



**PODER EXECUTIVO
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO – MEC
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO -
PPGEP/UFSC
CAMPUS TRINDADE / CENTRO TECNOLÓGICO**

**MODELO DE MEDIÇÃO DA MATURIDADE DA LOGÍSTICA 5.0 EM
EMPRESAS POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

NAZARÉ TOYODA MACHADO

Florianópolis – SC

2025

**MODELO DE MEDIÇÃO DA MATURIDADE DA LOGÍSTICA 5.0 EM EMPRESAS
POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

NAZARÉ TOYODA MACHADO

Orientador: Prof. PhD. Carlos Manuel Taboada Rodriguez

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação
da Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito à obtenção do título de Doutora em
Engenharia de Produção.

Área de concentração: Logística e Cadeia de Suprimentos
Linha de pesquisa – Gestão do Desempenho Logístico

Florianópolis – SC

2025

Ficha catalográfica

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Machado, Nazare Toyoda
MODELO DE MEDIÇÃO DA MATURIDADE DA LOGÍSTICA 5.0 EM
EMPRESAS POLO INDUSTRIAL DE MANAUS / Nazare Toyoda
Machado ; orientadora, Carlos Manoel Taboada Rodriguez,
2025.
209 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Indústria 5.0. 3. Logística
5.0. 4. Modelos de Maturidade. 5. Polo Industrial de
Manaus. I. Rodriguez, Carlos Manoel Taboada. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

NAZARÉ TOYODA MACHADO

**Título: MODELO DE MEDIÇÃO DA MATURIDADE DA LOGÍSTICA 5.0 EM
EMPRESAS POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 23 de junho de 2025,
pela banca examinadora composto pelos seguintes membros:

Profa. Marina Bouzon, Dra.

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Francisco Gaudêncio Mendonça Freires, Dr.

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Prof. Ricardo Chalmeta, Dr.

Instituição: Universidade Jaime I, Castelló de la Plana Espanha

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.



Documento assinado digitalmente
Enzo Morosini Frazzon
Data: 11/09/2025 17:34:33-0300
CPF: ***.696.429-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
CARLOS MANUEL TABOADA RODRIGUEZ
Data: 10/09/2025 00:37:11-0300
CPF: ***.044.459-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Carlos Manoel Taboada Rodrigues, Dr.

Orientador

Florianópolis – SC, 2025

DEDICAÇÃO

Dedico este trabalho aos meus pais, “*In Memoriam*”.

CITAÇÃO

“A tecnologia está mudando a natureza da competição na logística, e empresas que conseguem usar essa tecnologia para melhorar a eficiência e criar um valor superior estão obtendo vantagens competitivas sustentáveis.”¹.

Michael E. Porter

1985

¹ Economista renomado, professor da Harvard Business School e um dos mais influentes teóricos da área de estratégia de negócios. Ele é autor de vários livros, incluindo "Competitive Advantage", onde discute como as empresas podem criar e sustentar um desempenho superior a longo prazo através da análise da estrutura competitiva de suas indústrias. Seu trabalho sobre estratégia competitiva e a cadeia de valor revolucionou a teoria e prática do desenvolvimento estratégico e da competitividade global.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por todas as coisas de minha vida, que está me concedendo toda serenidade e tranquilidade para enfrentar os desafios para essa grande trajetória.

Ao Prof. Dr. Carlos Manuel Taboada Rodriguez pela sua importância como orientador no correto direcionamento para que esse trabalho fosse desenvolvido com sucesso.

Aos meus professores por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas nesses primeiros anos de doutorado.

Aos meus colegas de classe, aos amigos do LDL (Laboratório de Desempenho Logístico) e Gelog (Grupos de Estudos Logísticos) pelo companheirismo e amizade durante os grupos de pesquisas e trabalhos realizados.

E claro, por muitos trabalhos que ainda estarão por vir, nos quais necessitaremos estar juntos (colegas e professores) para compartilhar o conhecimento e formar uma network robusta.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio e suporte.

A Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e a sociedade pela oportunidade de estudar em uma renomada Instituição de Ensino Superior Federal de excelentíssima qualidade de forma gratuita.

E por fim, não menos importante a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com esse trabalho.

RESUMO

Machado, Nazaré Toyoda. Título: MODELO DE MEDIÇÃO DA MATURIDADE DA LOGÍSTICA 5.0 EM EMPRESAS POLO INDUSTRIAL DE MANAUS. Santa Catarina - SC, 2025. Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, 2025.

A emergência da indústria 5.0 trouxe novos paradigmas para a gestão logística, enfatizando a centralidade humana, a sustentabilidade e a colaboração inteligente entre humanos e máquinas. Este estudo tem como objetivo principal desenvolver e aplicar um modelo de medição da maturidade da logística 5.0, capaz de capturar, de maneira sistêmica e interrelacional, os fatores críticos que impulsionam a transformação logística na era pós-digital, com aplicação prática no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM). Para atingir esse propósito, foi realizada uma revisão integrativa da literatura em bases indexadas, como *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*, mapeando os principais modelos de maturidade existentes e suas limitações quanto à nova realidade da logística contemporânea. A pesquisa propôs um modelo conceitual estruturado em seis dimensões: infraestrutura tecnológica, integração digital, sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e desempenho operacional. A metodologia aplicada envolveu o uso do multicritério DEMATEL para analisar as relações de causa e efeito entre os fatores críticos de sucesso da logística 5.0, possibilitando a construção de um modelo validado por especialistas atuantes no ecossistema industrial em Manaus. O modelo foi posteriormente refinado por meio do uso combinado da técnica *Grey DEMATEL*, que considera incertezas subjetivas nos julgamentos dos especialistas. A coleta e análise de dados foi conduzida com apoio de ferramentas de inteligência computacional, utilizando a linguagem *Python* para processamento das respostas e cálculo do Índice IMAL 5. Os resultados evidenciaram que, apesar dos avanços em digitalização, a maioria das empresas ainda apresenta baixa maturidade nas dimensões de centralidade humana e sustentabilidade, revelando uma predominância de abordagens ainda centradas apenas na eficiência operacional. O estudo também demonstrou que a integração sistêmica das tecnologias digitais com práticas colaborativas e sustentáveis é um diferencial competitivo essencial para a adaptação das empresas ao novo contexto global. Assim, a principal contribuição desta tese reside na formulação de um modelo inédito de avaliação da maturidade logística para a era da Indústria 5.0, oferecendo uma ferramenta estratégica para organizações industriais interessadas em evoluir de maneira sustentável, resiliente e orientada para o futuro. Os resultados obtidos ampliam o entendimento teórico sobre maturidade logística e fornecem subsídios práticos para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à transformação digital sustentável na Amazônia e em outros contextos industriais emergentes.

Palavras-chave: Modelo de Maturidade. Logística 5.0. DEMATEL. Indústria 5.0. Polo Industrial de Manaus.

ABSTRACT

Machado, Nazaré Toyoda. Title: LOGISTICS 5.0 MATURITY MEASUREMENT MODEL IN MANAUS INDUSTRIAL HUB COMPANIES. Santa Catarina - SC, 2025. Thesis presented to the Postgraduate Program of the Federal University of Santa Catarina, 2025.

The emergence of Industry 5.0 has brought new paradigms to logistics management, emphasizing human centrality, sustainability, and intelligent collaboration between humans and machines. The main objective of this study is to develop and apply a model to measure the maturity of Logistics 5.0, capable of capturing, in a systemic and interrelation manner, the critical factors that drive the logistics transformation in the post-digital era, with practical application in the context of the Manaus Industrial Pole (PIM). To achieve this purpose, an integrative literature review was carried out in indexed databases, such as Scopus, Science Direct, and Web of Science, mapping the main existing maturity models and their limitations regarding the new reality of contemporary logistics. The research proposed a conceptual model structured in six dimensions: technological infrastructure, digital integration, sustainability, human centrality, resilience, and operational performance. The methodology applied involved the use of the DEMATEL multicriteria to analyze the cause-and-effect relationships between the critical success factors of Logistics 5.0, enabling the construction of a model validated by experts working in the factories at Manaus city. The model was subsequently refined through the combined use of the Grey DEMATEL technique, which considers subjective uncertainties in experts' judgments. Data collection and analysis were conducted with the support of computational intelligence tools, using the Python language to process responses and calculate the IMAL 5 Index. The results showed that, despite advances in digitalization, most companies still have low maturity in the dimensions of human centrality and sustainability, revealing a predominance of approaches still focused solely on operational efficiency. The study also demonstrated that the systemic integration of digital technologies with collaborative and sustainable practices is an essential competitive advantage for companies to adapt to the new global context. Thus, the main contribution of this thesis lies in the formulation of a novel model for assessing logistics maturity for the industry 5.0 era, offering a strategic tool for industrial organizations interested in evolving in a sustainable, resilient, and future-oriented manner. The results obtained expand the theoretical understanding of logistics maturity and provide practical support for the development of public policies and business strategies aimed at sustainable digital transformation in the Amazon and other emerging industrial contexts.

Keywords: Maturity Model. Manaus. Logistics 5.0. DEMATEL. Industry 5.0. Manaus Industrial Hub.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas metodológicas da pesquisa.....	10
Figura 2 - Procedimentos para análise em DEMATEL.....	14
Figura 3 - DEMATEL vs. Processo de Hierarquia Analítica (AHP)	21
Figura 4 - DEMATEL vs. Processo de Rede Analítica (ANP)	23
Figura 5 - DEMATEL vs. à SEM.....	24
Figura 6 - DEMATEL vs. à Fuzzy	25
Figura 7 - DEMATEL vs. Dinâmica de Sistemas (DS)	27
Figura 8 - Mapa de co-ocorrência de termos relacionados à logística 5.0	34
Figura 9 - Escopo da logística empresarial.....	38
Figura 10 - Transição de paradigma	40
Figura 11 - Evolução histórica da logística 1.0 à logística 5.0	42
Figura 12 - Dimensões da logística 5.0	44
Figura 13 - Dimensões da logística 5.0	54
Figura 14 - Nuvem de palavras IMAL 5.0	79
Figura 15 - Dimensões da Logística 5.0, Subdimensões Críticas, Referenciais Teóricos e Contribuições Temáticas para o Modelo IMAL 5.0.....	82
Figura 16 - Níveis de Maturidade na Logística 5.0: da conscientização à sustentabilidade perenizada.....	83
Figura 17 - Fluxograma de um sistema logístico sustentável na indústria 5.0.....	106
Figura 18 - Estrutura e operacionalização do Índice de Maturidade da Logística 5.0 (IMAL 5.0)	126
Figura 19 - Construção do processo de desenvolvimento da análise para a matriz de influência	131
Figura 20 - Exemplos de relações causais e resultantes na logística 5.0 voltada à sustentabilidade	139
Figura 21- Gráfico da Importância (D) por dimensão nos limites superior e inferior.....	175
Figura 22 - Gráfico do Efeito (R) por dimensão nos limites superior e inferior	177
Figura 23- Nível médio de maturidade logística por dimensão – modelo IMAL 5.0	179
Figura 24 – Diagrama Causal entre as dimensões.....	189
Figura 25 – Dígrafo de Influência entre Dimensões do Índice IMAL 5.0	192
Figura 26 - Estrutura conceitual e operacional do modelo IMAL 5.0.....	200
Figura 27 - Conclusão visual do modelo IMAL 5.0.....	201

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pilares de justificação da pesquisa	5
Quadro 2 - Caracterização metodológica da pesquisa.....	11
Quadro 3 - Comparativo entre DEMATEL e métodos multicritério de apoio à decisão	29
Quadro 4 - Principais abordagens dos MM's	70
Quadro 5 - Dimensões do IMAL 5.0, definições, indicadores e justificativas.....	117
Quadro 6 - Fórmulas do IMAL 5.0	123
Quadro 7. Parâmetros de cálculo IMAL 5.0.....	165
Quadro 8 - Matriz Total Superior	173
Quadro 9 - Matriz Total Inferior.....	174
Quadro 10 - Limite Superior (T+).....	174
Quadro 11 - Limite Inferior (T-)	175
Quadro 12 - Limite Superior (T+):	182
Quadro 13 - Limite Inferior (T-):	182
Quadro 14 - Relações Diretas (Valores da Matriz Normalizada D).....	185
Quadro 15 - Relações Indiretas (Calculadas a partir de D2)	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução dos Modelos de Maturidade	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Percentual de adequação	121
Equação 2 – Cálculo IMAL 5.0.....	122
Equação 3 – Cálculo das Médias.....	155
Equação 4 – Normalização da matriz (E_{eu})	156
Equação 5- Limite Superior ($D +$) e Limite Inferior ($D -$)	157
Equação 6 – Matriz Total	159
Equação 7 – Matriz Total	159
Equação 8 – Cálculo da Importância (D)	161
Equação 9 - Cálculo Efeito (R).....	161
Equação 10- Adequação para normalização.....	163
Equação 11 – Cálculo do IMAL5.0.....	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI - Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ABIA - Associação Brasileira da Indústria de Alimentos

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AM - Estado do Amazonas

AMOC - Amazônia Ocidental

CLM - *Council of Logistics Management*

CNI - Confederação Nacional da Indústria

CPS - *Cyber Physical Systems*

CSCMP - *Council of Supply Chain Management Professionals*

DEMATEL - *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*

IA - Inteligência artificial

IGI - Índice Geral da Inovação

LGPD - Lei Geral de Proteção de Dados

MM's - Modelo de Maturidade

MPO - Ministério do Planejamento e Orçamento

NASA - Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMPI - Organização Mundial da Propriedade Intelectual

ONU - Organização das Nações Unidas

PB – Portifólio bibliográfico

PIB - Produto Interno Bruto

PIM - Polo Industrial de Manaus

TI - Tecnologia da Informação

TIC - Tecnologias de informação e comunicação

SEPLAN - Secretária Nacional de Planejamento

SUFRAMA - Superintendência da Zona Franca de Manaus

ZFM – Zona Franca de Manaus

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	4
1.1.1. Geral	4
1.1.2. Específicos.....	4
1.2. Justificativa.....	4
1.3. Contribuição e ineditismo.....	6
1.4. Delimitação do estudo	7
CAPÍTULO II. METODOLOGIA	9
2.1. Enquadramento metodológico	11
2.2. Seleção do Portfólio bibliográfico (PB)	13
2.3. Procedimento metodológico	14
2.4. Introdução ao <i>Grey DEMATEL</i>	18
2.5. Análise Comparativa entre o DEMATEL e outras abordagens multicritério	21
2.6. Aplicação do DEMATEL na Logística	31
CAPÍTULO III. REVISÃO DA LITERATURA.....	33
3.1. Logística	35
3.2. Indústria 4.0 e a transição para a logística 5.0.....	39
3.3. Logística 5.0	41
3.4 Implementação da indústria 5.0 na Logística	48
3.4.1 Resiliência na logística 5.0	50
3.4.2. Tecnologias de previsão e simulação para aumentar a resiliência.....	51
3.4.3. Colaboração humano-robótica como pilar da resiliência logística	52
3.5. Modelos de maturidade	55
3.5.1. Histórico e primeiros Modelos de Maturidade	57
3.5.2. Evolução dos Modelos de Maturidade.....	58
3.5.3. Modelos de Maturidade contemporâneos	67
3.6. Abordagem dos Modelos de Maturidade	68
3.6.1 Ferramentas de avaliação e indicadores de desempenho em logística	71
3.6.2. Personalização e flexibilidade.....	73
3.7. Inferências sobre a evolução dos Modelos de Maturidade de logística	74

CAPÍTULO IV. Desenvolvimento do Modelo IMAL 5.0	77
4.1 Construção conceitual do Modelo IMAL 5.0: Bases teóricas e metodológicas	81
4.2. Níveis de maturidade na logística 5.0.....	82
4.2.1 Nível 1: introdução e conscientização	83
4.2.2 Nível 2: digitalização e automação básica	86
4.2.3 Nível 3: Integração e sustentabilidade estruturada	89
4.2.4 Nível 4: Logística resiliente e adaptável	92
4.2.5 Nível 5: Maturidade total e sustentabilidade perenizada	95
4.3. Caracterização do Modelo de Maturidade por dimensão	98
4.3.1. Infraestrutura e tecnologias da logística 5.0	98
4.4. Sustentabilidade e iniciativas verdes na logística.....	101
4.5. Integração e colaboração na cadeia logística 5.0.....	105
4.6. Resiliência logística e mudanças climáticas	109
4.7. Maturidade e desempenho da logística 5.0.....	111
4.8 Aspecto humano na logística 5.0.....	114
4.9. Caracterização introdutória do IMAL 5.0	117
4.9.1 Aplicação do formulário para análise DEMATEL	118
4.9.2. Dimensões estruturantes do IMAL 5.0	119
4.9.3. Cálculo do IMAL 5.0	121
4.9.4 Validação do IMAL 5.0 com o Grey DEMATEL.....	127
CAPÍTULO V. Ensaio Aplicado do Modelo IMAL 5.0 no Setor Eletroeletrônico do PIM	129
5.1. Desenvolvimento da análise: a construção da matriz de influência	129
5.1.1. Identificação de fatores causais e resultantes	130
5.2 Visualização e interpretação da análise dos resultados	131
5.3. Relevância da análise Dematel para o modelo de maturidade	133
5.3.1. Suporte à tomada de decisão	135
5.3.2. DEMATEL e a sustentabilidade.....	137
5.3.3 A formulação de políticas e estratégias orientadas pela lógica causal sistêmica.....	139
CAPÍTULO VI. Resultados	142
6.1 Caracterizações do Modelo de Maturidade por dimensão.....	142

6.2. Indicadores-chave de desempenho do IMAL 5.0	143
6.3. Logística 5.0 no contexto do PIM	144
6.3.1 Desafios geográficos e logísticos no PIM	145
6.3.2 O Papel da IoT e da Inteligência Artificial no PIM.....	146
6.3.3 Blockchain e transparência na cadeia de suprimentos	146
6.3.4 Sustentabilidade e logística verde no PIM	147
6.3.5 Resiliência logística e adaptação às mudanças climáticas no PIM	148
6.4. Descrição do contexto empresarial.....	149
6.5. Índice de maturidade e adequação logística 5.0 (IMAL 5.0)	153
6.5.1 Construção da matriz base DEMATEL	154
6.5.2. Agrupamento por dimensões	162
6.6. Cálculo da pontuação total e do índice	163
6.6.1. Parâmetros de cálculo com pesos	165
6.7. Ensaio prático do modelo em empresas industriais.....	166
6.7.1 Aplicações práticas do DEMATEL no Brasil	169
6.7.2. Análise Grey DEMATEL e sua relevância	170
6.8. Interpretação dos resultados	172
6.8.1 Análise comparativa entre as dimensões avaliadas	178
6.8.2 Interpretação consolidada dos gráficos	179
6.8.3 Análise comparativa	187
CAPÍTULO VII. DISCUSSÃO DA PESQUISA	194
CONCLUSÃO.....	201
<i>Limitações da Pesquisa</i>	<i>205</i>
<i>Contribuições para estudos futuros.....</i>	<i>207</i>
REFERÊNCIAS	210
APÊNDICES	236
APÊNDICE A - LOGISTICS/SCM 4.0 MATURITY MODEL REVIEW: OPPORTUNITIES FOR TECHNOLOGIES APPLICATION.....	236
APÊNDICE B – Citações Fundamentais e Metodologias de Referência para a Construção do Modelo IMAL 5.0	271
APÊNDICE C - Questionário para Avaliação da Maturidade da Logística 5.0.....	275
APÊNDICE D – Questionário para avaliação DEMATEL: Logística 5.0.....	287

APÊNDICE E – Respostas dos Especialistas – Influência das Dimensões	290

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o avanço exponencial das tecnologias digitais tem impulsionado uma profunda transformação na forma como as organizações operam, produzem e se conectam com seus públicos. No epicentro dessa revolução está a Indústria 4.0, marcada pela convergência entre sistemas ciberfísicos (CPS), internet das coisas (IoT), *big data*, inteligência artificial (IA) e automação avançada. Estas tecnologias passaram a integrar toda a cadeia de valor (Nguyen, Nawara e Kashef, 2024).

O contexto brasileiro, entretanto, revela uma dualidade preocupante. Por um lado, o setor industrial representa aproximadamente 10% do PIB e continua sendo um dos pilares da economia nacional (ABIA, 2024). Por outro lado, o país ocupa a 49ª posição no Índice Global de Inovação (GII) de 2023, entre 132 economias avaliadas, liderando a América Latina e o Caribe. Apesar desse avanço, o Brasil ainda apresenta uma lacuna significativa entre seu potencial econômico e sua capacidade de adoção tecnológica, evidenciando a necessidade de políticas públicas mais eficazes e investimentos estratégicos em ciência, tecnologia e inovação para melhorar seu desempenho no cenário global.

Esse cenário é particularmente sensível quando se observa o desempenho do Polo Industrial de Manaus (PIM). Faz-se importante explicar que o modelo Zona Franca de Manaus (ZFM) abrange três eixos: agropecuário, comércio e industrial. Apesar de seu papel histórico como catalisador do desenvolvimento econômico da Amazônia Ocidental, o PIM enfrenta desafios estruturais relacionados à baixa densidade tecnológica de parte significativa das indústrias instaladas, à fragilidade na difusão de tecnologias emergentes e à reduzida capacidade de geração de inovação endógena. Estudos apontam que, embora o modelo da ZFM tenha proporcionado ganhos fiscais e geração de empregos ao longo das décadas, a sua dependência de incentivos e a limitada articulação entre empresas, centros de pesquisa e universidades dificultam a formação de um ecossistema inovador robusto e resiliente (Cavalcante, 2020).

Além disso, a maioria das empresas do PIM ainda opera com tecnologias que não refletem os avanços preconizados pela Indústria 4.0, o que torna ainda mais urgente a transição para um modelo baseado na Indústria 5.0, com foco na centralidade humana, sustentabilidade e integração inteligente entre homem e máquina. Andrade, Gelcer e Holland (2019) afirmam que para tanto, é fundamental repensar os modelos de avaliação de maturidade tecnológica e

logística, especialmente no contexto amazônico, que demanda soluções customizadas, sustentáveis e integradas à realidade socioprodutiva da região.

Essa realidade vem sendo agravada por fatores estruturais como a transição demográfica acelerada, reformas econômicas e tributárias em curso e o surgimento de novas exigências de mercado, mais centradas em sustentabilidade, rastreabilidade e customização em massa. Relatórios do Banco Mundial (2023) alertam que, sem um salto estratégico em inovação nos próximos anos, o setor produtivo brasileiro poderá enfrentar um ciclo prolongado de estagnação e perda de relevância global. Nesse cenário, a adoção das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 deixa de ser uma opção estratégica e se torna uma condição *sine qua non* para a sobrevivência organizacional no médio e longo prazo (Acemoglu e Restrepo, 2019).

A integração bem-sucedida dessas tecnologias, no entanto, exige mais do que investimentos em infraestrutura digital. Requer um entendimento profundo sobre o nível de prontidão e maturidade organizacional para absorver inovações disruptivas de maneira eficiente e sustentável (Faiz, Le e Masli, 2024). Nesse sentido, diversos modelos de maturidade (MMs) têm sido desenvolvidos nas últimas décadas com o objetivo de apoiar empresas na mensuração de seu estágio de evolução digital e no delineamento de roteiros estratégicos para transformação (Broccardo *et al.*, 2024).

Embora esses modelos tenham evoluído no contexto da Indústria 4.0, a maior parte ainda foca em elementos específicos, como os fluxos de informação, tecnologias de produção ou etapas logísticas tratadas de forma segmentada (Maddikunta *et al.*, 2022). E ainda são limitados por sua ênfase excessiva em aspectos técnicos e pela incapacidade de captar a complexidade da Logística 5.0, que exige integração entre tecnologia, sustentabilidade e centralidade humana.

Poucos consideram as múltiplas dimensões sociotécnicas que permeiam a adoção tecnológica em cadeias de suprimentos complexas, como a capacidade de integração entre agentes, a adaptabilidade organizacional, a colaboração homem-máquina e os impactos sobre o capital humano.

Diante do avanço acelerado da digitalização e da crescente complexidade das cadeias de valor globais, torna-se cada vez mais desafiador separar os aspectos técnicos dos humanos na análise de prontidão tecnológica. As abordagens tradicionais dos processos logísticos, focadas unicamente na eficiência operacional, revelam-se limitadas para compreender a

dinâmica em constante evolução das cadeias digitais e a diversidade de fatores que influenciam sua transformação bem-sucedida (Yu e Sun, 2024).

Com essas limitações, a evolução das tecnologias disruptivas e o crescente apelo por cadeias de suprimentos mais humanas, sustentáveis e resilientes impulsionaram o surgimento de uma nova abordagem: a Indústria 5.0. Essa nova fase representa uma mudança de paradigma ao priorizar a centralidade humana, a colaboração entre humanos e máquinas inteligentes, e a personalização da produção como pilares fundamentais (Romero *et al.*, 2020; Nahavandi, 2021). Consequentemente, a Logística 5.0 emerge como uma extensão dessa visão, reunindo tecnologias como IA, *blockchain* e IoT com princípios de empatia, sustentabilidade e agilidade adaptativa. Essa evolução exige novos modelos de medição de maturidade capazes de capturar não apenas a digitalização, mas também os aspectos sociais, emocionais e ambientais da logística contemporânea (Dwivedi *et al.*, 2023; Yin et al., 2022).

No cenário contemporâneo, em que as demandas por sustentabilidade, centralidade humana e adaptabilidade ganham força, emerge o conceito de Indústria 5.0 — uma nova abordagem que valoriza a colaboração entre pessoas e máquinas inteligentes. Nesse contexto, a Logística 5.0 representa um avanço necessário, ao incorporar tecnologias digitais a valores como empatia, resiliência e sustentabilidade.

Embora diversos modelos de maturidade tecnológica tenham sido propostos nos últimos anos, observa-se uma lacuna na literatura quanto à sua aplicabilidade à Logística 5.0, especialmente em ambientes industriais emergentes como o Polo Industrial de Manaus, onde faltam instrumentos analíticos capazes de orientar a transformação digital de forma sistêmica. Grande parte desses modelos ainda foca em aspectos isolados da digitalização, sem contemplar a complexidade sociotécnica das cadeias logísticas atuais.

Diante disso, surge a necessidade de desenvolver um modelo inovador de medição da maturidade logística que considere relações causais entre fatores críticos e responda às exigências da era pós-digital. Assim, esta pesquisa parte da seguinte pergunta de pesquisa: Como desenvolver um modelo de medição da maturidade da Logística 5.0 capaz de captar as inter-relações entre fatores críticos, incluindo a centralidade humana, a sustentabilidade e a digitalização, e aplicá-lo de forma eficaz no contexto do Polo Industrial de Manaus? A partir dessa pergunta, busca-se construir um modelo conceitual de maturidade alinhado aos princípios

da Logística 5.0, que possa servir de ferramenta estratégica para gestores e formuladores de políticas industriais na região.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral

Construir um modelo conceitual de maturidade logística alinhado à Indústria 5.0, capaz de captar inter-relações entre fatores estruturantes e orientar decisões estratégicas em ambientes industriais emergentes, como o Polo Industrial de Manaus.

1.1.2. Específicos

1. Determinar o conceito e definir os critérios relevantes à Logística 5.0.;
2. Estruturar as dimensões, critérios e níveis do modelo com base nos princípios da Indústria 5.0 e focado na Logística Interna;
3. Aplicar o modelo em empresas do PIM do setor eletroeletrônico utilizando o método DEMATEL para mapear relações causais e propor estratégias de evolução.

1.2. Justificativa

Esta pesquisa busca responder à seguinte pergunta: como desenvolver um modelo de maturidade da Logística 5.0 capaz de captar as inter-relações entre fatores críticos — como centralidade humana, sustentabilidade e digitalização — e aplicá-lo no contexto do Polo Industrial de Manaus?

Apesar do avanço das tecnologias da Indústria 4.0, os modelos de maturidade existentes ainda apresentam limitações para mensurar de forma integrada a complexidade da transição para a Logística 5.0. A maioria desses modelos permanece centrada em aspectos técnicos, negligenciando dimensões emergentes como colaboração homem-máquina, resiliência organizacional e sustentabilidade. O quadro 01 sintetiza os pilares que fundamentam cientificamente e estrategicamente o modelo proposto de maturidade da Logística 5.0.

Quadro 1 - Pilares de justificação da pesquisa

Pilar	Descrição	Fontes de apoio
Relevância científica	Superar lacunas nos modelos de maturidade tradicionais, incorporando dimensões emergentes como sustentabilidade, colaboração homem-máquina e empatia organizacional.	Tang, M. S.; Nguyen, T. H., 2024; Dallasega <i>et al.</i> , 2022; Samawi, 2024
Inovação metodológica	Aplicação do método DEMATEL para análise interrelacional dos fatores críticos de maturidade logística, permitindo visualização sistêmica das dependências.	Gabus e Fontela (1972); Leng et al. (2022)
Impacto prático	Fornecer um instrumento estratégico para empresas do PIM avaliarem seu estágio de maturidade e planejarem sua transformação logística.	Nascimento e Rivas (2025)
Relevância econômica regional	Apoiar a competitividade e a sustentabilidade das indústrias do PIM, fortalecendo o desenvolvimento econômico da Amazônia Ocidental.	Cavalcante (2020)
Contribuição social e ambiental	Estimular práticas logísticas mais humanas, inclusivas e alinhadas aos ODS's, favorecendo a responsabilidade corporativa.	Rashed <i>et al.</i> , 2024; ONU (2025)

Fonte: Autoria Própria (2025).

No contexto amazônico, essa lacuna se intensifica. O PIM, apesar de sua relevância econômica, enfrenta desafios estruturais como a baixa densidade tecnológica, a dependência de incentivos fiscais e a limitada difusão de inovações. A ausência de instrumentos analíticos alinhados aos princípios da Logística 5.0 compromete a capacidade das empresas locais de planejar sua transformação digital de forma coordenada e estratégica. Além disso, os modelos tradicionais de *readiness* (TRL, MRL, SCRL) oferecem diagnósticos fragmentados, desconsiderando a interdependência entre os fatores críticos da maturidade logística. Assim, destaca-se a importância de metodologias multicritério, como o DEMATEL, capazes de identificar relações causais e orientar decisões mais sistêmicas.

Portanto, esta pesquisa propõe a construção e aplicação de um modelo inovador, contextualizado ao PIM, que auxilie organizações na transição para cadeias logísticas mais resilientes, inteligentes e humanizadas, alinhadas à Indústria 5.0.

1.3. Contribuição e ineditismo

Do ponto de vista metodológico, a pesquisa inova se propõe ao integrar as abordagens DEMATEL e Grey-DEMATEL para analisar as interdependências causais entre os critérios de maturidade logística, oferecendo maior precisão na identificação de fatores críticos e suas relações, especialmente em contextos industriais complexos e sujeitos a incertezas. Os pontos abaixo trazem as dimensões de contribuição da pesquisa, os eixos de contribuição e as categorias de impacto do estudo:

1. Científica e metodológica: Proposição do IMAL 5.0, um índice inédito que amplia o conceito de maturidade logística ao integrar critérios técnico-operacionais e sociotécnicos como empatia organizacional, resiliência e sustentabilidade.

2. Instrumental: Modelo replicável, acessível via formulário digital, com cálculo automatizado e possibilidade de aplicação em contextos de baixa densidade tecnológica.

3. Técnica: Uso combinado de DEMATEL e Grey DEMATEL, oferecendo precisão na análise de interdependências causais entre critérios.

4. Empírica: Validação realizada em empresas do setor eletroeletrônico do PIM, conferindo aplicabilidade em ambiente industrial real e desafiador.

5. Estratégica e política: Ferramenta útil para empresas, gestores públicos e instituições de fomento em prol da neoindustrialização e sustentabilidade da Amazônia.

A escolha pelo método DEMATEL foi motivada pela sua capacidade de estruturar e analisar relações causais entre fatores críticos em sistemas complexos. Essa abordagem se mostra especialmente eficaz em contextos industriais com múltiplos agentes decisórios, como o Polo Industrial de Manaus. Conforme destacado por Bouzon et al. (2021), o DEMATEL permite não apenas a visualização gráfica das influências entre variáveis, mas também a identificação de elementos causais e de efeito em sistemas logísticos.

1.4. Delimitação do estudo

Esta tese delimita-se à proposição e aplicação do Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0), voltado à avaliação da prontidão logística em empresas do setor eletroeletrônico do Polo Industrial de Manaus. O modelo é focado na logística interna e considera fatores tecnológicos, humanos, ambientais e colaborativos, em alinhamento com os princípios da Logística 5.0. A abordagem metodológica combina revisão sistemática da literatura, aplicação das técnicas DEMATEL e Grey DEMATEL, e coleta de dados com especialistas do setor, utilizando formulário estruturado digital.

No aspecto temporal, a pesquisa abrange o período de 2016 a 2024, correspondente à consolidação da Indústria 5.0. A delimitação tecnológica prioriza ferramentas aplicáveis ao ambiente fabril, como IoT, *cobots*, IA e *big data*. Excluem-se processos externos de distribuição e *last mile delivery*. O modelo foi aplicado a 28 especialistas atuantes no PIM do setor eletroeletrônico, com foco na identificação das inter-relações críticas e prioridades de evolução.

Importante destacar que a construção do modelo conceitual e da matriz de relações causais levou à identificação de critérios interdependentes, permitindo a visualização das dimensões mais influentes e mais impactadas. Para representar graficamente essa lógica, a presente tese incorpora a figura 01 a ser apresentada mais a seguir na seção “Enquadramento Metodológico”, a qual apresenta a arquitetura de um sistema logístico da produção, sob a perspectiva da Logística 5.0. A imagem explica como os fluxos informacionais, humanos, operacionais e ambientais se entrelaçam para compor uma malha logística interna integrada, sistêmica e orientada ao desempenho com propósito social.

A originalidade e o ineditismo deste estudo residem na análise de uma abordagem conceitual e metodológica acerca da implantação de um modelo de medição da maturidade da Logística 5.0, capaz de captar as inter-relações entre os fatores críticos representados no sistema logístico ilustrado — como a logística interna, o uso estratégico de tecnologias habilitadoras e a integração dos fluxos de materiais e informações.

Além desta Introdução, a tese está organizada da seguinte forma: a partir do capítulo 2, a tese apresentou uma estrutura metodológica clara, articulando teoria e prática com elevado rigor científico. O enquadramento metodológico detalhou os procedimentos técnicos adotados, incluindo a seleção bibliográfica, o uso do DEMATEL e Grey-DEMATEL e a aplicação computacional com Python, evidenciando a analítica da pesquisa. No capítulo 3, a revisão da

literatura contextualizou a evolução da logística até a Logística 5.0, fundamentando as dimensões do modelo IMAL proposto. O capítulo 4 aplicou o modelo ao contexto amazônico, caracterizando níveis de maturidade em empresas do Polo Industrial de Manaus. Por fim, os capítulos 5 e 6 apresentaram a validação do modelo e análise dos resultados, garantindo coesão entre os objetivos da pesquisa e a aplicação prática do índice desenvolvido.

Desta feita, o modelo IMAL 5.0 focou no contexto logístico do PIM, com escopo delimitado, garantindo viabilidade metodológica, profundidade analítica e transição para a descrição dos procedimentos científicos adotados.

