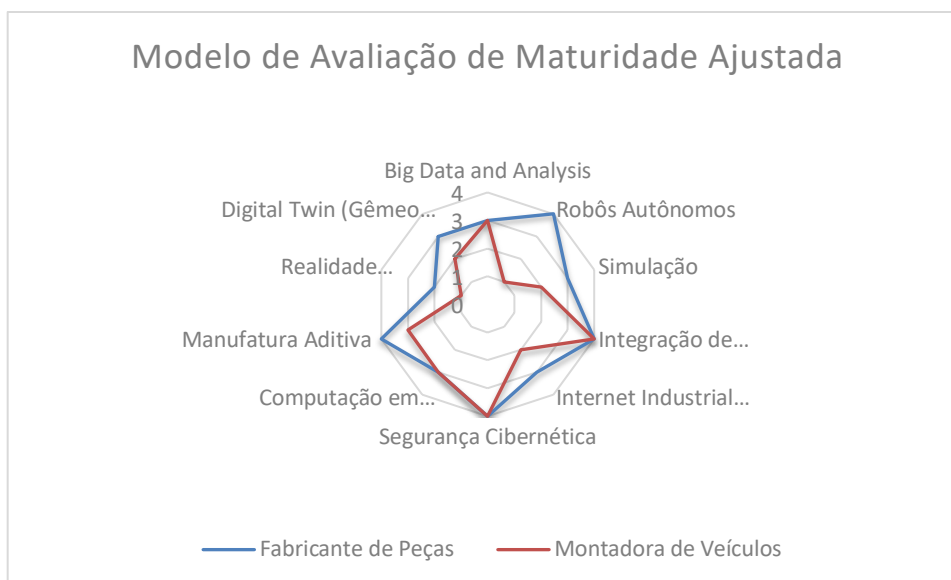
A partir desse diagnóstico comparativo, tornou-se possível identificar os elementos que se destacam como pontos fortes e aqueles que ainda representam desafios para o avanço da maturidade tecnológica. Essa análise crítica fundamenta a construção do framework final de avaliação, permitindo compreender as capacidades consolidadas, as lacunas existentes e as oportunidades de aprimoramento que orientam a evolução digital da empresa.

A seguir o gráfico do tipo radar foi utilizado por permitir a representação visual e comparativa do nível de maturidade das diferentes tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 entre os dois ambientes analisados. Esse tipo de gráfico é particularmente adequado para estudos de maturidade, pois possibilita observar simultaneamente múltiplas dimensões e identificar, de maneira intuitiva, os pontos de maior e menor desenvolvimento tecnológico. Cada eixo do gráfico corresponde a uma tecnologia habilitadora, e os valores plotados indicam o nível de maturidade alcançado, variando de 1 (inicial) a 5 (otimizado).

No presente estudo, as linhas azul e vermelha representam, respectivamente, os ambientes de fabricação de peças e de montagem de veículos. A forma poligonal resultante de cada conjunto de dados evidencia o perfil tecnológico de cada ambiente, permitindo identificar tanto convergências quanto lacunas entre eles. Quando a área delimitada é mais ampla, observa-se um nível mais elevado de digitalização e integração dos processos; áreas mais restritas indicam tecnologias em estágios iniciais de adoção. Assim, o gráfico radar fornece uma visão integrada

do diagnóstico, contribuindo para a análise comparativa da maturidade digital e para a formulação de estratégias de evolução tecnológica alinhadas à realidade de cada setor produtivo.

Figura 3 - Modelo de Avaliação de Maturidade Ajustada



Fonte: Autora (2025)

A consolidação dos resultados apresentados evidencia a contribuição prática e teórica da aplicação do modelo de avaliação de maturidade tecnológica como instrumento diagnóstico e evolutivo. A partir das análises realizadas com os gestores das diferentes áreas, foi possível ajustar os níveis de cada tecnologia habilitadora, refletindo a realidade operacional e estratégica da empresa. O uso do gráfico radar permitiu visualizar de forma integrada as discrepâncias e os avanços entre os ambientes da fabricação de peças e da montagem de veículos, demonstrando que o processo de transformação digital se encontra em diferentes estágios dentro da organização. Esses resultados confirmam a natureza dinâmica da pesquisa-ação, em que cada ciclo de diagnóstico, validação e reflexão promove o aprendizado coletivo e subsidia o planejamento de ações futuras. Assim, o capítulo encerra-se destacando que a maturidade tecnológica não representa um estado final, mas um processo contínuo de evolução organizacional, orientado pelo desenvolvimento das competências digitais e pela consolidação de uma cultura voltada à inovação e à integração dos sistemas produtivos.

O resultado consolidado das etapas de diagnóstico, validação e reflexão deu origem ao artefato final desta pesquisa: o Modelos de Avaliação de Maturidade Tecnológica da Indústria 4.0. Esse instrumento foi desenvolvido com base nos pilares tecnológicos e nos quatro eixos

estratégicos da transformação digital — Smart Manufacturing, Smart Working, Smart Supply Chain e Smart Products & Services — e estruturado em cinco níveis evolutivos de maturidade.

O modelo de avaliação de maturidade final integra critérios técnicos e organizacionais de avaliação, permitindo diagnosticar, de forma prática e participativa, o estágio de adoção das dez tecnologias habilitadoras (Big Data & Analytics, Robôs Autônomos, Simulação, Integração de Sistemas, IIoT, Segurança Cibernética, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e Digital Twin). Sua aplicação possibilita mensurar a maturidade tecnológica de cada área, comparar desempenhos e direcionar planos de ação para evolução digital contínua.

A tese que orienta este trabalho sustenta que é possível medir a maturidade tecnológica de ambientes industriais por meio de um modelo de avaliação de maturidade baseada em pilares da Indústria 4.0, construída e validada de forma colaborativa, conforme os princípios da pesquisa-ação. Assim, o artefato desenvolvido representa não apenas um produto científico, mas também um guia de gestão prática para organizações em processo de transformação digital.