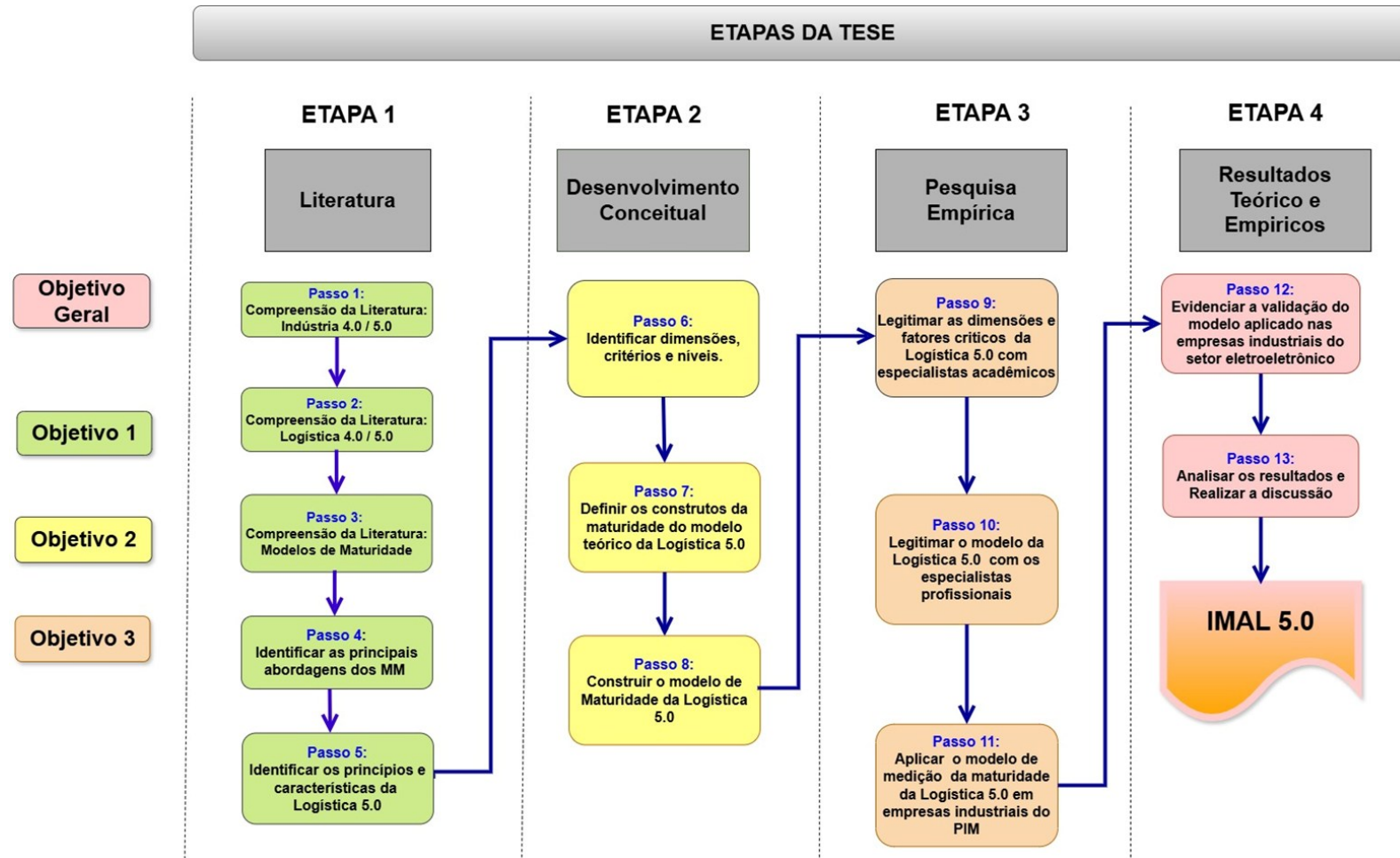
CAPÍTULO II. METODOLOGIA

Este capítulo descreveu a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento, aplicação e validação do modelo de medição da maturidade da Logística 5.0 proposto nesta tese. A metodologia foi estruturada em três etapas principais: (i) enquadramento metodológico, que define a estratégia de pesquisa e justifica as escolhas metodológicas; (ii) seleção do portfólio bibliográfico (PB), que detalha os critérios para a revisão integrativa da literatura; e (iii) procedimento metodológico, que apresenta as técnicas e ferramentas utilizadas para coleta e análise dos dados, incluindo a aplicação do método DEMATEL e do ensaio no Polo Industrial de Manaus (PIM).

Cada uma dessas etapas foi delineada com o intuito de garantir rigor científico, coerência interna e aderência aos objetivos da pesquisa. O enquadramento metodológico fundamentou-se em uma abordagem mista, predominantemente qualitativa, com suporte quantitativo na etapa de análise multicritério. A seleção do portfólio bibliográfico seguiu critérios de relevância, atualidade e pertinência ao tema, com foco em publicações revisadas por pares. Já o procedimento metodológico foi construído para possibilitar a identificação dos fatores críticos da Logística 5.0, sua priorização e inter-relação causal. A escolha pelo método DEMATEL justificou-se por sua capacidade de revelar relações dinâmicas entre variáveis complexas em sistemas logísticos. Deste modo, a figura 1 detalhou o fluxo metodológico o qual integra revisão integrativa, ensaio no PIM, seleção bibliográfica via ProKnow-C, aplicação de questionário, análise DEMATEL e *Grey DEMATEL*, cálculo do IMAL 5.0 e síntese dos resultados, visando mapear e mensurar a maturidade logística sob a ótica da Logística 5.0 dentro deste estudo.

A condução desta pesquisa seguiu uma estrutura metodológica composta por quatro macro etapas interdependentes: (i) revisão sistemática da literatura, (ii) desenvolvimento conceitual do modelo, (iii) validação empírica junto a especialistas e (iv) aplicação prática do índice IMAL 5.0 em empresas do Polo Industrial de Manaus. A figura 1 apresentou o encadeamento dessas etapas, articulando cada uma delas aos objetivos específicos da tese e destacando os principais passos executados em cada fase. Esse fluxo metodológico permitiu alinhar rigor acadêmico, fundamentação teórica e aderência prática, garantindo a robustez do modelo proposto.

Figura 1 - Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autoria Própria (2025).

2.1. Enquadramento metodológico

A presente pesquisa classificou-se como aplicada, de natureza quantitativo-qualitativa, com delineamento exploratório-descritivo. De acordo com Vergara (2009), a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, ao passo que a natureza exploratória visa proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito. Esse delineamento possibilitou compreender, com maior profundidade, os fatores que influenciam a maturidade logística no contexto amazônico, articulando a construção teórica com a aplicação empírica do modelo proposto conforme é possível verificar no quadro 2.

Quadro 2 - Caracterização metodológica da pesquisa

Componente	Descrição
Natureza da pesquisa	Pesquisa aplicada, voltada à proposição de um modelo de avaliação da maturidade logística.
Objetivos metodológicos	Exploratórios e descritivos, com foco na caracterização e estruturação de critérios logísticos.
Abordagem do problema	Quanti-qualitativa, integrando análise de dados numéricos e percepção de especialistas.
Tipo de pesquisa	Ensaio aplicado do modelo, com aplicação prática no Polo Industrial de Manaus.
Instrumento de coleta	Questionário estruturado em escala linguística (0 a 4), aplicado via <i>Google Forms</i> .
População e amostra	28 especialistas selecionados por amostragem intencional com base em experiência profissional.
Procedimentos de coleta	Envio do formulário por e-mail e <i>WhatsApp</i> , com coleta entre novembro e dezembro de 2024.
Técnica de análise 1	DEMATEL, para análise das relações de causa e efeito entre os critérios.
Técnica de análise 2	Grey-DEMATEL, para validar o modelo e tratar incertezas nas respostas.
Produto resultante	Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0).

Fonte: Autoria Própria (2025).

No presente caso do quadro 02, a aplicação do estudo ocorreu ao propor um modelo de maturidade voltado à Logística 5.0 com foco no Polo Industrial de Manaus (PIM), enquanto a exploração buscou compreender, de forma estruturada, os fatores críticos dessa transição logística. Assim, do ponto de vista dos objetivos, esta pesquisa foi classificada como descritiva, uma vez que buscou detalhar e categorizar fenômenos complexos — neste caso, o estágio de maturidade da logística industrial — por meio de variáveis mensuráveis e categorias analíticas. Gil (2010) destacou que as pesquisas descritivas são apropriadas quando se pretende observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los, como ocorre neste estudo.

Quanto à abordagem do problema, optou-se pela estratégia quanti-quali por entender que a maturidade logística é um fenômeno multifacetado que exige tanto mensuração estatística quanto interpretação contextualizada. Para Creswell (2014), os métodos mistos combinam a profundidade da análise qualitativa com a força explicativa da análise quantitativa, permitindo uma compreensão mais holística dos dados e ampliando a validade dos resultados.

Nesse sentido, a etapa qualitativa foi representada pela revisão integrativa da literatura, que proporcionou o levantamento dos principais modelos de maturidade existentes, bem como suas limitações teóricas e práticas. Já a etapa quantitativa foi operacionalizada por meio da aplicação do DEMATEL, que permitiu mensurar e hierarquizar as relações causais entre os critérios do modelo proposto, conforme defendem Gabus e Fontela (1972) e reforçado por Leng *et al.* (2022).

A revisão integrativa da literatura seguiu os princípios metodológicos sugeridos por Souza, Silva e Carvalho (2010), ao permitir a coleta, análise e síntese de conhecimentos científicos disponíveis sobre o tema. O foco recaiu sobre as dimensões estruturantes da Logística 5.0 — digitalização, centralidade humana, sustentabilidade, integração tecnológica, desempenho e resiliência — com base em artigos selecionados nas bases *Web of Science*, *Scopus*, *Elsevier* e *ScienceDirect*. A análise bibliográfica revelou uma lacuna clara: a escassez de modelos integrativos voltados a ambientes industriais de baixa densidade tecnológica, como o PIM.

2.2. Seleção do Portfólio bibliográfico (PB)

Diante dessa fundamentação metodológica apresentada anteriormente e alinhada às melhores práticas em pesquisa aplicada, tornou-se indispensável ancorar teoricamente o desenvolvimento do modelo de maturidade proposto. Para isso, a construção de uma base conceitual consistente se materializou na etapa seguinte, voltada à seleção criteriosa do portfólio bibliográfico (PB), que deu suporte às decisões estruturais do modelo e garantiu a aderência científica às premissas da Logística 5.0.

Desta feita, a seleção do portfólio bibliográfico (PB) constituiu uma etapa importante desta pesquisa, pois visou embasar teoricamente o modelo de maturidade proposto à luz da Logística 5.0. Para tanto, adotou-se o método de revisão integrativa da literatura, conforme proposto por Mendes, Silveira e Galvão (2018), que permitiu a síntese do conhecimento científico existente, integrando achados empíricos e teóricos de forma crítica e sistematizada. Este tipo de revisão é especialmente apropriado quando o campo de estudo ainda se encontra em consolidação, como é o caso da Logística 5.0, cuja definição e escopo ainda estão em construção conceitual.

A seleção do Portfólio Bibliográfico (PB) teve como objetivo embasar teoricamente o desenvolvimento do modelo de maturidade IMAL 5.0, por meio de uma revisão integrativa da literatura e da metodologia *ProKnow-C* (Ensslin, L. *et al.* 2010). A busca foi realizada nas bases das *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*, com descritores relacionados à Logística 4.0/5.0, modelos de maturidade e métodos multicritério, resultando inicialmente em 142 artigos. Após aplicação de critérios rigorosos de inclusão e exclusão, 50 artigos compuseram o portfólio final desta tese.

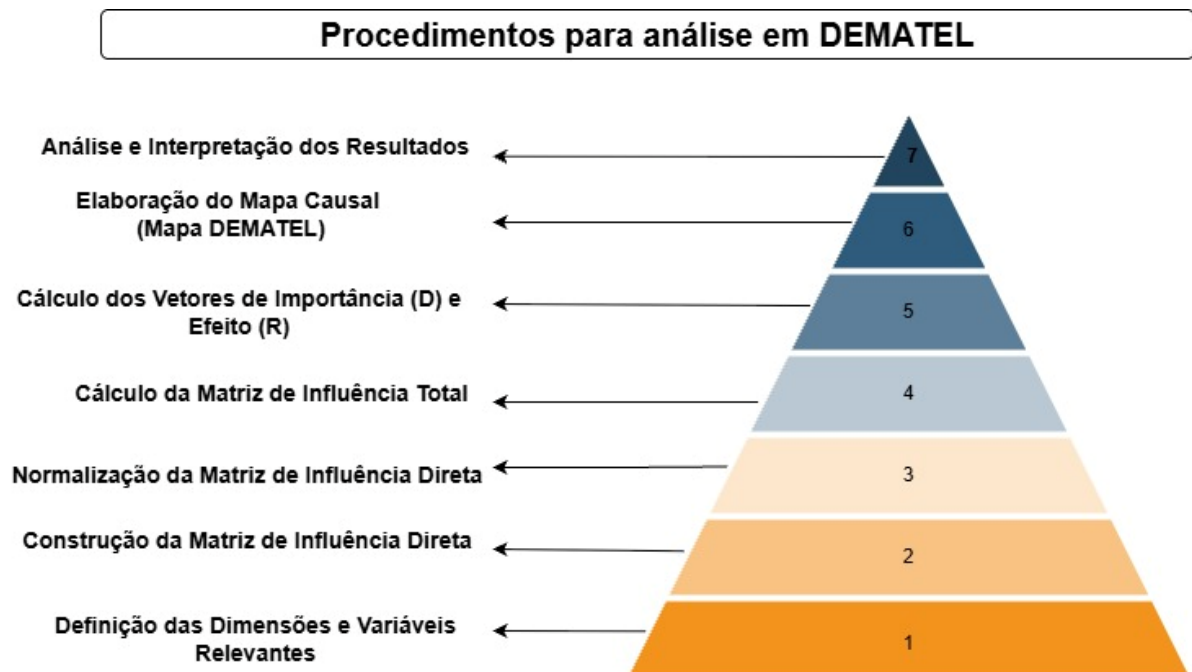
A análise envolveu classificações por conteúdo (revisão, desenvolvimento conceitual, validação) e revelou lacunas críticas na literatura, como a escassez de modelos voltados à logística interna, à centralidade humana e à sustentabilidade. Apenas 36% dos estudos apresentaram validação empírica e a maioria ainda está ancorada na lógica da Indústria 4.0. O portfólio permitiu estruturar as dimensões e critérios do IMAL 5.0, além de orientar a aplicação do método DEMATEL. Assim, a seleção do PB contribuiu significativamente para a densidade teórica e a relevância prática da pesquisa, especialmente no contexto da transformação digital no PIM. Parte dos resultados obtidos na etapa de revisão sistemática, que fundamentou a seleção do PB e contribuiu para a construção do modelo IMAL 5.0, foi previamente publicada no artigo

científico intitulado “Revisão de Modelos de Maturidade para Logística/SCM 4.0: Oportunidades para Aplicação de Tecnologias da Indústria 4.0”, reforçando a relevância e o rigor acadêmico da base conceitual adotada nesta tese conforme também é possível corroborar na seção Apêndice A.

2.3. Procedimento metodológico

A operacionalização desta pesquisa ocorreu em três grandes etapas metodológicas integradas: (i) formulação do modelo conceitual de maturidade logística 5.0, (ii) aplicação do método DEMATEL para análise das relações causais entre os critérios identificados, e (iii) realização de um ensaio em empresas do setor eletroeletrônico do Polo Industrial de Manaus (PIM), com o objetivo de validar e refinar o modelo proposto. Cada uma dessas etapas foi concebida de forma a assegurar o alinhamento entre os objetivos do estudo, a complexidade do fenômeno investigado e as exigências do rigor científico, conforme a figura 2.

Figura 2 - Procedimentos para análise em DEMATEL



Fonte: Autoria Própria (2025).

Foi possível inferir a partir da figura 02, um percurso estruturado em sete etapas sequenciais que orientaram a aplicação do método DEMATEL na identificação de relações causais entre variáveis complexas, como as que compõem o modelo de maturidade IMAL 5.0 proposto nesta tese. A aplicação do método iniciou-se com a definição das dimensões e

variáveis relevantes (etapa 1), oriundas da revisão sistemática da literatura, seguindo-se pela construção e normalização da matriz de influência direta (etapas 2 e 3), procedimento necessário para eliminar distorções e garantir a comparabilidade entre os julgamentos dos especialistas.

Na sequência, procedeu-se ao cálculo da matriz de influência total (etapa 4) e dos vetores de importância (D) e efeito (R) (etapa 5), os quais permitem classificar as variáveis em termos de sua capacidade de influência e sensibilidade ao sistema analisado. A elaboração do mapa causal (etapa 6) resultou em uma representação gráfica das interdependências entre variáveis, permitindo a visualização dos elementos mais críticos do sistema logístico estudado. Por fim, a interpretação dos resultados (etapa 7) subsidiou a priorização estratégica das dimensões com maior impacto na maturidade logística 5.0 no contexto do Polo Industrial de Manaus. Essa abordagem metodológica seguiu as diretrizes propostas por Gabus e Fontela (1972) e foi reforçada por autores contemporâneos como Manafzadeh (2016), Leng, Jiang e Li (2022) e Niemsakul *et al.*, (2025) os quais defendem o uso do DEMATEL como ferramenta para o tratamento de sistemas complexos e interdependentes, especialmente em cenários logísticos orientados por tecnologias emergentes, centralidade humana e sustentabilidade.

Na primeira etapa, fundamentada na revisão integrativa do portfólio bibliográfico (PB), foram identificadas as principais dimensões que compõem a Logística 5.0, as quais foram consolidadas em seis categorias principais: infraestrutura tecnológica, integração digital, sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e desempenho operacional. Essas dimensões foram sistematizadas com base em autores como Yin *et al.* (2022), Romero e Stahre (2021), Monferdini *et al.* (2025) e Ghobakhloo *et al.* (2023), sendo posteriormente desdobradas em critérios analíticos que compõem a estrutura do modelo.

Na segunda etapa, o modelo conceitual foi submetido à análise interrelacional por meio do método DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*), desenvolvida por Gabus e Fontela (1972). Esta técnica multicritério foi escolhida por sua capacidade de mapear relações de causa e efeito entre múltiplas variáveis dentro de um sistema complexo, permitindo identificar quais critérios exercem maior influência (fatores causais) e quais são mais suscetíveis a impactos (fatores de efeito). Essa abordagem foi especialmente relevante em ambientes logísticos industriais, nos quais a interdependência entre fatores é uma constante.

Uma contribuição relevante ao entendimento do DEMATEL no campo da logística veio dos estudos desenvolvidos por Bouzon *et al.* (2021), que aplicaram o método para identificar

barreiras críticas à sustentabilidade e à inovação em cadeias de suprimento. A autora destacou a capacidade do DEMATEL de evidenciar relações causais entre fatores estratégicos, especialmente em contextos industriais complexos e incertos. Em sua abordagem, Bouzon integra a análise dos vetores D+R (influência e dependência) e D-R (papel causal ou resultante) com a definição de prioridades para ações corretivas e preventivas. Essa perspectiva se alinhou à proposta desta tese ao utilizar o DEMATEL como ferramenta de apoio à priorização de fatores críticos no modelo de maturidade logística 5.0, com base em dados coletados de especialistas atuantes no Polo Industrial de Manaus. Assim, a presente pesquisa se ancorou em uma base metodológica sólida e validada por pesquisadores nacionais reconhecidos no uso dessa metodologia.

Embora a literatura especializada no método DEMATEL utilizou predominantemente os termos “influência” e “dependência” para interpretar os vetores D+R e D-R (BOUZON et al., 2021), este trabalho optou por empregar os conceitos de “centralidade” e “relevância” com base em uma leitura ampliada das funções sistêmicas dos fatores analisados. A “centralidade” (ou D+R) foi interpretada como o grau de interação total de um fator com os demais, evidenciando sua participação ativa e passiva nas relações causais. Já a “relevância” (ou D-R) refletiu o papel de um elemento como originador ou receptor de influência, o que se mostra útil para o planejamento de ações estratégicas, especialmente em sistemas logísticos complexos. Essa diferenciação semântica não comprometeu a essência técnica do método, mas buscou enriquecer sua aplicação no contexto da maturidade logística 5.0, alinhando-se a abordagens que enfatizaram a interdependência estrutural dos elementos analisados. Ao adotar essa nomenclatura, a tese visou favorecer interpretações que dialoguem com a prática gerencial no ambiente industrial amazônico, sem perder o rigor metodológico estabelecido por autores como Bouzon *et al* (2021).

A aplicação do DEMATEL foi realizada por meio de um questionário estruturado para investigar o grau de influência de um critério sobre outro. A escala linguística utilizada foi de 0 (zero) a 4 (quatro) onde zero representou “sem influência” e quatro se referiu “influência muito alta”. Os participantes são especialistas atuantes em empresas do PIM, acadêmicos da área de logística e consultores industriais — avaliaram o grau de influência entre cada par de critérios do modelo. Foram selecionadas 3 empresas com 28 especialistas em logística e acadêmicos ligados à área de estudo com base em amostragem intencional, considerando tempo de atuação, conhecimento técnico e vínculo com o setor industrial da Zona Franca de Manaus. Conforme

sugerido por Manafzadeh (2016) e Leng et al. (2022), a amostra atendeu aos requisitos mínimos para robustez dos resultados em métodos multicritério.

A coleta de dados foi conduzida de forma digital, garantindo anonimato e aderência à Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). Após a coleta, os dados foram organizados em matrizes de relação direta, normalizadas, e então transformadas em matrizes de influência total. A partir dessas matrizes, foram extraídos os valores de impacto e suscetibilidade (D+R e D-R), permitindo a construção do diagrama causal. A interpretação dos resultados seguiu os princípios de análise estrutural sistêmica, conforme orientações de Li, Zhang e Jiang (2024) e do pioneirismo de Ensslin et al., (2010).

Com base na análise DEMATEL, foram identificados os critérios mais influentes do sistema de maturidade — como “integração homem-máquina” e “capacidade analítica digital” — e aqueles mais impactados — como “empatia organizacional” e “resiliência operacional”. Esse resultado confirmou a tese de que a Logística 5.0 demanda uma abordagem centrada não apenas na infraestrutura tecnológica, mas também na capacidade de orquestrar as dimensões humanas e sustentáveis de forma integrada (Azarian; Yu, 2022; Romero et al., 2020).

A terceira e última etapa do procedimento metodológico consistiu na aplicação prática do modelo em empresas do setor eletroeletrônico do PIM. A escolha desse setor deve-se à sua representatividade econômica na região, elevado nível de complexidade logística e inserção em cadeias produtivas globais. Foram selecionadas três empresas com base na disponibilidade de dados, perfil tecnológico e interesse institucional em aderir ao estudo. Os dados foram coletados por meio de entrevistas semiestruturadas com gestores logísticos, observação direta e aplicação do instrumento desenvolvido com base no modelo de maturidade validado pelo DEMATEL.

As evidências empíricas obtidas foram trianguladas com os dados secundários e os resultados do método multicritério, permitindo validar a coerência do modelo proposto e identificar pontos críticos a serem aprimorados. A análise dos casos revelou, por exemplo, que embora as empresas apresentem níveis moderados de digitalização, enfrentam desafios significativos na integração de práticas colaborativas e no alinhamento da estratégia logística com valores socioambientais, corroborando os achados de estudiosos como Crespo et al. (2023) e Rashed et al. (2024).

Além disso, os dados empíricos permitiram propor roteiros de evolução estratégica para cada empresa analisada, com recomendações específicas quanto à priorização de investimentos, desenvolvimento de competências e reestruturação de processos internos. Tais roteiros foram

baseados na hierarquia de influência extraída do DEMATEL, fornecendo aos gestores subsídios objetivos para planejar a transição rumo a uma logística mais inteligente, sustentável e centrada no ser humano.

Finalmente, a integração entre as três etapas metodológicas conferiu consistência epistemológica e aplicabilidade prática ao modelo desenvolvido, atendendo aos critérios de validade interna, externa e construtiva. Essa abordagem metodológica não apenas permitiu avaliar o grau de maturidade das empresas estudadas, como também viabilizou a elaboração de uma ferramenta gerencial replicável em outros contextos industriais de características semelhantes, especialmente na América Latina e em países em desenvolvimento, onde a transição para a Logística 5.0 tende a ser mais desafiadora.

2.4. Introdução ao *Grey* DEMATEL

O método *Grey* DEMATEL é uma ferramenta analítica que permite identificar e avaliar as inter-relações complexas entre diversos fatores em sistemas dinâmicos. A sua aplicação é particularmente relevante na transição da Logística 4.0 para a Logística 5.0, onde a integração de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis redefinem processos e estratégias operacionais (John e Singh, 2025).

No contexto desta pesquisa, o *Grey* DEMATEL foi aplicado para mapear e compreender as influências mútuas entre os critérios que compõem o modelo de atualização logística proposta. A análise revelou contribuições inéditas a serem expostas ao decorrer desta seção acerca dos fatores que impulsionam ou restringem a evolução para a Logística 5.0 no contexto global e local. A aplicabilidade do *Grey* DEMATEL permitiu, ainda, identificar fatores causais e resultantes que para este estudo são foram determinantes ao categorizar determinados aspectos que exercem maior influência sobre outros critérios no sistema e os resultantes e/ou agentes que são mais influenciados por outros critérios

A utilização do *Grey* DEMATEL nesta pesquisa pode proporcionar uma compreensão aprofundada das relações de causa e efeito entre os diversos critérios do modelo de atualização logística, pois, essa abordagem permitiu a priorização de intervenções ao identificar os fatores causais para direcionar esforços e recursos para áreas que promovam melhorias significativas no sistema como um todo.

Isso foi possível também ao fato da contribuição da metodologia analítica a qual foi desenvolvida para lidar com problemas de sistemas complexos que são caracterizados pela presença de múltiplas interdependências entre seus componentes (Narula *et al.*, 2021).

Originalmente criado pelo *Battelle Memorial Institute*, o método foi concebido para investigar questões estratégicas em processos de tomada de decisão, sendo amplamente adotado em áreas como engenharia, logística, gestão estratégica e sustentabilidade (Fontana *et al.*, 2021). Estudos desses autores afirmam que a principal contribuição do *Grey DEMATEL* foi a sua capacidade de estruturar problemas complexos, identificando relações de causa e efeito que não seriam evidentes por métodos tradicionais.

No contexto da logística, particularmente na transição da Logística 4.0 para 5.0, o *Grey DEMATEL* desempenhou um papel estratégico ao preencher lacunas na literatura e na prática. A Logística 5.0 incorporou não apenas tecnologias emergentes, como inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT), mas também práticas que integrativas como a sustentabilidade ambiental e o bem-estar humano (*Mittelstand Digital*, 2019). Essas dimensões ampliaram a complexidade das interações sistêmicas, exigindo que ajudem na priorização de intervenções e na alocação estratégica de recursos. Segundo Niemsakul *et al.*, (2025), o *Grey DEMATEL* é particularmente eficaz nesse cenário, pois permitiu mapear a dinâmica dos sistemas logísticos, destacando os fatores que impulsionam ou restringem sua evolução.

A aplicação do *Grey DEMATEL* nesta tese fundamentou-se por adotar uma abordagem estruturada, que combinou coleta de dados qualitativos com análises quantitativas. Inicialmente, estudos de (Leng *et al.*, 2022) identificaram e avaliaram os critérios relevantes para o sistema em estudo, que representaram a intensidade das influências entre os critérios. Desta feita, seguindo esse raciocínio, os dados desta pesquisa foram organizados em uma matriz de influência, a partir da qual se calcularam os fatores causais e resultantes. De acordo com Kayikci *et al.* (2022), esse tipo de abordagem permitiu um entendimento holístico do sistema, premissa esta relevante para a formulação de estratégias adaptativas em ambientes sonoros como o da logística moderna.

Além disso, o *Grey DEMATEL* se diferenciou por sua capacidade de gerar contribuições práticas e diretamente aplicáveis. Ao contrário de métodos que apenas identificam correlações, o *Grey DEMATEL* estabeleceu relações causais explícitas, permitindo que os gestores priorizassem fatores de acordo com sua relevância sistêmica. Por exemplo, no contexto da Logística 5.0, fatores como tecnologia tecnológica e capacitação de recursos humanos foram destacados como alavancas estratégicas, orientando a implementação de iniciativas de elevado impacto (Ivanov, 2023). Desta forma, a ferramenta não só contribuiu para a compreensão teórica dos sistemas logísticos, mas também ofereceu suporte direto à tomada de decisão e à formulação de políticas.

Com isso, o *Grey DEMATEL* surgiu como uma metodologia indispensável para a análise de maturidade logística deste estudo voltado ao PIM, fornecendo também uma estrutura que combinou rigor científico com aplicabilidade prática. Essa dualidade tornou a ferramenta uma escolha ideal para estudos que buscam tanto contribuir para a literatura acadêmica quanto oferecer soluções pragmáticas para os desafios enfrentados por organizações no contexto da Indústria 5.0 na ZFM.

A abordagem multicritério *Grey DEMATEL* adotado como técnica principal de análise, foi indicada por sua aptidão em mapear relações de causa e efeito entre variáveis interdependentes, proporcionando uma visão sistêmica e hierarquizada dos critérios envolvidos (Manafzadeh, 2016). Essa escolha metodológica foi coerente com estudos anteriores na área de engenharia de produção, logística e inovação, onde a compreensão das interações entre elementos estratégicos é essencial (Li; Zhang e Jiang, 2024).

O método *Grey DEMATEL* possibilitou, portanto, a estruturação de uma rede de influências entre as dimensões da maturidade logística, facilitando a priorização de ações por parte dos gestores. O uso desse método na pesquisa foi especialmente eficaz para lidar com a complexidade das relações entre tecnologia, capital humano e sustentabilidade ambiental — elementos centrais da Logística 5.0 (Romero *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2022).

Além da aplicação do método DEMATEL clássico, a abordagem *Grey-DEMATEL* complementou a análise, e tem com o objetivo de lidar com as incertezas subjetivas e imprecisões linguísticas presentes nas avaliações realizadas pelos especialistas durante o processo de validação do modelo. O método *Grey-DEMATEL*, proposto por Niemsakul *et al.*, (2025), combinou a teoria dos conjuntos cinzentos (*Grey Systems Theory*) com a matriz DEMATEL tradicional, permitindo tratar julgamentos vagos por meio de números cinzentos (*grey numbers*), o que aprimorou os resultados em contextos de tomada de decisão com alta complexidade e variabilidade cognitiva.

Por fim, a combinação entre revisão integrativa, abordagem multicritério e ensaios conferiu validade metodológica ao trabalho, ao articular teoria, técnica e prática de maneira coesa e integrada. Essa triangulação metodológica esteve de acordo com as boas práticas da pesquisa aplicada em engenharia, conforme defendido por Robson *et al.*, (2022), além de legitimar a proposta de um modelo original, replicável e aderente às necessidades do setor produtivo amazônico. Além disso, a integração dessas abordagens permitiu compreender de forma mais abrangente os fatores críticos que influenciam a maturidade logística, favorecendo

análises contextuais mais ricas e recomendações aplicáveis que respondam à complexidade dos ambientes industriais em transformação.

2.5. Análise Comparativa entre o DEMATEL e outras abordagens multicritério

Após explorar como o DEMATEL contribuiu para o delineamento de políticas e estratégias logísticas orientadas por evidências, tornou-se relevante situá-lo em relação a outras abordagens de apoio à decisão multicritério. A comparação entre métodos foi fundamental para evidenciar as vantagens específicas da ferramenta adotada, especialmente em contextos caracterizados por alta complexidade, como o das cadeias logísticas da Indústria 5.0. Assim, a seguir apresentou-se uma análise comparativa entre o DEMATEL e outras metodologias consagradas, destacando suas complementaridades, limitações e aplicabilidades estratégicas.

O DEMATEL destacou-se como uma ferramenta eficaz para analisar sistemas complexos com forte interdependência entre critérios, como ocorre nas cadeias logísticas da Indústria 5.0. Segundo Pierin Ramos e Rocha (2020), sua principal vantagem residiu na capacidade de identificar relações de causa e efeito entre variáveis, proporcionando uma visualização clara das interconexões. Em contraste, o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) assumiu independência entre critérios e foi mais indicado para contextos com estruturas hierárquicas lineares. A figura 3 ilustrou essas distinções, evidenciando que, enquanto o AHP é mais simples e adequado para decisões com critérios independentes, o DEMATEL ofereceu maior profundidade analítica em cenários com múltiplas influências cruzadas.

Figura 3 - DEMATEL vs. Processo de Hierarquia Analítica (AHP)

PRINCIPAIS DIFERENÇAS	PONTOS FORTES DEMATEL	PONTOS FORTES DO AHP
- Foco na interdependência: a DEMATEL aborda explicitamente as interdependências entre fatores, enquanto o AHP assume a independência entre os critérios. - Quantificação de influência: a DEMATEL calcula influências diretas e indiretas, enquanto o AHP prioriza fatores com base em comparações pareadas, sem explorar efeitos sistêmicos.	- Ideal para sistemas onde existem ciclos de feedback ou influências mútuas, como redes de cadeia de suprimentos ou ecossistemas tecnológicos. - Visualiza relacionamentos por meio de gráficos, facilitando a interpretação de interdependências	- Simples de implementar e interpretar, especialmente para problemas de tomada de decisão linear com hierarquias claras. - Mais adequado para classificar prioridades quando os critérios são independentes

Fonte: Pierin Ramos e Rocha (2020). Adaptação: Autora (2025).

De acordo com a figura 4, a escolha entre os métodos considerou a complexidade do sistema analisado e o grau de interdependência entre os critérios. Foi possível inferir que há uma comparação entre as metodologias DEMATEL e AHP, destacando suas principais diferenças e pontos fortes no apoio à tomada de decisão. O AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi amplamente utilizado para problemas com critérios independentes e estrutura hierárquica clara, sendo ideal para decisões como a seleção de um provedor logístico com base em atributos específicos, como custo, confiabilidade e tempo de entrega. Já o DEMATEL ofereceu vantagens em cenários mais complexos, nos quais há interdependência entre fatores, como ocorre nas cadeias de suprimentos da logística 5.0. Essa metodologia permitiu identificar relações causais e visualizar os efeitos diretos e indiretos entre os critérios, por meio de representações gráficas. Ao aplicar o DEMATEL, gestores puderam compreender como uma variável afeta todo o sistema, o que contribuiu para decisões mais sistêmicas e estratégicas. Assim, cada método possui aplicabilidade específica conforme o grau de complexidade e interdependência do problema analisado.

Outro destaque deste estudo foi a comparação entre DEMATEL e o Processo de Rede Analítica (ANP) que destacou abordagens complementares na análise de sistemas complexos conforme a figura 4. O ANP, como extensão do AHP, incorporou interdependências por meio de uma estrutura em rede de critérios e subcritérios, utilizando supermatrizes para modelar feedbacks entre os níveis hierárquicos.

Já o DEMATEL focou na quantificação e visualização direta das relações de causa e efeito entre os fatores, facilitando a interpretação sistêmica por meio de mapas de impacto. Em contextos logísticos, o DEMATEL foi especialmente útil para representar interações entre dimensões estratégicas, como tecnologia, sustentabilidade e capital humano, fornecendo suporte ágil à priorização de intervenções (Stoffers, Karla e Kaufmann, 2021). Por outro lado, o ANP foi mais apropriado quando há uma estrutura complexa e hierarquizada de decisões, permitindo análise mais detalhada em diferentes níveis. Assim, embora ambos lidem com interdependências, o DEMATEL foi preferido para diagnósticos estratégicos rápidos, enquanto o ANP atendeu melhor à modelagem estruturada e granular de sistemas logísticos complexos.

A comparação entre DEMATEL e o Processo de Rede Analítica (ANP) evidenciou diferenças metodológicas relevantes para a análise da maturidade logística. Enquanto o DEMATEL destacou-se por sua capacidade de mapear influências sistêmicas entre fatores, permitindo a identificação de relações causais diretas e indiretas em sistemas complexos, o ANP

aprofunda-se nas interações hierárquicas, modelando dependências entre critérios e subcritérios por meio de supermatrizes.

Figura 4 - DEMATEL vs. Processo de Rede Analítica (ANP)

PRINCIPAIS DIFERENÇAS	PONTOS FORTES DEMATEL	PONTOS FORTES DO ANP
• O ANP é uma extensão do AHP que incorpora interdependências, semelhante ao DEMATEL, mas depende de uma estrutura de rede de critérios e subcritérios. • O DEMATEL se concentra mais em quantificar e visualizar relacionamentos, enquanto o ANP usa supermatrizes para modelar interações.	• Fornece uma visualização mais clara das relações de causa e efeito usando mapas de relação de impacto. • Mais fácil de interpretar e aplicar para sistemas com um número moderado de critérios.	• Mais adequado para problemas com critérios hierárquicos e em rede, onde o <i>feedback</i> entre os níveis é importante. • Permite uma análise mais granular de critérios e subcritérios.

Fonte: Adaptação de Stoffers, Karla e Kaufmann (2021). Adaptação: Autora (2025).

Essa distinção foi imprescindível em estudos de maturidade logística, onde o DEMATEL pode ser utilizado para revelar quais fatores exercem maior influência sobre o sistema como um todo — como tecnologias emergentes ou práticas sustentáveis —, orientando decisões estratégicas. Por outro lado, o ANP foi especialmente eficaz quando se deseja desmembrar essas dimensões em níveis mais detalhados, como competências operacionais, políticas internas e indicadores específicos de desempenho. Assim, ao analisar a maturidade dos sistemas logísticos, a aplicação combinada ou complementar dessas abordagens pode enriquecer substancialmente o diagnóstico e a formulação de estratégias.

Em relação ao DEMATEL vs. à Modelagem de equações estruturais (SEM), a figura 5, a modelagem por equações estruturais (SEM) e o DEMATEL foram metodologias utilizadas para compreender relações entre variáveis em sistemas complexos, mas com abordagens distintas (Fukas *et al.*, 2021). O SEM, de natureza estatística, foi ideal para confirmar modelos teóricos com base em grandes volumes de dados, permitindo validar relações hipotéticas entre fatores por meio de análises exploratórias e confirmatórias. Já o DEMATEL se destacou por

sua flexibilidade em contextos em que há limitação de dados e se valoriza a expertise qualitativa de especialistas, como ocorreu frequentemente em análises de maturidade logística. Em vez de buscar correlações, o DEMATEL identificou relações de causa e efeito, fornecendo uma visualização clara dos impactos entre os critérios.

Por isso, ao analisar a maturidade dos sistemas logísticos, o SEM pode ser empregado para validar estatisticamente um modelo teórico, enquanto o DEMATEL foi mais apropriado para priorizar intervenções com base em influências sistêmicas percebidas, sendo especialmente útil em ambientes industriais como o PIM. O DEMATEL focou na visualização de relações de causa e efeito com fácil aplicação.

Figura 5 - DEMATEL vs. à SEM

PRINCIPAIS DIFERENÇAS	PONTOS FORTES DEMATEL	PONTOS FORTES DO SEM
• O ANP é uma extensão do AHP que incorpora interdependências, semelhante ao DEMATEL, mas depende de uma estrutura de rede critérios e subcritérios. • Modela interações.	• Fornece uma visualização mais clara das relações de causa e efeito usando mapas de relação de impacto. • Mais fácil de interpretar e aplicar para sistemas com um número moderado de critérios.	• Mais adequado para problemas com critérios hierárquicos e em rede, onde o feedback entre os níveis é importante. • Permite uma análise mais granular de critérios e subcritérios.

Fonte: Adaptação de Fukas *et al.*, 2021. Adaptação: Autora (2025).

Na figura 5 houve a comparação entre DEMATEL e Modelagem de Equações Estruturais (SEM) o qual revelou abordagens complementares para a análise de sistemas logísticos complexos. Enquanto o SEM foi amplamente utilizado para validar estatisticamente hipóteses sobre relações entre variáveis, exigindo grandes conjuntos de dados e suposições rigorosas, o DEMATEL se destacou por sua capacidade de capturar percepções qualitativas e transformar o conhecimento de especialistas em mapas estruturados de causa e efeito Sony e Naik (2020). Em contextos de resiliência da cadeia de suprimentos, por exemplo, o SEM pode confirmar relações hipotéticas entre fatores operacionais como lead time, capacidade de resposta e flexibilidade, fornecendo evidências empíricas para um modelo teórico. Já o DEMATEL permitiu priorizar intervenções estratégicas ao identificar quais fatores exercem

maior influência sobre os demais, com base na visão sistêmica de especialistas. Essa característica foi especialmente útil quando os dados estatísticos são limitados, mas há conhecimento prático acumulado no sistema. Dando continuidade à análise comparativa entre o DEMATEL e outras abordagens multicritério, foi importante considerar os métodos baseados em lógica Fuzzy conforme a figura 6. Esse método vem ganhando destaque no tratamento de incertezas e subjetividades presentes nos processos decisórios, especialmente em contextos em que os dados são imprecisos ou ambíguos (Limat, 2022).

Figura 6 - DEMATEL vs. à Fuzzy

PRINCIPAIS DIFERENÇAS	PONTOS FORTES DEMATEL	PONTOS FORTES DO FUZZY
- Os métodos fuzzy se concentram no gerenciamento da incerteza e da imprecisão na tomada de decisões usando lógica fuzzy. - O DEMATEL quantifica relacionamentos, mas não lida explicitamente com incertezas, a menos que seja combinado com extensões fuzzy (por exemplo, Fuzzy DEMATEL).	- Interpretação direta de relacionamentos e causalidade. - Mais simples de implementar para sistemas bem definidos com critérios claros.	- Mais adequado para problemas com dados ambíguos ou imprecisos, como satisfação do cliente ou tendências de mercado. - Captura o "grau" de verdade em vez de relacionamentos binários.

Fonte: Adaptação de Limat, 2022. Adaptação: Autora (2025).

Os métodos Fuzzy foram amplamente utilizados em problemas de decisão onde a imprecisão dos dados foi uma variável crítica — como na avaliação da satisfação do cliente ou na previsão de tendências de mercado. Diferentemente do DEMATEL, que quantificou relações de causa e efeito com base em julgamentos claros e critérios definidos, a lógica Fuzzy lidou diretamente com a incerteza e a ambiguidade, atribuindo graus de pertencimento às variáveis em vez de relações binárias. Isso permitiu maior flexibilidade em cenários onde não há consenso absoluto entre os especialistas ou onde os dados disponíveis foram qualitativos e subjetivos. No entanto, o DEMATEL apresentou vantagens em sistemas bem estruturados, nos quais se desejou visualizar com clareza as interdependências e priorizar intervenções. Quando necessário, as metodologias puderam ser combinadas — como no Fuzzy DEMATEL —, unindo

a densidade causal do DEMATEL com a capacidade Fuzzy de tratar incertezas, o que ampliou sua aplicabilidade em estudos logísticos e estratégicos.

A comparação entre os métodos fuzzy e o DEMATEL revelou abordagens complementares na análise de sistemas logísticos, especialmente quando se trata de avaliar variáveis subjetivas. Os métodos Fuzzy foram particularmente eficazes em contextos em que os dados são ambíguos ou qualitativos, como na mensuração da satisfação do cliente, preferências de mercado ou percepção de valor. Ao utilizar lógica Fuzzy, é possível capturar nuances de julgamento, atribuindo graus de pertencimento que refletem a incerteza natural desses cenários. Já o DEMATEL se destacou por sua capacidade de quantificar e visualizar relações de causa e efeito entre fatores estratégicos e operacionais, sendo útil para entender como decisões logísticas — como mudanças na roteirização, tempo de entrega ou automação de processos — impactavam a experiência do cliente. Por exemplo, enquanto métodos Fuzzy analisou a percepção de satisfação, o DEMATEL avaliou os efeitos sistêmicos dessas decisões sobre essa percepção. Juntas, essas metodologias ofereceram uma visão mais abrangente e integrada da cadeia de valor logística.

Além das metodologias baseadas em lógica Fuzzy, outra abordagem relevante na análise de sistemas complexos é a Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics – SD*), especialmente útil quando o objetivo foi compreender a evolução de comportamentos ao longo do tempo e os efeitos acumulados de decisões interdependentes.

De acordo com Singh *et al.*, (2022), a Dinâmica de Sistemas (DS) é uma metodologia centrada na modelagem de comportamento dinâmico, permitindo simular como variáveis interagem e evoluem ao longo do tempo. Essa abordagem foi especialmente eficaz para analisar cenários de longo prazo, ciclos de feedback e impactos de políticas em sistemas logísticos. Por outro lado, o DEMATEL se destacou por oferecer uma análise estrutural estática, útil quando se deseja mapear relações de causa e efeito em um momento específico, sem necessidade de simulações temporais complexas. Em contextos logísticos, por exemplo, o DS pode ser aplicado para prever os efeitos cumulativos de uma política de redução de estoques sobre a resiliência da cadeia, enquanto o DEMATEL pode identificar, de forma imediata, quais fatores operacionais mais influenciam essa resiliência. Assim, enquanto o SD forneceu uma visão evolutiva e preditiva, o DEMATEL abordou diagnósticos acionáveis em curto prazo, sendo mais ágil para decisões estratégicas imediatas em ambientes industriais como o do PIM.

Em relação à comparação entre DEMATEL e Dinâmica de Sistemas (DS) evidenciou abordagens com finalidades distintas, mas complementares na análise logística. O DEMATEL foi eficaz para mapear, de forma estática e objetiva, como determinados fatores — como a integração tecnológica — exerceram influência direta sobre outros, como a sustentabilidade na cadeia logística (Waqas *et al.*, 2023). Essa visualização das relações de causa e efeito permitiu decisões estratégicas mais rápidas e focalizadas. Já a Dinâmica de Sistemas se destacou por sua capacidade de simular comportamentos ao longo do tempo, considerando variáveis interdependentes, ciclos de feedback e efeitos cumulativos.

Por exemplo, ao se avaliar o impacto de políticas públicas sobre emissões de carbono na logística, a SD permitiu observar como essas mudanças evoluem, seus efeitos de médio e longo prazo e os riscos associados. Assim, enquanto o DEMATEL respondeu à pergunta “o que influencia o quê?”, a SD ampliou a análise para “como isso evolui com o tempo?”, permitindo projeções e planejamento de cenários futuros. A figura 7 ilustra as principais diferenças e pontos fortes e compara DEMATEL e Dinâmica de Sistemas (DS). O DEMATEL foi ideal para análises estáticas, mapeando relações sem simulações complexas. Já o DS focou em simulações dinâmicas ao longo do tempo, capturando ciclos de feedback e mudanças sistêmicas. Enquanto DEMATEL priorizou relações pontuais, o DS modelou evoluções temporais, sendo útil para políticas e planejamento estratégico de longo prazo.

Figura 7 - DEMATEL vs. Dinâmica de Sistemas (DS)

PRINCIPAIS DIFERENÇAS	PONTOS FORTES DEMATEL	PONTOS FORTES DO DS
O SD se concentra na modelagem e simulação de comportamento dinâmico ao longo do tempo, enfatizando ciclos de feedback e mudanças dependentes do tempo. DEMATEL identifica e quantifica relacionamentos, mas não inclui dinâmicas temporais.	- Ideal para análises estáticas onde o objetivo é mapear relacionamento em um ponto específico no tempo. - Fornecer contribuições acionáveis sem exigir simulações complexas.	- Captura como as mudanças evoluem ao longo do tempo, fornecendo colaborações sobre consequências de longo prazo e ciclos de feedback. - Útil para modelar mudanças ou cenários de políticas.

Deste modo, para sintetizar as principais características das metodologias analisadas, o quadro 03 evidenciou a comparação resumida para uma visão integrada dos focos, níveis de interdependência, presença de dinâmica temporal, complexidade de aplicação e melhores casos de uso de cada abordagem. Essa consolidação permitiu uma compreensão comparativa estratégica, reforçando a aplicabilidade diferenciada de cada método em função do tipo de problema a ser enfrentado. Nesse cenário, o DEMATEL se evidenciou como uma ferramenta especialmente poderosa para sistemas que exigem a identificação e a priorização de relações de causa e efeito entre múltiplos fatores interdependentes, sem a exigência de grandes volumes de dados ou simulações temporais.

Ao lado de métodos como AHP, ANP, SEM, Lógica Fuzzy e Dinâmica de Sistemas, o DEMATEL ocupou uma posição estratégica por sua adaptabilidade e capacidade de integração. A seguir, aprofundou-se a contribuição dessa metodologia para a construção do modelo proposto nesta tese: o IMAL 5.0. O quadro 03 ainda comparou métodos multicritério quanto a foco, interdependência, dinâmica temporal e complexidade. DEMATEL destacou-se por mapear relações causais moderadas, ideal para sistemas interdependentes sem necessidade de simulação temporal.

A análise comparativa entre o DEMATEL e outras abordagens multicritério, como AHP, ANP, SEM, lógica Fuzzy e Dinâmica de Sistemas, evidenciou a versatilidade e a relevância do DEMATEL em cenários logísticos marcados por elevada complexidade e interdependência entre fatores. Ao contrário de métodos que assumem independência entre critérios ou que requerem grandes volumes de dados para validação estatística, a força do DEMATEL residiu na sua capacidade de traduzir percepções qualitativas de especialistas em estruturas quantitativas de causa e efeito, permitindo visualizar e priorizar as interações sistêmicas de forma clara e estratégica.

Além de sua aplicabilidade em sistemas complexos, o DEMATEL destacou-se por sua flexibilidade metodológica e pela clareza na representação de relações causais, o que o tornou valioso para contextos logísticos onde múltiplos critérios interagem de forma não linear conforme o quadro 3. Essa capacidade de evidenciar padrões de influência direta e indireta facilitou a construção de estratégias adaptativas, especialmente em ambientes industriais dinâmicos. A seguir, apresentou-se um quadro comparativo entre métodos multicritério comumente utilizados em estudos logísticos, permitindo visualizar as principais diferenças

conceituais e operacionais entre essas abordagens e contextualizar a escolha do DEMATEL nesta pesquisa.

Quadro 3 - Comparativo entre DEMATEL e métodos multicritério de apoio à decisão

MÉTODO	FOCO	INTERDEPENDÊNCIA	DINÂMICA TEMPORAL	COMPLEXIDADE	MELHOR CASO DE USO
DEMATEL	Relações de causa e efeito	Sim	Não	Moderado	Sistemas com interdependências claras
AHP	Tomada de decisão hierárquica	Não	Não	Baixo	Priorização de critérios independentes
ANP	Análise de critérios em rede	Sim	Não	Alto	Sistemas complexos com redes hierárquicas
SEM	Teste de relacionamento estatístico	Não	Não	Alto	Validação de relações hipotéticas
FUZZY	Lidando com a imprecisão	Não	Não	Moderado	Problemas com dados incertos ou subjetivos
DINAMICA DE SISTEMAS (DS)	Modelagem de <i>feedback</i> dinâmico	Sim	Sim	Alto	Análise de política ou cenário de longo prazo

Fonte: Autoria Própria (2025).

Essa característica o tornou especialmente eficaz na Logística 5.0, onde coexistem elementos tecnológicos, humanos e ambientais, todos altamente interconectados. Em comparação com métodos como a lógica Fuzzy, que lidou com a imprecisão de julgamentos, ou com a Dinâmica de Sistemas, que simulou cenários ao longo do tempo, o DEMATEL ofereceu uma resposta direta à necessidade de decisões estruturadas, com foco no curto e médio prazo. Além disso, sua integração com outras metodologias, como Fuzzy DEMATEL ou SEM-DEMATEL, ampliou seu escopo e precisão, tornando-o aplicável em contextos nos quais se exige tanto profundidade quanto adaptabilidade. No contexto desta pesquisa, o DEMATEL provou ser mais do que uma ferramenta analítica — foi um alicerce metodológico para a construção do modelo de maturidade IMAL 5.0, ao oferecer subsídios para a priorização de fatores críticos e para a proposição de estratégias alinhadas aos desafios contemporâneos da logística industrial. Assim, ao encerrar esta seção, reforçou-se que o DEMATEL não apenas se

compara de forma vantajosa a outras abordagens, mas se consolidou como a escolha metodológica mais aderente às exigências do Polo Industrial de Manaus e aos objetivos desta tese. Com a estrutura do índice validada e ponderada, o capítulo subsequente tratou da aplicação prática do IMAL 5.0 em empresas do Polo Industrial de Manaus. O ensaio permitiu avaliar o desempenho logístico sob a ótica do modelo proposto, identificando os níveis de maturidade e os fatores críticos que influenciam sua evolução.

É possível ainda inferir que o quadro 06 forneceu uma comparação entre diferentes métodos multicritério comumente utilizados em estudos de decisão e avaliação sistêmica, destacando os focos analíticos, presença de interdependência, dinâmica temporal, complexidade e melhores casos de uso. O método DEMATEL se sobressaiu como uma ferramenta intermediária em termos de complexidade, mas extremamente eficaz na identificação de relações de causa e efeito entre fatores interdependentes. Seu uso foi indicado para sistemas com alto grau de interconexão, como é o caso da logística 5.0. Por outro lado, o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) foi mais adequado para situações com critérios independentes e apresenta baixa complexidade, sendo útil para decisões hierárquicas simples.

A PNA (Processo de Redes Analíticas) e o SEM (Modelagem de Equações Estruturais) são métodos mais complexos, ideais para lidar com sistemas com estruturas hierárquicas em rede e para testar hipóteses estatísticas, respectivamente. O método Difuso foi útil em contextos com dados imprecisos ou subjetivos. Já a Dinâmica de Sistemas se destacou pela sua capacidade de modelar feedbacks e mudanças ao longo do tempo, sendo valiosa para cenários de políticas públicas ou projeções de longo prazo.

Diante da análise comparativa dos métodos multicritério e da fundamentação que sustentou a escolha do DEMATEL como abordagem central desta pesquisa, conclui-se que sua aplicação não apenas dialoga com os desafios analíticos da Logística 5.0, mas também ofereceu uma estrutura robusta para a priorização de fatores críticos em sistemas complexos e interdependentes. Com a base conceitual e metodológica consolidada, o próximo capítulo apresentou os resultados empíricos obtidos com a aplicação do IMAL 5.0 em empresas do Polo Industrial de Manaus, seguidos da análise crítica e discussão interpretativa à luz da literatura científica e das contribuições práticas da pesquisa.

2.6. Aplicação do DEMATEL na Logística

Diante das evidências apresentadas, o DEMATEL revelou-se não apenas eficaz na identificação de relações causais, mas também fundamental para a priorização de critérios críticos à maturidade logística. Esse conceito técnico justificou sua adoção neste estudo como ferramenta central para estruturar as interdependências sistêmicas no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM), especialmente frente às demandas da Logística 5.0. A seguir, detalhou-se a aplicação prática do DEMATEL no domínio da logística, com foco na operacionalização dos dados obtidos, na construção da matriz de influência e nos desdobramentos analíticos que sustentaram as decisões estratégicas voltadas à transição para modelos logísticos mais sustentáveis, resilientes e centrados no ser humano.

Para He *et al.*, (2024), o DEMATEL desempenha um papel fundamental no domínio da logística, particularmente ao abordar as complexidades dos sistemas modernos de cadeia de suprimentos. Sua aplicação é imprescindível para entender as interdependências entre vários fatores logísticos e para fornecer uma abordagem estruturada para a tomada de decisões em ambientes dinâmicos e complexos.

Estudos de Osmanoglu *et al.*, (2020) apontam que se trata de uma ferramenta essencial para analisar sistemas logísticos complexos. Sua aplicação permite identificar e mapear as relações de influência entre fatores críticos, auxiliando na tomada de decisões estratégicas em ambientes dinâmicos e interconectados. Provin *et al.*, (2021) afirmam que no contexto logístico, o DEMATEL é particularmente útil para abordar os desafios de tecnologia tecnológica, sustentabilidade e eficiência operacional, que são elementos centrais na transição da Logística 4.0 para logística 5.0. Nessa mesma linha de pensamento, Hein-Pensel *et al.*, (2023) destacam que as relações de causa e efeito entre os fatores logísticos, o DEMATEL fornece um modelo plausível para priorizar intervenções e alocar recursos de forma estratégica.

Quanto à identificação de fatores críticos e causais, reforça-se de acordo com Gupta *et al.*, (2023) que uma das principais contribuições do DEMATEL é sua capacidade de identificar os fatores que exercem maior influência (fatores causais) e aqueles que são mais impactados (fatores resultantes) no sistema logístico. Por exemplo, em estudos que exploram a evolução da logística, fatores como adoção de tecnologias emergentes (IoT, inteligência artificial, blockchain) apareceram frequentemente como causais, uma vez que impulsionam melhorias em eficiência, integração e resiliência. Por outro lado, fatores como sustentabilidade ambiental e satisfação do cliente tendem a ser resultantes, refletindo o impacto de melhorias sistêmicas

promovidas por outros elementos (Gerlitz, 2015). Essa distinção se fez necessária para orientar os gestores na priorização de esforços, garantindo que as intervenções sejam direcionadas para áreas com maior potencial de alavancagem estratégica.

E por fim para efeitos de explicação dos benefícios práticos e estratégicos advindos do DEMATEL para a logística, pois, além de mapear relações complexas, Caggiano *et al.*, (2023) apontam que auxilia na elaboração de estratégias de longo prazo. Nas cadeias de suprimentos modernas, a interconexão entre fornecedores, transportadores e consumidores gera desafios significativos, como riscos de interrupção, variabilidade de demanda e pressão por práticas sustentáveis. Para Caiado *et al.*, (2021), aplicação do DEMATEL nesse contexto permitiu identificar pontos de fragilidade e propor soluções integradas que minimizem riscos e maximizem eficiência. Por exemplo, ao identificar que a integração digital tem uma influência direta sobre a resiliência logística, os gestores podem priorizar investimentos em sistemas de monitoramento em tempo real e análises preditivas, melhorando a resposta a eventos disruptivos. Em contexto industrial, como as empresas localizadas na cidade de Manaus, o DEMATEL não apenas aprimorou a compreensão teórica das interações sistêmicas, mas também oferece percepções práticas para transformar desafios logísticos em oportunidades estratégicas, ainda mais em uma cidade que apresenta as mais diversas vulnerabilidades de logística (Rocha, 2024).

Desta feita, a ferramenta se posiciona como um elemento indispensável na gestão logística contemporânea, especialmente em um cenário onde a transição para a Logística 5.0 exige soluções inovadoras e fundamentadas. Ao se inscreverem no DEMATEL, as organizações podem alcançar maior eficiência, sustentabilidade e competitividade em suas operações (Arora *et al.*, 2022).

CAPÍTULO III. REVISÃO DA LITERATURA

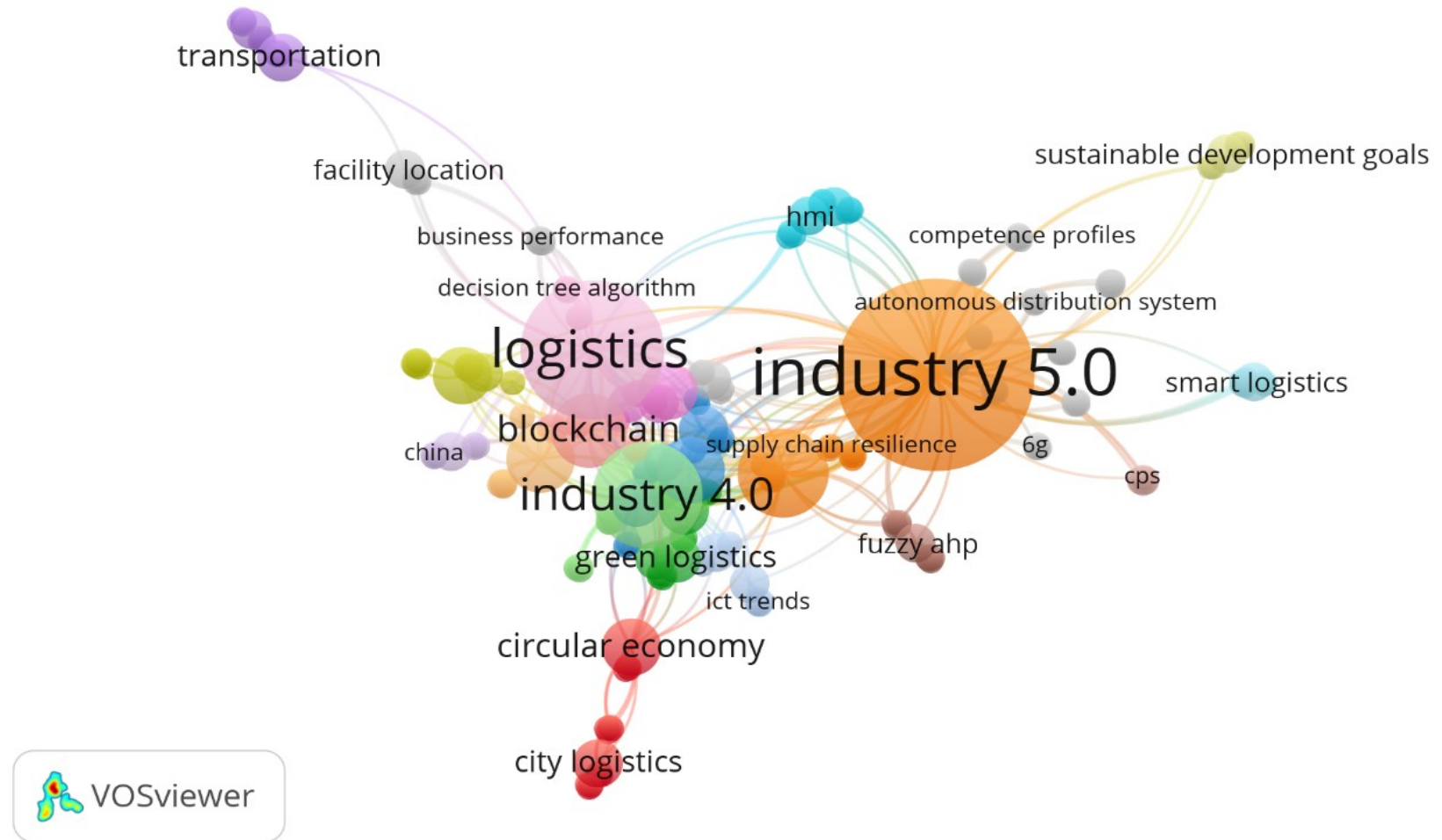
A revisão da literatura buscou contemplar a diversidade de fenômenos inerentes da pesquisa a ser desenvolvida. Dessa forma, os temas relacionados ao objeto de estudo, as categorias analíticas e aos procedimentos metodológicos utilizados foram apresentados conforme se propõe esta tese.

A fim de reforçar a análise qualitativa da literatura, utilizou-se o software *VOSviewer* para realizar a análise de concorrência de palavras-chave nos artigos selecionados na etapa de revisão sistemática. Para Ali Bukar *et al.*, (2023), com o avanço das tecnologias de informação e a crescente complexidade dos dados científicos disponíveis, tornou-se essencial adotar ferramentas que auxiliem na organização, interpretação e visualização de grandes volumes de informações.

Assim, a presente pesquisa incorporou o uso do *VOSviewer*, um *software* de código aberto amplamente utilizado para análises bibliométricas e mapeamento de redes científicas, com o objetivo de estruturar e interpretar os campos conceituais relacionados à logística 5.0 e aos modelos de maturidade. Para Donthu *et al.*, (2022), o *VOSviewer* ainda ofereceu funcionalidades completas de análise textual, sendo capaz de lidar com dados provenientes de diversas fontes, com diferentes formatos e em grande escala, gerando mapas visuais claros e interativos a partir da concorrência de termos, autores ou palavras-chave.

A utilização do *VOSviewer* nesta pesquisa foi essencial para identificar clusters conceituais e orientar a definição das dimensões do modelo IMAL 5.0. Sua aplicação ofereceu suporte técnico à revisão sistemática, permitindo mapear tendências e lacunas da literatura com maior precisão. Essa ferramenta também fortaleceu o alinhamento entre os fundamentos teóricos e os objetivos propostos, contribuindo para a consistência metodológica da investigação. Conforme Van Eck e Nees Jan (2019), o *VOSviewer* potencializa a qualidade das análises científicas. A figura 8 ilustrou visualmente essas conexões, destacando temas centrais como *Industry 5.0*, *Blockchain*, *Circular Economy* e *Supply Chain Resilience*.

Figura 8 - Mapa de co-ocorrência de termos relacionados à logística 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

3.1. Logística

Dada a complexidade e a evolução da logística enquanto área estratégica, tornou-se essencial compreender os desdobramentos tecnológicos que influenciaram sua transformação. Nesse sentido, a seguir foi abordada a Logística 4.0, conceito que representou uma nova etapa impulsionada pelas inovações digitais e pelas exigências de integração em tempo real.

A Logística é conceituada de diversas formas e comumente aceita pela comunidade acadêmica e empresarial. O *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP) define a logística como: “o processo de planejamento, implementação e controle eficiente e eficaz do fluxo e armazenagem de mercadorias, serviços e informações relacionadas desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender às necessidades do cliente” (CSCMP, 2019). Nos estudos de Nguyen *et al.*, (2025) consideram que a logística moderna abrange todo o processo de movimentação física de mercadorias dos fornecedores aos demandantes e o fluxo efetivo de informações que tornam a embalagem, transporte, armazenamento, carregamento e descarregamento, processamento, acabamento, distribuição e informação uma integração orgânica e formam uma cadeia de suprimentos completa para fornecer aos usuários serviços multifuncionais, integrados e abrangentes.

A logística empresarial é conceituada por Shih (2020) como todas as atividades de movimentação e armazenagem que facilitam o fluxo de material e o fluxo de informação do ponto de aquisição da matéria-prima até o consumidor final, com o propósito de atender excelentes níveis de serviços e custos razoáveis ao cliente final. Para Rani *et al.*, (2025), a logística é um conceito minimizado da cadeia de suprimentos, refere-se ao processo de gerenciar estrategicamente a aquisição, movimentação e armazenagem de materiais, matéria-prima e produtos acabados e os fluxos de informação por intermédio da organização e seus canais de marketing, com o propósito de maximizar o lucro e atendimento dos pedidos com menor custo.

No trabalho de vanguarda de Strandhagen *et al.*, (2017), a logística está relacionada à cadeia de suprimentos, produção, distribuição e logística reversa com características e desafios diferentes, assim como a Logística da Produção ou fabricação deve ser tratada no ambiente de produção da empresa. Isso influenciou as considerações que precisam ser feitas ao projetar e gerenciar toda a cadeia de suprimentos de logística.

A evolução da Logística deu-se por três fases até chegar a que corresponde ao moderno gerenciamento da cadeia de suprimentos, Görçün, Pamucar e Biswas (2023) a fase mais

significativa ocorreu a partir de 1990 com a integração da logística essa integração possibilita maior visibilidade, agilidade e controle, criando valor para todos os elos da cadeia. Tecnologias como *cloud computing*, *IoT* e *analytics* permitiram a consolidação de sistemas logísticos em tempo real, com foco na eficiência operacional, na minimização de estoques e no aumento da responsividade. Estudos recentes reforçaram que a logística integrada se tornou essencial para enfrentar ambientes dinâmicos e imprevisíveis, contribuindo diretamente para a resiliência e sustentabilidade da cadeia de suprimentos (Rani *et al.*, 2025). O sucesso da gestão da logística integrada deu-se pelo desenvolvimento da informática, que possibilitou o agrupamento de todas as atividades logísticas conjuntas em um sistema que foca a minimização dos custos totais, redução de estoque e uma maior satisfação do cliente (Murat Ar *et al.*, 2020).

Do mesmo ponto de vista, a integração estratégica da Logística, foi também denominada Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (SCM). Dessa forma, a área da logística passa a ser vista não mais como geradora de custo, mas sim como um fator estratégico na busca de soluções novas para ganhar competitividade e estimular novos negócios, sendo utilizada como elemento diferenciador para aumentar a participação da empresa no mercado (Liu, Qu e Gao, 2022).

Assim, o fluxo de informações, materiais e dinheiro tornou-se primordial nessa fase, estimulando as parcerias entre fornecedores e empresas ao longo da cadeia de forma estratégica. Esse compartilhamento aberto e mútuo de informações proporcionou melhor controle, gerenciamento do fluxo de materiais, agregando o máximo de valor à cadeia logística, a fim de eliminar os desperdícios e gerar plena satisfação do consumidor final (Sharma *et al.*, 2023). Entretanto, apesar do termo cadeia de suprimentos ser o mais apropriado, não é amplamente aceito e utilizado pela academia e pelas empresas (Rani *et al.*, 2025). Por exemplo, Nair *et al.*, (2024) defendiam que a ideia de que a SCM é um aprimoramento da logística, para outros autores como Shih (2020) considerou que a gestão logística seria uma das vertentes táticas da SCM, sendo vista como uma das suas partes. Já Phillipson (2024) destacou que a evolução da logística parece ter levado ao termo SCM, além do termo apresentar uma evolução e ampliação nos assuntos abordados, pode envolver muitas variáveis, que torna o conceito vasto e gera conflitos de interesses. Dessa forma, impediu a execução efetiva e completa do conceito SCM na prática.

Nota-se, que a SCM foi uma nova perspectiva do paradigma da logística, no entanto, a logística tradicional foi contestada e a cadeia de suprimentos é percebida como uma entidade, que envolveu o todo em vez de atividades fragmentadas e dispersas ao longo do fluxo de

material e informações. A importância da SCM passou a ser estratégica; e os sistemas passaram a ser integrados ao invés de possuir apenas interface Phillipson (2024).

Porém, ao analisar a área da logística como somente uma parte ou como uma cadeia independente da SCM tornou o conceito ainda mais difuso, contudo a maior preocupação deveu-se ao fato que a SCM não é aplicada completamente no campo prático e a área logística ainda está atuando sem uma gestão integrada entre a empresa e seus parceiros.

De outro modo, nas definições do gerenciamento da logística e operações, os fluxos logísticos percorreram toda cadeia logística, podem ser diretos ou reversos, com abrangência nos domínios interno e externo da organização (Le e Fan, 2023). Neste contexto, as atividades logísticas envolvidas na gestão do *inbound* (entrada ou suprimentos) e *outbound* (distribuição) do transporte, gestão de frota, armazenagem, manuseio de materiais, controle do inventário, gestão da demanda e gestão dos fornecedores (Sharma *et al.*, 2023).

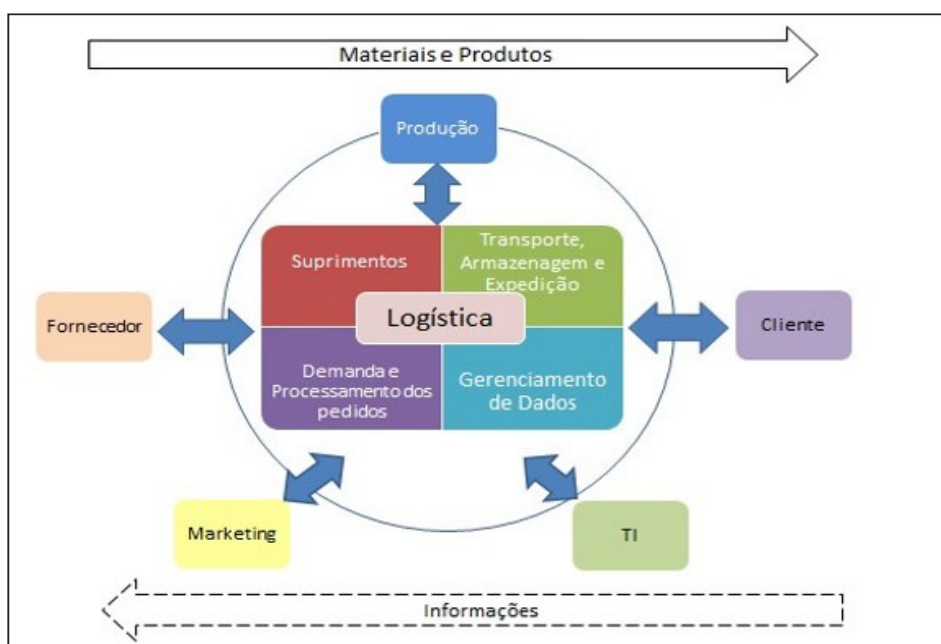
As etapas tradicionais da logística definidas por Porter (1999) foram novamente enfatizadas por Rani *et al.*, (2025) como elementos fundamentais da criação de valor para o cliente, são elas: i) abastecimento; ii) planta; iii) distribuição; e iv) reversa. Cada uma dessas fases contribuiu para a sincronização dos fluxos de materiais e informações, operando de forma interdependente como um sistema de subsistemas integrados.

- a) Logística de abastecimento (ou suprimentos): envolveu as funções de compras, recebimento, armazenagem e gestão de estoques, incluindo também as atividades relacionadas à pesquisa, seleção, registro e controle de fornecedores.
- b) Logística de planta (ou de produção): compreendeu o transporte, manuseio, armazenagem e controle de matérias-primas, produtos semiacabados e acabados, além do apoio e segurança durante o processo de fabricação em ambiente fabril.
- c) Logística de distribuição: referiu-se à emissão de documentação, transporte e entrega dos produtos acabados até o cliente final.
- d) Logística reversa: abrangeu o retorno de produtos ou embalagens ao ponto de origem, com o objetivo de recuperar valor, promover reuso ou reciclagem.

Como a área da logística abrangeu processos que vão desde os fornecedores até os clientes, foi comum que ela seja confundida com a logística da cadeia de suprimentos ou, até mesmo, com a própria gestão da cadeia como um todo. Diante disso, tornou-se necessário delimitar o escopo logístico adotado nesta pesquisa, o qual se concentrou na logística de produção, ou seja, no ambiente interno das organizações.

Nesta pesquisa, a logística foi compreendida como o processo de coordenação do fluxo de materiais, produtos e informações dentro da organização — desde o recebimento até a expedição dos produtos acabados. Esse processo envolveu atividades como transporte e movimentação interna, armazenagem, gestão de estoques, gestão da demanda e gestão de dados, funcionando como um elo integrador entre diferentes áreas da empresa. O objetivo foi garantir a fluidez do processo produtivo, assegurando agregação de valor ao produto, ao serviço e aos stakeholders envolvidos. O escopo logístico adotado nesta pesquisa foi representado no diagrama da figura 9.

Figura 9 - Escopo da logística empresarial



Fonte: Adaptado de Sharma *et al.*, (2023); Rani *et al.*, (2025) e Liu, Qu e Gao, (2022).

A logística de produção, também denominada logística de planta, refere-se aos processos logísticos realizados dentro de um ambiente de fabricação. Segundo Nguyen *et al.*, (2025), ela compreendeu todas as atividades envolvidas na movimentação de materiais e informações ao longo do processo produtivo. Sharma *et al.*, (2023) complementaram que essa modalidade é frequentemente classificada como logística interna, enquanto Liu, Qu e Gao (2022) a identificaram como parte da logística *inbound*, ou seja, aquela voltada ao fluxo interno de suprimentos. Murat Ar *et al.*, 2020 as inseriu dentro de um sistema logístico aberto e integrado à cadeia de suprimentos, destacando seu papel como elo essencial entre o abastecimento e a distribuição. A logística de produção, portanto, abrangeu desde o recebimento de matérias-primas, passando pelo processamento em andamento, até o fluxo de produtos

acabados, os quais foram planejados com eficiência para garantir elevada capacidade de entrega, previsibilidade e confiabilidade operacional (Sharma *et al.*, 2023).