A seguir, são discutidos os principais resultados obtidos com a aplicação do artefato, analisando-se as evidências empíricas e as implicações teóricas que emergem da avaliação de maturidade tecnológica nos ambientes estudados.

4.4 RESULTADOS ORIGINAIS DA TESE *VERSUS* LITERATURA

A proposição da matriz de maturidade tecnológica desenvolvida nesta pesquisa parte da constatação de que os modelos disponíveis na literatura sobre Indústria 4.0 apresentam limitações quanto à aplicabilidade prática, à mensurabilidade de resultados e à contextualização em diferentes ambientes. Embora diversos autores tenham contribuído para o avanço teórico do campo, observa-se que grande parte das estruturas de avaliação de maturidade mantém caráter genérico, com foco em pequenas e médias empresas, sem conexão direta com métricas operacionais. Dessa forma, a construção do artefato proposto nesta tese busca superar essas lacunas ao integrar dimensões tecnológicas, organizacionais e de desempenho em uma abordagem prescritiva e empiricamente validada, desenvolvida mediante pesquisa-ação junto aos gestores das áreas de Tecnologia da Informação, Engenharia e Manufatura da Marcopolo.

Ao comparar o artefato proposto com o modelo de Omol, Mburu e Abuonji (2025), observa-se que o Digital Maturity Assessment Model (DMAM) estrutura cinco níveis de maturidade e seis dimensões — tecnologia, produto, estratégia, pessoas, organização e operações, com base na integração da Design Science Research (DSR) ao modelo CMMI.

Embora apresente rigor conceitual e coerência metodológica, o modelo concentra-se em micro e pequenas empresas, priorizando indicadores de natureza gerencial e estratégica, sem incorporar métricas industriais. Em contraste, a matriz desta tese expande a lógica do CMMI para dez tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, associando-as a indicadores operacionais (OEE, disponibilidade, integração MES/SAP) e validando-as empiricamente em um ambiente fabril de grande porte, o que lhe confere maior granularidade e aplicabilidade prática.

De modo semelhante, o Digital Construction Company Maturity Model (DCCMM) de Jäkel *et al.* (2024) propõe uma estrutura de seis níveis e cinco dimensões voltada à transformação digital na construção civil. Apesar de metodologicamente consistente, o modelo mantém caráter setorial e descritivo, abordando tecnologias como BIM, IoT e robótica de forma genérica, sem vinculação a indicadores de desempenho produtivo. Já o artefato desta tese transpõe os princípios de maturidade para o contexto industrial real, utilizando critérios mensuráveis e auditáveis em dez tecnologias habilitadoras, integradas a sistemas ciberfísicos e sustentadas por uma abordagem normativa e participativa. Essa combinação assegura uma capacidade diagnóstica mais precisa e replicável, superando o alcance qualitativo do DCCMM.

O estudo de van Tonder *et al.* (2024), por sua vez, sintetiza nove dimensões-chave da maturidade digital em pequenas e médias empresas onde a estratégia, liderança, cultura, organização, pessoas, tecnologia, processos, produtos e clientes, a partir de uma revisão sistemática. Apesar de oferecer um mapeamento abrangente, o modelo é predominantemente conceitual, carecendo de validação empírica e de instrumentos métricos que traduzam a maturidade digital em resultados operacionais tangíveis. Em contraposição, a matriz desta tese avança ao propor um instrumento mensurável, construído por meio de pesquisa-ação e articulado a indicadores industriais objetivos, permitindo a avaliação contínua e comparável entre áreas produtivas. Assim, enquanto o modelo de van Tonder *et al.* se limita à esfera teórica, o artefato proposto materializa esse conhecimento em aplicação prática e validada.

Comparando-se ao modelo Digital Service Transformation Maturity Model (DSTM) de Teichert (2023), observa-se que aquele apresenta detalhamento elevado, com oito fatores e vinte e sete subfatores distribuídos em cinco níveis de maturidade, direcionado ao setor de serviços B2B. Apesar de seu valor analítico, o DSTM restringe-se ao ambiente de serviços e enfatiza aspectos culturais e estratégicos, sem considerar variáveis industriais como automação, integração de sistemas e métricas de performance. O artefato desta tese, em contrapartida, foi concebido especificamente para o contexto fabril, com base em dez tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 e cinco níveis de maturidade alinhados ao CMMI, mas adaptados às operações industriais. A incorporação de dados reais e a integração com indicadores de produção conferem

ao modelo aplicabilidade imediata, orientando o diagnóstico e a reavaliação contínua da maturidade tecnológica.

Em relação ao modelo de Semeraro *et al.* (2023), que combina nove tecnologias habilitadoras com seis princípios de design (interoperabilidade, modularidade, descentralização, virtualização, entre outros), verifica-se que a proposta contribui para compreender o impacto da Indústria 4.0 em pequenas e médias empresas. Todavia, a metodologia de base fuzzy privilegia inferências qualitativas e não contempla indicadores de desempenho quantitativos. O artefato desta tese avança ao associar o diagnóstico de maturidade a métricas de produtividade e eficiência, permitindo correlação direta entre digitalização e resultados operacionais. Além disso, sua validação no contexto industrial brasileiro, mediante pesquisa-ação participativa, assegura aderência às práticas e à cultura organizacional local, ampliando a relevância e a confiabilidade do instrumento.

Por fim, o modelo de Senna *et al.* (2023), baseado no arcabouço Technology–Organization–Environment (TOE), representa um dos esforços mais abrangentes de integração teórica no campo da Indústria 4.0. Estruturado em três dimensões, doze eixos e cinquenta indicadores, o modelo busca generalizar a avaliação de maturidade digital em diferentes setores manufatureiros. No entanto, apesar da consistência conceitual e da validação empírica com empresas portuguesas, seu caráter descritivo e dependente de aplicação externa limita sua utilização em diagnósticos internos e operacionais. Em contraposição, o artefato desta tese é um instrumento normativo, de fácil aplicação e sustentado por indicadores fabris, conferindo maior poder de mensuração e replicabilidade. Ao integrar as dimensões tecnológica, organizacional e ambiental em um modelo aplicável à realidade da Marcopolo, a matriz consolida a convergência entre rigor científico e utilidade prática.