Assim, a logística de produção também foi inserida em todos os níveis organizacionais: estratégicos operacionais e táticos, nos quais a gestão logística é uma função de integração, que coordenou e otimizou todas as atividades da logística além disso integra essas atividades com outras funções empresariais como as áreas de marketing e produção (Phillipson, 2024). Nesse sentido, gerenciar a logística de produção e estimular a cooperação com outras empresas foi mais essencial para o sucesso da cadeia logística (Shih, 2020).

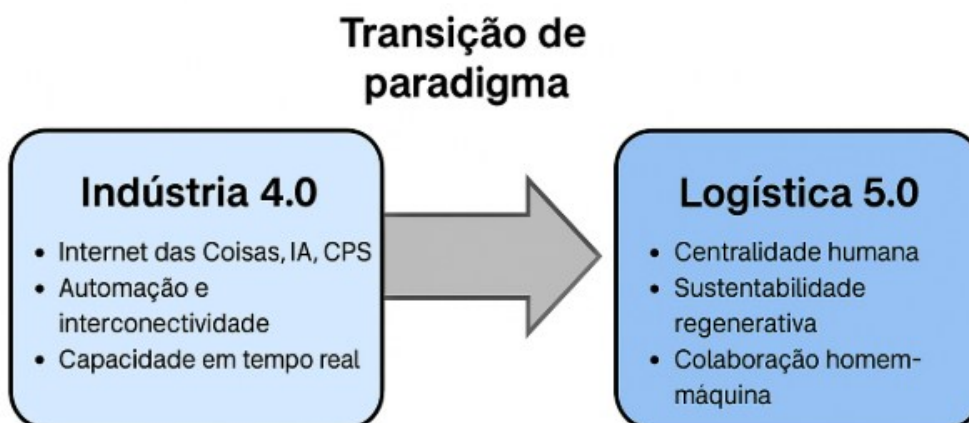
Dessa maneira, ainda para Murat Ar *et al.*, (2020) a capacidade de gerenciar as atividades internas da logística e de cooperar com outras áreas da empresa foram condições de vantagens competitivas visto que a evolução tecnológica da logística é inevitável e necessária para que haja uma maior integração estratégica de todos os agentes da cadeia logística para o aprimoramento do fluxo de material, informações e financeiro e atender os clientes com os requisitos das funções logísticas.

3.2. Indústria 4.0 e a transição para a logística 5.0

Diante dessas transformações internas e intraorganizacionais, tornou-se fundamental compreender como a digitalização impulsiona essa integração, especialmente no contexto da Indústria 4.0 e sua transição para a Logística 5.0. Portanto, a indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, representou uma reconfiguração dos sistemas produtivos e logísticos, impulsionada pela incorporação de tecnologias emergentes como internet das coisas (iot), *big data*, inteligência artificial (ia), robótica colaborativa, manufatura aditiva e sistemas ciberfísicos (cp's). Para Nguyen, Nawara e Kashef (2024), esses elementos permitiram uma produção mais autônoma, interconectada e inteligente, promovendo ganhos de eficiência, rastreabilidade e redução de desperdícios. A arquitetura da indústria 4.0 baseou-se em princípios como interoperabilidade, descentralização, virtualização e capacidade em tempo real, transformando as cadeias produtivas em ecossistemas digitais e responsivos conforme infere-se a figura 10.

A ilustração ainda refletiu a transição da Indústria 4.0 para a Logística 5.0, representando uma mudança de paradigma na gestão dos sistemas produtivos e logísticos. Enquanto a Indústria 4.0 foi caracterizada por tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), automação e capacidade de operação em tempo real, a Logística 5.0 avançou ao incorporar dimensões mais amplas, como a centralidade humana, a sustentabilidade regenerativa e a colaboração entre humanos e máquinas inteligentes.

Figura 10 - Transição de paradigma



Fonte: Nguyen, Nawara e Kashef (2024).

Entretanto, apesar dos avanços promovidos pela indústria 4.0, emergiram críticas quanto à sua limitação em lidar com aspectos sociotécnicos fundamentais. A centralização nas tecnologias, em detrimento de questões humanas, ambientais e sociais, revelou a necessidade de uma nova abordagem. Assim, surgiu a indústria 5.0, uma proposta que não nega os avanços da 4.0, mas os complementou com princípios como centralidade humana, empatia organizacional, colaboração homem-máquina e sustentabilidade regenerativa (Romero *et al.*, 2020; Nahavandi, 2021). Tratou-se de uma transição de paradigma que redefine as prioridades da transformação digital, enfatizando o papel estratégico do ser humano nas cadeias de valor.

Para Haq *et al.*, (2022), no contexto da logística, essa transformação deu origem ao conceito de logística 5.0, que ampliou o escopo tradicional da logística 4.0. Enquanto esta última tem foco em automação, conectividade e dados em tempo real, a logística 5.0 buscou harmonizar esses elementos com os valores da nova era industrial. Essa nova abordagem não apenas considerou os fluxos físicos e informacionais, mas também introduziu dimensões subjetivas e socioambientais na gestão logística, promovendo a integração entre sustentabilidade, inovação tecnológica e bem-estar dos trabalhadores. Nesse sentido, tecnologias como blockchain, *digital twins* e sistemas de apoio à decisão baseados em IA tornaram-se instrumentos para viabilizar cadeias logísticas mais humanas, transparentes e resilientes.

Além disso, Choi e Siqin (2022) afirmaram que a logística 5.0, portanto, não deveria ser vista apenas como uma evolução linear da logística 4.0, mas como uma reorientação estratégica em direção a uma cadeia de suprimentos humano cêntrica. Isso significou incorporar

indicadores de bem-estar, diversidade, colaboração e responsabilidade ambiental como elementos centrais dos sistemas logísticos. O papel dos profissionais de logística também se transformou, exigindo competências híbridas, como pensamento sistêmico, fluência digital e sensibilidade sociocultural. Essa nova lógica impôs desafios significativos, sobretudo em países emergentes, nos quais a infraestrutura digital ainda é incipiente e os modelos operacionais são baseados em eficiência de curto prazo.

No caso brasileiro, e especialmente na realidade do PIM, a logística 5.0 ofereceu um caminho promissor para superar entraves estruturais. A integração inteligente entre pessoas, máquinas e tecnologias permitiu desenhar soluções adaptadas à complexidade geográfica, à diversidade de atores e às exigências ambientais da região (Hashem, 2025). Assim, a proposta de um modelo de maturidade alinhado aos preceitos da logística 5.0 buscou preencher uma lacuna teórico-prática, oferecendo uma ferramenta capaz de orientar a transição para um sistema logístico mais eficiente, sustentável e socialmente justo. Essa construção foi detalhada nos capítulos seguintes, a partir da definição das dimensões críticas e da análise interdependente dos seus fatores constituintes.

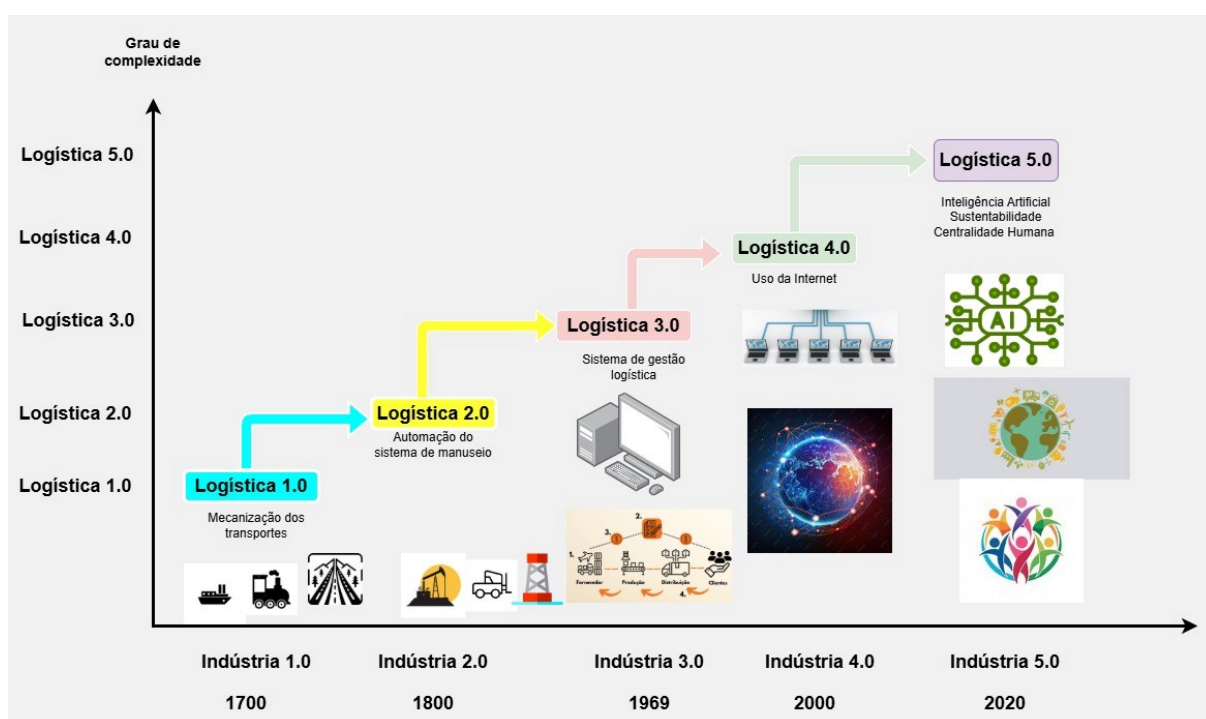
3.3. Logística 5.0

Diante disso, tornou-se essencial compreender em profundidade os fundamentos e as transformações que caracterizam a Logística 5.0 na atualidade. Para Rüßmann *et al.*, (2022), a logística 5.0 surgiu como um marco evolutivo no gerenciamento de cadeias de suprimentos, representando uma transição significativa em relação aos modelos anteriores, que priorizaram automação e digitalização de forma isolada. Enquanto a Logística 4.0 se concentrava na integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial para otimizar processos, a Logística 5.0 avançou ao incorporar uma abordagem mais holística, onde a colaboração entre humanos e máquinas, a sustentabilidade e a personalização em massa tornaram-se centrais.

Esse novo paradigma não apenas aumentou a eficiência operacional, mas também redefiniu o papel do ser humano no ecossistema logístico, transformando-o em um agente ativo e decisivo dentro de sistemas cada vez mais inteligentes. A figura 11 mostrou o caminho que a logística percorreu das suas fases iniciais até a era atual. Com base na figura 06, foi possível observar que a evolução dos sistemas logísticos em paralelo às transformações promovidas pelas revoluções industriais, revelando uma transição paradigmática ao longo do tempo. A logística 1.0, alinhada à indústria 1.0 (século XVIII), esteve centrada na mecanização dos

transportes e na organização inicial do fluxo de bens, apoiando-se em uma infraestrutura física rudimentar. Com o surgimento da indústria 2.0, a logística 2.0 passou a incorporar a automação dos processos de manuseio, impulsionada pela introdução de máquinas e equipamentos industriais mais sofisticados. Na sequência, a logística 3.0, associada à indústria 3.0, consolidou-se com o uso de sistemas computacionais e softwares de gestão, permitindo a integração de processos por meio do planejamento logístico, controle de estoques e melhoria da tomada de decisão baseada em dados.

Figura 11 - Evolução histórica da logística 1.0 à logística 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

A partir dos anos 2000, com a indústria 4.0, a logística 4.0 passou a integrar tecnologias como IoT, *big data* e sistemas ciberfísicos, ampliando o uso da internet na cadeia de suprimentos e viabilizando sistemas logísticos mais conectados e inteligentes. Finalmente, na era da indústria 5.0, surgiu a logística 5.0, caracterizada por um novo patamar de complexidade e integração entre I.A, sustentabilidade e centralidade humana, como defendiam Romero e Stahre (2021), Nahavandi (2019) e Ghobakhloo *et al.*, (2023). Essa nova fase propôs uma logística colaborativa, sensível aos fatores sociais e ambientais, alinhada à visão de um sistema produtivo mais empático e resiliente.

A necessidade de uma logística mais adaptável e resiliente tornou-se evidente após eventos globais disruptivos, como a pandemia de COVID-19 e crises geopolíticas, que expuseram as fragilidades das cadeias de suprimentos tradicionais (Hofmann *et al.*, 2023). Nesse contexto, a logística 5.0 emerge como uma resposta estratégica, alinhando-se aos princípios da Indústria 5.0, proposta pela Comissão Europeia (2021), que enfatiza três pilares fundamentais: humanização, sustentabilidade e resiliência. Esses pilares não apenas orientam a implementação de novas tecnologias, mas também demandam uma reavaliação dos modelos de negócios, garantindo que as operações logísticas sejam não apenas eficientes, mas também éticas e ambientalmente responsáveis.

A integração de tecnologias habilitadoras, como *cobots* (robôs colaborativos), gêmeos digitais (*digital twins*) e *blockchain*, desempenhou um papel importante na operacionalização da logística 5.0. De acordo com Stock *et al.*, (2024), essas ferramentas permitiram a criação de ecossistemas logísticos inteligentes, onde dados em tempo real são utilizados para antecipar falhas, otimizar rotas e personalizar entregas conforme as demandas específicas dos clientes. Além disso, a adoção de práticas sustentáveis, como logística reversa e redução de emissões de carbono, reforçou o alinhamento desse modelo com as metas globais de desenvolvimento sustentável, tornando-o não apenas uma evolução tecnológica, mas também uma mudança de paradigma em direção a uma economia mais circular.

No âmbito da indústria 5.0, a logística 5.0 assumiu um papel estratégico, viabilizando a customização em larga escala e a produção sob demanda, características essenciais para atender às expectativas de mercados cada vez mais dinâmicos (Kagermann *et al.*, 2021). A capacidade de integrar sistemas físicos e digitais permitiu que empresas respondam com agilidade a variações na demanda, reduzindo desperdícios e aumentando a satisfação do cliente. No entanto, essa transformação não está isenta de desafios, como a necessidade de capacitação da força de trabalho, investimentos em infraestrutura tecnológica e a superação de barreiras regulatórias, que podem retardar a adoção em larga escala dessas inovações.

Diante desse cenário, este capítulo teve como objetivo explorar os fundamentos da logística 5.0, desde suas origens e conceituação até suas aplicações práticas na indústria 5.0. Para tanto, foram analisadas as contribuições de autores como Hofmann *et al.*, (2023), Kagermann *et al.*, (2021) e Stock *et al.*, (2024), que discutiam as implicações dessa nova abordagem para a gestão de cadeias de suprimentos. Além disso, foram examinados os desafios e as oportunidades associados à sua implementação, oferecendo uma visão abrangente sobre

como a logística 5.0 pode moldar o futuro das operações logísticas em um mundo cada vez mais digitalizado e interdependente.

A logística 5.0 não surgiu de forma isolada, mas como uma evolução natural dos modelos anteriores, impulsionada pelas limitações da logística 4.0 e pelas novas demandas da sociedade pós-digital. Enquanto a quarta revolução industrial focava na hiper automação e na conectividade entre máquinas, a quinta fase introduz uma abordagem mais equilibrada, em que a tecnologia não substitui, mas potencializava a capacidade humana (Hofmann *et al.*, 2023). Essa transição foi catalisada por crises globais, como a pandemia de COVID-19 e rupturas nas cadeias de suprimentos, que evidenciaram a necessidade de sistemas mais flexíveis e adaptáveis. Nesse contexto, a Logística 5.0 se consolidou como um modelo que integra inovação tecnológica com sustentabilidade e valorização do capital humano, alinhando-se aos princípios da indústria 5.0.

Figura 12 - Dimensões da logística 5.0



Fonte: Hofmann *et al.*, (2023).

A figura 12 representou graficamente as principais dimensões que compõem a logística 5.0, sintetizando os pilares sobre os quais o novo paradigma logístico se apoia. Conforme ilustrado, a logística 5.0 articulou seis dimensões interdependentes: Humana, Sustentável, Tecnológica, Resiliente, Integrada e novamente Sustentável, reforçando a importância da sustentabilidade como eixo transversal da proposta. Essa configuração expressa o avanço em relação à logística 4.0, cuja ênfase recaía prioritariamente sobre a digitalização e automação.

Na logística 5.0, houve uma transição para um modelo mais humanizado, resiliente e centrado em valores sociais e ambientais, como apontam Ghobakhloo *et al.*, (2023) e Romero e Stahre (2021).

Além disso, a inclusão das dimensões de integração e tecnologia reforçou a necessidade de conectividade sistêmica entre atores da cadeia e de adoção de ferramentas como IoT, *Big Data* e inteligência artificial, elementos destacados por Nahavandi (2019) como fundamentais para a sustentabilidade operacional. Esta representação visual evidenciou que a maturidade logística não pode mais ser compreendida de forma linear, mas sim como uma malha complexa que exige equilíbrio entre desempenho, adaptabilidade, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental (Rashed *et al.*, 2024; Yin *et al.*, 2022).

Dessa forma, ao compreender a logística 5.0 como uma malha interdependente de dimensões estratégicas, torna-se necessário aprofundar a análise de cada um de seus pilares. Entre eles, destaca-se a centralidade do humano, que representa uma ruptura significativa em relação aos modelos anteriores e será detalhada a seguir como um dos elementos estruturantes desse novo paradigma. Kagermann *et al.*, (2021) afirmam que um dos pilares fundamentais da logística 5.0 é a humanização, ou do inglês, *human-centricity*, que redefinem o papel do trabalhador dentro dos processos logísticos. Diferentemente da automação tradicional, que muitas vezes marginaliza a mão de obra humana, essa nova abordagem coloca o ser humano como colaborador ativo, trabalhando em sinergia com cobots (robôs colaborativos) e sistemas de inteligência artificial.

Essa interação, também para Baroroh e Chu (2022), permite que habilidades humanas – como criatividade, tomada de decisão em cenários complexos e adaptabilidade – sejam amplificadas por ferramentas digitais, resultando em operações mais eficientes e personalizadas. Além disso, a *human-centricity* também implica em melhorias ergonômicas, segurança no trabalho e maior satisfação profissional, fatores essenciais para a retenção de talentos em um mercado cada vez mais competitivo.

Com base nessa valorização do fator humano, a logística 5.0 amplia seu escopo de atuação ao incorporar também princípios de responsabilidade ambiental e social. Nesse sentido, outro pilar essencial desse novo paradigma foi a sustentabilidade, que será discutida a seguir a partir da perspectiva da logística verde e da economia circular. Stock *et al.*, (2024) afirmavam que outro aspecto crítico da logística 5.0 é a sustentabilidade, que vai além da simples redução

de emissões de carbono. Tratou-se de uma reestruturação profunda dos processos logísticos, incorporando princípios de economia circular, logística reversa e eficiência energética.

Por exemplo, tecnologias como veículos elétricos autônomos, armazéns inteligentes com gestão otimizada de energia e embalagens biodegradáveis são exemplos práticos dessa transformação. Além disso, a rastreabilidade proporcionada pelo blockchain permite maior transparência em cadeias de suprimentos sustentáveis, garantindo que matérias-primas sejam provenientes de fontes éticas e renováveis. Essa abordagem não apenas atende a exigências regulatórias e de consumidores conscientes, mas também gera vantagens competitivas a longo prazo, reduzindo custos operacionais e mitigando riscos ambientais (Cannava *et al.*, 2025).

Assim de fato, além da sustentabilidade, outro pilar estratégico da logística 5.0 é a resiliência, fundamental para enfrentar instabilidades globais e assegurar a continuidade das operações logísticas diante de cenários imprevisíveis e crescentemente complexos, como será explorado a seguir. Para Hofmann *et al.*, (2023), a resiliência tornou-se um requisito indispensável para as operações logísticas no século XXI, especialmente após eventos como guerras comerciais, pandemias e desastres naturais exporem a fragilidade das cadeias globais. A logística 5.0 aborda esse desafio por meio de sistemas ciberfísicos capazes de se autorregular em tempo real, utilizando *digital twins* (gêmeos digitais) para simular cenários e prever interrupções antes que ocorram.

Além disso, a diversificação de fornecedores, a descentralização de estoques (micrologística) e a adoção de plataformas colaborativas entre empresas aumentam a capacidade de resposta a crises. Estudos de Cao *et al.*, (2025) ensinam que essa resiliência não se limita à recuperação de falhas, mas também à capacidade de se reinventar diante de mudanças estruturais no mercado, garantindo continuidade operacional mesmo em contextos adversos.

Esse novo entendimento da resiliência como capacidade de adaptação contínua reforça a necessidade de repensar não apenas processos, mas também os paradigmas que moldam as cadeias produtivas e logísticas. Na seção posterior, haverá uma conexão específica entre a resiliência, logística 5.0 e a sua correlação com as tecnologias preditivas, dada a importância do tema. Nesse cenário de transformações estruturais, torna-se inevitável abordar a convergência entre a logística 5.0 e a indústria 5.0, cujas sinergias potencializam uma atuação integrada, inteligente e centrada no ser humano, rompendo com modelos tradicionais e abrindo espaço para uma nova era de conectividade, personalização e sustentabilidade.

Sob o mesmo ponto de vista da evolução da logística 5.0, a qual, está intrinsecamente ligada aos avanços da indústria 5.0, a Comissão Europeia (2021), já propôs uma produção mais customizável, sustentável e centrada no ser humano. Nesse cenário, a logística deixa de ser um mero elo de transporte e armazenagem para se tornar uma rede inteligente e integrada, onde dados fluem em tempo real entre fábricas, distribuidores e consumidores. Essa sinergia permite, por exemplo, que pedidos personalizados sejam produzidos e entregues em prazos cada vez mais curtos, sem comprometer a eficiência. Dessa maneira, a interoperabilidade entre sistemas garante que a logística não seja um gargalo, mas um facilitador da indústria 5.0, viabilizando modelos de negócios inovadores, como manufatura aditiva (impressão 3D distribuída) e micrologística urbana.

Diante dessa integração estratégica entre indústria e logística, torna-se evidente que a logística 5.0 não é apenas uma tendência, mas uma evolução necessária frente aos desafios contemporâneos e futuros Panter *et al.*, (2024). Nesse viés, a logística 5.0 representa, portanto, uma resposta às demandas de um mundo em transformação, onde eficiência tecnológica, responsabilidade socioambiental e adaptabilidade são igualmente prioritárias. Suas origens estão profundamente enraizadas nas lições aprendidas com as limitações da logística 4.0, bem como nas novas possibilidades abertas por tecnologias emergentes e por uma visão mais humanizada da indústria.

Por conseguinte, à medida que empresas e governos reconhecem a importância desse paradigma, Krokowski, Regelman e Wentzek (2025) relatam que sua adoção tende a se acelerar, redefinindo não apenas como mercadorias são movimentadas, mas também como valor é criado em toda a cadeia produtiva. Sintetizando essas dimensões, a logística 5.0 pode ser representada por um quadro conceitual com três eixos inter-relacionados: tecnologias habilitadoras (o como), princípios orientadores (o porquê) e modelos operacionais (o quê).

Nesse sentido, Stock *et al.*, (2024) relatam que no núcleo desse modelo está a criação de valor sustentável - não apenas econômico, mas social e ambiental - através da sinergia entre capacidades humanas e aumentadas por tecnologia. Essa visão holística diferencia radicalmente a Logística 5.0 de estágios anteriores, posicionando-a não como mais uma evolução incremental, mas como uma transformação paradigmática na forma como concebemos e operamos cadeias de suprimentos no antropoceno. Essa mudança de paradigma proposta pela logística 5.0 exige mais do que inovação conceitual — demanda ações práticas. Por isso, torna-

se fundamental compreender os desafios e requisitos para sua implementação, especialmente à luz das tecnologias emergentes associadas à indústria 5.0, como discutido a seguir.

3.4 Implementação da indústria 5.0 na Logística

Diante dessa transformação estrutural proposta pela logística 5.0, torna-se essencial discutir os desafios e requisitos práticos envolvidos na sua implementação, especialmente no contexto da Indústria 5.0 e suas tecnologias associadas.

Neste cenário, Maddikunta *et al.*, (2022) afirmam que a integração de tecnologias emergentes, como robôs colaborativos (*cobots*), I.A. e gêmeos digitais, requer investimentos significativos em infraestrutura e capacitação profissional. Empresas de pequeno e médio porte podem enfrentar dificuldades financeiras para adotar essas inovações, o que pode ampliar a disparidade tecnológica no setor.

Além disso, a resistência cultural à mudança é um obstáculo considerável. Colaboradores acostumados a métodos tradicionais podem demonstrar hesitação ou receio em adotar novas tecnologias, temendo a substituição de empregos ou a complexidade das novas ferramentas. Para mitigar esse desafio, é essencial investir em programas de treinamento e desenvolvimento que enfatizem a complementaridade entre humanos e máquinas.

Por outro lado, a segurança é outra questão crucial na integração humano-tecnológica. Na indústria 5.0, a interação entre humanos e máquinas é mais próxima e frequente, o que aumenta os riscos de acidentes. Para mitigar esses riscos, tecnologias de detecção e prevenção de colisões, como sensores avançados, são essenciais. Contudo, a implementação dessas tecnologias exige um investimento significativo e ajustes operacionais, especialmente em ambientes onde o trabalho humano e o robótico se sobrepõem (Waschull *et al.*, 2020).

Além dos desafios de segurança, Sanithi e Muthuswamy (2023) há também barreiras associadas ao custo de implementação das novas tecnologias. Segundo estudos recentes, a transição para a Indústria 5.0 pode ser financeiramente inviável para pequenas e médias empresas devido aos altos custos iniciais associados a *cobots*, sensores inteligentes e gêmeos digitais. Isso sugere para Heinrich *et al.*, (2020) que, embora as oportunidades sejam numerosas, elas podem não estar igualmente acessíveis a todos os atores do setor logístico.

Em relação à complexidade na gestão de dados, Xu *et al.*, (2021) apontam que é outro desafio significativo. A coleta massiva de informações provenientes de diversas fontes exige sistemas avançados de análise e interpretação para extrair insights valiosos. Sem uma gestão

eficaz, há o risco de sobrecarga de informações, dificultando a tomada de decisões estratégicas. Além disso, a segurança cibernética se destaca como uma preocupação central. A crescente digitalização e interconectividade aumentam a vulnerabilidade a ataques cibernéticos, que podem comprometer dados sensíveis e interromper operações logísticas críticas. Implementar medidas robustas de segurança cibernética é imperativo para proteger as operações e a integridade dos dados.

Outro desafio importante está relacionado ao desenvolvimento de uma infraestrutura logística que acomode a colaboração humano-tecnológica. Romero e Stahre (2021) apontam que “a colaboração humano-robô requer um alinhamento entre hardware e software, além de uma adaptação do ambiente de trabalho para atender às novas necessidades de segurança e ergonomia”. Essa transformação estrutural pode implicar na reestruturação dos espaços físicos e dos fluxos de trabalho, o que exige uma abordagem estratégica e planejamento financeiro.

Diante desses desafios estruturais e tecnológicos, é igualmente importante reconhecer que a indústria 5.0 não apenas impõe exigências, mas também abre um leque de oportunidades estratégicas que podem transformar positivamente o setor logístico. De acordo com Sindhwani *et al.*, (2022), a sustentabilidade não é apenas um objetivo, mas uma necessidade para a continuidade das operações logísticas. Práticas como a logística reversa e a economia circular são facilitadas pela Indústria 5.0, que permite um rastreamento mais preciso e uma gestão de materiais mais eficiente. Isso não apenas contribui para a redução de resíduos, mas também possibilita uma economia de custos a longo prazo para as empresas.

Apesar dos desafios, a indústria 5.0 oferece oportunidades promissoras para o setor logístico. Hashem (2025) explica que a personalização em massa é uma delas, permitindo que as empresas adaptem seus serviços às necessidades específicas de cada cliente, aumentando a satisfação e a fidelização. Essa capacidade de customização é viabilizada pela análise avançada de dados e pela flexibilidade operacional proporcionada pelas novas tecnologias. Reforça-se ao fato que a sustentabilidade também emerge como uma oportunidade essencial dentro da Indústria 5.0. Outro ponto central da indústria 5.0 é a resiliência das operações logísticas, particularmente em situações de crise. Durante a pandemia de COVID-19, a flexibilidade da cadeia de suprimentos tornou-se um diferencial crítico para as empresas que conseguiram adaptar rapidamente suas operações. A indústria 5.0, com seu foco em sistemas autônomos e colaborativos, oferece uma resposta robusta a essas demandas, permitindo que as empresas reajam rapidamente a mudanças abruptas na demanda.

Diante dos desafios e oportunidades discutidos na implementação da indústria 5.0 na logística, destaca-se um componente estratégico que se torna cada vez mais relevante em cenários de instabilidade global: a resiliência. Mais do que uma competência desejável, a capacidade de adaptação tornou-se indispensável para garantir a continuidade operacional em ambientes incertos e voláteis. Nesse contexto, a logística 5.0 emerge como uma resposta integrada e humanizada às vulnerabilidades sistêmicas, como será abordado na próxima seção.

3.4.1 Resiliência na logística 5.0

Romero e Stahre (2021) explicam que a resiliência logística é um elemento crucial na Indústria 5.0, que busca construir operações robustas e adaptáveis a partir da sinergia entre humanos e tecnologias avançadas. Diferente de abordagens anteriores e percorridas em seções anteriores, que priorizavam eficiência e automação como metas principais, a indústria 5.0 valoriza a flexibilidade e a capacidade de adaptação, especialmente em resposta a crises e mudanças abruptas na demanda. Durante a pandemia de COVID-19, a importância da resiliência ficou evidente, com empresas adaptáveis mantendo suas operações enquanto outras enfrentaram desafios substanciais para atender à demanda. A logística 5.0, ao adotar novas tecnologias e um foco humano, fortalece essa capacidade adaptativa.

De fato, a capacidade de uma cadeia logística responder rapidamente a interrupções depende não só das tecnologias empregadas conforme apontam estudos de Sun *et al.*, 2021, mas também da adaptação dos trabalhadores e das operações em geral a uma nova cultura de resiliência e flexibilidade. As tecnologias da indústria 5.0 permitem que as empresas antecipem problemas e adaptem rapidamente suas operações. Os gêmeos digitais, IA e *cobots*, ao serem integrados com um enfoque humano, proporcionam uma abordagem que transcende a automação simples, pois inclui previsibilidade, cooperação e sustentabilidade como pilares da resiliência.

Para Hofmann *et al.*, (2023), a resiliência da logística 5.0 está ancorada em três áreas principais: previsibilidade e simulação, colaboração humano-robótica e sustentabilidade. Cada uma dessas áreas contribui de maneira distinta para a construção de uma cadeia de suprimentos mais resistente e adaptável, capaz de responder de maneira eficiente aos desafios e ao mesmo tempo promover práticas sustentáveis e socialmente responsáveis. Logo mais, entre os pilares que sustentam a resiliência na logística 5.0, destacam-se as tecnologias de previsão e simulação, que permitem às organizações anteciparem riscos, otimizar decisões e adaptar-se dinamicamente às mudanças do ambiente operacional. A seguir, serão exploradas essas

ferramentas, com ênfase na aplicação dos gêmeos digitais como elementos estratégicos na construção de cadeias logísticas inteligentes e responsivas.

3.4.2. Tecnologias de previsão e simulação para aumentar a resiliência

Estudos de Frederico (2021) apontam que as tecnologias de previsão e simulação são fundamentais para promover a resiliência na logística 5.0, permitindo uma adaptação proativa a situações imprevistas e a antecipação de cenários críticos. Entre essas tecnologias, o uso de gêmeos digitais destaca-se como uma inovação transformadora, pois cria réplicas virtuais das operações físicas, possibilitando monitorar, simular e testar diferentes cenários em tempo real.

Além dos gêmeos digitais, a inteligência artificial (IA) e o aprendizado de máquina (*machine learning*) são ferramentas poderosas para aumentar a resiliência, pois permitem prever demandas futuras, identificar padrões de consumo e até mesmo antecipar mudanças nas preferências dos clientes. A análise preditiva baseada em IA torna possível ajustar o planejamento de estoques e a alocação de recursos de forma proativa, mitigando os impactos de variações sazonais e eventos externos sobre as operações logísticas. Em cenários de crise, como desastres naturais ou pandemias, a IA permite que as empresas tomem decisões informadas com rapidez, minimizando impactos negativos (Sun *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a IA e os gêmeos digitais também possibilitam o monitoramento contínuo das operações, com alertas em tempo real que sinalizam problemas antes que eles se tornem críticos. Esse tipo de resposta rápida não apenas ajuda a evitar prejuízos, mas também protege a reputação da empresa, que mantém um nível de serviço mais estável mesmo diante de adversidades. Esse monitoramento em tempo real é especialmente relevante em setores que lidam com prazos rigorosos de entrega e demandas flutuantes, como o *e-commerce* e o setor de alimentos perecíveis (Di Nardo e Yu, 2021).

Chen *et al.*, (2025) explicam que com o uso de tecnologias de previsão, as empresas conseguem implementar estratégias de planejamento preventivo, ajustando suas operações com antecedência e estabelecendo contingências para responder a possíveis interrupções. A combinação de IA, aprendizado de máquina e gêmeos digitais cria uma estrutura de resiliência mais robusta, pois permite que a cadeia de suprimentos seja mais flexível e responsiva às necessidades em constante mudança dos clientes. Dessa forma, a logística 5.0 assegura uma resposta mais eficiente aos desafios, melhorando a estabilidade operacional e promovendo um desempenho contínuo mesmo em momentos de alta demanda ou crise.

Por fim, a capacidade preditiva das tecnologias da logística 5.0 reduz a dependência das empresas de fornecedores externos e permite que elas adaptem rapidamente suas operações a flutuações no mercado global. Ao prever com precisão as necessidades de suprimentos e demanda, as organizações conseguem minimizar o impacto de variáveis externas, como escassez de matérias-primas ou atrasos no transporte. Esse nível de controle é essencial para a resiliência da cadeia logística e promove uma operação mais sustentável e eficaz (Frederico, 2021).

3.4.3. Colaboração humano-robótica como pilar da resiliência logística

Diante desse contexto tecnológico, a resiliência logística não depende apenas de previsões precisas, mas também da interação eficaz entre humanos e máquinas. Para Berx *et al.*, (2025), a colaboração humano-robótica como elemento-chave para operações logísticas são mais adaptáveis, inteligentes e sustentáveis. Essa colaboração humano-robótica representa um dos principais pilares da resiliência na logística 5.0, permitindo que as empresas combinem a adaptabilidade humana com a precisão e eficiência dos robôs. Robôs colaborativos, ou *cobots*, têm sido cada vez mais utilizados em tarefas repetitivas e fisicamente exigentes, liberando os operadores humanos para focar em atividades estratégicas e complexas.

Essa sinergia entre humanos e robôs oferece flexibilidade às operações, pois os robôs podem executar tarefas operacionais, enquanto os trabalhadores humanos mantêm a supervisão e fazem ajustes críticos durante situações de crise (Romero e Stahre, 2021).

Além de otimizar a produtividade, os *cobots* melhoram a segurança no ambiente de trabalho ao assumir tarefas que envolvem esforço físico ou exposição a condições adversas. A utilização de *cobots* minimiza os riscos de acidentes, pois esses robôs são equipados com sensores avançados que detectam a presença de humanos, ajustando automaticamente suas ações para evitar colisões. Esse ambiente seguro promove a confiança dos trabalhadores e facilita a integração de novas tecnologias, tornando a resiliência uma parte inerente das operações logísticas (Butner e Ho, 2019).