Em síntese, a análise comparativa entre o artefato desenvolvido nesta pesquisa e os principais modelos existentes revela que a matriz proposta apresenta avanços significativos em quatro dimensões essenciais:

- a) Integração de indicadores quantitativos e métricas industriais: a matriz incorpora variáveis mensuráveis de desempenho, promovendo uma avaliação objetiva e alinhada às práticas operacionais do setor produtivo;
- b) Validação empírica em ambiente fabril: o modelo foi testado e aprimorado por meio de pesquisa-ação, assegurando sua aplicabilidade prática e relevância no contexto real da manufatura;

- c) Caráter normativo e prescritivo: além de diagnosticar o estágio de maturidade tecnológica, a matriz orienta estrategicamente a trajetória evolutiva rumo à Indústria 4.0, funcionando como um guia para tomada de decisão;
- d) Conformidade com normas técnicas nacionais: o artefato está alinhado às diretrizes normativas vigentes, o que reforça sua coerência metodológica e viabilidade de implementação em território nacional.

Dessa forma, a matriz de maturidade tecnológica concebida nesta tese transcende a função de mensuração, consolidando-se como um instrumento original, robusto e estrategicamente orientado para apoiar processos decisórios de transformação digital no contexto da Indústria 4.0.

5 CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo central o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de avaliação de maturidade tecnológica voltada à avaliação do grau de adoção e integração das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 em ambientes industriais. A partir da questão de pesquisa “Como avaliar o grau de maturidade tecnológica de empresas industriais com base nas tecnologias habilitadoras, de modo a orientar estratégias eficazes de transformação digital?” buscou-se melhorar um instrumento que conjugasse rigor metodológico, aplicabilidade prática e aderência ao contexto brasileiro.

A concepção do artefato seguiu os princípios da metodologia de pesquisa-ação, permitindo que a investigação científica se desenvolvesse de forma participativa, colaborativa e aplicada. Essa abordagem possibilitou a integração dos processos de diagnóstico, planejamento, implementação e avaliação em ciclos contínuos de aprendizagem organizacional. A aplicação prática foi realizada na empresa Marcopolo S.A., envolvendo setores com distintos níveis de maturidade tecnológica, o que viabilizou uma análise comparativa e contextualizada entre os ambientes de Fabricação de Peças e Montagem de Ônibus.

Os resultados obtidos evidenciam que o modelo de avaliação de maturidade proposta cumpre adequadamente sua função de mensurar de forma estruturada, o estágio de maturidade tecnológica das organizações industriais. Composta por dez dimensões tecnológicas e cinco níveis evolutivos, o modelo de avaliação de maturidade mostrou-se eficaz na identificação de lacunas, potencialidades e oportunidades de avanço rumo à Indústria 4.0. A aplicação empírica revelou que a maturidade digital transcende a mera disponibilidade tecnológica, sendo fortemente influenciada por fatores humanos, culturais e organizacionais. Tal constatação reforça a compreensão da transformação digital como um processo sistêmico, no qual a tecnologia atua em sinergia com pessoas, processos e estratégias.

Do ponto de vista teórico, a pesquisa contribui ao consolidar um modelo de avaliação fundamentado em referenciais clássicos de maturidade (como CMMI e SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016) e nas dimensões estratégicas da Indústria 4.0 (FRANK *et al.*, 2019; MEINDL *et al.*, 2021), adaptando-os ao contexto nacional. Ao propor uma matriz integrada e validada empiricamente, o estudo amplia o corpo de conhecimento sobre modelos de maturidade tecnológica aplicáveis à realidade industrial brasileira, respondendo a uma lacuna identificada na literatura especializada.

Sob a perspectiva prática, o artefato desenvolvido oferece às organizações um instrumento de diagnóstico e gestão da transformação digital. Sua aplicação permite reconhecer o estágio

atual de maturidade, definir planos de ação alinhados às estratégias corporativas e monitorar a evolução das iniciativas tecnológicas ao longo do tempo. No caso da Marcopolo, os resultados obtidos possibilitaram identificar níveis distintos de maturidade entre as áreas analisadas, bem como direcionar investimentos, capacitações e projetos prioritários de integração digital.

Como recomendações para estudos futuros, sugere-se a ampliação da aplicação do modelo de avaliação de maturidade em diferentes setores industriais e contextos organizacionais, com vistas à validação e ao aprimoramento do instrumento em amostras mais diversificadas. Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de ferramentas digitais de apoio, como dashboards interativos e sistemas de acompanhamento, que tornem o processo de avaliação mais dinâmico e acessível. Outra possibilidade de aprofundamento consiste na integração de indicadores de desempenho (KPIs) e métricas financeiras, permitindo a correlação entre o nível de maturidade tecnológica e os resultados em termos de produtividade e competitividade.

Em conclusão, esta tese alcança seus objetivos ao propor, validar e aplicar um modelo de avaliação de maturidade tecnológica inovadora, construída de forma participativa e fundamentada teoricamente. O artefato resultante representa uma contribuição efetiva tanto para o avanço científico quanto para a prática gerencial da transformação digital, oferecendo um modelo replicável, contextualizado e orientado à ação. Dessa forma, consolida-se como uma ferramenta estratégica para organizações que almejam evoluir de maneira estruturada rumo à Indústria 4.0, fortalecendo sua capacidade de inovação, integração e aprendizado contínuo no contexto industrial brasileiro.

APÊNDICE A – FRAMEWORK

São listados os artigos selecionados nas bases de dados Scopus, Web of Science, realizado a bibliometria de 49 artigos nas bases.