A flexibilidade operacional proporcionada pela colaboração humano-robótica é particularmente valiosa em setores que exigem adaptação rápida, como a logística de última milha (*last mile*). Durante eventos de alta demanda, como sazonalidades ou eventos promocionais, a integração de *cobots* com operadores humanos permite que a empresa ajuste seus fluxos de trabalho sem a necessidade de aumentar significativamente o número de funcionários. Essa abordagem oferece uma solução prática para otimizar o desempenho

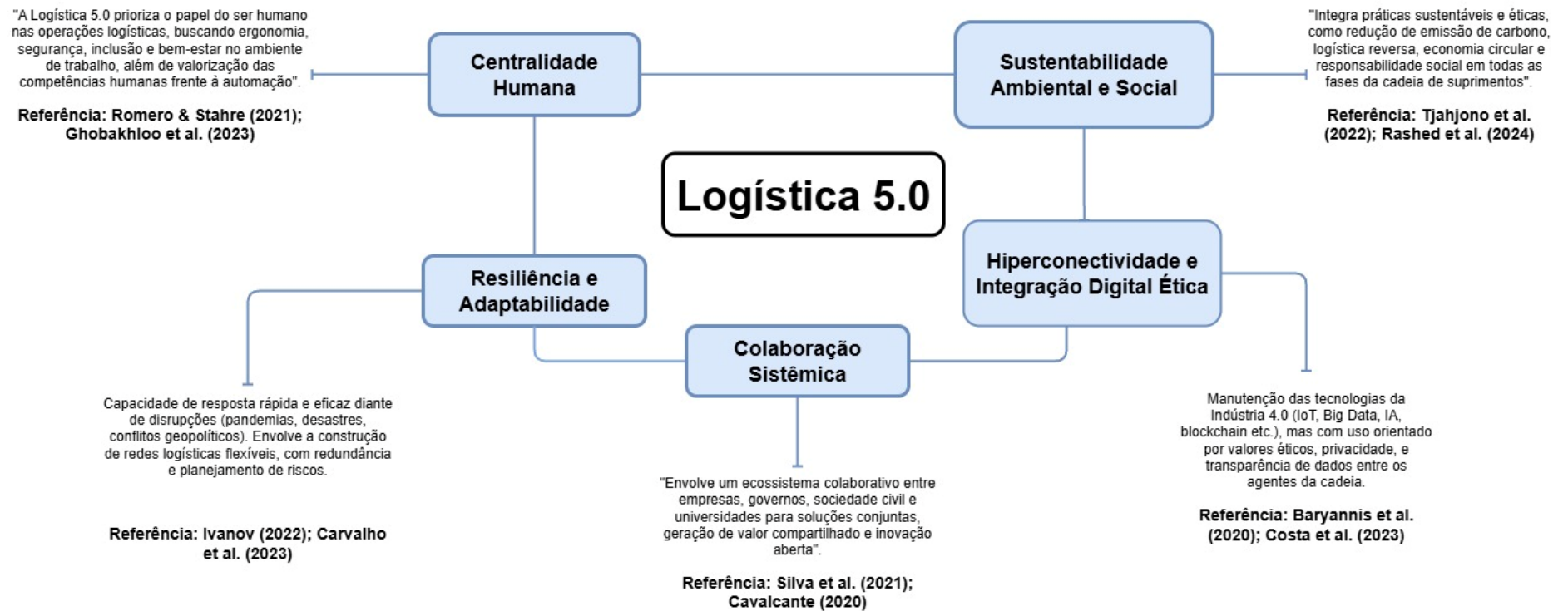
logístico e assegurar a continuidade das operações sem comprometer a qualidade dos serviços (Di Nardo e Yu, 2021).

Ainda segundo Romero e Stahre (2021), a capacidade de adaptação da colaboração humano-robótica também é ampliada pelo uso de realidade aumentada (RA), que permite que os trabalhadores recebam instruções visuais em tempo real, melhorando sua interação com os robôs e otimizando o desempenho das operações. Dessa forma, a RA não apenas pode melhorar a eficiência, mas também capacita os colaboradores, aumentando sua confiança e capacidade de resposta em situações críticas.

Por fim, a colaboração humano-robótica na logística 5.0 pode promover uma cultura de inovação, onde a resiliência se torna uma prática contínua de melhoria. Para Gualtieri, Rauch e Vidoni (2021), a adaptação constante dos processos, aliada ao desenvolvimento de habilidades dos colaboradores para trabalhar com robôs, garante que as empresas estejam preparadas para enfrentar desafios futuros e respondam rapidamente a um mercado em constante transformação. Essa sinergia é fundamental para a construção de um sistema logístico resiliente, onde o trabalho humano e a automação atuam juntos para superar obstáculos e impulsionar o desempenho das operações.

Essa abordagem da colaboração humano-robótica está diretamente alinhada às dimensões estruturantes da logística 5.0, conforme sistematizado na figura 08. A representação gráfica ilustra como pilares como centralidade humana, resiliência e adaptabilidade, e colaboração sistêmica sustentam a construção de sistemas logísticos robustos, inovadores e orientados à cooperação. Nesse contexto, a articulação entre habilidades humanas e capacidades robóticas, conforme discutido por Gualtieri, Rauch e Vidoni (2021), consolida-se como uma prática essencial para promover ambientes logísticos preparados para lidar com rupturas e transformações contínuas. A figura 12 evidenciou, portanto, que a integração entre pessoas, tecnologias e valores éticos constitui a base para uma logística mais resiliente, sustentável e responsiva às demandas contemporâneas. Essa convergência também impulsiona a personalização de processos, o aprendizado contínuo e a melhoria da experiência do trabalhador. Ao integrar sensores inteligentes, algoritmos de tomada de decisão e interfaces intuitivas, os sistemas logísticos tornam-se mais sensíveis ao contexto operacional, elevando a eficiência, a segurança e a capacidade de adaptação em tempo real.

Figura 13 - Dimensões da logística 5.0



Fonte: Romero & Stahre (2021); Ghobakhloo *et al.*, (2023).

Os pilares conceituais que estruturam a logística 5.0 revelam seu caráter transdisciplinar e sua orientação para a inovação com propósito. As dimensões destacadas — centralidade humana, sustentabilidade ambiental e social, resiliência e adaptabilidade, hiperconectividade com integração digital ética e colaboração sistêmica — expressam os fundamentos que orientam o novo paradigma logístico (Romero & Stahre, 2021; Ghobakhloo *et al.*, 2023). A centralidade humana emerge como resposta às críticas à automação desumanizada da logística 4.0, enquanto a sustentabilidade abrange práticas éticas em toda a cadeia de suprimentos (Rashed *et al.*, 2024).

A resiliência representa a capacidade de resposta a rupturas e instabilidades, exigindo planejamento e flexibilidade (Ivanov, 2022). A hiper conectividade, por sua vez, preserva o uso de tecnologias da Indústria 4.0, mas com foco em valores éticos e transparência (Costa *et al.*, 2023). Por fim, a colaboração sistêmica assume papel estratégico ao integrar atores diversos, como empresas, universidades e sociedade civil, na construção de soluções logísticas mais inteligentes e inclusivas (Silva *et al.*, 2021; Cavalcante, 2020). Essa visualização reforça a tese de que a logística 5.0 não é apenas uma evolução técnica, mas uma inflexão ética, social e organizacional.

3.5. Modelos de maturidade

Essa reconfiguração ética, tecnológica e colaborativa da logística 5.0 exige ferramentas capazes de mensurar sua implementação de forma estruturada. Nesse sentido, os Modelos de Maturidade (MM's) tornam-se essenciais para avaliar o grau de desenvolvimento das organizações frente aos desafios e exigências dessa nova abordagem.

Os níveis de sofisticação das atividades executadas por uma organização podem ser definidos por MM's. Inicialmente, esses modelos foram desenvolvidos a partir do sistema de avaliação do desempenho (Tapia, 2007). Logo, alguns modelos foram utilizados para avaliar a maturidade da tecnologia e a capacidade de fabricação durante as fases de desenvolvimento e implantação de produtos e sistemas (Tucker e Paxton, 2010), enquanto outros avaliam o desenvolvimento de softwares (LEYH *et al.*, 2016; Gökalp, Sener e Eren, 2017) e os mais recentes estão voltados para o nível de digitalização ou adesão à indústria 4.0 (Schumacher; Erol; Sihn, 2016; Colli *et al.*, 2018; Canetta; Barni; Montini, 2018; Schuh *et al.*, 2019).

O conceito de maturidade do processo sugere que um processo tem ciclo de vida que é avaliado a partir do que foi definido, gerenciado, medido e controlado. As políticas, padrões e as estruturas organizacionais são institucionalizados, e dessa forma as organizações aumentam

a maturidade do processo, ou seja, alcançam os níveis mais altos de capacidade do processo (Lockamy III *et al.*, 2008).

Um modelo de maturidade da Cadeia de Suprimentos pode ser considerado como uma metodologia relacionada à definição, mensuração, gerenciamento e controle do processo de negócios. Maior nível de maturidade indica o desempenho superior de uma organização, que ocasiona melhores resultados, melhora o alcance das metas, reduz custos e habilita para novos desafios (Lockamy III; McCormack, 2004; McCormack; Ladeira; Oliveira, 2008).

Dessa maneira, os processos amadurecem à medida que o foco da organização evolui de uma perspectiva interna para uma perspectiva externa do sistema. Um nível de maturidade representa a institucionalização da visão total dos sistemas de avaliação de desempenho e a capacidade de alcançar um conjunto de metas pré-estabelecidas (Lockamy III; McCormack, 2004).

A maioria dos MM's é composta de estágios ou níveis de maturidade, eles são hierárquicos, crescentes e interligados, e quando apresentam um nível maior de maturidade, aumenta também os níveis de previsibilidade, capacidade, controle, eficácia e eficiência (Lockamy; McCormack, 2004; Bititci *et al.*, 2004). As publicações realizadas a partir de 2000 possuem estruturas que têm sido modificadas e atualizadas ao longo do tempo, com o objetivo de auxiliar os executivos a determinarem o relativo nível de maturidade de suas organizações e definir o que se precisa fazer para afetar positivamente a linha de resultados (Lahti, Shamsuzzoha e Helo, 2009).

Assim, no próximo tópico, são abordados alguns MM's que podem ser aplicados de forma geral, ou seja, em qualquer empresa ou negócios. Bem como, os estágios desses modelos e seus impactos na avaliação de desempenho da Logística e Cadeia de Suprimentos.

Os modelos de maturidade surgiram como uma abordagem estruturada para avaliar e melhorar a capacidade de processos em diversas áreas, incluindo a logística. Esses modelos oferecem uma estrutura para que as empresas possam avaliar o seu nível de desempenho, identificar áreas de melhoria e estabelecer um plano de ação para alcançar níveis superiores de maturidade. O conceito de maturidade, inicialmente proposto no setor de engenharia de software com o *Capability Maturity Model* (CMM), foi rapidamente adaptado para a logística devido à sua relevância em melhorar a eficiência das cadeias de suprimento (Paulk *et al.*, 1993).

Ao longo do tempo, os modelos de maturidade logística evoluíram para incluir não apenas a eficiência operacional, mas também a sustentabilidade e a inovação tecnológica, elementos cruciais na era da Indústria 4.0 e da Logística 5.0 (Battista; Fumi; Schiraldi, 2017). Esses modelos servem como ferramentas essenciais para as empresas que buscam uma abordagem estruturada e sistemática para melhorar sua capacidade logística. De acordo com Werner-Lewandowska e Kosacka-Olejnika (2018), um dos principais benefícios dos modelos de maturidade é a sua capacidade de fornecer um diagnóstico claro do estágio atual de desenvolvimento de uma organização, permitindo uma transição planejada e controlada para níveis mais avançados.

Tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), a inteligência artificial (IA) e o *big data* são fundamentais para a transformação digital nas cadeias de suprimento (Weerabahu *et al.*, 2023). Esses recursos sustentam modelos desenvolvidos para apoiar empresas que operam em um ambiente globalizado e altamente dinâmico, no qual a capacidade de resposta rápida e a inovação contínua são essenciais para a manutenção da competitividade.

3.5.1. Histórico e primeiros Modelos de Maturidade

Os primeiros modelos de maturidade logística foram baseados nos princípios do *Capability Maturity Model* (CMM), desenvolvido por Paulk *et al.* (1993), no contexto de engenharia de software. Esses primeiros modelos seguiam uma estrutura de cinco níveis de maturidade, variando de um nível inicial, onde os processos são ad hoc e desorganizados, até um nível otimizado, em que os processos são continuamente melhorados com base em métricas e feedback. Embora inicialmente aplicados à gestão de software, esses princípios rapidamente se expandiram para outras áreas, incluindo a logística, devido à necessidade de estruturas que permitissem melhorar a eficiência operacional e a gestão da cadeia de suprimentos.

O *Supply Chain Operations Reference Model* (SCOR), desenvolvido pelo *Supply Chain Council* (SCC), foi um dos primeiros modelos a ser amplamente adotado no setor de logística. O SCOR é um framework que permite às empresas mapearem, medirem e analisarem suas operações logísticas, desde o fornecimento até a entrega final (SCC, 2017). Este modelo foi projetado para ser aplicado em qualquer indústria e se tornou uma referência global para medir o desempenho logístico. De acordo com Salhieh e Alswaer (2022), o SCOR ajudou as empresas a integrarem seus processos logísticos com suas estratégias de negócios, aumentando a visibilidade e a transparência em toda a cadeia de suprimentos.

No início, o SCOR concentrava-se em três dimensões principais: planejamento, execução e controle. Essas dimensões foram adaptadas ao longo do tempo para incluir novos processos, como retorno e gestão de ativos, refletindo a crescente complexidade das cadeias de suprimentos modernas (Hansali *et al.*, 2022). Além disso, com a introdução de novas tecnologias, como o IoT e a inteligência artificial, o SCOR passou a incorporar indicadores de digitalização e automação, permitindo que as empresas mensuram o impacto dessas tecnologias em suas operações.

Outra adaptação importante dos modelos de maturidade ocorreu com o surgimento da Indústria 4.0. A partir desse momento, os modelos de maturidade começaram a incluir métricas de tecnologia digital e inovação, como parte essencial para a evolução logística (Coşkun e Kazan, 2023). Em mercados altamente competitivos e globalizados, as empresas que implementaram as tecnologias digitais propostas pela Indústria 4.0 tiveram uma vantagem significativa em termos de eficiência operacional e capacidade de resposta ao mercado.

A inclusão de práticas de sustentabilidade nos modelos de maturidade também se tornou uma tendência crescente nos últimos anos. A sustentabilidade passou a ser um fator-chave na avaliação da maturidade logística, com foco na redução de emissões de carbono, no uso de energia renovável e na promoção de práticas de logística verde. Werner-Lewandowska e Kosacka-Olejnik (2018) argumentam que, além da eficiência operacional, as empresas que adotam práticas sustentáveis têm uma maior resiliência e capacidade de se adaptar a disjunções na cadeia de suprimentos, como mudanças nas regulamentações ambientais e crises econômicas.

3.5.2. Evolução dos Modelos de Maturidade

A evolução dos modelos de maturidade reflete o avanço das necessidades organizacionais diante das transformações industriais e tecnológicas, desde os primeiros frameworks como o *Capability Maturity Model* (CMM), voltado à maturidade em processos de software (Sei, 1993; Saiedian e Kuzara, 1995), até os modelos voltados à gestão integrada da cadeia de suprimentos, como o SCOR (que introduziu dimensões como planejamento, execução e habilitação logística (Apics, 2010; Lockamy e McCormack, 2004). A partir dos anos 2000, surgem modelos mais abrangentes, como o PRTM e o BPMM, que incorporam dimensões estratégicas e de governança (PRTM, 2005; Tarhan *et al.*, 2016), além de modelos orientados à transformação digital como o *Industry 4.0 Maturity Index* (Schuh *et al.*, 2017). Com o avanço das demandas por sustentabilidade, resiliência e centralidade humana, emergem novos

referenciais, como o *Logistics 4.0 Maturity Model* (Maddikunta *et al.*, 2022). E por fim, o IMAL 5.0, proposto nesta tese, que se diferencia por integrar dimensões tecnológicas e humanas sob o paradigma da Indústria 5.0 (Ghobakhloo *et al.*, 2023; Romero e Stahre, 2021). A sistematização desses modelos ao longo do tempo permitiu identificar lacunas e construir uma abordagem mais adequada à realidade logística do PIM conforme a tabela 1.

As primeiras abordagens da maturidade surgiram na área da gestão da qualidade na década de 70 com a Matriz de Maturidade da Gestão da Qualidade, *Quality Management Maturity Grid* (QMMG), desenvolvida por Crosby (1979), relaciona os cinco níveis de maturidade: (i) incerteza; (ii) conscientização; (iii) esclarecimento; (iv) bom senso; (v) certeza, com os aspectos da qualidade (Fraser; Moutrie; Gregory, 2002). Na década de 80 surgiu o *Capability Maturity Model* (CMM), desenvolvido pelo *Software Engineering Institute* afiliado a *Carnegie Mellon Software Engineering Institute* (SEI, 2002), e o *Balanced Scorecard* (BSC) é desenvolvido na década de 90 por Kaplan e Norton (1996).

Apesar de toda essa relevância da Cadeia de Suprimentos e da influência de seu desempenho para o alcance dos objetivos organizacionais, os programas de melhorias implementados nas empresas como: *six sigma*, gestão da qualidade total e melhoria contínua, assim como os as primeiras abordagens, não foram suficientes. Surgiu então, a necessidade de novas metodologias que abordassem a cadeia de suprimentos e realizasse uma profunda análise das áreas operacionais para priorizar os recursos e esforços para melhoria do seu desempenho global (Reyes e Giachetti, 2010), detalhadas na Tabela 1.

Dessa maneira, surgem outros MM's, por exemplo: *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) é uma derivação do CMM (SEI, 2004); *Business Process Maturity Model* (BPMM) (OMG, 2008); *European Foundation for Quality Management Excellence Model* (EFQM, 2012); *The Portfolio, Programme, and Project Management Maturity Model*, (P3M3, 2012).

O CMM adota uma abordagem diferente da qualidade, identifica um conjunto cumulativo chamadas de *Key Process Areas* (KPAs), que precisam ser monitoradas e executadas à medida que o nível de maturidade aumenta, assim, diferentes práticas são direcionadas para cada processo. Os principais processos abordados são: Desenvolvimento da capacidade das pessoas; aquisição de software; sistema de engenharia; e desenvolvimento integrado do produto. Possui cinco estágios: (i) inicial; (ii) repetível; (iii) definido; (iv) gerenciado; e (v) otimizado (Lahti, Shamsuzzoha e Helo, 2009).

Tabela 1 - Evolução dos Modelos de Maturidade

Modelo de Maturidade	Ano	Foco Principal	Dimensões Avaliadas	Tipo de Aplicação	Referência
CMM – Capability Maturity Model	1993	Processos de software	5 níveis de maturidade	TI/Software	SEI (1993); Saiedian e Kuzara (1995)
SCOR – Supply Chain Operations Reference	2000s	Cadeia de suprimentos	Planejamento, Execução, Retorno, Habilitação	Supply Chain	APICS (2010); Lockamy e McCormack (2004)
PRTM Maturity Model	2005	Gestão de processos e cadeia de suprimentos	Estratégia, Infraestrutura, Pessoas, Sistemas	Gestão de operações	PRTM (2005); Reyes e Giachetti (2010)
BPMM – Business Process Maturity Model	2008	Maturidade de processos de negócio	Gestão, Governança, Controle	Processos organizacionais	OMG (2008); Tarhan <i>et al.</i> (2016)
Industry 4.0 Maturity Index	2017	Transformação digital da manufatura	Estrutura digital, Inteligência, Cultura	Indústria e manufatura	Schuh <i>et al.</i> (2017); Colli <i>et al.</i> (2018)
Maturity Model for Logistics 4.0	2018	Logística digital	Tecnologia, Organização, Processos, Pessoas	Logística industrial	Maddikunta <i>et al.</i> , (2022)
Maturity Model for Logistics 5.0 (IMAL)	2025	Logística humanizada, sustentável e inteligente	Centralidade Humana, Sustentabilidade, Resiliência, etc.	Logística aplicada à Indústria 5.0	Esta tese

Fonte: Autoria Própria (2025).

Já o modelo *Capability Maturity Model Integration* (CMMI), trata-se de uma derivação do modelo CMM, possui uma característica mais completa para avaliar o índice de maturidade. O CMMI tem uma abordagem de melhoria de processos que fornece às organizações os elementos essenciais de processos eficazes. E considera que o desempenho nível a nível leva a um desempenho melhor do que uma visão ampla e interdepartamental. Ele pode ser usado para guiar a melhoria de processos em um projeto, uma divisão ou uma organização inteira. Possui cinco estágios de maturidade: (i) inicial; (ii) gerenciado; (iii) definido; (iv) quantitativamente gerenciado; e (v) otimização (ESTAMPE *et al.*, 2013).

O *Business Process Maturity Model* (BPMM) classifica a maturidade dos processos em cinco estágios: (i) Inicial: são observados esforços individuais sem o suporte de um processo

ou organizacional; (ii) Gerenciado: os gerentes estabelecem um ambiente de trabalho estável em sua unidade de trabalho; (iii) Padronizado: a organização estabelece processos e recursos padronizados para realização do trabalho do produto e do serviço; (iv).

O previsível é voltado ao trabalho dos processos é gerenciado quantitativamente para estabelecer resultados previsíveis e (v) Inovador: os processos da organização são melhorados continuamente. O BPMM ainda estabelece práticas específicas para cada estágio de maturidade, divididos em cinco áreas (OMG, 2008) como: a) gerenciamento do processo organizacional; b) gerenciamento do negócio organizacional; c) gerenciamento do domínio do trabalho; d) desempenho do domínio do trabalho; e e) suporte organizacional.

Quanto ao modelo EFQM, foi desenvolvido em 1994 pela *Association of Manufacturers and Retailers* (ECR), seu enfoque é direcionado para excelência das organizações para garantir um crescimento financeiro sustentável. O objetivo é de avaliar a eficácia no desenvolvimento, aperfeiçoar o uso de todos os seus recursos dentro da organização como um todo e fornecer uma estratégia focada nas partes interessadas (sociedade, pessoas, clientes e acionistas). Destacam-se os seguintes objetivos de acordo com EFQM (2012): adicionar valor aos clientes, criar um futuro sustentável, desenvolver a capacidade organizacional, aproveitar a criatividade e inovação, liderar com visão, inspiração e integridade, gerenciar com agilidade, alcançar o sucesso com o talento das pessoas e sustentar resultados extraordinários.

Esses objetivos são desenvolvidos por meio de dois grupos de critérios, que se relacionam entre si e retroalimentam o processo para ações de melhoria contínua, como os critérios facilitadores, que envolvem liderança (pessoas; estratégia; parcerias e recursos); e processos, produtos e serviços e critérios de resultado, que envolvem os resultados das pessoas, dos clientes e da sociedade, serão causadores dos resultados do negócio, como um todo. Considera-se neste ponto que uma empresa deve possuir um sistema de mensuração do desempenho em todas estas frentes para poder identificar o sucesso ou não de sua estratégia (EFQM, 2012).

Enquanto para o modelo P3M3 o principal objetivo é ajudar as organizações a avaliarem a relação entre seus portfólios, programas e projetos. Aborda três MM's que podem ser usados separadamente para focar em áreas específicas do negócio, como: controle gerencial, gestão de benefícios, gestão financeira, compromisso com o stakeholder, gestão de riscos, governança organizacional e gestão de recursos (P3M3, 2012).

Os primeiros MM's com a abordagem voltada para Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos foram desenvolvidos no final da década de 90. Embora esses modelos variem quanto a sua evolução da Cadeia de Suprimentos e estrutura do desenvolvimento dos negócios, suas metas são comuns, divide a cadeia em práticas em diferentes níveis de capacidade ou maturidade e visam identificar a posição atual da empresa no modelo de maturidade e traçar metas para alcançar elevados níveis de maturidade, já que quanto maior o nível de maturidade, melhor será o desempenho global (McCormack; Ladeira; Oliveira, 2008; Lahti; Shamsuzzoha; Helo, 2009; Estampe *et al.*, 2013).

Embora os MM's, BSC e EFQM, serem os mais conhecidos, esses modelos não levaram em consideração a complexidade da cadeia de suprimentos, assim, outros modelos foram desenvolvidos a partir de 2000, como por exemplos os modelos: SCOR, APICS (2010); Lockamy III e McCormack (2004); Handfield e Straight, (2004); PRTM (2005); Lahti, Shamsuzzoha e Helo (2009); Follmann (2012); Battista, Fumi e Schiraldi (2012).

Esses MM's desenvolvidos para cadeia de suprimentos possuem o intuito de ajudar e analisar as cadeias em termos de alguns ou todos os seus componentes, tanto com medidas qualitativas (satisfação do cliente, colaboração dos atores, satisfação dos funcionários, flexibilidade, integração do fluxo de informação, gerenciamento de risco, sustentabilidade e desempenho do fornecedor) quanto com medidas quantitativas, como as medidas baseadas em: custo, produtividade, qualidade e responsividade ao cliente (Gunasekaran; Patel; Mcgaughey, 2004; Estampe *et al.*, 2013).

De acordo com os estudos de Estampe *et al.*, (2013), o SCOR possui características mais integrativas com todas as partes interessadas da cadeia, inclusive com uma visão multi-cadeias e societária, ou seja, relaciona-se com a capacidade das empresas de gerenciar todo o escopo de uma Cadeia de Suprimentos. Os estágios de maturidade são classificados em quatro níveis:

- Nível 1: integração funcional: o objetivo é responder as melhorias no desempenho dos processos internos de uma empresa, sem buscar o ponto ótimo uns com outros, processos auxiliares;

- Nível 2: integração interna: O objetivo é criar ferramentas para medir desempenho transversal dentro da empresa, validando assim desempenho global, buscando um ponto ótimo entre a demanda e o gerenciamento de recursos;

- Nível 3: integração externa: o objetivo é estender a medição do desempenho para os principais atores externos da empresa. Esta associação busca compartilhar o desempenho;

- Nível 4: colaboração entre empresas: o objetivo é compartilhar a estratégia organizacional (design, modos de gestão, riscos compartilhados etc.), de modo a permitir a escolha de objetivos de desempenho comuns.

Os modelos de Lockamy III e McCormack (2004); McCormack, Ladeira e Oliveira (2008), associaram o nível de maturidade de cada elemento e processo da Cadeia de Suprimentos com os resultados do desempenho global foi constatada nos estudos, suas pesquisas foram baseadas no modelo SCOR, que permite trazer os indicadores de desempenho para uma linguagem comum para ser utilizado no Benchmarking e permitir uma comparação dos processos e práticas das empresas (McCormack; Ladeira; Oliveira, 2008).

Além do modelo SCOR, Lockamy III e McCormack (2004) e McCormack, Ladeira e Oliveira (2008), basearam-se também no BPO (*Business Process Orientation*), que sugere que as empresas podem melhorar seu desempenho geral adotando uma visão de processo da organização. Dessa forma, concluíram que o desempenho do processo de SCM coletado pela área do SCOR está fortemente relacionado à maturidade do SCM. Constataram ainda existência de uma correlação do nível de capacidade dos processos com o nível de maturidade da Cadeia de Suprimentos, ou seja, quanto mais competência, aptidão, habilidade, estabilidade e acuracidade dos processos, maior será o nível de maturidade da Cadeia de Suprimentos.

Os modelos de Lockamy III e McCormack (2004); McCormack, Ladeira e Oliveira (2008), dividem o nível de maturidade em cinco estágios: (1) *ad hoc*; (2) definida; (3) conectada; (4) integrada e (5) estendida, como:

1) *Ad hoc*: é o primeiro nível do modelo, é caracterizado por práticas indefinidas e não estruturadas. Medições de processo não são aplicadas e estruturas organizacionais não são baseadas em processo horizontal na Cadeia de Suprimentos. O desempenho é imprevisível e os custos são altos. Cooperação funcional e os níveis de satisfação do cliente são baixos.

2) Definido: no segundo nível, o básico dos processos da Cadeia de Suprimentos é definido e documentado. Há poucas mudanças organizacionais. O desempenho é mais previsível. E para superar problemas interfuncionais, é necessário um esforço considerável e os custos permanecem altos. Os níveis de satisfação do cliente melhoram, mas ainda são insatisfatórios.

3) Conectados: no terceiro nível, as estruturas organizacionais tornam-se mais orientadas horizontalmente, atribuindo responsabilidade aos “donos do processo”. Há uma maior cooperação intraorganizacional, com as funções, os fornecedores e os clientes representados por equipes que partilham as medidas e objetivos comuns. Essas equipes trabalham em melhoria contínua e análise da causa raiz, que resultam em melhor desempenho. Os clientes ficam diretamente envolvidos, já que a eficiência melhora com os esforços focalizados nas atividades dos processos.

4) Integrado: no quarto nível, a empresa, os fornecedores e os clientes cooperam estrategicamente no nível do processo. As estruturas organizacionais e atividades são baseadas nos princípios da Logística e as tarefas tradicionais começam a desaparecer e são substituídas por atividades amplas da Cadeia de Suprimentos. As medições de desempenho são amplamente implantadas e a colaboração é usada na maioria das atividades, os objetivos da melhoria dos processos são atribuídos às equipes e os custos são drasticamente reduzidos. A satisfação do cliente e o espírito de equipe torna-se uma vantagem competitiva.

5) Estendido: no quinto nível, caracteriza-se por equipes multi-organizacionais, processos expandidos, autoridade e objetivos reconhecidos em toda a Cadeia de Suprimentos. A base de suporte é construída por meio da confiança e da interdependência. A cultura horizontal é focada no cliente. O desempenho do processo e a confiança no sistema são medidos, assim como, os investimentos e o ROI (*Return of Investment*) em melhorias também são compartilhados para todos.

Já o *Supply Chain Management Maturity* (SCMM) de Handfield e Straight (2004) utilizou os conceitos de orientação pelo processo de negócios BPO e o SCOR. Divide o nível de maturidade em cinco estágios: (i) *ad hoc*; (ii) definida; (iii) conectada; (iv) integrada; e (v) estendida. O objetivo do estudo foi determinar um modelo de avaliação de maturidade integrada entre as funções da Cadeia de Suprimentos no processo de terceirização (cliente e fornecedor) e as áreas de processos: desenvolvimento, manufatura, entrega, venda e manutenção.

No modelo de Maturidade PRTM (2005) desenvolvido por uma joint-venture entre a PRTM *Management Consultants* e o *Performance Measurement Group*, foi dado o enfoque na combinação de benchmarking com a experiência no campo de conhecimento. Utiliza os estágios de capacidade de cada uma das quatro áreas de processo (planejamento, fornecimento, manufatura e entregas) definido pelo SCOR e classifica as práticas com uma visão geral da

SCM para identificar o nível de maturidade da organização. Este modelo de maturidade identifica o ponto de equilíbrio das práticas de maturidade atuais e auxilia as empresas focarem os processos críticos que irão alavancar a maturidade geral. Os quatro estágios de maturidade são:

- a) Foco funcional: Processo de Cadeia de Suprimentos discreto, fluxo de informações bem documentado e compreendido. Recursos gerenciados; medidos o seu desempenho em nível funcional.
- b) Integração interna: Modelo de processo e dados horizontalmente por toda a empresa; mede os níveis de empresa continuamente, processo e diagnóstico; recursos gerenciados nos níveis funcionais e interfuncionais.
- c) Integração externa: parceiros estratégicos em toda a cadeia de fornecimento global colaboram para: identificar objetivos de negócios e planos de ação conjuntos; impor processos comuns e compartilhamento de dados; definir, monitorar e reagir a métricas de desempenho.
- d) Colaboração cruzada por toda empresa: As soluções de TI e e-business permitem uma estratégia de Cadeia de Suprimentos colaborativa que: alinha as empresas participantes aos objetivos de negócio e processos associados; resultam em planejamento, decisão, tomada e execução em tempo real da Cadeia de Suprimentos; respostas às necessidades do cliente.

Já o modelo de Lahti, Shamsuzzoha e Helo (2009) foi baseado no modelo PRTM, o foco principal foi a determinação específica de cada estágio de maturidade em diferentes áreas e práticas da Cadeia de Suprimentos, dessa forma, a empresa pode identificar seu estágio atual de maturidade e determinar os próximos passos para melhorar seu desempenho. A pesquisa realizou um questionário com 128 perguntas e desenvolveu uma matriz do modelo que relaciona os quatro estágios de maturidade: (1) foco funcional; (2) integração interna; (3) integração externa e (4) colaboração cruzada por toda empresa, que representa do menor (1) ao maior (4) nível de maturidade.

Esses estágios são correlacionados com cinco áreas da SCM: (i) planejamento; (ii) fornecimento; (iii) manufatura; (iv) entregas e (v) visão geral subdivididos em 16 subáreas, dessa maneira será possível mapear e identificar as práticas dominantes e práticas futuras para o desenvolvimento de cada nível de maturidade. Nos últimos anos, alguns MM's foram mais específicos para área logística como a pesquisa desenvolvida por Follmann (2012), com o objetivo de elaborar um modelo de maturidade logística para identificar a maturidade da

logística em empresas industriais de grande porte e desenvolver uma escala chamada de Índice Potencial de Maturidade (IPM) que mensura o percentual dos estágios já alcançados e aqueles que ainda necessitam ser trabalhados, a partir da análise do indicador estágio de maturidade (EM) que revela o atual estágio de maturidade da logística.

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram abordadas três áreas da logística: a logística de suprimentos, a logística interna e a logística de distribuição, compreendendo as atividades de transporte e movimentação, armazenagem, gestão de estoques, embalagens e processamento de informação. Foram identificados sete atributos que compreendem a logística, são eles: estratégia, estratégia organizacional, integração, agilidade, mensuração, responsabilidade ambiental e competência. Com base nesses atributos noventa práticas foram avaliadas, que posteriormente foram organizadas conforme as etapas da logística.

Outro modelo voltado para a maturidade logística foi desenvolvido nos estudos de Battista, Fumi e Schiraldi (2012), que apresentaram estruturas de um Modelo de Maturidade Logística (MML) baseado no modelo de maturidade CMM, que considera quatro áreas chaves da Cadeia de Suprimentos: (i) planejamento; (ii) aquisição; (iii) armazenamento e (iv) distribuição. O LMM é composto de quatro pilares:

1. Estrutura de modelagem: identifica as principais áreas de processo logístico, atribuindo a cada estrutura específica multinível de processos e subprocessos;
2. Estrutura de maturidade: Avalia o nível de maturidade de cada área/processo/sub processo logístico, por meio da comparação das metas alcançadas;
3. Estrutura de desempenho: Auxilia na análise quantitativa dos desempenhos de cada área/processo/sub processo logístico, através da escolha do conjunto de indicadores específicos e mais adequados;
4. Estrutura de melhorias contínuas: realiza a conexão entre a pontuação da maturidade, os indicadores de desempenho e as possíveis boas práticas para cada área/processo/subprocesso logístico.

Após o estudo dessa seção, nota-se que alguns modelos visam analisar a maturidade a partir das dimensões internas, outros modelos focam as análises nas dimensões externas. Já os modelos mais atuais buscam avaliar a maturidade além dessas dimensões, as dimensões sociais, ambientais e de forma integrada entre os atores da cadeia. Contudo, as abordagens e os

enfoques dos MM's são muito genéricos, com isso, os estágios dos modelos também apresentam variação entre si, o que dificulta o correto entendimento e o amplo uso.

Nesse sentido, uma atenção especial deve-se ser dada para a fase de concepção de um modelo de maturidade, já que requer uma definição para qual propósito o modelo será desenvolvido, assim para um melhor entendimento e uma visão clara dos objetivos do modelo, no próximo tópico serão relatadas as principais abordagens utilizadas no desenvolvimento dos MM's.

3.5.3. Modelos de Maturidade contemporâneos

Diante dessa diversidade de estruturas e enfoques apresentados nos modelos de maturidade logísticos tradicionais, torna-se evidente a necessidade de incorporar novas variáveis e dimensões ao processo avaliativo. Assim, os modelos contemporâneos surgem como resposta a essas lacunas, ampliando o escopo analítico ao integrar tecnologias emergentes, sustentabilidade e inteligência adaptativa.

Os modelos de maturidade contemporâneos evoluíram significativamente desde os primeiros frameworks, incorporando uma série de novos elementos, como a transformação digital e a sustentabilidade. O modelo *Gartner Supply Chain Maturity Model*, por exemplo, propõe cinco níveis de maturidade: reativo, controlado, padronizado, proativo e autônomo. Cada nível reflete o grau de digitalização e integração tecnológica das cadeias de suprimentos, sendo o nível autônomo caracterizado pelo uso intensivo de IA e automação para gerenciar as operações com mínima intervenção humana (GARTNER, 2020).

Segundo Weerabahu *et al.*, (2023), os modelos mais recentes são projetados para medir a capacidade digital das empresas, avaliando a adoção de IoT, big data, e inteligência artificial em suas operações logísticas. Essas tecnologias são vistas como críticas para permitir uma resposta mais rápida e eficaz às mudanças do mercado global, especialmente em um contexto de crescente complexidade e volatilidade (Weerabahu *et al.*, 2023). Além disso, a digitalização permite uma maior visibilidade e controle em tempo real das operações, reduzindo os tempos de ciclo e otimizando a utilização de recursos.

A transformação digital também facilita a implementação de práticas de sustentabilidade, um dos pilares da Logística 5.0. Benton e Tontini (2019) sugerem que a digitalização permite uma gestão mais eficiente dos recursos, reduzindo desperdícios e melhorando a sustentabilidade em toda a cadeia de suprimentos. O uso de *blockchain*, por

exemplo, pode aumentar a transparência e rastreabilidade dos produtos, garantindo práticas mais éticas e ambientalmente responsáveis (Benton e Tontini, 2019).

Outro modelo contemporâneo, o *Logistics Performance Measurement System* (LPMS), se concentra na avaliação do desempenho logístico em termos de eficiência, inovação e sustentabilidade. O LPMS foi criado para ajudar as empresas a medirem seu progresso em direção à maturidade logística, permitindo que elas alinhem suas operações com as melhores práticas globais. Segundo *Hansali et al.*, (2022), esse modelo é particularmente útil para empresas que operam em mercados emergentes, onde os recursos limitados e as barreiras estruturais dificultam a implementação de práticas de maturidade mais avançadas.

O modelo LPMS também incorpora indicadores de resiliência, medindo a capacidade das empresas de se recuperarem de interrupções na cadeia de suprimentos, como desastres naturais ou crises econômicas (*Hansali et al.*, 2022). Isso é especialmente importante no contexto da Logística 5.0, onde as cadeias de suprimentos precisam ser adaptáveis e resilientes para enfrentar os desafios de um ambiente de negócios cada vez mais imprevisível.

3.6. Abordagem dos Modelos de Maturidade

Com a evolução dos Modelos de Maturidade (MM's), que agora incorporam critérios digitais, sustentáveis e resilientes, é necessário compreender suas estruturas conceituais e objetivos. Segundo *De Bruin et al.*, (2005) e *Maier, Moultrie e Clarkson* (2012), os MM's podem ser classificados como descritivos, prescritivos ou comparativos. Modelos descritivos avaliam o estágio atual da organização sem indicar melhorias. Modelos prescritivos, por sua vez, oferecem caminhos para evolução e desempenho. Já os comparativos possibilitam a análise entre diferentes unidades ou contextos.

Dessa forma, o Apêndice B apresentada na sequência sistematiza e valida empiricamente essas abordagens teóricas, demonstrando como os modelos têm sido aplicados conforme diferentes propósitos e realidades. Reforça-se, assim, a importância do alinhamento entre a finalidade do modelo e o contexto organizacional no qual será implementado. Além disso, compartilha um panorama das principais citações utilizadas na fundamentação teórica do modelo IMAL 5.0, evidenciando a diversidade metodológica e a solidez científica das bases que sustentam a pesquisa. Cada entrada na tabela explicita a citação direta, os autores, o tipo de metodologia empregada (como revisão teórica ou discussão conceitual) e a plataforma científica na qual o trabalho foi publicado, como *ScienceDirect*, *IEEE Access* e *Web of Science*. Essa sistematização permite visualizar de forma objetiva a credibilidade das fontes utilizadas,

além de reforçar o caráter interdisciplinar e contemporâneo da literatura científica que embasa a estrutura do índice. A seleção foi realizada com base na relevância dos estudos para as dimensões da Logística 5.0, integrando abordagens sobre sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e integração digital (Romero e Stahre, 2021; Ghobakhloo *et al.*, 2023; Nahavandi, 2021).

Essas abordagens apesar de serem consideradas distintas, representam fases evolutivas do ciclo de vida de um modelo, com melhorias e possibilidades de melhorias contínuas. A estrutura de desenvolvimento do modelo de maturidade de De Bruin *et al.*, (2005) serve como base sólida para o modelo de maturidade proposto no estudo. Primeiro, a fase descritiva foi o objetivo para identificar e compreender o estado atual da organização, para em uma segunda fase a realização de um planejamento para a prescrição das práticas e tecnologias a serem adotadas para uma ascensão nos níveis de maturidade. Entretanto, devido ao nível de incerteza das ações de implementação e os impactos que possam causar, a fase preditiva é identificada como importante e sugerida por Oleśków-Szłapka e Stachowiak (2018), que tem o objetivo de prever os resultados das ações planejadas por meio de simulações para refletir o ambiente real da organização e garantir o escalonamento nos níveis de maturidade.

O quadro 4, apresentado a seguir, sistematizou as principais referências teóricas que sustentam o desenvolvimento do modelo IMAL 5.0, destacando a diversidade metodológica e a robustez científica da literatura utilizada. Cada entrada explicita uma citação direta, os autores correspondentes, a metodologia adotada (como revisão teórica, ensaio, análise DEMATEL ou modelo conceitual) e a plataforma científica de publicação (como *ScienceDirect*, *IEEE Access*, *Emerald* ou *Web of Science*). Tal sistematização contribuiu para reforçar a credibilidade e relevância das fontes utilizadas, ao mesmo tempo em que evidencia o caráter multidisciplinar e atual das contribuições teóricas que fundamentam as dimensões da Logística 5.0 — sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e hiperconectividade (Romero e Stahre, 2021; Ghobakhloo *et al.*, 2023; Nahavandi, 2021).

Essas abordagens, embora distintas em suas metodologias, convergiram para a construção de modelos mais completos e aplicáveis à realidade dinâmica das cadeias logísticas modernas. Conforme propõem De Bruin *et al.* (2005), os modelos de maturidade podem ser descritivos (avaliam o estágio atual), prescritivos (sugerem ações de melhoria) ou comparativos (permitem benchmarking). Oleśków-Szłapka e Stachowiak (2018) ampliaram esse entendimento ao sugerirem uma fase preditiva, baseada em simulações, como forma de antever os impactos das decisões planejadas.

Quadro 4 - Principais abordagens dos MM's

ESTUDO	ABORDAGEM	DESCRIÇÃO
Curtis e Paulk (1993)	Descritiva	Descrevem o CMM
Crawford (2006)	Descritiva	Desenvolveram um MM descritivo para o gerenciamento de projetos
Serna (2012)	Descritiva	MM para descrever o gerenciamento do conhecimento
Wong et al. (2013)	Descritiva	Descreve um BPM (Business Process Model) e desempenho organizacional
Oré e Lozada (2017)	Descritiva	MM descritivo de um e-governo
Raza, Capretz, e Ahmed (2012)	Descritiva	Descreve um MM para um código aberto
Vezzetti, Violante e Marcolin (2013)	Comparativa	Compara os atributos de 6 gerenciamentos de ciclo de vida de produtos. (Nível de maturidade, Dimensões, Linhas gerais de implementação e Ano de publicação)
Duarte e Martins (2013)	Comparativa	Compara 9 MM's educacionais
Bamford e Deibler (1993); Saiedian e Kuzara (1995); Rozman et al. (1997); Van der Pijl, Swinkels e Verrijdt (1997); Lee e Chang (2006)	Comparativa	Desde a década de 90 o CMM se compara com os requisitos da norma da ISO 9001 (Contexto da Organização, Liderança, Planejamento, Recursos, Operação, Avaliação de desempenho e Melhorias)
Schuppan e Rußwurm (2000)	Comparativa	Compara o CMM com outros instrumentos de gerenciamento, V-model 97, Desenvolvimento de padrão para sistemas de TI na Alemanha
Haase (1996) e Kitson (1996)	Comparativa	O CMM é comparado com o SPICE (Software Process Improvement Capability Determination)
González-Rojas, Correal e Camargo (2016) e Storm <i>et al.</i> (2014)	Prescritivo	Propõem ações para cada transição entre todos os níveis de maturidade
Solar <i>et al.</i> (2014)	Prescritivo	Estabeleceram 15 recomendações prescritivas para um caso específico em que o objetivo é maximizar o nível de maturidade de dados abertos do governo em órgãos públicos
Pigosso, Rozenfeld e McAloone (2013)	Prescritivo	Recomendam melhorar o nível de maturidade de oito projetos de ecodesign pelas empresas manufatureiras

Fonte: Adaptado de Tarhan, Turetken e Reijers (2016); Santos-Neto e Costa (2019).

O quadro 04, portanto, não apenas resumiu essas contribuições, como também validou a coerência entre o modelo IMAL 5.0 e as práticas metodológicas contemporâneas identificadas na literatura (Tarhan; Turetken; Reijers, 2016; Santos-Neto; Costa, 2019).

A abordagem descritiva apresenta-se como a mais utilizada no desenvolvimento de MM's, seguida pela abordagem comparativa, que utiliza o CMM como base de referência. A menos usual é a abordagem prescritiva, os artigos classificados como prescritivos atuam em áreas como: engenharia de software / gerenciamento da TI e Sistemas de Informação (SI), sustentabilidade / gerenciamento de energia e gerenciamento de pessoas. Segundo Maier, Moultrie e Clarkson (2012), nesse tipo de pesquisa as ações específicas e detalhadas devem ser claras para cada nível de maturidade de uma área de processo. Assim, os MM's apoiarão as tomadas de decisões no gerenciamento organizacional com o intuito de obter um desempenho evolutivo. No entanto, as poucas pesquisas com uma abordagem prescritiva enfrentam dificuldades quanto à aplicação prática e manutenção para melhoria contínua dos modelos.

Desta forma, apesar de ser muito complexa a tarefa de analisar o desempenho das empresas principalmente no que se refere ao nível de sofisticação com que as atividades da Cadeia de Suprimentos e Logística são executadas. Os MM's demonstraram ser uma ferramenta útil para identificar o grau de maturidade em que as empresas se encontram, além de suportar as tomadas de decisões e alinhar as ações de melhorias contínuas no alcance dos objetivos e metas definidos nas estratégias organizacionais. Assim, na próxima seção serão abordados os principais MM's na área logística e ainda como esses modelos estão se desenvolvendo no ambiente da Indústria 4.0.

3.6.1 Ferramentas de avaliação e indicadores de desempenho em logística

Dessa forma, torna-se evidente que os Modelos de Maturidade não apenas contribuem para o diagnóstico do nível organizacional, mas também fornecem diretrizes para orientar ações de melhoria contínua. No entanto, para que essa evolução seja mensurável e gerenciável, é fundamental o uso de ferramentas complementares que sustentem o processo decisório com base em evidências. Segundo Battista e Schiraldi (2013), é importante explorar os principais instrumentos de avaliação e indicadores de desempenho (KPIs) aplicados à logística no contexto da Indústria 5.0, ampliando a capacidade de monitoramento estratégico das operações.

No contexto da Indústria 5.0, os modelos de maturidade logística devem incluir uma ampla gama de ferramentas de avaliação e indicadores de desempenho (KPI's) que considerem não apenas a eficiência operacional, mas também a sustentabilidade, a adaptabilidade e a integração humano-tecnológica. A inclusão de KPIs específicos para esses aspectos permite que as empresas obtenham uma visão mais abrangente de suas operações e identifiquem áreas que necessitam de aprimoramento, alinhando-se aos princípios da Indústria 5.0.

A medição do desempenho logístico na indústria 5.0 requer ferramentas avançadas de análise de dados, que permitam coletar e processar informações em tempo real. Isso possibilita uma gestão mais proativa das operações, onde problemas podem ser identificados e resolvidos antes de impactarem a cadeia de suprimentos. Ferramentas de análise preditiva baseadas em IA são particularmente úteis nesse contexto, pois permitem que as empresas antecipem variações na demanda e ajustem suas operações logísticas de maneira eficiente e precisa. Além disso, a IA pode ser utilizada para monitorar o cumprimento dos KPI's e garantir que as metas de sustentabilidade e eficiência sejam alcançadas.

Outro aspecto importante dos indicadores de desempenho na Indústria 5.0 é a mensuração do impacto social e ambiental das operações logísticas. Em vez de focar exclusivamente na eficiência operacional, os KPIs da logística 5.0 devem considerar métricas de sustentabilidade, como emissões de carbono, consumo energético e desperdício de materiais. Esses indicadores permitem que as empresas avaliem o impacto de suas operações no meio ambiente e implementem práticas de logística verde que contribuam para a sustentabilidade da cadeia de suprimentos. Além disso, o uso de ferramentas de rastreabilidade, como o blockchain, pode ajudar a monitorar a conformidade com os padrões de sustentabilidade e a transparência nas operações logísticas.

A integração de indicadores de desempenho voltados para o bem-estar humano é outra inovação trazida pela Indústria 5.0 para a logística. Esses indicadores permitem que as empresas monitorem o impacto das condições de trabalho na saúde e segurança dos colaboradores, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e saudável. Isso é particularmente importante em operações logísticas que envolvem o uso de robótica colaborativa, onde é essencial garantir que os trabalhadores estejam protegidos e que as máquinas operem de maneira segura ao lado dos humanos.

Por fim, a combinação de ferramentas de avaliação avançadas e indicadores de desempenho abrangentes permite que as empresas desenvolvam uma visão mais estratégica de suas operações logísticas. Essa abordagem orientada por dados promove uma tomada de decisão mais embasada, possibilitando ajustes rápidos e precisos nas operações logísticas e assegurando que os objetivos de sustentabilidade e eficiência sejam atingidos. Portanto, os modelos de maturidade logística para a Indústria 5.0 devem incorporar esses elementos para garantir que as operações logísticas estejam alinhadas com os princípios e valores dessa nova fase industrial.

3.6.2. Personalização e flexibilidade

Nesse contexto, ao mesmo tempo em que os indicadores orientam decisões mais estratégicas e humanizadas, a Indústria 5.0 também reforça a necessidade de sistemas logísticos adaptáveis e centrados no cliente. Essa evolução não se limita à eficiência ou à sustentabilidade, mas estende-se à capacidade de personalização e flexibilidade dos serviços logísticos. Para Groschopf *et al.*, (2021), esses atributos tornam-se essenciais para atender, de forma proativa, às exigências de mercados dinâmicos e consumidores cada vez mais exigentes.

Assim, a transição para a Indústria 5.0 introduz um novo paradigma na logística, centrado na capacidade de personalizar e adaptar as operações de forma rápida e eficiente às mudanças nas demandas dos consumidores. Em um contexto em que a customização e a flexibilidade são cada vez mais valorizadas, o conceito de logística 5.0 atende a essas expectativas ao permitir que os processos logísticos não apenas respondam, mas também se antecipem às necessidades dos clientes. A aplicação da personalização, portanto, não está apenas em produtos, mas também em serviços, como a entrega, o processamento de pedidos e a comunicação com os clientes.

O aumento da demanda por personalização traz consigo a necessidade de uma maior integração entre a logística e as tecnologias de automação e análise de dados. A introdução de sistemas ciber-físicos (CPS) e gêmeos digitais na Indústria 5.0 tem sido essencial para permitir que as operações logísticas atinjam níveis de personalização que anteriormente eram impensáveis. Os gêmeos digitais, por exemplo, criam réplicas virtuais dos processos logísticos que permitem simulações em tempo real e ajustes instantâneos com base nos dados coletados, resultando em uma logística altamente personalizada e flexível (Azarian e Yu, 2022).

Além disso, a integração humano-tecnológica desempenha um papel fundamental na personalização e flexibilidade da logística 5.0, promovendo um ambiente colaborativo onde robôs e humanos trabalham lado a lado. A robótica colaborativa, ou *cobots*, proporciona uma flexibilidade sem precedentes nas operações logísticas, permitindo que tarefas repetitivas e extenuantes sejam realizadas por robôs, enquanto os humanos se concentram em atividades de maior valor e de natureza mais complexa. Essa colaboração aumenta a eficiência e permite ajustes rápidos e personalizados em resposta às mudanças no ambiente operacional (Battista e Schiraldi, 2013).

A personalização na logística também é impulsionada pela análise preditiva e pelo uso de *machine learning* para antecipar as demandas dos clientes e ajustar os estoques e as

operações de acordo. Com esses recursos, as empresas podem identificar padrões de consumo e prever picos de demanda, otimizando a alocação de recursos para evitar interrupções e melhorar o tempo de resposta. Por exemplo, ao prever a alta demanda de certos produtos em determinadas épocas do ano, as empresas podem adaptar a logística de armazenamento e distribuição, proporcionando uma experiência de compra mais fluida e satisfatória para o cliente (Silva e Thomé, 2018).

Outro aspecto importante da personalização na logística 5.0 é a flexibilidade nas entregas, especialmente no que se refere à última milha (*last mile delivery*). A utilização de drones e veículos autônomos tem sido explorada para oferecer opções de entrega mais rápidas e ajustáveis, permitindo que os consumidores escolham o horário e o local de entrega que melhor se adequem às suas necessidades. Esse nível de personalização na entrega não apenas melhora a satisfação do cliente, mas também aumenta a eficiência logística ao reduzir o tempo e o custo das operações (Jefroy *et al.*, 2022).

A flexibilidade nas operações logísticas 5.0 também depende da integração de plataformas de gestão e controle que permitem uma visão unificada e centralizada de todos os processos logísticos. Essas plataformas utilizam Inteligência Artificial (IA) para monitorar e ajustar automaticamente os processos com base nos dados coletados em tempo real. Com essa integração, as empresas conseguem coordenar diferentes partes da cadeia de suprimento de maneira ágil, adaptando-se rapidamente a variações de demanda e promovendo uma logística flexível e adaptável (Coşkun e Kazan, 2023).

Por fim, a capacidade de personalização na logística 5.0 é aprimorada pela inclusão de tecnologias emergentes, como realidade aumentada (RA) e realidade virtual (RV), que facilitam o treinamento e a adaptação dos colaboradores aos novos processos. Essas tecnologias permitem que os colaboradores visualizem operações complexas em um ambiente virtual, aprimorando a compreensão e a capacidade de resposta às mudanças. Esse aspecto é particularmente valioso em ambientes de alta demanda por customização, pois permite que os operadores se adaptem rapidamente a diferentes cenários operacionais, promovendo uma logística mais dinâmica e responsiva (Groschopf *et al.*, 2021).

3.7. Inferências sobre a evolução dos Modelos de Maturidade de logística

Com a incorporação de tecnologias imersivas e foco na personalização, a logística 5.0 redefine os critérios de excelência operacional. Esse avanço exige modelos de maturidade mais

abrangentes, capazes de refletir as transformações tecnológicas, humanas e sustentáveis que moldam as cadeias logísticas na era da Indústria 5.0.

Desta feita, a evolução dos modelos de maturidade logística para a indústria 5.0 reflete a transição de uma abordagem centrada na eficiência para uma abordagem que valoriza igualmente a sustentabilidade, a colaboração humano-tecnológica e a personalização. Esses novos modelos oferecem uma visão mais abrangente e flexível das operações logísticas, permitindo que as empresas desenvolvam cadeias de suprimento adaptativas e alinhadas com os valores sociais e ambientais. Como discutido, a integração de IA, robótica colaborativa e blockchain nos modelos de maturidade permite que as empresas alcancem níveis mais altos de eficiência e flexibilidade, alinhando-se às demandas da Indústria 5.0 (Battista e Fumi, 2013).

Os modelos de maturidade logística evoluíram para incluir métricas de sustentabilidade e responsabilidade social, reconhecendo que o sucesso logístico vai além da eficiência e do lucro. Essa transformação é essencial para que as empresas atendam às expectativas dos consumidores modernos, que buscam cada vez mais transparência e práticas responsáveis. Nesse contexto, os modelos de maturidade para a Indústria 5.0 não só contribuem para o aprimoramento contínuo das operações logísticas, mas também fortalecem a posição das empresas em um mercado global competitivo e ético.

Além disso, para Fraboni, Brendel e Pietrantonio (2023), a ênfase na personalização e na flexibilidade permite que os modelos de maturidade logística se adaptem às flutuações do mercado e às necessidades dos consumidores, promovendo uma logística mais centrada no cliente. Essa abordagem personalizada representa uma vantagem competitiva significativa para as empresas, pois melhora a satisfação do cliente e a fidelização a longo prazo.

Os novos modelos de maturidade logística são uma ferramenta estratégica para que as empresas se posicionem na vanguarda da indústria 5.0, promovendo uma logística mais eficiente, sustentável e adaptável. Ao adotar esses modelos, as empresas não só aumentam sua competitividade, mas também contribuem para o desenvolvimento de uma economia mais justa e sustentável. Portanto, a evolução dos modelos de maturidade logística é uma resposta essencial aos desafios e oportunidades da Indústria 5.0, consolidando a logística como um pilar fundamental para o sucesso dessa nova era industrial.

Finalmente, a transição dos modelos de maturidade logística para a Indústria 5.0 requer superar limitações históricas ao incorporar dimensões humanas, sustentáveis e inclusivas. Embora eficazes na mensuração de progresso, muitos modelos falham em considerar o bem-

estar dos trabalhadores, especialmente diante da crescente colaboração homem-máquina (Werner-Lewandowska e Kosacka-Olejnika, 2018). Além disso, negligenciam as particularidades das pequenas e médias empresas (PMEs), que enfrentam desafios financeiros e tecnológicos para acompanhar o avanço das grandes corporações (Benton e Tontini, 2019). Outra crítica relevante refere-se à ausência de métricas voltadas à sustentabilidade, foco crescente nas cadeias globais, mas ainda subvalorizado frente à eficiência operacional (Coşkun e Kazan, 2023). Assim, propõe-se o desenvolvimento de modelos mais inclusivos, capazes de integrar variáveis sociais, ambientais e adaptativas às diferentes realidades empresariais. Tais modelos alinham-se aos valores da Indústria 5.0, promovendo cadeias logísticas mais responsáveis, resilientes e justas.

CAPÍTULO IV. DESENVOLVIMENTO DO MODELO IMAL 5.0

O Capítulo IV constitui o núcleo conceitual e metodológico desta tese, pois apresenta de forma estruturada a construção e o desenvolvimento do Modelo de Medição da Maturidade da Logística 5.0 (IMAL 5.0). Ao consolidar os fundamentos teóricos discutidos nos capítulos anteriores, esta seção viabiliza a transição do plano teórico para a aplicação prática do modelo, estabelecendo as diretrizes que nortearam sua formulação, como a integração entre as principais categorias analíticas da logística 5.0 – tais como centralidade humana, sustentabilidade, integração digital e resiliência – em um sistema coerente e com operação.

Isso somente foi possível, também, em razão da análise crítica da literatura e da evolução dos modelos de maturidade logística apresentados no Capítulo III, entendendo que se tornou evidente a necessidade de aplicar esses conceitos à realidade prática das empresas, especialmente diante dos desafios e oportunidades impostos pela Indústria 5.0. A construção teórica do modelo IMAL 5.0 ofereceu uma base sólida para essa aplicação. Sabe-se que transformação digital tem impactado as cadeias de suprimentos de forma acelerada, fazendo com que as empresas adotem novas tecnologias e práticas para se manterem competitivas e atenderem às exigências de um mercado cada vez mais dinâmicas e exigentes. No meio dessa revolução, a Logística 5.0 surgiu como uma resposta para integrar tecnologias de ponta, como Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e *Big Data*, com uma abordagem centrada no ser humano e orientada para a sustentabilidade. Segundo Leng *et al.* (2022), essa nova fase da logística buscou não apenas a eficiência operacional, mas também a criação de cadeias de suprimentos resilientes, sustentáveis e colaborativas. No entanto, para que as empresas possam evoluir de forma estruturada na melhoria desses avanços, é fundamental o desenvolvimento de um modelo de atualização específico que aborde as características e exigência da Logística 5.0.

É nesse contexto que a nuvem de palavras conforme a figura 9 representou os principais conceitos centrais que fundamentam o desenvolvimento do Índice de Maturidade da Logística 5.0 (IMAL 5.0), evidenciando os eixos estruturantes da tese. Termos como “maturidade”, “IML5.0”, “digital”, “sustentabilidade” e “centralidade humana” destacam-se como pilares conceituais, indicando uma abordagem integrada entre transformação digital, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental. Palavras como “resiliência”, “desempenho”, “infraestrutura”, “eficiência” e “interoperabilidade” reforçaram a importância de sistemas logísticos adaptáveis, conectados e orientados por dados. A recorrência de expressões como

“inteligência artificial”, “computação analítica”, “IoT” e “cibersegurança” demonstra a influência da Indústria 5.0 na reconfiguração da cadeia de suprimentos. Por fim, a presença dos termos “Manaus”, “Polo” e “PIM” revelaram o foco territorial da pesquisa, alinhando os fundamentos teóricos às especificidades do contexto regional do Polo Industrial de Manaus. Assim, a nuvem sintetiza visualmente a convergência entre maturidade organizacional, tecnologias emergentes e os princípios norteadores da logística humanizada, sustentável e inteligente.

Inferese assim que a logística 5.0 representa uma extensão natural da logística 4.0, que se caracterizou pela automação e pela digitalização de processos logísticos através de tecnologias ciber-físicas. No entanto, enquanto a Logística 4.0 priorizava a eficiência e a redução de custos, a Logística 5.0 introduz uma dimensão adicional ao enfatizar a colaboração humano-máquina e a sustentabilidade. Como argumentam Nahavandi (2019) e Trstenjak *et al.* (2022), a Logística 5.0 coloca o ser humano no centro do processo, promovendo um equilíbrio entre automação e personalização e buscando um impacto positivo não apenas econômico, mas também social e ambiental. Essa abordagem exige um novo conceito para medir e gerenciar a maturidade logística, visto que os modelos de maturidade não capturaram integralmente a complexidade e as especificidades dessa nova fase.

Nesse sentido, o desenvolvimento de um Modelo de Maturidade para a Logística 5.0 é essencial para que as empresas possam avaliar seu estágio atual de desenvolvimento e planejar um desenvolvimento estruturado e eficaz. A aplicação de um modelo de maturidade fornece um roteiro que permite às organizações avançarem de forma gradual, passando por diferentes níveis de maturidade e adaptando-se às demandas de um ambiente de negócios cada vez mais exigente e em constante transformação (Ghobakhloo, 2020). Além disso, um modelo de modernidade específico para a Logística 5.0 permite que as empresas não apenas integrem tecnologias avançadas, mas também garantam uma operação sustentável e centrada no ser humano, atendendo às expectativas dos consumidores e stakeholders por práticas empresariais responsáveis e éticas. Estes aspectos são essenciais para uma cadeia de suprimentos moderna, que precisa ser capaz de enfrentar incertezas e adaptar-se rapidamente a eventos imprevistos, mantendo a segurança e o bem-estar dos colaboradores e minimizando o impacto ambiental.

Figura 14 - Nuvem de palavras IMAL 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

Um modelo de atualização para a Logística 5.0 deve considerar, portanto, dimensões específicas como infraestrutura tecnológica, sustentabilidade, integração e colaboração, resiliência climática, desempenho operacional e valorização do aspecto humano nas operações logísticas. Cada uma dessas dimensões desempenha um papel fundamental na construção de uma cadeia de suprimentos avançada e eficaz. No nível de infraestrutura e tecnologia, por exemplo, as empresas precisam investir em sistemas de IoT, IA e *Big Data* para obter uma visão em tempo real das operações e tomar decisões rápidas e informadas. Essas tecnologias permitem o monitoramento contínuo e preditivo da cadeia de suprimentos, diminuindo o tempo de resposta a problemas e aumentando a eficiência das operações.

Em relação à sustentabilidade, o modelo de maturidade deve avaliar o grau de adoção de práticas de logística verde e economia circular. Como aponta Klimecka-Tatar *et al.*; (2021), a sustentabilidade é um aspecto central na Logística 5.0, que busca não apenas melhorar o uso de recursos, mas também reduzir a pegada de carbono e promover práticas de conservação ambiental. As empresas que alcançam níveis mais altos de maturidade em sustentabilidade são aquelas que se integram completamente às práticas verdes em suas operações, utilizando veículos elétricos, energias renováveis e sistemas de gestão de resíduos que prejudicam a redução de impactos ambientais negativos.

A integração e a colaboração na cadeia de suprimentos são outra dimensão fundamental no modelo de maturidade da Logística 5.0, uma vez que a complexidade e a interdependência dos processos logísticos impedem uma comunicação eficiente entre todos os elos da cadeia. Plataformas digitais que permitem a troca de informações em tempo real entre fornecedores, distribuidores e clientes essenciais são essenciais para garantir uma operação fluida e adaptável. Björklund e Forslund (2018) argumentam que, ao aumentar o nível de colaboração, as empresas conseguem antecipar problemas, compartilhar soluções e melhorar a eficiência das operações. O uso de blockchain, por exemplo, facilita o rastreamento de produtos e garante a transparência das práticas logísticas, criando um ambiente de confiança mútua entre os parceiros da cadeia de suprimentos.

Além disso, a resiliência logística tornou-se uma necessidade crescente em virtude dos impactos das mudanças climáticas e de eventos imprevisíveis, como desastres naturais e globais na cadeia de suprimentos. Estudos recentes, como o de Espina-Romero *et al.*, (2023), demonstram que empresas com níveis avançados de maturidade na logística 5.0 são aquelas que integram ferramentas preditivas para antecipar riscos climáticos e que possuem planos de contingência robustos para lidar com crises. A resiliência logística permite que as empresas não

apenas respondam de maneira adversa a indiretas, mas também minimizem os impactos financeiros e operacionais decorrentes desses eventos.

Por fim, a valorização do aspecto humano na logística 5.0 diferencia esta fase das anteriores, pois coloca o trabalhador como um elemento central no processo de transformação digital. A introdução de tecnologias colaborativas, como robôs independentes e sistemas de IA, permite que os trabalhadores desempenhem atividades de maior valor, como a análise de dados e a resolução de problemas complexos. Nahavandi (2019) ressalta que, ao criar um ambiente de trabalho seguro e inclusivo, a Logística 5.0 aumenta a satisfação e o bem-estar dos colaboradores, promovendo um ambiente propício para a inovação e a produtividade.

Portanto, a introdução do Modelo de Maturidade para logística 5.0 representa um avanço estratégico para as empresas que buscam se adaptar a um cenário logístico em constante evolução. Ele oferece uma estrutura sistemática para avaliar a prontidão e o desenvolvimento das organizações em relação às demandas tecnológicas, ambientais e sociais. Ao integrar todas essas dimensões, o modelo permite que as empresas construam cadeias de suprimentos não apenas mais eficientes, mas também mais responsáveis, resilientes e centradas no ser humano. Com isso, a logística 5.0 torna-se um vetor de transformação que alinha os objetivos econômicos das empresas com as demandas globais por sustentabilidade e ética empresarial, consolidando-se como uma abordagem essencial para o futuro da logística global (Lanza *et al.*, 2022).

4.1 Construção conceitual do Modelo IMAL 5.0: Bases teóricas e metodológicas

A construção do modelo IMAL 5.0 – Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 – fundamenta-se em uma articulação rigorosa entre referenciais teóricos contemporâneos sobre logística, indústria 5.0 e modelos de maturidade, bem como em métodos analíticos consagrados para avaliação multicritério em sistemas complexos. O modelo foi concebido com o propósito de capturar, de maneira adaptativa e contextualizada, o grau de maturidade logística de empresas localizadas no Polo Industrial de Manaus (PIM), integrando critérios técnicos, humanos, sustentáveis e colaborativos.

Do ponto de vista teórico, o IMAL 5.0 incorpora os princípios da Logística 5.0, que ampliam os conceitos da Logística 4.0 ao incluir dimensões como centralidade humana, sustentabilidade socioambiental, integração digital inteligente e resiliência sistêmica. Nesse sentido, o modelo dialoga com autores como Romero e Stahre (2021), que defendem uma abordagem humano centrada da transformação industrial, e Ghobakhloo (2020), ao propor a

análise da maturidade digital sob múltiplas dimensões organizacionais. Metodologicamente, o IMAL 5.0 foi estruturado com base na lógica dos modelos de maturidade e no uso combinado da Escala Likert, da média ponderada e do método *Grey DEMATEL*. A figura 15 apresenta de forma consolidada as dimensões estruturantes do modelo IMAL 5.0, suas respectivas subdimensões críticas, autores de referência que embasam teoricamente cada eixo temático e as principais contribuições temáticas identificadas na literatura.

Figura 15 - Dimensões da Logística 5.0, Subdimensões Críticas, Referenciais Teóricos e Contribuições Temáticas para o Modelo IMAL 5.0

Dimensão	Descrição das Subdimensões críticas	Autores	Contribuição temática
Centralidade Humana	• Capacitação e desenvolvimento de pessoas • Cultura organizacional voltada à inovação • Bem-estar, saúde e ergonomia no ambiente de trabalho • Inclusão e diversidade nas práticas logísticas • Valorização da decisão humana frente à automação	Nahavandi (2019), Lanza et al. (2022), Romero e Stahre (2021), Yin et al. (2022)	Discutem a integração homem-máquina, ergonomia, capacitação e protagonismo do capital humano na Logística 5.0.
Sustentabilidade Ambiental e Social	• Gestão de resíduos e economia circular • Adoção de práticas verdes na cadeia logística • Responsabilidade social corporativa • Uso de energia limpa e renovável nas operações • Redução de emissões de carbono e impactos ambientais	Klimecka-Tatar et al. (2021), Ali et al. (2023), Nahavandi (2019), Espina-Romero et al. (2023)	Enfatizam práticas de logística verde, economia circular, emissões de carbono e alinhamento com metas ambientais.
Resiliência e Adaptabilidade	• Capacidade de resposta a rupturas e crises • Gestão de riscos e construção de planos de contingência • Redes logísticas flexíveis e redundância operacional • Adaptação a mudanças no mercado e nas demandas • Cibersegurança e continuidade operacional	Ivanov et al. (2021), Ali et al. (2023), Azarian e Yu (2022), Choi e Siqin (2022)	Focam em previsibilidade, aprendizado de máquina, cibersegurança, protocolos de contingência e resposta a eventos disruptivos.
Tecnologia e Automação	• Adoção de tecnologias emergentes (IoT, IA, Big Data) • Conectividade automação de processos logísticos • Interoperabilidade em sistemas e rastreabilidade digital • Ética digital, transparência e privacidade de dados • Integração entre parceiros e plataformas logísticas	Ghobakhloo (2020), Nahavandi (2019), Leng et al. (2022), Ivanov et al. (2021), Choi e Siqin (2022)	Abordam a integração de tecnologias digitais como IoT, IA, automação e sensores na cadeia logística para eficiência operacional.
Integração e Colaboração	• Eficiência nos custos logísticos • Qualidade na entrega (pontualidade, rastreabilidade) • Agilidade responsividade da operação • Confiabilidade os processos logísticos • Nível de digitalização e automação aplicada	Björklund e Forslund (2018), Ivanov et al. (2021), Choi e Siqin (2022), Van Erp et al. (2023)	Destacam a interligação entre setores e parceiros logísticos, rastreabilidade via blockchain e redes colaborativas.

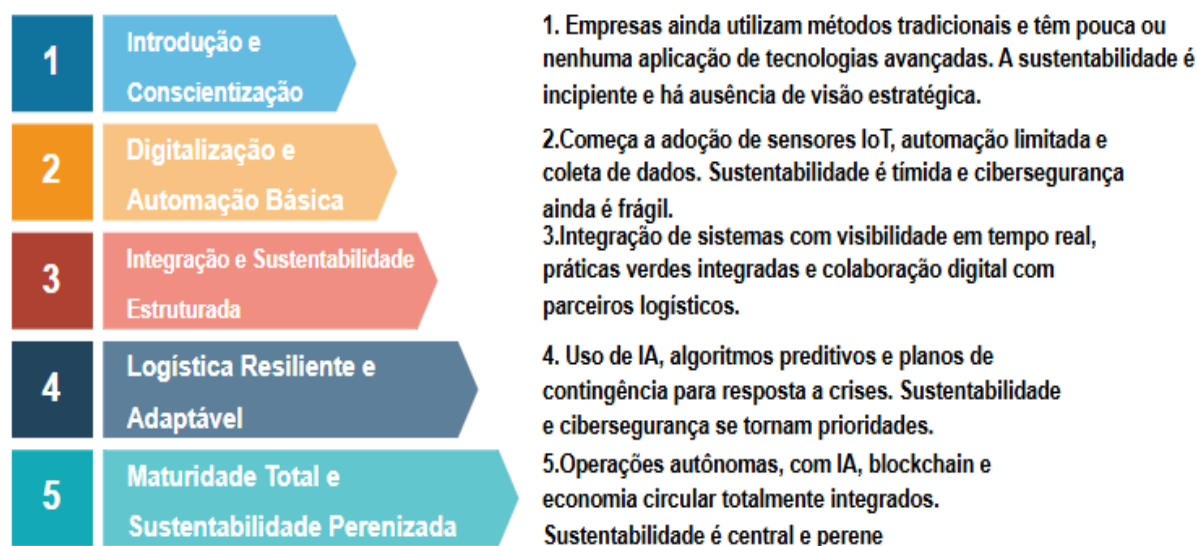
Fonte: Autoria Própria (2025).

4.2. Níveis de maturidade na logística 5.0

O modelo de atualização para logística 5.0 é composto por cinco níveis progressivos que refletem o avanço das empresas na implementação de tecnologias e práticas sustentáveis e centradas no ser humano conforme a figura 16. Cada nível é projetado para fornecer um guia claro de desenvolvimento, desde os estágios iniciais de digitalização até a maturidade total, onde as operações logísticas são sustentáveis, resilientes e altamente adaptáveis. Esses níveis

oferecem uma estrutura para avaliar o estágio atual da organização e estabelecer metas para o progresso na melhoria da logística, promovendo uma transição gradual e eficaz para uma operação avançada e colaborativa.

Figura 16 - Níveis de Maturidade na Logística 5.0: da conscientização à sustentabilidade perenizada



Fonte: Autoria Própria (2025).

4.2.1 Nível 1: introdução e conscientização

O primeiro nível do proposto modelo de maturidade, denominado Introdução e Conscientização, conforme figura 10 foi caracterizado pela ausência ou utilização mínima de tecnologias e práticas avançadas na logística. Neste estágio, as operações logísticas são, em grande parte, tradicionais, com um foco limitado na automação e digitalização. As empresas que se encontram nesse nível têm um entendimento inicial das tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e *Big Data*, mas a aplicação prática dessas ferramentas ainda é incipiente ou inexistente. Esse estágio representa o primeiro passo para que as empresas comecem a entender os benefícios potenciais dessas tecnologias para a eficiência e sustentabilidade das operações logísticas, estabelecendo as bases para uma transformação gradual.