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Big Data and Analysis	Conhecimento conceitual básico, sem aplicação prática. (Zikopoulos et al., 2011)	Iniciativas isoladas de coleta e armazenamento de dados, sem análise estruturada. (Kakhani et al., 2013)	Uso de ferramentas de análise básica para apoio à decisão em áreas específicas. (Shmueli; Koppius, 2011)	Análise de dados integrada à operação, com dashboards e relatórios preditivos. (McAfee; Brynjolfsson, 2012)	Big Data totalmente integrado à cadeia de valor com automação de decisões baseada em dados. (Azevedo, 2016)
Robôs Autônomos	Conhecimento básico sobre automação, sem uso de robôs no ambiente produtivo. (Romano; Dutra, 2016)	Uso de robôs com programação fixa e funções limitadas, sem autonomia. (Garcia, 2016)	Implantação de robôs com sensores e capacidade de adaptação parcial ao ambiente. (Barros, 2016)	Robôs autônomos colaborativos operando junto a humanos com segurança e eficiência. (Pereira; Simonetto, 2018)	Integração total de robôs autônomos com sistemas ciberfísicos e aprendizado contínuo. (Rüßmann et al., 2015)
Simulação	Conhecimento básico sobre simulação, sem aplicação prática. (Silva, 2007)	Uso de simulações estáticas ou demonstrativas, sem integração aos processos reais. (Gavira, 2003)	Simulações aplicadas a processos específicos com apoio à tomada de decisão. (Ferreira et al., 2020)	Modelagem dinâmica e em tempo real integrada aos sistemas de produção. (Bateman et al., 2013)	Simulação avançada com gêmeos digitais, análise de desempenho e otimização contínua. (Oliveira Junior, 2023)
Integração de sistemas horizontais e verticais	Estrutura organizacional isolada, com sistemas sem comunicação entre si. (Kagermann et al., 2013)	Início de integração entre departamentos internos ou parceiros externos, com baixa interoperabilidade. (Rüßmann et al., 2015)	Integração parcial entre sistemas operacionais, engenharia e cadeia de suprimentos. (Pérez-Lara et al., 2018)	Integração consistente entre níveis organizacionais e parceiros externos, com troca de dados em tempo real. (Chukalov, 2017)	Integração total entre sistemas internos e externos, suportada por arquiteturas escaláveis e dados compartilhados. (Doleski, 2015)
A Internet Industrial das Coisas	Conhecimento conceitual sobre IoT, sem aplicação prática no ambiente industrial. (Santos et al., 2016)	Implementação inicial de sensores e coleta de dados em áreas-piloto, com baixa integração (Conte; Araujo, 2020)	Integração parcial de dispositivos com redes industriais e análise de dados local. (Azevedo, 2017)	Aplicações de IIoT em larga escala com conectividade entre máquinas, sistemas e nuvem. (Oliveira et al., 2016)	Ecossistema digital inteligente, com IIoT totalmente integrado à operação, análise preditiva e decisão autônoma. (Zhang et al., 2015)
Segurança Cibernética	Ausência de políticas de segurança, foco apenas na operação dos sistemas. (Canongia; Junior, 2009)	Iniciativas pontuais de segurança digital com foco em rede ou antivírus isolados. (Ani; He; Tang, 2016)	Segurança cibernética implementada em áreas críticas com controles técnicos e operacionais. (Walso et al., 2017)	Gestão integrada de segurança da informação com foco em prevenção e resposta a incidentes. (BCG, 2019)	Cultura organizacional orientada à cibersegurança com monitoramento contínuo e arquitetura resiliente. (Walso et al., 2017)
A Nuvem - The Cloud	Conhecimento conceitual sobre computação em nuvem; sem uso prático. (Pedrosa; Nogueira, 2011)	Utilização básica de serviços em nuvem para armazenamento ou e-mails. (De Paula; De Oliveira Dian, 2021)	Uso de nuvem em aplicações empresariais específicas, com integração parcial. (Heidrich et al., 2017)	Integração de sistemas industriais à nuvem com serviços de análise e controle em tempo real. (Rüßmann et al., 2015)	Infraestrutura digital inteligente baseada em nuvem com tomada de decisão autônoma e escalabilidade. (Costa, 2021)
Manufatura Aditiva	Conhecimento teórico sobre impressão 3D, sem aplicações industriais. (Junior; Costa, 2019)	Uso de manufatura aditiva para prototipagem simples, com materiais limitados. (Li, 2019)	Produção de peças funcionais com aplicação em setores específicos e integração parcial. (Herderick, 2015)	Uso consolidado em processos produtivos com redução de etapas e personalização de produtos. (Rodrigues et al., 2017)	Manufatura aditiva integrada estrategicamente à cadeia de valor e ao ciclo de vida do produto. (Rodrigues et al., 2017)
Realidade Aumentada (RA)	Conhecimento conceitual sobre RA, sem aplicação prática. (Kimer; Kirner, 2011)	Uso experimental em treinamentos ou apresentações, com baixa interação. (Cardoso et al., 2014)	Aplicação em áreas específicas, como montagem ou manutenção, com integração parcial. (Kimer et al., 2004)	RA integrada ao ambiente industrial com dados em tempo real e interação multimodal. (Ziaee; Hamed, 2021)	RA amplamente aplicada em processos industriais com tomada de decisão orientada por visualização aumentada. (Fischer et al., 2016)
Digital Twin	Conhecimento conceitual sobre gêmeo digital, sem aplicações práticas. (Grieves; Vickers, 2017)	Modelos digitais utilizados de forma estática para visualização ou documentação. (Kritzinger et al., 2018)	Uso de gêmeos digitais em áreas-piloto com dados operacionais parciais. (Tao et al., 2019)	Gêmeos digitais integrados aos sistemas de produção com monitoramento em tempo real. (Fuller et al., 2020)	Gêmeo digital totalmente conectado ao ciclo de vida do produto, com simulação preditiva e otimização contínua. (Jones et al., 2020)

APÊNDICE B – MANUAL TÉCNICO DE APLICAÇÃO

O manual técnico de aplicação define critérios objetivos para classificar cada tecnologia nos níveis de maturidade. Seu uso garante padronização, consistência e redução da subjetividade no diagnóstico.

Tecnologias Habilitadoras	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Big Data and Analytics	Dados coletados de forma manual ou descentralizada; Ausência de padronização; Análises pontuais e reativas; Uso predominante de planilhas.	Dados digitais estruturados em sistemas transacionais (ex.: ERP); Relatórios periódicos; Indicadores definidos, porém sem integração entre sistemas.	Uso de ferramentas de BI; Integração parcial entre bases de dados; Dashboards operacionais; Análises descritivas e diagnósticas apoiando decisões táticas.	Governança de dados formalizada; Integração entre ERP, MES e BI; Indicadores monitorados em tempo quase real; análises preditivas.	Uso avançado de analytics e IA; Análises prescritivas; Aprendizado contínuo a partir dos dados; Dados orientando decisões estratégicas e otimização contínua.
Robôs Autônomos	Operações predominantemente manuais; Inexistência de robôs industriais.	Robôs industriais convencionais operando isoladamente; Programação fixa; Baixa flexibilidade.	Robôs integrados a células produtivas; Uso de robôs colaborativos; Interação homem-máquina controlada.	Robôs conectados a sistemas de controle e monitoramento; Reconfiguração rápida; Indicadores de desempenho acompanhados.	Robôs com autonomia adaptativa; Integração com IA; Autoajuste de rotas e tarefas; Cooperação entre múltiplos robôs.
Simulação	Ausência de simulações; Decisões baseadas apenas em experiência prática.	Simulações pontuais e offline; Apoio a projetos específicos (layout, fluxo).	Uso recorrente de simulações digitais; Apoio à tomada de decisão operacional e tática.	Simulações integradas a dados reais; Avaliação de cenários e gargalos; Apoio ao planejamento.	Simulações contínuas e em tempo real; Integração com Digital Twin; Otimização automática de processos.
Integração de Sistemas	Sistemas isolados; Troca manual de informações.	Integrações pontuais; Interfaces básicas entre sistemas.	Integração entre sistemas principais (ERP, MES); Fluxo de dados padronizado.	Integração horizontal e vertical; Dados fluem em tempo quase real.	Ecosistema totalmente integrado; Interoperabilidade com parceiros; Arquitetura orientada a serviços.
Internet das Coisas	Coleta manual de dados; Equipamentos não conectados.	Sensores locais; Coleta de dados limitada e isolada.	Equipamentos conectados; Coleta automática de dados; Monitoramento básico.	IIoT integrado a sistemas corporativos; Monitoramento em tempo real; Alertas automáticos.	IIoT com inteligência embarcada; Tomada de decisão autônoma; Otimização contínua do processo.
Segurança cibernética	Medidas básicas e reativas; Ausência de política formal.	Controles definidos; Políticas básicas implementadas.	Gestão de riscos; Políticas formalizadas; Conscientização dos usuários.	Monitoramento contínuo; Indicadores de segurança; Resposta a incidentes estruturada.	Segurança preditiva; Uso de IA; Melhoria contínua e resiliência cibernética.
Nuvem	Infraestrutura local; Ausência de cloud.	Uso pontual de soluções em nuvem; Sem estratégia definida.	Serviços em nuvem padronizados; Apoio a sistemas corporativos.	Cloud integrada à arquitetura de TI; Escalabilidade monitorada.	Cloud como base estratégica; Otimização contínua de recursos e custos.
Manufatura Aditiva	Inicial Ausência de impressão 3D.	Uso experimental para protótipos simples.	Uso recorrente para protótipos funcionais e dispositivos auxiliares.	Impressão 3D integrada ao processo produtivo; Uso para gabaritos e ferramentas.	Produção de componentes finais; Integração total com engenharia e produção.
Realidade Aumentada	Ausência de RA; Treinamentos exclusivamente presenciais.	Uso experimental ou pontual de RA; Sem padronização.	RA aplicada em treinamentos e manutenção; Conteúdos padronizados.	RA integrada a sistemas; Uso frequente; Indicadores de desempenho monitorados.	RA com IA; Suporte remoto inteligente; Aprendizado contínuo e adaptação ao usuário.
Digital Twin	Representações físicas ou desenhos estáticos; Inexistência de modelo digital dinâmico.	Modelos digitais parciais (CAD/CAE); Simulações sem vínculo com dados operacionais.	Modelos digitais conectados a dados históricos; Simulações de desempenho e capacidade.	Digital Twin integrado a sistemas produtivos; Análise de cenários com dados reais.	Digital Twin em tempo real; Aprendizado automático; Suporte à otimização contínua do sistema físico.

REFERÊNCIAS

- ANI, U. D.; HE, H.; TANG, T. A. **A review on cybersecurity vulnerabilities in smart grid.** Smart Grid and Renewable Energy, v. 7, n. 1, p. 1–8, 2016.
- ANI, Uchenna p.; HE, Hongmei; TIWARI, Ashutosh. **Manufacturing Review of cybersecurity issues in industrial critical infrastructure: manufacturing in perspective.** Journal of Cyber Security Technology ISSN, p 32-74, 2017.
- ARAÚJO, R. M. de. **Internet das Coisas: aplicações e desafios para a Indústria 4.0.** Revista Gestão & Tecnologia, v. 20, n. 1, p. 45–59, 2020.
- AYALA, N. F. *et al.* **Servitization through outcome-based contract performance: Evidence from the defense industry.** Industrial Marketing Management, v. 63, p. 137-149, 2017.
- AZEVEDO, A. **Big Data: caracterização, desafios e oportunidades.** São Paulo: Editora Técnica, 2016.
- AZEVEDO, L. F. R. **Big Data: conceitos, desafios e oportunidades.** Revista de Administração e Inovação, v. 12, n. 2, p. 27–38, 2016.
- AZEVEDO, R.J. F. **Internet das Coisas: um estudo exploratório sobre suas oportunidades e desafios.** Revista de Tecnologia Aplicada, v. 5, n. 2, p. 123–135, 2017.
- AZUMA, R. T. **Recent advances in augmented reality.** IEEE Computer Graphics and Applications, v. 21, n. 6, p. 34–47, 2001.
- BHARADWAJ, Anandhi *et al.* **Digital businnes strategy: Toward a next generation of insigths.** MIS Quarterly, v. 37, n. 2, p. 471-482, 2013.
- BARANIUK, C. **The data deluge.** New Scientist, v. 211, n. 2828, p. 30–31, 2011.
- BARROS, José Roberto Mendonça de. **"A indústria 4.0 e o Brasil".2016.** Disponível
- BARROS, M. R. **Robótica Autônoma na Indústria 4.0: uma análise sobre os impactos produtivos.** São Paulo: Blucher, 2016.
- BATEMAN, N. *et al.* **Lean: Implantando sistemas enxutos de produção.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BCG – BOSTON CONSULTING GROUP. **Cybersecurity in the Age of Industry 4.0: The new industrial security challenge.** Boston: BCG, 2019. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2019/cybersecurity-age-industry-4>. Acesso em: 4 mai. 2025.
- BECKER, J.; KNACKSTEDT, R.; PÖPPELBUß, J. **Developing maturity models for IT management.** Business & Information Systems Engineering, v. 1, n. 3, p. 213–222, 2009.