Um dos principais desafios enfrentados pelas empresas neste nível é a falta de infraestrutura tecnológica necessária para suportar a digitalização dos processos logísticos. Muitas organizações ainda dependem de métodos tradicionais de gerenciamento de operações, como planilhas manuais e sistemas descentralizados, que não são adequados para a coleta e

análise de dados em tempo real. De acordo com Leng *et al.* (2022), essas limitações impedem que as empresas obtenham uma visão abrangente de sua cadeia de suprimentos, ou que reduza sua capacidade de responder de maneira ágil a mudanças na demanda ou temporárias no mercado. Assim, o estágio de introdução e conscientização é fundamental para preparar as empresas para o critério de uma logística mais avançada, pois incentivar a avaliação de tecnologias que podem transformar suas operações.

Outro aspecto relevante nesse nível é a necessidade de uma mudança cultural dentro das organizações. A adoção de tecnologias disruptivas exige uma mentalidade aberta à inovação e à adaptação constante. Para que as empresas possam avançar além do nível de introdução, é essencial que os líderes e colaboradores compreendam a importância da transformação digital e tenham interesse no aprendizado e se adaptem às novas práticas logísticas. Um passo crucial para a Logística 5.0, uma vez que a resistência interna à mudança é um dos principais obstáculos à implementação de tecnologias avançadas. Portanto, é necessário investir em programas de capacitação e comunicação interna que enfatizem os benefícios de longo prazo da transformação digital e ambiental para a cadeia de suprimentos.

Além da falta de infraestrutura e da resistência cultural, a ausência de uma visão estratégica clara também representa um desafio para as empresas nesse estágio. A Logística 5.0 requer uma abordagem estratégica que alinhe os objetivos de inovação tecnológica com as metas de sustentabilidade e centrimento humano. No entanto, muitas empresas em estágio inicial de maturidade logística não possuem uma estratégia bem definida para integrar essas dimensões em suas operações. Segundo Oran e Cezayirlioglu (2021), essa ausência de visão estratégica torna para as organizações identificarem quais tecnologias são mais adequadas para suas necessidades específicas e como elas podem ser inovadoras de maneira eficaz e economicamente viável.

Além disso, a sustentabilidade e as práticas verdes são considerações mínimas no nível de introdução e conscientização. Embora muitas empresas demonstrem interesse por práticas sustentáveis, poucas implementaram ações concretas para reduzir o impacto ambiental de suas operações. De acordo com Klimecka-Tatar *et al.*; (2021), a maioria das empresas nesse estágio limita-se a iniciativas isoladas de sustentabilidade, como a redução do consumo de papel ou a introdução de programas de reciclagem em pequena escala. Essas ações, embora positivas, são insuficientes para alcançar os objetivos de sustentabilidade da Logística 5.0, que desbloqueiam uma integração mais profunda de práticas verdes em todos os aspectos da cadeia de suprimentos.

O nível de introdução e conscientização também apresenta desafios relacionados à segurança da informação e à cibersegurança. À medida que as empresas começam a explorar a possibilidade de digitalizar suas operações logísticas, surgem preocupações quanto à proteção de dados e à vulnerabilidade a ataques cibernéticos. Como apontam Ali *et al.* (2023), muitas organizações ainda não possuem políticas ou sistemas adequados de cibersegurança, o que pode representar um risco significativo quando a digitalização começa a ser renovada. Essa falta de preparação para lidar com ameaças cibernéticas pode atrasar o progresso das empresas para os próximos níveis de maturidade, uma vez que a cibersegurança é um componente fundamental para a implementação segura da tecnologia digital.

Para que as empresas avancem além do nível de introdução e conscientização, é necessário que elas invistam na construção de uma infraestrutura básica de TI que permita a digitalização dos processos logísticos. Isso inclui a implementação de sistemas de coleta e análise de dados, a introdução de tecnologias de monitoramento e a criação de uma rede de comunicação eficiente entre os diferentes departamentos e parceiros logísticos. Além disso, é importante que as empresas adotem uma abordagem gradual para a implementação dessas tecnologias, começando com projetos-piloto que possam ser avaliados e ajustados antes de uma adoção mais ampla (Choi e Siqin, 2022). Os projetos-piloto podem incluir a automação de uma única etapa do processo logístico ou a introdução de sensores IoT para monitoramento de inventário, permitindo que a organização adquira experiência prática com as novas tecnologias.

Nesse sentido, a introdução e conscientização no contexto da logística 5.0 oferece às empresas a oportunidade de experimentar e entender as mudanças tecnológicas de forma progressiva, reduzindo os riscos associados à transformação digital. Como as organizações exploram as vantagens da tecnologia sem comprometer sua estabilidade operacional, o que pode ser especialmente importante em setores onde a logística desempenha um papel crítico na satisfação do cliente e na competitividade (Björklund e Forslund, 2018). No entanto, é importante que esta fase inicial não se prolongue indefinidamente, pois a falta de ação efetiva pode resultar numa defasagem competitiva significativa.

Além disso, para que as empresas possam desenvolver uma visão estratégica eficaz, é excepcional que realizem análises planejadas de benchmarking com empresas de referência no setor logístico. Isso pode ajudá-las a identificar práticas de sucesso e compreender as melhores maneiras de integrar tecnologias e práticas sustentáveis em suas operações (Leng *et al.*, 2022). Uma análise de benchmarking permite que as organizações comparem suas práticas com as dos líderes de mercado e adquiram uma compreensão mais clara dos benefícios da logística 5.0.

Em resumo, o nível de introdução e conscientização é uma fase de preparação para que as empresas possam se adaptar às novas exigências do mercado e às pressões por sustentabilidade e eficiência operacional. Esse nível representa a base para uma transição bem-sucedida para a logística 5.0, uma vez que estabelece o entendimento necessário para uma transformação logística mais profunda. As empresas que investem em conscientização e capacitação estão mais bem posicionadas para avançar para os níveis mais avançados de maturidade, onde a digitalização, a sustentabilidade e a colaboração humano-máquina tornam pilares de uma operação logística eficaz e moderna.

4.2.2 Nível 2: digitalização e automação básica

No nível 2 do modelo de maturidade para logística 5.0, conhecido como digitalização e automação básica, as empresas começaram a adotar tecnologias de digitalização e automação com o objetivo de melhorar a eficiência e a precisão de suas operações logísticas. Nesse estágio, a transformação digital avança em comparação ao nível de introdução, mas o uso das tecnologias ainda é isolado e com escopo limitado. De acordo com Machado (2025), o foco das empresas neste nível é a implementação de sistemas de monitoramento e coleta de dados que proporcionam maior visibilidade das operações, permitindo um controle mais preciso e ágil sobre as atividades logísticas.

A automação básica caracteriza-se pela introdução de tecnologias como sensores IoT para monitoramento de ativos e ambientes, sistemas de gestão de estoque automatizados e, em alguns casos, veículos guiados para entrega automática de mercadorias dentro dos armazéns. Essas tecnologias permitem que as empresas comecem a digitalizar partes do processo logístico, diminuindo a dependência de processos manuais e, consequentemente, minimizando erros e aumentando a eficiência operacional (Oran e Cezayirlioglu, 2021). No entanto, o nível de automação ainda é básico, e a integração entre as diferentes tecnologias é limitada, com cada sistema operando de maneira relativamente independente.

Um dos principais benefícios da digitalização e automação básica é a capacidade de melhorar a precisão e a velocidade das operações logísticas. A introdução de sensores IoT, por exemplo, permite o monitoramento em tempo real do inventário e das condições de transporte, o que facilita o controle de qualidade e reduz o risco de perda de produtos devido às condições prejudiciais de armazenamento ou transporte (Choi e Siqin, 2022). Esse monitoramento constante também permite que as empresas respondam de forma mais rápida e precisa às

mudanças na demanda ou aos problemas logísticos, aumentando a agilidade e a resiliência da cadeia de suprimentos.

Além disso, o uso de tecnologias de automação permite que as empresas comecem a obter insights sobre suas operações por meio da coleta de dados. Embora o uso de Big Data e análise avançada ainda não seja comum nesse nível, as empresas começam a acumular um histórico de dados que pode ser utilizado para identificar padrões e áreas de melhoria. O nível de digitalização básica é um passo importante para que as empresas iniciem uma transição para uma operação mais orientada a dados, onde decisões logísticas possam ser tomadas com base em informações precisas e atualizadas, ainda que o uso de dados ferramentas analíticas avançadas não sejam plenamente exploradas.

Nesse estágio, as empresas também começam a considerar práticas de sustentabilidade e logística verde, mas de maneira limitada. A introdução de veículos elétricos para transporte interno, o uso de embalagens recicláveis e a implementação de políticas de redução de desperdício são algumas das iniciativas que podem ser observadas em empresas que estão no nível de digitalização e automação básica. Embora essas práticas ainda não sejam integradas de maneira abrangente, elas representam um avanço em relação ao nível de introdução e conscientização, onde a sustentabilidade era uma consideração mínima. Nesse sentido, o nível de digitalização e automação básica começa a preparar as empresas para uma maior integração de práticas sustentáveis nos avanços mais avançados de atualização logística (Machado, 2025).

Um desafio importante para as empresas nesse nível de maturidade é a necessidade de uma infraestrutura tecnológica básica que suporte as novas tecnologias. A digitalização requer investimentos em sistemas de comunicação e armazenamento de dados, além de uma rede de internet de alta velocidade que permite o monitoramento em tempo real. Muitas empresas enfrentam dificuldades em adaptar sua infraestrutura existente para suportar essas exigências tecnológicas, ou que podem limitar o escopo das implementações de automação (Ali et al., 2023). Além disso, a falta de integração entre os diferentes sistemas de automação pode resultar em operações fragmentadas, onde dados e informações importantes são bloqueados em silos e não estão disponíveis para todos os setores da empresa.

Outro aspecto que caracteriza o nível de digitalização e automação básica é a introdução inicial de medidas de cibersegurança. À medida que as empresas começam a digitalizar seus processos e coletar dados em tempo real, torna-se necessário proteger essas informações contra ameaças cibernéticas. No entanto, muitas organizações nesse nível ainda carecem de uma

política robusta de cibersegurança e, em alguns casos, a proteção dos dados é negligenciada devido à falta de conhecimento ou de recursos adequados (Nahavandi, 2019). Isso representa um risco para a integridade dos dados e para a continuidade operacional, pois a vulnerabilidade a ataques cibernéticos pode resultar em perdas financeiras e danos à transação da empresa.

Para progredir além do nível de digitalização e automação básica, as empresas precisam investir na integração das tecnologias adotadas. Isso envolve a criação de uma infraestrutura que permite a interconexão entre sistemas e a adoção de plataformas que centralizam os dados logísticos em um único ambiente de fácil acesso e análise. Conforme sugerem Björklund e Forslund (2018), a integração entre sistemas de monitoramento, gestão de estoque e transporte é essencial para maximizar os benefícios da digitalização e para que as empresas possam avançar para níveis mais altos de maturidade, onde a análise de dados e a colaboração digital se partes tornam-se centrais da operação logística.

O nível de digitalização e automação básica também exige que as empresas comecem a desenvolver uma cultura orientada a dados. A coleta de dados gerados pelos sistemas de monitoramento e automação deve ser vista como uma oportunidade para melhorar operações e reduzir custos. No entanto, para que isso aconteça, é necessário que os líderes e colaboradores compreendam o valor dos dados e saibam interpretá-los de maneira eficaz. Segundo Lanza *et al.*, (2022), a capacidade de uma empresa de utilizar dados para aprimorar suas operações logísticas depende tanto da tecnologia quanto das habilidades e do conhecimento dos colaboradores que lidam com essas informações. Portanto, além de investir em tecnologia, as empresas precisam fornecer treinamentos para desenvolver uma força de trabalho capacitada e orientada para a análise de dados.

Em resumo, o nível de digitalização e automação básica marca um ponto de inflexão importante para as empresas na jornada rumo à Logística 5.0. Esse estágio representa um avanço significativo em relação ao nível de introdução e conscientização, uma vez que a organização começa a incorporar tecnologias que aumentam a eficiência e exercem a dependência de processos manuais. Embora as práticas de automação e sustentabilidade ainda sejam limitadas, o nível de digitalização básica estabelece uma base importante para a evolução contínua das operações logísticas. Conforme o programa das empresas nesse estágio, a integração e o uso eficaz de dados tornam-se essenciais para maximizar os benefícios da digitalização e preparar a organização para um ambiente logístico mais avançado e conectado (Azarian e Yu, 2022).

A transição para o nível de digitalização e automação básica exige, portanto, uma combinação de investimentos em infraestrutura, desenvolvimento de cultura organizacional e integração de tecnologias. As empresas que implementam essas práticas e superam os desafios desse estágio estão mais bem posicionadas para avançar nos próximos níveis de maturidade logística, onde a colaboração humano-máquina, a sustentabilidade integrada e a resiliência tornam aspectos essenciais de uma operação logística eficiente e moderna.

4.2.3 Nível 3: Integração e sustentabilidade estruturada

No nível 3 do modelo de maturidade para logística 5.0, denominado integração e sustentabilidade estruturada, as empresas começaram a alcançar um nível significativo de atualização em que as operações logísticas são integradas e sustentáveis. Esta etapa é caracterizada pela utilização de plataformas digitais que promovem a comunicação e a troca de informações em tempo real entre os diferentes elos da cadeia de suprimentos, incluindo fornecedores, distribuidores e parceiros logísticos. Além disso, a sustentabilidade deixa de ser uma iniciativa isolada e passa a fazer parte integrante da estratégia operacional, com práticas verdes que abrangem diversas etapas da cadeia logística.

A integração digital é um dos elementos centrais nesse nível, permitindo que as empresas conectem suas operações e tenham maior visibilidade sobre a entrega de insumos e produtos. Ferramentas como sistemas de gestão integrados e redes de IoT são amplamente utilizadas para monitorar, rastrear e sincronizar as atividades logísticas em toda a cadeia de suprimentos. Esse avanço permite que as empresas reduzam o tempo de resposta às mudanças de demanda e melhorem a eficiência operacional, uma vez que os dados sejam compartilhados em tempo real e a tomada de decisão se torne mais ágil e informada (Leng *et al.*, 2022).

Além da integração digital, a sustentabilidade estruturada é outro pilar desse nível de maturidade. As práticas de logística verde tornam-se mais robustas e abrangentes, incluindo o uso de veículos elétricos para transporte, a adoção de embalagens recicláveis e a implementação de sistemas de gestão de resíduos. Klimecka-Tatar *et al.* (2021) destacam que, no nível de integração e sustentabilidade estruturada, as empresas não apenas reduzem seu impacto ambiental, mas também começam a ver a sustentabilidade como um diferencial competitivo. Ao monitorar suas operações logísticas com práticas ambientais responsáveis, as empresas fortalecem sua imagem corporativa e respondem às demandas crescentes dos consumidores e das partes interessadas por práticas sustentáveis e éticas.

A colaboração é uma característica fundamental no nível de integração e sustentabilidade estruturada. A partir do uso de plataformas digitais, as empresas não apenas compartilham dados em tempo real com seus parceiros, mas também coordenam atividades como o planejamento de demanda e a previsão de estoques. Isso cria uma cadeia de suprimentos mais fluida e colaborativa, onde todas as partes envolvidas trabalham juntas para atingir objetivos comuns. Segundo Björklund e Forslund (2018), a colaboração digital entre parceiros logísticos permite que as empresas melhorem a isolamento da absorção de demanda e reduzam o desperdício de recursos, o que contribui para uma operação mais eficiente e sustentável.

A introdução de tecnologias de rastreabilidade, como o blockchain, também se torna relevante neste estágio. O blockchain permite que as empresas rastreiem e verifiquem a origem e o trajeto dos produtos ao longo da cadeia de suprimentos, promovendo uma maior transparência e segurança. Isso é especialmente importante em operações que envolvam produtos sensíveis, como alimentos e medicamentos, em que a rastreabilidade é essencial para garantir a segurança e a conformidade regulatória. Além disso, o blockchain contribui para a sustentabilidade, pois permite que as empresas se identifiquem pontos críticos de emissão de carbono ou desperdício de materiais ao longo da cadeia de suprimentos, promovendo melhorias contínuas (Ali *et al.*, 2023).

Outro aspecto importante do nível de integração e sustentabilidade estruturada é a introdução de práticas de economia circular. A economia circular baseia-se no conceito de reduzir, reutilizar e reciclar, prolongando o ciclo de vida dos produtos e reduzindo o consumo de recursos. Empresas que atingem este nível de maturidade começam a adotar estratégias de economia circular em suas vendas logísticas, promovendo a reaproveitamento de materiais e a reciclagem de resíduos. Essa prática não só contribui para a preservação ambiental, mas também reduz custos operacionais e aumenta a eficiência da cadeia de suprimentos (Nahavandi, 2019).

O foco em sustentabilidade também reflete o uso de indicadores de desempenho ambiental que medem o impacto das operações logísticas. Esses indicadores incluem a pegada de carbono, o consumo de energia e a geração de resíduos. Segundo Ghobakhloo (2020), o monitoramento regular desses indicadores permite que as empresas estabeleçam metas de redução de impacto ambiental e melhorem continuamente suas práticas de sustentabilidade. Além disso, a transparência na divulgação desses indicadores ajuda a empresa a fortalecer sua confiança e a conquistar a confiança dos consumidores, que valorizam cada vez mais práticas empresariais responsáveis.

Para avançar além do nível de integração e sustentabilidade estruturada, as empresas precisam desenvolver uma infraestrutura tecnológica robusta que suporte o uso de tecnologias avançadas, como a inteligência artificial e o aprendizado de máquina, para análise de dados em tempo real e tomada de decisões preditivas. A capacidade de utilizar dados para prever padrões de demanda e identificar gargalos na cadeia de suprimentos torna-se essencial para garantir uma operação eficiente e resiliente. De acordo com Ivanov *et al.*, (2021), a aplicação de IA nesse contexto permite que as empresas otimizem suas operações logísticas e aumentem sua capacidade de adaptação a mudanças repentinas no mercado ou nas condições de transporte.

Nesse sentido, o nível de integração e sustentabilidade estruturado marca um ponto de transição importante para as empresas que buscam se posicionar como líderes em práticas logísticas modernas e responsáveis. Ao integrar suas operações e adotar práticas seguras de forma estruturada, essas organizações estabelecem uma base sólida para a implementação de tecnologias avançadas nos níveis mais altos de maturidade. Essa base permite que as empresas respondam com agilidade às flutuações do mercado e fortaleçam suas cadeias de suprimentos em um ambiente cada vez mais complexo e interconectado (Van Erp *et al.*, 2023).

Contudo, os desafios enfrentados nesse nível não são insignificantes. A integração de sistemas e a adoção de práticas de sustentabilidade demandam investimentos significativos em infraestrutura e treinamento de pessoal. As empresas precisam preparar suas equipes para lidar com novas ferramentas tecnológicas e para adotar uma cultura de sustentabilidade que permita todos os níveis de organização. Segundo Azarian e Yu (2022), a resistência à mudança é um obstáculo comum e muitas empresas enfrentam dificuldades em adaptar suas operações e sua cultura organizacional para se alinharem aos objetivos de integração e sustentabilidade.

A segurança dos dados é outro desafio relevante no nível de integração e sustentabilidade segurança estruturada. Com o aumento da troca de informações e da interconexão entre os sistemas, torna-se essencial implementar medidas rigorosas de cibersegurança para proteger os dados sensíveis da empresa e de seus parceiros. A falta de segurança pode comprometer a integridade dos dados e prejudicar a colaboração entre os elos da cadeia de suprimentos. Assim, investir em tecnologias de cibersegurança e em protocolos de proteção de dados é fundamental para garantir uma operação segura e confiável (Lanza *et al.*, 2022).

Em resumo, o nível de integração e sustentabilidade estruturada representa um avanço significativo para as empresas no caminho da Logística 5.0. Este estágio permite que as

organizações construam uma operação integrada e orientada para a sustentabilidade, onde a eficiência e a responsabilidade ambiental se tornem prioridades estratégicas. A integração de sistemas e a adoção de práticas verdes ajudam as empresas a atenderem às demandas do mercado por uma logística mais ágil e ambientalmente responsável, além de prepará-las para enfrentar os desafios de um ambiente logístico cada vez mais dinâmico e interdependente. Como argumentam Choi e Siqin (2022), o nível de integração e sustentabilidade estruturada fornece uma base para a evolução da Logística 5.0, permitindo que as empresas avancem para operações ainda mais avançadas e adaptáveis.

4.2.4 Nível 4: Logística resiliente e adaptável

No Nível Logística Resiliente e Adaptável representa um estágio avançado de atualização no modelo de logística 5.0, onde as empresas não apenas operam de forma eficiente e sustentável, mas também desenvolvem uma capacidade aprimorada de resposta a eventos adversos. Esse nível é caracterizado pela integração de tecnologias avançadas, como inteligência artificial (IA), aprendizado de máquina e algoritmos preditivos, que permitem à organização antecipar problemas e ajustar suas operações em tempo real para garantir a continuidade do fluxo logístico. Segundo Ivanov *et al.* (2021), a resiliência logística é fundamental em um ambiente global cada vez mais dinâmica e imprevisível, onde interrupções na cadeia de suprimentos podem resultar em perdas significativas para empresas e consumidores.

Neste nível, a IA desempenha um papel central para permitir que as empresas realizem análises preditivas e tomem decisões com base em dados históricos e em tempo real. Por exemplo, um IA pode ser usado para prever a demanda com maior precisão, ajustar os níveis de estoque e identificar gargalos na cadeia de suprimentos antes que eles afetem a operação. De acordo com Ghobakhloo (2020), essa capacidade de prever e adaptar-se rapidamente às flutuações no mercado representa um diferencial competitivo importante, pois permite que as empresas respondam a mudanças com mais agilidade e precisão, minimizando o impacto de eventos imprevistos sobre suas operações.

A resiliência no Nível 4 também é alcançada através do uso de algoritmos de aprendizagem de máquina, que podem analisar dados climáticos, econômicos e de mercado para identificar padrões e sugestões de ações preventivas. Essas ferramentas tecnológicas permitem que as empresas se preparem para eventos como desastres naturais, interrupções de transporte e mudanças abruptas na demanda. O uso de dados climáticos em tempo real, por

exemplo, ajuda a empresa a ajustar rotas de transporte para evitar áreas afetadas por condições climáticas severas, como inundações ou nevascas. Segundo Lanza *et al.* (2022), essa adaptabilidade climática não apenas protege os ativos da empresa, mas também contribui para a sustentabilidade, ao melhorar o consumo de combustível e reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

Outro aspecto crítico do Nível 4 é a integração de planos de contingência e protocolos de resposta rápida, que são revisados e atualizados regularmente para garantir sua eficácia. Esses planos incluem desde rotas alternativas de transporte até acordos com fornecedores de backup para garantir o fornecimento contínuo completo de insumos em caso de interrupções. Choi e Siqin (2022) destacam que a capacidade de responder rapidamente a eventos disruptivos é essencial para manter a estabilidade da cadeia de suprimentos e evitar interrupções que possam afetar negativamente a experiência do cliente e a rentabilidade da empresa. A logística resiliente é, portanto, uma vantagem estratégica que fortalece a relação entre a empresa e seus parceiros comerciais, consolidando a confiança e a proteção da organização.

Além disso, o Nível 4 exige um foco intensivo na cibersegurança, visto que a resiliência digital é tão importante quanto a resiliência física no contexto da Logística 5.0. Com o aumento da digitalização e da conectividade entre os sistemas logísticos, as empresas tornam-se mais vulneráveis a ataques cibernéticos que podem comprometer a integridade dos dados e a continuidade das operações. Segundo Nahavandi (2019), a implementação de uma política de cibersegurança robusta, que inclui monitoramento constante, protocolos de resposta a incidentes e treinamento de pessoal, é fundamental para garantir a proteção dos dados logísticos e a segurança dos sistemas conectados. A cibersegurança não apenas protege a empresa contra perdas financeiras, mas também mantém a confiança dos parceiros e clientes.

Nesse nível, a colaboração com fornecedores e parceiros da cadeia de suprimentos também se torna mais forte e colaborativa. Empresas que alcançam o nível de resiliência e adaptabilidade desenvolvem parcerias estratégicas baseadas na troca de informações e em suporte mútuo durante crises. Esses parceiros trabalham juntos para alinhar suas operações e melhorar a eficiência de toda a cadeia de suprimentos, aumentando a resiliência coletiva. Björklund e Forslund (2018) afirmam que a cooperação entre empresas contribui para um sistema logístico mais robusto e adaptável, onde todos os elos da cadeia de suprimentos podem se beneficiar da resiliência mútua, tornando o sistema mais resistente a temporários.

Para fortalecer a resiliência, o Nível 4 também incorpora a prática de treinamentos regulares e simulações de resposta a crises. Esses exercícios ajudam a preparar os colaboradores para lidar com emergências, familiarizando-os com os protocolos de segurança e com os planos de contingência. Segundo Azarian e Yu (2022), a resiliência não se limita apenas à infraestrutura e às tecnologias, mas também depende da preparação e da capacidade de resposta dos colaboradores. A realização de simulações permite que a empresa identifique possíveis falhas nos planos de contingência e faça os ajustes necessários antes que uma crise real ocorra, aumentando assim a eficácia dos protocolos de resposta.

A sustentabilidade continua a ser uma prioridade no Nível 4, mas com um foco ampliado em práticas que promovem a resiliência ambiental. As empresas nesse estágio avançado não apenas controlam suas emissões de carbono e adotam práticas de economia circular, mas também desenvolvem estratégias para adaptar suas operações aos impactos das mudanças climáticas. Isso inclui, por exemplo, a escolha de fornecedores comprometidos com práticas sustentáveis e a otimização de rotas logísticas para minimizar a exposição a eventos climáticos extremos (Ali *et al.*, 2023). Essa abordagem contribui para uma cadeia de suprimentos mais sustentável e resiliente, preparada para operar de forma eficaz em um mundo sujeito a desafios climáticos constantes.

Em resumo, o Nível 4: Logística Resiliente e Adaptável representa um estágio em que as empresas alcançam muita maturidade em suas operações logísticas, tornando-as capazes de responder rapidamente a eventos imprevistos e de garantir a continuidade de suas operações. A combinação de IA, aprendizado de máquina, planos de contingência robustos e foco em cibersegurança permite que as organizações operem com segurança e eficiência em um ambiente de negócios cada vez mais incerto e volátil. Conforme apontam Ivanov *et al.* (2021), esse nível de resiliência proporciona uma vantagem competitiva significativa, uma vez que empresas resilientes podem não apenas sobreviver a crises, mas também prosperar, mantendo a confiança de seus parceiros e clientes.

O avanço para o próximo nível de atualização exige que as empresas consolidem essas práticas e explorem novas tecnologias de automação e integração colaborativa que elevem ainda mais a resiliência e a adaptabilidade da cadeia de suprimentos. Uma logística resiliente e adaptável não é apenas uma resposta aos desafios imediatos, mas uma estratégia que prepara as empresas para o futuro, garantindo uma operação sustentável, segura e orientada para a inovação.

4.2.5 Nível 5: Maturidade total e sustentabilidade perenizada

O Nível 5 Maturidade Total e Sustentabilidade Perenizada representa o auge da maturidade na Logística 5.0, onde a empresa atinge um nível de operação altamente automatizada, sustentável e resiliente. Nesse estágio, a logística é totalmente integrada, e a empresa consegue operar de maneira autônoma, utilizando tecnologias avançadas como inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), *blockchain* e robótica colaborativa para otimizar cada aspecto de suas operações. Além disso, a sustentabilidade é totalmente construída à estratégia empresarial, sendo uma prioridade central e perene que permeia todas as práticas logísticas (Leng *et al.*, 2022).

As operações no nível de maturidade total são fundamentadas em uma infraestrutura tecnológica robusta, capaz de processar dados em tempo real e suportar uma tomada de decisões inovadoras. A IA é utilizada em sua capacidade máxima, permitindo que a empresa realize integração de demanda altamente precisa, ajuste níveis de estoque automaticamente e otimize rotas de transporte com base em condições climáticas, de tráfego e de consumo de combustível. Segundo Ghobakhloo (2020), a maturidade total não apenas melhorou a eficiência, mas também transformou a empresa em uma organização adaptável e resiliente, que pode operar de forma autônoma em um ambiente de negócios dinâmico e incerto.

Outro aspecto essencial do Nível 5 é a integração completa da cadeia de suprimentos, onde todos os elos trabalham de maneira colaborativa e transparente. O uso de *blockchain* é amplamente adotado para garantir a rastreabilidade e a segurança das informações ao longo de toda a cadeia, desde a origem das matérias-primas até o consumidor final. Essa rastreabilidade não apenas reforça a confiança entre os parceiros da cadeia de suprimentos, mas também permite que os consumidores acompanhem a jornada do produto, garantindo que as práticas sustentáveis e éticas foram seguidas (Choi e Siqin, 2022). Essa transparência fortalece a confiança da empresa e contribui para a fidelidade do cliente em um mercado cada vez mais consciente das questões ambientais e sociais.

A sustentabilidade perenizada é uma característica fundamental desse nível de maturidade, onde as práticas ambientais não são mais uma iniciativa secundária, mas um pilar estratégico de longo prazo. As empresas no nível 5 adotam uma abordagem de economia circular, na qual o ciclo de vida dos produtos é prolongado ao máximo por meio de reciclagem, reutilização e regeneração de materiais. Klimecka-Tatar *et al.* (2021) observam que a economia circular se torna uma prática comum nas empresas com maturidade total, pois essas

organizações estão comprometidas em reduzir sua pegada de carbono e minimizar o desperdício de recursos. O uso de veículos elétricos, energia renovável e sistemas de gestão de resíduos é maximizando, fazendo com que as operações logísticas sejam neutras em carbono ou, em alguns casos, até positivas para o meio ambiente.

A operação sustentável no nível de maturidade total inclui também o uso de tecnologias regenerativas, como painéis solares e sistemas de coleta de água da chuva, que protegem a dependência de recursos externos e externos para uma cadeia de suprimentos autossustentáveis. Empresas que atingem esse nível desenvolvem estratégias para neutralizar completamente seu impacto ambiental, como a compensação de emissões de carbono e a regeneração de habitats naturais. De acordo com Ali *et al.* (2023), essa prática não só reflete um compromisso com a sustentabilidade, mas também fortalece a posição da empresa como líder em práticas ambientais, atraindo investidores e consumidores que valorizam a responsabilidade ambiental.

No Nível 5, a colaboração humano-máquina é harmoniosa e plena. Os trabalhadores e sistemas independentes trabalham lado a lado em um ambiente seguro e eficiente, onde os robôs colaborativos (*cobots*) desempenham tarefas repetitivas, enquanto os colaboradores humanos se concentram em atividades de maior valor, como a tomada de decisões estratégicas e a inovação. Segundo Nahavandi (2019), essa sinergia entre humanos e máquinas é essencial para alcançar um alto nível de produtividade e satisfação no ambiente de trabalho, pois permite que os colaboradores utilizem suas habilidades criativas e analíticas, promovendo um ambiente de inovação contínua.

A cibersegurança no nível de maturidade total também é rigorosa e abrangente. Com muita conectividade e digitalização, as empresas adotam protocolos de cibersegurança para proteger os dados e garantir a continuidade das operações em caso de ataques cibernéticos. Esses protocolos incluem sistemas de monitoramento em tempo real, uso de IA para detecção de ameaças e planos de resposta a incidentes cibernéticos. Segundo Lanza *et al.* (2022), a cibersegurança nesse nível não apenas protege a integridade das operações, mas também fortalece a confiança dos parceiros e consumidores, garantindo que as práticas logísticas sejam seguras e confiáveis.

Para alcançar e manter a maturidade total, as empresas também investem significativamente em programas de treinamento e desenvolvimento para seus colaboradores. A formação contínua é essencial para garantir que a força de trabalho esteja preparada para lidar com as novas tecnologias e práticas sustentáveis inovadoras na Logística 5.0. Isso inclui

treinamentos em análise de dados, gestão de IA e práticas de sustentabilidade, além de incentivos ao desenvolvimento de habilidades de liderança e inovação. De acordo com Björklund e Forslund (2018), esta ênfase na capacitação humana é um dos pilares da maturidade total, pois permite que a empresa evolua continuamente e se adapte às mudanças tecnológicas e ambientais com agilidade.

A adaptação climática é outra prioridade nesse nível. As empresas desenvolvem estratégias de resiliência climática que consideram os impactos das mudanças climáticas e buscam minimizar a exposição a eventos climáticos extremos. Isso pode incluir a diversificação de rotas logísticas, a utilização de previsão climática para ajustar as operações e o desenvolvimento de infraestruturas adequadas a condições adversas. Segundo Espina-Romero *et al.* (2023), a adaptação climática é crucial para garantir a continuidade das operações logísticas e reduzir o impacto das mudanças climáticas sobre a cadeia de suprimentos, fortalecendo a resiliência organizacional.

A maturidade total e a sustentabilidade perenizada também implicam em uma gestão baseada em dados, onde as decisões são orientadas por análises em tempo real e previsões geradas por IA e aprendizado de máquina. Esse uso intensivo de dados permite que uma empresa não apenas otimize suas operações, mas também identifique oportunidades de inovação e melhoria contínua. Segundo Ivanov *et al.*, (2021), a capacidade de utilizar dados para identificar tendências e prever desafios torna a organização não apenas resiliente, mas também proativa, permitindo que se antecipe a demandas e desafios futuros de maneira eficaz.

Em resumo, o nível 5: maturidade total e sustentabilidade perenizada representa o estágio mais alto de desenvolvimento na logística 5.0, onde a empresa opera com uma combinação de automação, sustentabilidade e resiliência sem precedentes. As práticas logísticas são integradas, transparentes e orientadas para o longo prazo, refletindo um compromisso inabalável com a sustentabilidade e a excelência operacional. Empresas que alcançam esse nível se destacam como líderes de mercado, inspirando outras organizações a adotar práticas sustentáveis e inovadoras que beneficiam tanto a sociedade quanto o meio ambiente (Van Erp *et al.*, 2023).

Essas organizações estão preparadas para enfrentar os desafios globais e se adaptar às mudanças nas condições de mercado e ambientais com rapidez e eficiência, mantendo sempre a satisfação dos clientes e o bem-estar dos colaboradores como prioridades. Com uma operação autônoma, transparente e sustentável, as empresas no nível 5 não só conquistam vantagens

competitivas significativas, mas também consolidam seu papel como agentes de transformação na indústria logística.

4.3. Caracterização do Modelo de Maturidade por dimensão

O Modelo de Maturidade para Logística 5.0 é composto por sete dimensões principais que, juntas, formam a base para a construção de uma cadeia de suprimentos eficiente, sustentável e centrada no ser humano. Essas dimensões incluem: 1) Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0, 2) Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística, 3) Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0, 4) Resiliência Logística e Mudanças Climáticas, 5) Maturidade e Desempenho da Logística 5.0, e 6) Aspecto Humano na Logística 5.0. Cada uma dessas dimensões é essencial para o avanço da modernidade logística e apresenta requisitos e desafios específicos, todos aplicados e voltados para logística 5.0 no Contexto do Polo Industrial de Manaus.

4.3.1. Infraestrutura e tecnologias da logística 5.0

A dimensão Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0 representa a base tecnológica essencial para o desenvolvimento de operações logísticas modernas, conectadas e resilientes. Essa dimensão engloba a adoção de tecnologias de ponta, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e Blockchain, além de uma infraestrutura robusta de conectividade e segurança. O desenvolvimento de uma logística 5.0 exige que as empresas implementem uma infraestrutura que permita o monitoramento, a análise e o controle em tempo real, promovendo operações mais rápidas, seguras e eficientes. Segundo Ghobakhloo (2020), o papel da infraestrutura tecnológica é central para a transformação digital da logística, pois permite que os dados sejam coletados e processados continuamente, apoiando uma tomada de decisão mais informada e ágil.

A Internet das Coisas (IoT) é uma das tecnologias centrais na infraestrutura da logística 5.0. A IoT conecta dispositivos e sensores que coletam dados em tempo real, permitindo monitorar a localização, o status e o desempenho de ativos logísticos, como veículos, veículos e instalações. Essa conectividade oferece uma visibilidade abrangente das transações, facilitando a gestão de estoque e o rastreamento de mercadorias durante o transporte. De acordo com Leng *et al.* (2022), o uso da IoT na logística permite que as empresas reduzam o desperdício de recursos e melhorem a precisão nas operações, uma vez que os dados em tempo real forneçam informações sobre condições ambientais e de segurança, como temperatura e

umidade, especialmente importantes. para setores que transportam produtos sensíveis, como o alimentício e o farmacêutico.

Além de fornecer visibilidade operacional, a IoT contribui para a automação de processos logísticos, como a entrega de mercadorias em armazéns e centros de distribuição. Sensores e dispositivos IoT integrados aos sistemas de gestão permitem que as empresas monitorem o fluxo de produtos e ajustem as operações conforme necessário, diminuindo o tempo de espera e aumentando a eficiência. Contudo, a adoção da IoT requer uma infraestrutura robusta de rede e uma política de cibersegurança que proteja os dados sensíveis. A vulnerabilidade a ataques cibernéticos é um dos principais desafios associados à IoT, pois a interconectividade expõe os dados a possíveis invasões, o que exige um sistema de segurança robusto para mitigar esses riscos (Ali *et al.*, 2023).