BILLINGHURST, M. **Augmented Reality Interfaces**. In: SIGGRAPH Conference Abstracts and Applications, 2001.

CANONGIA, C.; JUNIOR, L. N. **Segurança cibernética: desafios e estratégias para o Brasil**. Brasília: IPEA, 2009.

CANONGIA, Claudia; JUNIOR, Raphael Mandarino. **Segurança cibernética: o desafio da nova Sociedade da Informação**. Parcerias Estratégicas, v. 14, n. 29, 2009.

CARDOSO, Raul GS *et al.* **Uso da realidade aumentada em auxílio à Educação**. Anais do Computer on the Beach, v. 5, p. 330-339, 2014.

CHUKALOV, K. **Horizontal and Vertical Integration, as a Requirement for Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0**. In: Proceedings of the International Scientific Conference "Industry 4.0", 2017. Disponível em: <https://stumejournals.com/journals/i4/2017/4/155.full.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2025.

CMMI INSTITUTE. **CMMI for Development, Version 1.3: Improving processes for better products**. Pittsburgh: Software Engineering Institute, 2010.

CMMI PRODUCT TEAM. **CMMI for Development, Version 1.3**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute, 2010.

COELHO, R. **Indústria 4.0: o caminho para a manufatura avançada**. Belo Horizonte: SEBRAE, 2016.

COHEN, P. R.; *et al.* **The Role of Artificial Intelligence in the Factory of the Future**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 103, n. 5-8. P. 2001-2014, 2019.

CONTE, Gerson Yuri Cagnani; DE ARAUJO, Geraldo Jose Ferraresi. **A internet da indústria das coisas: oportunidades e ganhos potenciais**. Ágora: revista de divulgação científica, v. 25, p. 1-17, 2020.

CONTE, T. A.; ARAÚJO, R. M. **Internet das Coisas e sua contribuição para a Indústria 4.0: fundamentos, desafios e oportunidades**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 4, n. 10, p. 45–60, 2020.

COSTA, M. P.S*. **Análise da Computação em Nuvem na Indústria 4.0**. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5382/6/MONOGRAFIA_An%C3%A1liseComputa%C3%A7%C3%A3oNuvem.pdf. Acesso em: 6 abr. 2025.

DALENOGARE, L. S. *et al.* **The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance**. International Journal of Production Economics, v. 204, p. 383-394, 2018.

DALENOGARE, L. S. et al. **The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance.** *International Journal of Production Economics*, v. 204, p. 383–394, 2018.

DE PAULA, Laís; DE OLIVEIRA DIAN, Mauricio. **COMPUTAÇÃO EM NUVEM: os desafios das empresas ao migrar para a nuvem.** *Revista Interface Tecnológica*, v. 18, n. 2, p. 304-315, 2021.

DE PAULA, T. C.; DE OLIVEIRA DIAN, P. **Computação em nuvem e seus impactos na gestão da informação.** *Revista de Tecnologia Aplicada*, v. 10, n. 1, p. 45–58, 2021.

ENISA – **European Union Agency for Cybersecurity.** *Cybersecurity for SMEs: Challenges and Recommendations.* Athens: ENISA, 2019.

FANTINI, P.; PINNA, C; TOLIO, T. **A digital Twin approach for the improvement of assembly line performance.** *Procedia CIRP*, Amsterdam, v.96, p. 1153-1158,2020.

FERREIRA, D. C. *et al.* **Modelagem e simulação na Indústria 4.0: Uma abordagem estratégica para a tomada de decisões.** *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 5, n. 1, p. 29–40, 2020.

FISCHER, G.; LIMA, E. P.; MELLO, C. H. P.; COSTA, S. E. G. **Tecnologia da informação e manufatura avançada: um estudo bibliométrico.** *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 23, n. 1, p. 26–40, 2016.

FONSECA, J. S. **Metodologia do estudo de caso e do plano de ação.** São Paulo: Atlas, 2015.

FRANK, A. G. *et al.* **Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies.** *International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 15–26, 2019a.

FRANK, A. G. *et al.* **The maturity of industry 4.0 model: An empirical assessment in Brazilian manufacturing companies.** *Technological Forecasting and Social Change*, v. 148, 2019b.

FRANK, A. G. *et al.* **Indústria 4.0: mapeamento bibliométrico da produção científica e perspectivas de pesquisa.** *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 25, n. 1, p. 143–161, 2018.

FRANK, Alejandro G.; DALLA VALENTINA, Leonardo; AYALA, Natalia F.; GARMABAKSHI, Reza. **Industry 4.0 and performance: A bibliometric analysis.** *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 30, n. 5, p. 926–947, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0247>

FREDERICO, G. F.; MARTINS, R. A.; MIRANDA, P. V. **Supply Chain 4.0: concepts, maturity and implementation.** *International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 62–74, 2019.

FULLER, A.; FAN, Z.; DAY, C.; BITTENCOURT, L. **Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research.** *IEEE Access*, v. 8, p. 108952–108971, 2020.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativ**. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

FROHLICH, P.; DOROFEEV, K.; ZHARINOV, A. **OMNIVIL—An Autonomous Mobile Manipulator for Flexible Production**. *Sensors*, v. 20, n. 24, p. 7249, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/24/7249>. Acesso em: 6 abr. 2025. FULLER, A. *et al.* Digital twin: Enabling technologies, challenges and open researc. *IEEE Access*, v. 8, p. 108952–108971, 2020.

GANDOMI, A.; HAIDER, M. **Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics**. *International Journal of Information Management*, v. 35, n. 2, p. 137–144, 2015.

GARCIA, A. C. **Automação e robótica inteligente: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. São Carlos. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, 2003.

GAVIRA, M. O. **Simulação: princípios e aplicações**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

GIEREI, H. **Internet das Coisas e suas aplicações industriais**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 8, n. 1, p. 89–97, 2017. GIEREJ, Sylwia. The Framework of Business Model in the Context of Industrial Internet of Things. *Procedia Engineering*, p 206 – 212, 2017.

GRIEVES, M. **Virtually Intelligent Digital Twins**. Product Lifecycle Management Institute, 2020.

GRIEVE, R. J. **Digital twin technology in manufacturing: A literature review**. *Procedia Manufacturing*, v. 54, p. 24–29, 2021.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. **Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems**. In: Kahlen, F. J. *et al.* (Org.). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. GRIEVES, Michael; VICKERS, John. *Origins of the Digital Twin Concept*. Florida Institute of Technology, 201. Disponível em: GUNAL, M. M. *Simulation for Industry 4.0: Past, Present, and Future*. Cham: Springer, 2019. HEIDRICH, Felipe; FACÓ, Júlio; REIS, Cristina. *O impacto competitivo na indústria brasileira com a aplicação dos conceitos da indústria 4.0*. Universidade Federal do ABC, 2017.

HERDERICK, E. D. **Additive Manufacturing of Metals: A Review**. *Annual Review of Materials Research*, v. 45, p. 1–25, 2015.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review**. Technische Universität Dortmund, 2016.

KAASINEN, R.; SCHMIDT, A.; WOODWARD, J. R.; ELVIRA, L. **Empowering people in the era of digitization**. In: *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications – AutomotiveUI’ 20*, 2020.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.

HUSSAIN, R. F.; PAKRAVAN, A.; SALEHI, M. . **Analyzing the performance of smart Industry 4.0 applications on cloud computing systems.** arXiv preprint, 2020. Disponível em: . Acesso em: 6 abr. 2025.

INCORTA. **Big data and industry 4.0: optimizing operations.** 2024. Disponível em: <https://www.incorta.com/blog/big-data-and-industry-4-0>. Acesso em: 6 abr. 2025.

INDUSTRIAL”. 2016. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~hermini/Robotica/livro/cap.1.pdf>>. Acesso em: 16 mar.2016.

JÄKEL, J.-I.; FISCHERKELLER, F.; OBERHOFF, T.; KLEMT-ALBERT, K. Development of a Maturity Model for the Digital Transformation of Companies in the Context of Construction Industry 4.0. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, v. 29, p. 778–809, 2024. DOI: 10.36680/j.itcon.2024.034.

JONES, D. *et al.* **Characterising the Digital Twin: A systematic literature review.** *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 29, p. 36–52, 2020.

JUNIOR, A. C. S.; COSTA, F. G. **Prototipagem Rápida e Impressão 3D: uma nova forma de produzir.** *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 4, n. 2, p. 55–62, 2019.

KAASINEN, E. *et al.* **Empowering people in the era of digitization.** In: Proceedings of the 12th ACM International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications – AutomotiveUI '20, 2020, Washington, D.C. Anais [...]. New York: ACM, 2020. p. 1–7.

KACHE, F. **Real-time analytics in supply chain management.** *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 16, p. 4781–4791, 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. Frankfurt: acatech, 2013.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group.** Berlin: acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. **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. Frankfurt: acatech, 2013.

KAKHANI, Manish Kumar; KAKHANI, Sweeti; BIRADAR, S. R. ResearchKAKHANI, P.; KAKHANI, V.; BIRADAR, R. **Big Data: Analysis of data**. International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 4, n. 12, p. 1–4, 2013.

KEMMIS, S.; McTAGGART, R. **The action research planner**. Victoria: Deakin University Press, 1988.

Kirner, C. *et al.* (2004) “**Uso de Realidade Aumentada em Ambientes Virtuais de Visualização de Dados**” Proc. of VII Symposium on Virtual Reality, SP

KIRNER, C. *et al.* **Realidade Aumentada: conceitos, tecnologias e aplicações**. In: Anais do Workshop de Realidade Virtual e Aumentada, São Carlos: SBC, 2004.

KIRNER, C.; KIRNER, T. G. **Introdução à realidade aumentada**. Revista de Informática Aplicada, v. 7, n. 1, p. 10–17, 2011.

KIRNER, C.; KIRNER, T. G. **Realidade aumentada: aplicações na educação, medicina e indústria**. In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO DE EDUCAÇÃO, TECNOLOGIA E SOCIEDADE, 2011, Curitiba. Anais... Curitiba: UTFPR, 2011. p. 1–12.

KIRNER, C.; TORI, R. **Realidade virtual e aumentada: aplicações na indústria e no ensino**. Revista Brasileira de Informática na Educação, v. 14, n. 2, p. 31–42, 2006.

KRITZINGER, W. *et al.* **Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification**. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018

LACHENMAIER, Jens; LASI, Heiner; KEMPER, Hans-Georg. **Simulation of production processes involving cyber-physical system**. Procedia CIRP, p 577 – 582, 2017.

LI, J. **Additive manufacturing: Technology, applications and research needs**. Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 13, p. 89–98, 2019. LI, Neng *et al.* Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Journal of Materials Science & Technology, v. 35, n. 2, p. 242-269, 2019.

MATTE, Christian; HESS, Thomas; BENLIAN, Alexander. **Digital transformation strategies**. Business & Information Systems Engineering, v. 57, n.5, p. 339-343, 2015.

MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E. **Big Data: The management revolution**. Harvard Business Review, v. 90, n. 10, p. 60-68, 2012.

MEINDL, R. *et al.* **Value creation in the digital world: Four dimensions of smart factory transformation**. Journal of Manufacturing Technology Management, v. 32, n. 3, p. 622–641, 2021.

MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E. **Big Data: The Management Revolutio**. Harvard Business Review, v. 90, n. 10, p. 60–68, 2012.

NONAKA, Ikujiro; TAKEUCHI, Hirotaka. **Criação do Conhecimento na empresa: como as empresas japonesas geram a dinâmica da inovação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2008.

OLIVEIRA JUNIOR, A. R. **Gestão inteligente e simulação aplicada na Indústria 4.0**. São Paulo: Atlas, 2023. OLIVEIRA JUNIOR, Airton Antunes de. A importância dos softwares de simulação dentro da Indústria 4.0: uma análise da inserção do Digital Twin nos contextos industriais. 2023.

OMOL, E. J.; MBURU, L. W.; ABUONJI, P. A. **Digital Maturity Assessment Model (DMAM): Assimilation of Design Science Research (DSR) and Capability Maturity Model Integration (CMMI)**. *Digital Transformation and Society*, v. 4, n. 2, p. 128–152, 2025. DOI: 10.1108/DTS-04-2024-0049.

PALADINI, E. P. **Gestão da Qualidade: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2012.

PARMENTER, D. **Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

PASCHOU, Theodora *et al.* **Digital Servitization in manufacturing: A systematic literature review and research agenda**. *Industrial Marketing Management*, v. 89, p. 278-292, 2020.

PAULK, M. C. *et al.* **Capability maturity model for software**, version 1.1. Pittsburgh: SEI, Carnegie Mellon University, 1993.

PEDROSA, E. M. C.; NOGUEIRA, A. M. **Computação em nuvem: uma abordagem sobre as tendências tecnológicas**. *Anais do Workshop de Informática*, v. 1, n. 1, p. 65–71, 2011

PEREIRA, L. V.; DE OLIVEIRA SIMONETTO, E. **Indústria 4.0: perspectivas e desafios para o Brasil**. *Revista Produção Online*, v. 18, n. 3, p. 1227–1248, 2018.

PÉREZ-LARA, M. *et al.* **Vertical and Horizontal Integration Systems in Industry 4.0: A Case Study Approach**. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, v. 826, p. 405–412, 2018.

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

REZNIKOV, R. **The economic impact of cloud technologies on the Industry 4.0 development**. *Economic Herald of the Donbas*, n. 4(74), p. 67–74, 2023. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4949522. Acesso em: 6 abr. 2025.

RODRIGUES, Vinícius Picanço; ZANCUL, Eduardo de Senzi; GONÇALVES, Cauê; GIORDANO, Caio Mezzeti; SALERNO, Mario Sergio. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, 2016.

ROMANO, L. N.; DUTRA, M. S. **Robótica industrial: princípios e aplicações**. São Paulo: Érica, 2016.

ROMERO, D.; STRAHRE, J.; WUEST, T. **Digital Lean Manufacturing: Past, Present and Future**. In: CHOUDHARY, A. K.; UCHIDA, K.; SINGH, R. K. (ed.). *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. Cham: Springer, 2020.

RUBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALTHER, M.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. Boston: Boston Consulting Group, 2015.

SANTOS, A. L.; OLIVEIRA, R. A. **Aplicações da Internet das Coisas na Industria 4.0: Uma revisão sistemática**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, 2016.

SEBASTIAN, I. M. *et al.* **How big old companies navigate digital transformation**. MIS Quarterly Executive, v. 16 n.3, p. 197-213, 2017.

SEMERARO, C.; ALYOUSUF, N.; KEDIR, N. I.; ABU LAIL, E. **A Maturity Model for Evaluating the Impact of Industry 4.0 Technologies and Principles in SMEs**. Manufacturing Letters, v. 37, p. 61–65, 2023. DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.07.018.

SENNA, P. P.; BARROS, A. C.; BONNIN ROCA, J.; AZEVEDO, A. **Development of a Digital Maturity Model for Industry 4.0 Based on the Technology–Organization–Environment Framework**. Computers & Industrial Engineering, v. 185, 109645, 2023. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109645.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. **A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises**. Procedia CIRP, v. 52, p. 161–166, 2016.

SCHUMACHER, Andreas; EROL, Selahattin; SIHN, Wilfried. **A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises**. Procedia CIRP, v. 52, p. 161–166, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SILVA, R.R. da; Souza, SOUZA, R. de M; COSTA, R. M. **Na Organizational maturity model for digital transformation in manufacturing**. Journal of Manufacturing Technology Management, v 31, n.7, p. 1303-1326, 2020.

STRAMDHAGEN, J. O.; FRICK, J.; VOLLENHOVEN, T. V.; ROMERO, D. **Logistics 4.0 and emerging Sustainable business models**. In: Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative: Springer, 2017.

TEICHERT, R. **A Model for Assessing Digital Transformation Maturity for Service Provider Organizations**. European Journal of Business Science and Technology, v. 9, n. 2, p. 205–230, 2023. DOI: 10.11118/ejobsat.2023.014.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2011.

TRIPP, D. **Pesquisa-ação: uma introdução metodológica**. Educação e Pesquisa, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 443-466, 2005.

VAN TONDER, C.; BOSSINK, B.; SCHACHTEBECK, C.; NIEUWENHUIZEN, C. **Key Dimensions That Measure the Digital Maturity Levels of Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs)**. Journal of Technology Management & Innovation, v. 19, n. 1, p. 110–123, 2024. DOI: 10.4067/S0718-27242024000100110.

VERHOEF, Peter C. *et al.* **Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda.** Journal of Business Research, v. 122, p. 889-901, 2021.

VIAL, Gregory. **Understanding digital transformation: A review and a research agenda.** Journal of Strategic Information Systems, v. 28, n. 2, p. 118-144, 2019.

VISURE SOLUTIONS. **What is a Maturity Model?** Visure Solutions, 2023. Disponível em: <https://visuresolutions.com/blog/what-is-a-maturity-model/> . Acesso em: 14 mai. 2025