A Inteligência Artificial (IA) é outra tecnologia fundamental na infraestrutura da Logística 5.0, sendo utilizada para análise preditiva, otimização de rotas e automação de processos. A IA permite que as empresas analisem grandes volumes de dados coletados em tempo real para prever a demanda, ajustar os níveis de estoque e identificar padrões que auxiliem na tomada de decisão. Segundo Oran e Cezayirlioglu (2021), a AI aumenta a capacidade das empresas de operar de forma proativa, respondendo a mudanças na demanda e evitando interferências operacionais por meio de ajustes rápidos baseados em dados precisos. A integração da IA nas operações logísticas também facilita o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, que melhoram o desempenho do sistema com o tempo, aumentando a precisão da integração e a eficiência dos processos.

Uma aplicação importante da IA na logística é a otimização de rotas de transporte, que permite que as empresas identifiquem as rotas mais rápidas e eficientes, economizando tempo e recursos. Isso é especialmente importante em regiões onde o tráfego e as condições climáticas podem impactar significativamente os prazos de entrega. Com o uso de algoritmos de IA, as empresas ajustam automaticamente as rotas de entrega em resposta a fatores externos, como acidentes de trânsito ou condições climáticas adversas, melhorando a confiabilidade das entregas e a satisfação do cliente (Lanza *et al.*, 2022). A IA também contribui para a automação de processos repetitivos e para o desenvolvimento de robôs colaborativos (*cobots*), que auxiliam os trabalhadores em tarefas operacionais, como a separação e entrega de produtos em armazéns.

O Big Data é outra tecnologia crucial para a logística 5.0, permitindo que as empresas colem, armazenem e analisem grandes volumes de dados provenientes de diversas fontes, como sensores IoT, sistemas de rastreamento e redes de fornecedores. O Big Data possibilita que as empresas identifiquem tendências e padrões de comportamento no mercado, otimizando o planejamento logístico e o gerenciamento de estoque. Conforme destacado por Nahavandi (2019), o uso de *Big Data* na logística permite uma abordagem mais analítica, onde as decisões são baseadas em dados reais e atualizados, em vez de em suposições ou dados históricos. Isso aumenta a capacidade de resposta das empresas às mudanças do mercado e melhora a precisão das operações.

A análise de Big Data na logística também permite uma maior personalização dos serviços, ajustando as operações às necessidades específicas dos clientes e oferecendo uma experiência de entrega mais satisfatória. Esse nível de personalização é essencial para manter a competitividade em um mercado onde os consumidores esperam prazos de entrega cada vez mais curtos e serviços personalizados. No entanto, a implementação do Big Data requer uma infraestrutura de TI escalável e uma equipe capacitada para interpretar os dados e traduzi-los em ações práticas. A formação de equipes analíticas que saibam interpretar grandes volumes de dados é, portanto, uma necessidade para as empresas que buscam atingir níveis avançados de maturidade logística (Ghobakhloo, 2020).

O *blockchain* também se destaca como uma tecnologia estratégica na Logística 5.0, especialmente para garantir a rastreabilidade e a segurança dos dados. O blockchain cria um registro imutável de todas as transações e movimentos de mercadorias ao longo da cadeia de suprimentos, proporcionando maior transparência e confiabilidade para os parceiros e clientes. Segundo Choi e Siqin (2022), a rastreabilidade fornecida pelo *blockchain* é fundamental para setores que exigem alta conformidade com padrões de qualidade, como a indústria alimentícia e a farmacêutica, onde a segurança e as desvantagens dos produtos são cruciais.

Além de aumentar a transparência, o blockchain também facilita o cumprimento de regulamentações ambientais e de sustentabilidade, pois permite que as empresas melhorem o uso de práticas verdes e a origem dos materiais utilizados. Essa tecnologia promove uma cadeia de suprimentos mais responsável e confiável, onde cada etapa do processo é documentada e pode ser auditada por terceiros. No entanto, a implementação do blockchain exige uma infraestrutura tecnológica compatível e uma integração completa com os sistemas de gestão da empresa, o que pode representar um desafio para empresas que ainda operam com tecnologias tradicionais (Klimecka-Tatar *et al.*, 2021).

A infraestrutura de conectividade é outro elemento essencial para a logística 5.0, pois garante que todas as tecnologias estejam interligadas e operem de maneira coordenada. A conectividade é necessária para que os dispositivos IoT, sistemas de IA e plataformas de *Big Data* funcionem em sinergia, proporcionando uma visão unificada e em tempo real das operações logísticas. A falta de conectividade adequada pode comprometer o funcionamento das tecnologias e resultar em falhas operacionais e atrasos. Segundo Björklund e Forslund (2018), as empresas que investem em redes de alta velocidade e em tecnologias de comunicação seguras conseguem operar com mais eficiência e segurança, além de fornecer uma experiência de entrega mais confiável para os clientes.

A cibersegurança é um aspecto indispensável na infraestrutura da logística 5.0, pois a interconectividade dos sistemas e a coleta constante de dados tornam as operações logísticas vulneráveis a ataques cibernéticos. Medidas de cibersegurança, como criptografia de dados, autenticação multifatorial e monitoramento em tempo real, são fundamentais para proteger as informações seguras e garantir a continuidade das operações. Ali *et al.*, (2023) ressaltam que a segurança cibernética é uma necessidade estratégica para as empresas que operam em um ambiente digital, pois a integridade dos dados é essencial para manter a confiança dos clientes e a segurança dos sistemas.

Em resumo, a dimensão Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0 envolve a implementação de um ecossistema tecnológico interligado e seguro que permite o monitoramento e a automação das operações logísticas. Tecnologias como IoT, IA, Big Data e *Blockchain* desempenham papéis fundamentais para transformar a logística em uma operação digitalizada, eficiente e sustentável. A construção de uma infraestrutura robusta é, portanto, uma prioridade para empresas que buscam atingir níveis elevados de maturidade logística, pois ela serve como base para uma cadeia de suprimentos conectada, segura e resiliente.

4.4. Sustentabilidade e iniciativas verdes na logística

A dimensão Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística no modelo de maturidade para logística 5.0 é central para a construção de uma cadeia de suprimentos moderna, responsável e resiliente. A integração de práticas sustentáveis tem se tornado uma prioridade estratégica para empresas que desejam não apenas atender às exigências regulatórias, mas também se posicionar como líderes em responsabilidade social e ambiental. Segundo Klimecka-Tatar *et al.* (2021), a adoção de práticas de sustentabilidade na logística é

fundamental para atender às demandas crescentes dos consumidores e investidores por práticas empresariais mais conscientes, além de contribuir para a preservação do meio ambiente.

A logística tradicional é responsável por uma parte significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que contribuem para o aquecimento global e a manipulação ambiental. Em resposta a esse impacto, as empresas investem em práticas de logística verde, como o uso de veículos elétricos, a implementação de rotas mais eficientes e a substituição de embalagens alternativas recicláveis ou biodegradáveis. Essas práticas fazem parte de uma ampla estratégia de sustentabilidade que visa reduzir a pegada de carbono e tornar a operação logística mais ecológica. Segundo Ghobakhloo (2020), essas iniciativas verdes não apenas diminuem o impacto ambiental, mas também geram economia de custos a longo prazo, uma vez que promovem o uso mais eficiente dos recursos.

Uma das práticas mais eficazes no âmbito da logística verde é o uso de veículos elétricos e híbridos para o transporte de mercadorias. Esses veículos emitem menos gases poluentes em comparação com veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis, o que contribui para a redução das emissões de CO₂ na atmosfera. Além disso, o uso de veículos elétricos em áreas urbanas ajuda a reduzir a poluição sonora, melhorando a qualidade de vida das comunidades locais. Segundo Oran e Cezayirlioglu (2021), o transporte sustentável é uma iniciativa que beneficia tanto o ambiente quanto a imagem corporativa das empresas, pois demonstra um compromisso com a responsabilidade social e a inovação.

Outra prática sustentável relevante é a adoção de rotas otimizadas e a integração de sistemas de análise de dados para planejamento logístico. Com o uso de tecnologias de análise preditiva e IA, as empresas conseguem atualizar suas rotas de transporte, identificando os trajetos mais rápidos e eficientes, o que reduz o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes. Segundo Leng *et al.* (2022), a otimização de rotas contribui para uma operação mais ecológica e econômica, pois minimiza os custos associados ao transporte e reduz o desgaste dos veículos, prolongando sua vida útil.

A economia circular é outro elemento-chave na dimensão de sustentabilidade da Logística 5.0. Esse conceito baseia-se na ideia de reutilização, reciclagem e regeneração de materiais, prolongando o ciclo de vida dos produtos e minimizando o descarte de resíduos. Empresas que adotam uma economia circular em suas operações logísticas evitam o desperdício de recursos e consomem a demanda por novos materiais, ou que ajudam a preservar o meio ambiente. Segundo Azarian e Yu (2022), a economia circular é uma prática essencial

para empresas que desejam operar de maneira mais sustentável e eficiente, pois promove uma logística verde e um uso mais racional dos recursos naturais.

No contexto da sustentabilidade, o uso de blockchain tem se destacado como uma ferramenta importante para garantir a rastreabilidade das práticas verdes ao longo da cadeia de suprimentos. O blockchain cria um registro imutável de todas as transações e movimentos de mercadorias, permitindo que os consumidores e stakeholders acompanhem a origem dos produtos e verifiquem se os seguintes processos padrões de sustentabilidade. Essa transparência é fundamental para consolidar a confiança dos consumidores, que estão cada vez mais preocupados com a origem dos produtos e com o impacto ambiental das práticas empresariais. Segundo Choi e Siqin (2022), o blockchain contribui para uma cadeia de suprimentos mais transparente e segura, onde cada etapa do processo é documentada e pode ser auditada por terceiros.

Outra prática de destaque é o uso de embalagens sustentáveis, como materiais recicláveis, biodegradáveis e reutilizáveis. A escolha de embalagens adequadas é um fator importante na redução de resíduos e preservação ambiental, pois permite que os produtos sejam protegidos de maneira eficiente e sustentável. As embalagens sustentáveis também são reservadas para a economia circular, pois podem ser reutilizadas em novos ciclos logísticos, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas e evitando a quantidade de resíduos descartados no meio ambiente. Segundo Ali *et al.* (2023), a adoção de embalagens sustentáveis é uma prática cada vez mais valorizada pelos consumidores e pelas autoridades reguladoras, que incentivam as empresas a adotarem práticas de logística verde.

Além das práticas de sustentabilidade já mencionadas, muitas empresas também estão adotando políticas de compensação de carbono para neutralizar suas emissões. Essas políticas consistem em investir em projetos de preservação ambiental e de geração de energia limpa, que ajudam a reduzir a quantidade de carbono liberada na atmosfera. De acordo com Lanza *et al.* (2022), a compensação de carbono é uma prática que permite às empresas reduzirem seu impacto ambiental e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, demonstrando um compromisso com a sustentabilidade a longo prazo.

Contudo, a implementação de práticas sustentáveis na logística apresenta desafios, como os altos custos iniciais de investimentos em tecnologias e infraestrutura, além da necessidade de adaptação das operações para incorporar essas práticas. A transformação para uma logística verde exige, muitas vezes, uma reorganização de processos e a reestruturação da

cadeia de suprimentos, o que pode ser complexo e exigir tempo. Klimecka-Tatar *et al.* (2021) destacam que a adaptação a práticas sustentáveis requer uma mudança de mentalidade dentro das empresas, que deve ver a sustentabilidade não apenas como uma responsabilidade social, mas como um elemento estratégico que gera valor a longo prazo.

A educação e capacitação dos colaboradores também são fundamentais para o sucesso das iniciativas verdes em logística. Para que as práticas sustentáveis sejam inovadoras de forma eficaz, é necessário que os trabalhadores entendam a importância da sustentabilidade e estejam preparados para atuar em um ambiente onde a responsabilidade ambiental é uma prioridade. Programas de treinamento e workshops podem ajudar os colaboradores a se familiarizarem com as novas práticas e a adotarem uma postura proativa em relação à sustentabilidade. Segundo Ghobakhloo (2020), o engajamento dos colaboradores é essencial para a construção de uma cultura organizacional voltada para a sustentabilidade e para o sucesso no longo prazo das iniciativas verdes.

Além dos benefícios ambientais, a integração de práticas de sustentabilidade na logística traz benefícios financeiros e de confiança. Empresas que operam de forma sustentável reduzem custos operacionais, uma vez que práticas como o uso de embalagens recicláveis e a otimização de rotas promovem uma economia de recursos. Além disso, a sustentabilidade se tornou um diferencial competitivo, uma vez que consumidores e investidores estão cada vez mais conscientes do impacto ambiental e social das empresas. Dessa forma, a sustentabilidade se transforma em um ativo estratégico que contribui para a valorização da marca e para o fortalecimento das relações com os clientes (Björklund e Forslund, 2018).

A dimensão Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística representa um pilar fundamental para a Logística 5.0, orientando as empresas para uma operação responsável e consciente. A adoção de práticas verdes, como o uso de veículos elétricos, a economia circular, o *blockchain* e as políticas de compensação de carbono, permite que as organizações minimizem seu impacto ambiental e contribuam para a preservação dos recursos naturais. No entanto, a implementação dessas práticas exige investimentos em infraestrutura, mudanças nos processos operacionais e no envolvimento dos colaboradores, que são essenciais para o sucesso das iniciativas de logística verde. Dessa forma, a sustentabilidade se consolida como um diferencial competitivo e uma vantagem estratégica para as empresas que buscam se destacar em um mercado cada vez mais exigente e orientado para a responsabilidade ambiental (Van Erp *et al.*, 2023).

4.5. Integração e colaboração na cadeia logística 5.0

A dimensão Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0 é fundamental para o desenvolvimento de uma logística conectada, ágil e orientada para a eficiência. Na Logística 5.0, a colaboração entre os elos da cadeia de suprimentos não é apenas inconveniente, mas essencial para que as operações ocorram de maneira fluida e integrada. Esse nível de colaboração é viabilizado pela adoção de tecnologias digitais que permite a troca de informações em tempo real entre fornecedores, distribuidores e clientes finais. Segundo Leng *et al.* (2022), a colaboração digital fornece uma cadeia de suprimentos mais transparente e adaptável, onde todos os seus funcionários trabalham de forma coordenada para otimizar as operações e reduzir o desperdício de recursos.

A figura 17 ilustrou, de forma esquemática, os princípios funcionais de um sistema logístico sustentável sob a ótica da indústria 5.0. O modelo destaca a integração entre tecnologias habilitadoras e a atuação humana como elementos centrais do processo logístico contemporâneo. A presença do feedback contínuo, da personalização em larga escala e da sustentabilidade como resultado evidencia a transição da lógica puramente produtivista para uma abordagem regenerativa, centrada nas pessoas e no meio ambiente. A interação entre essas variáveis fundamenta a proposta do modelo IMAL 5.0, que parte do entendimento de que a maturidade logística deve incorporar não apenas tecnologia e eficiência, mas também resiliência, inclusão e impacto socioambiental positivo.

A integração digital é um dos elementos centrais dessa dimensão, uma vez que permite que as informações circulem rapidamente entre as partes envolvidas. Plataformas de comunicação digital, sistemas de Internet das Coisas (IoT) e tecnologias de *blockchain* são amplamente utilizadas para promover a conectividade e a interoperabilidade entre os sistemas logísticos. A integração digital permite que as empresas tenham visibilidade em tempo real sobre o status das mercadorias, os níveis de estoque e as condições de transporte, facilitando a tomada de decisões e o ajuste das transações de acordo com as necessidades do mercado. Segundo Björklund e Forslund (2018), a integração de sistemas é essencial para uma logística eficiente, pois permite que as empresas sincronizem suas operações e minimizem os atrasos e os erros operacionais.

Figura 17 - Fluxograma de um sistema logístico sustentável na indústria 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

Além da integração digital, a colaboração entre os elos da cadeia de suprimentos é uma característica fundamental da logística 5.0. A parceria possibilita que fornecedores, distribuidores e clientes compartilhem dados e trabalhem juntos para alcançar objetivos comuns, como a redução de custos, o aumento da agilidade e a melhoria da experiência do cliente. Um exemplo de colaboração eficaz é o planejamento conjunto da demanda, onde os parceiros da cadeia de suprimentos alinham suas expectativas e ajustam suas operações para atender às demandas de forma mais precisa e eficiente. De acordo com Ghobakhloo (2020), o planejamento colaborativo ajuda as empresas a evitarem problemas como o excesso de estoque e a falta de produtos, promovendo uma gestão mais equilibrada e sustentável.

No contexto de integração e colaboração, o blockchain surge como uma tecnologia avançada, pois permite que todas as partes acompanhem o andamento dos produtos e verifiquem a conformidade dos processos. O blockchain cria um registro imutável de cada transação e movimento ao longo da cadeia de suprimentos, aumentando a transparência e a segurança das transações. Essa rastreabilidade é particularmente importante em setores que desativam altos padrões de qualidade e segurança, como os de alimentos e o farmacêutico, onde é crucial garantir a origem e a integridade dos produtos. Segundo Choi e Siqin (2022), o *blockchain* promove uma cadeia de suprimentos mais confiável e transparente, onde todos os elos podem rastrear as mercadorias e verificar o cumprimento das regulamentações.

Outro aspecto importante da integração e colaboração na logística 5.0 é o uso de sistemas de IoT, que conectam dispositivos e sensores ao longo da cadeia de suprimentos para monitorar e reportar informações em tempo real. A IoT permite que as empresas monitorem as condições de armazenamento e transporte dos produtos, como temperatura e umidade, garantindo que as mercadorias sejam preservadas especificamente e que os padrões de qualidade sejam mantidos. Essa visibilidade também possibilita a detecção rápida de problemas, como variações ou atrasos, permitindo que as empresas tomem medidas corretivas antes que o problema afete o cliente final (Leng *et al.*, 2022). A integração da IoT com sistemas de gestão da cadeia de suprimentos aumenta a eficiência e a segurança das operações, promovendo uma logística mais ágil e adaptável.

A comunicação em tempo real é outro elemento-chave na integração e colaboração na cadeia logística. Com o uso de plataformas de comunicação digital, as empresas transmitem informações de forma imediata e sincronizada, eliminando barreiras de comunicação e melhorando a melhoria das operações. Essa comunicação em tempo real permite que as empresas respondam rapidamente a mudanças na demanda, ajustes de rota e eventos imprevistos, como interrupções no transporte. Segundo Lanza *et al.* (2022), a capacidade de comunicação instantânea entre os elos da cadeia de suprimentos é essencial para uma logística flexível, pois permite que as empresas adaptem suas operações de maneira rápida e eficiente.

A colaboração na logística 5.0 também envolve a criação de parcerias estratégicas entre os participantes da cadeia de suprimentos, onde cada parte contribui com suas competências e recursos para alcançar objetivos comuns. Estas parcerias vão além das relações transacionais tradicionais e baseiam-se na confiança e no comprometimento mútuo com a eficiência e a sustentabilidade. Enquanto as empresas colaboram para resolver problemas, compartilhem conhecimentos e desenvolvam inovações que beneficiem todos os envolvidos. Segundo Ali *et al.* (2023), as parcerias estratégicas fortalecem a resiliência da cadeia de suprimentos e criam um ambiente colaborativo onde todos os participantes podem se beneficiar da eficiência e da inovação.

A gestão de dados é outro fator crucial na integração e colaboração logística, pois permite que as empresas tomem decisões baseadas em informações precisas e atualizadas. A análise de dados ajuda as empresas a identificarem padrões de comportamento na cadeia de suprimentos, otimizando processos e antecipando problemas. No entanto, a recolha e a partilha de dados bloqueiam uma infraestrutura tecnológica robusta e políticas de segurança da informação para proteger os dados sensíveis. Segundo Nahavandi (2019), uma gestão eficaz de

dados permite que as empresas operem de maneira mais estratégica, ajustando suas operações em tempo real e promovendo uma logística mais eficiente e orientada por dados.

No entanto, a integração e a colaboração na cadeia logística apresentam alguns desafios, como a necessidade de padronização de sistemas e a resistência interna à mudança. A integração de sistemas logísticos exige que todas as partes envolvidas utilizem plataformas e protocolos compatíveis, o que pode ser uma barreira para empresas que ainda utilizam tecnologias antigas ou que possuem processos operacionais fragmentados. Além disso, uma mudança para uma operação colaborativa e digitalizada pode gerar resistência entre os colaboradores, especialmente entre aqueles acostumados com métodos tradicionais de trabalho. Segundo Klimecka-Tatar *et al.* (2021), superar esses desafios exige um esforço de liderança e treinamento para incentivar a adoção de novas práticas e garantir a coesão da cadeia de suprimentos.

A dimensão de Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0 traz consideráveis benefícios para as empresas que buscam uma operação ágil, eficiente e transparente. Ao integrar seus sistemas e colaborar com seus parceiros, as empresas conseguem aumentar a visibilidade e a precisão de suas operações, otimizando o uso de recursos e reduzindo os custos. Essa integração também fortalece a resiliência da cadeia de suprimentos, pois permite que as empresas respondam rapidamente a eventos imprevistos e ajustem suas operações conforme necessário (Björklund e Forslund, 2018). Além disso, a colaboração permite que as empresas compartilhem informações sobre práticas sustentáveis e soluções inovadoras, promovendo uma logística mais responsável e orientada para a sustentabilidade.

Assim sendo, a dimensão integração e colaboração na cadeia logística 5.0 representa um dos pilares fundamentais da maturidade logística, onde a conectividade e a transparência são essenciais para a eficiência e a flexibilidade das operações. Tecnologias como blockchain, IoT e plataformas de comunicação em tempo real facilitam a troca de informações e de forma cooperativa entre os elos da cadeia de suprimentos, promovendo uma operação colaborativa e resiliente. Embora a aplicação dessas práticas envolva desafios, os benefícios em termos de agilidade, a sustentabilidade e a satisfação do cliente tornam a integração e a colaboração uma vantagem estratégica para as empresas que se interessam por se destacar em um mercado cada vez mais exigente e competitivo (Van Erp *et al.*, 2023).

4.6. Resiliência logística e mudanças climáticas

A dimensão resiliência logística e mudanças climáticas é imprescindível para a modernidade na logística 5.0, pois representa a capacidade das empresas de se adaptarem a eventos adversos e responderem de forma eficiente a crises que possam impactar a continuidade das operações logísticas. A resiliência se torna cada vez mais relevante diante dos cenários de mudanças climáticas e das ocorrências nas cadeias de suprimentos globais. Segundo Ivanov *et al.* (2021), a resiliência logística é a capacidade de uma organização de resistência a disfunções e recuperar-se rapidamente, minimizando os impactos financeiros e operacionais. Nesse contexto, as empresas buscam desenvolver uma cadeia de suprimentos que não apenas sobreviva a eventos imprevistos, mas também se adapte e evolua com as mudanças ambientais e de mercado.

A análise preditiva desempenha um papel fundamental na construção da resiliência logística, permitindo que as empresas antecipem riscos e tomem medidas preventivas. Com o uso de tecnologias de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina, as empresas fornecem grandes volumes de dados em tempo real, identificando padrões e sinais de possíveis interrupções na cadeia de suprimentos. Segundo Ghobakhloo (2020), uma análise preditiva não apenas auxilia as empresas a evitarem problemas, mas também permite que ajustem suas operações para reduzir os impactos de eventos climáticos extremos, como enchentes, secas e tempestades. Esse monitoramento constante permite que as empresas tomem decisões mais ágeis e informadas, ajustando rotas de transporte, replanejando estoques e ativando protocolos de contingência com base em variações climáticas.

Outro componente importante da resiliência logística é a adaptação climática, que envolve a implementação de práticas e políticas para mitigar os impactos das mudanças climáticas nas operações logísticas. A adaptação climática permite que as empresas fortaleçam suas cadeias de suprimentos, preparando-se para enfrentar os desafios impostos por um clima em constante transformação. De acordo com Lanza *et al.* (2022), a adaptação climática na logística envolve medidas como a diversificação das rotas de transporte, a utilização de infraestruturas mais resistentes e o desenvolvimento de planos de contingência específicos para cada cenário climático. Essas práticas tornam a cadeia de suprimentos mais robusta e menos suscetível a danos causados por eventos climáticos extremos, garantindo a continuidade das operações e minimizando as perdas.

A diversificação de rotas e fornecedores é uma estratégia essencial para reduzir a vulnerabilidade das cadeias de suprimentos a áreas externas. Empresas que dependem de um único fornecedor ou rota de transporte tornam-se mais suscetíveis a problemas causados por desastres naturais ou interrupções logísticas, como greves e acidentes. Ao diversificar seus fornecedores e utilizar múltiplas rotas, as empresas aumentam a flexibilidade e a segurança de suas operações, diminuindo o risco de paralisações. Segundo Björklund e Forslund (2018), a diversificação é uma prática essencial para a resiliência logística, pois permite que as empresas adaptem suas operações rapidamente em resposta a eventos externos.

A implementação de protocolos de contingência também é uma prática essencial para empresas que desejam alcançar um alto nível de resiliência logística. Esses protocolos são planos detalhados que orientam a resposta da empresa em caso de interrupções, garantindo que as entregas possam ser retomadas o mais rapidamente possível. Esses planos de contingência incluem medidas como a ativação de rotas alternativas, o ajuste de estoques e a comunicação imediata com clientes e fornecedores. Segundo Klimecka-Tatar *et al.* (2021), protocolos de contingência bem estruturados são fundamentais para a continuidade das operações, pois permitem que uma empresa responda de forma rápida e eficiente a qualquer tipo de crise, minimizando o impacto financeiro e operacional.

No contexto da logística 5.0, o uso de redes de Internet das Coisas (IoT) também contribui para a resiliência logística, pois permite o monitoramento em tempo real das condições ambientais e da localização de mercadorias. A IoT conecta sensores que registram informações como temperatura, umidade e vibração, enviando alertas em caso de mudanças bruscas que possam comprometer a qualidade dos produtos. Essas informações são transmitidas instantaneamente para os sistemas de gestão, possibilitando que as empresas tomem medidas corretivas de maneira rápida. O uso de IoT, combinado com análise preditiva, facilita a detecção precoce de possíveis falhas e aumenta a capacidade da empresa de reagir a eventos que possam comprometer o fluxo logístico (Ali *et al.*, 2023).

Além do uso de IoT, o blockchain é outra tecnologia importante para a resiliência logística, especialmente quando se trata de garantir a segurança e a transparência nas operações. O *blockchain* cria um registro digital imutável que acompanha cada etapa da cadeia de suprimentos, desde a origem até o destino dos produtos. Isso é particularmente importante em eventos disruptivos, pois permite que as empresas rastreiem o movimento dos produtos e identifiquem pontos críticos onde ocorrem os incidentes. Segundo Choi e Siqin (2022), o

blockchain aumenta a transparência e a confiabilidade da cadeia de suprimentos, fornecendo uma resposta mais eficaz e coordenada em situações de crise.

A resiliência ambiental, que integra sustentabilidade e adaptação climática, também é uma prática fundamental na Logística 5.0. As empresas comprometidas com a resiliência ambiental adotam políticas e práticas que protegem seu impacto sobre o meio ambiente, como o uso de veículos elétricos, o investimento em energias renováveis e a escolha de fornecedores que unem o compromisso com a sustentabilidade. Segundo Ghobakhloo (2020), a resiliência ambiental fortalece a cadeia de suprimentos, pois garante que as exportações sejam fornecidas de maneira responsável e sustentável, reduzindo o impacto das mudanças climáticas e contribuindo para a preservação dos recursos naturais.

A resiliência logística na era das mudanças climáticas exige, ainda, o desenvolvimento de políticas de sustentabilidade e de compensação de carbono. Empresas resilientes investem em projetos que visam neutralizar suas emissões de carbono, como o reflorestamento e a geração de energia limpa, para compensar o impacto ambiental de suas operações. Esse compromisso com a sustentabilidade ajuda a mitigar os efeitos das mudanças climáticas e fortalece a imagem da empresa junto aos consumidores e investidores. Segundo Van Erp *et al.* (2023), a compensação de carbono e o compromisso com a sustentabilidade tornam-se diferenciais competitivos para as empresas que desejam operar de maneira ética e responsável.

A dimensão Resiliência Logística e Mudanças Climáticas no modelo de logística 5.0 representa a capacidade das empresas de enfrentar e superar eventos adversos e de se adaptar às mudanças climáticas. Tecnologias como análise preditiva, IoT e *blockchain*, aliadas às práticas como a diversificação de rotas, a implementação de protocolos de contingência e o compromisso com a sustentabilidade, permitem que as empresas construam cadeias de suprimentos resilientes e preparadas para os desafios do futuro. Essa dimensão reflete a modernidade logística necessária para enfrentar um ambiente de negócios incerto e sujeito às flutuações climáticas, posicionando-se como empresas como líderes em sustentabilidade e eficiência logística.

4.7. Maturidade e desempenho da logística 5.0

Maturidade e desempenho da logística 5.0 representam a busca contínua pela excelência operacional e pelo aprimoramento dos processos logísticos. Nessa dimensão, a evolução da logística reflete o grau de desenvolvimento das práticas e tecnologias utilizadas para melhorar a cadeia de suprimentos, enquanto o desempenho é medido por métricas de eficiência, precisão

e qualidade do serviço. A Logística 5.0 adota uma abordagem avançada, orientada por dados e inovação tecnológica, que permite às empresas atingirem níveis elevados de eficiência e desempenho ao longo de toda a cadeia de suprimentos (Ghobakhloo, 2020).

A logística é avaliada pelo grau de automação e digitalização das operações, além da capacidade da empresa de utilizar dados em tempo real para tomada de decisões estratégicas. Empresas que atingem altos níveis de maturidade operam de maneira proativa, antecipando demandas e ajustando suas operações de acordo com as condições do mercado. Segundo Leng *et al.* (2022), a modernidade logística é alcançada por meio da integração de tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e *Big Data*, que proporciona uma visão holística e precisa das operações logísticas, possibilitando o monitoramento e a análise em tempo real.

A automação é um componente central na atualização da logística 5.0, pois permite que as empresas reduzam a dependência de processos manuais e aumentem a velocidade e a segurança das operações. Com o uso de sistemas automatizados, como robôs para entrega de produtos em armazéns e veículos independentes para transporte, as empresas conseguem acelerar o fluxo logístico e reduzir os erros, promovendo uma logística ágil e responsiva. Segundo Oran e Cezayirlioglu (2021), a automação é um dos pilares da Logística 5.0, uma vez que permite às empresas atenderem à demanda de forma mais eficiente e com menor desperdício de recursos.

Além da automação, a análise de dados desempenha um papel fundamental no monitoramento e na otimização do desempenho logístico. A Logística 5.0 utiliza dados de diversas fontes, como sensores IoT e sistemas de rastreamento, para obter insights detalhados sobre o desempenho das operações e identificar áreas de melhoria. A análise de dados permite que as empresas acompanhem indicadores de desempenho, como tempo de entrega, precisão do inventário e nível de satisfação do cliente, promovendo uma gestão orientada por resultados. Segundo Nahavandi (2019), o uso de *Big Data* e IA para análise de desempenho é essencial para a maturidade logística, pois fornece uma base sólida para decisões estratégicas e ajustes operacionais.

A tecnologia de inteligência artificial (IA) é outra que impulsiona a modernidade e o desempenho da Logística 5.0. A IA permite que as empresas analisem grandes volumes de dados com rapidez e precisão, utilizando algoritmos preditivos para prever tendências de demanda, ajustar estoques e otimizar o planejamento de rotas. Com a IA, as empresas

antecipam mudanças no mercado e adaptam suas operações de forma proativa, minimizando os custos e melhorando a satisfação do cliente. De acordo com Lanza *et al.* (2022), a IA é uma ferramenta estratégica para a Logística 5.0, pois permite uma operação mais inteligente e adaptável, que se ajusta às flutuações da demanda e às condições externas.

O uso de indicadores de desempenho (KPI's) é fundamental para medir a maturidade e o desempenho logístico. Entre os KPIs mais comuns estão o tempo de ciclo, a precisão do inventário, o tempo de entrega e o custo por unidade movimentada. Esses indicadores permitem que monitorem a eficiência das operações das empresas e identifiquem áreas de melhoria. Segundo Björklund e Forslund (2018), a análise de KPI's é uma prática essencial para a maturidade logística, pois possibilita uma avaliação contínua do desempenho e promove uma cultura de melhoria constante.

Um dos KPI's mais críticos é o tempo de ciclo, que mede o tempo necessário para completar um pedido, desde a solicitação até a entrega. A redução do tempo de ciclo é uma prioridade para empresas que buscam oferecer um serviço ágil e responsivo, especialmente em setores onde a rapidez de entrega é um diferencial competitivo. Ao automatizar processos e melhorar o planejamento logístico, as empresas conseguem reduzir significativamente o tempo de ciclo, aumentando a satisfação do cliente e fortalecendo sua posição no mercado. Segundo Choi e Siqin (2022), a diminuição do tempo de ciclo é uma das principais vantagens da Logística 5.0, pois contribui para uma operação mais ágil e eficiente.

A precisão do inventário é outro KPI importante para a maturidade logística, pois reflete a capacidade da empresa de manter níveis adequados de estoque para atender à demanda. A gestão de inventário é otimizada por meio do uso de IA e *Big Data*, que permite prever a demanda com correções e ajustar os níveis de estoque em tempo real. Essa precisão ajuda a evitar tanto o excesso quanto a falta de produtos, reduzindo os custos associados aos estoques necessários e aumentando a disponibilidade de produtos. Segundo Klimecka-Tatar *et al.* (2021), a precisão do inventário é um indicador-chave de maturidade logística, pois demonstra a capacidade da empresa de operar de forma eficiente e responsiva.

A satisfação do cliente é um KPI que se torna central na logística 5.0, pois reflete o desempenho da empresa na entrega de um serviço de qualidade. A satisfação do cliente depende de fatores como a pontualidade das entregas, a precisão dos pedidos e a qualidade dos produtos. Empresas que monitoram a satisfação do cliente e utilizam feedbacks para ajustar suas operações demonstram um alto nível de maturidade logística, pois se adaptam rapidamente às

expectativas e necessidades dos consumidores. Segundo Ali *et al.* (2023), a satisfação do cliente é um fator determinante para a competitividade e o sucesso a longo prazo, sendo um reflexo direto do desempenho logístico.

A cibersegurança é um aspecto crucial para o desempenho da logística 5.0, pois a digitalização e a automação aumentam a vulnerabilidade das operações a ataques cibernéticos. Com a interconectividade dos sistemas e a troca constante de dados, é essencial que as empresas implementem medidas robustas de segurança da informação para proteger a integridade dos dados e garantir a continuidade das operações. Segundo Ghobakhloo (2020), a cibersegurança é um componente indispensável da logística, pois garante a confiança dos parceiros e clientes, além de proteger os dados sensíveis da empresa.

Portanto, a dimensão Maturidade e Desempenho da Logística 5.0 no modelo de maturidade representam a busca pela excelência operacional e pelo uso eficiente de recursos. Tecnologias como automação, IA, Big Data e sistemas de análise de KPIs são fundamentais para promover uma logística madura e orientada para resultados. Empresas que alcançam altos níveis de atualização monitoram e ajustam suas operações em tempo real, oferecendo um serviço de qualidade e atendendo às expectativas dos clientes de forma ágil e precisa.

4.8 Aspecto humano na logística 5.0

O aspecto humano na Logística 5.0 se destaca como um dos pilares centrais para a maturidade e o sucesso das operações logísticas avançadas. Diferentemente da Logística 4.0, que focava principalmente na automação e na digitalização de processos, a Logística 5.0 integra e valoriza a presença humana, monitorando o potencial dos trabalhadores para contribuir com a criatividade, o julgamento e a capacidade de adaptação às mudanças. Esse novo modelo enfatiza a colaboração entre humanos e máquinas, desenvolvendo uma logística centrada no ser humano, mais inclusiva, eficiente e inovadora (Ghobakhloo, 2020).

Na Logística 5.0, os trabalhadores são posicionados como agentes estratégicos, responsáveis não apenas pela execução de tarefas operacionais, mas também pelo monitoramento e pelo controle dos sistemas automatizados. A integração entre humanos e robôs colaborativos (*cobots*) cria um ambiente de trabalho híbrido, onde os trabalhadores podem delegar atividades repetitivas e fisicamente desgastantes aos robôs, concentrando-se em funções de maior valor, como análise de dados, tomada de decisões e inovação. Segundo Nahavandi (2019), a colaboração humano-máquina potencializa a produtividade e reduz a taxa de erros nas operações, uma vez que as máquinas realizam as tarefas padronizadas e os

humanos aplicam suas habilidades criativas e analíticas para resolver problemas e melhorar os processos.

O avanço da logística 5.0 exige uma força de trabalho desenvolvida, capacitada para lidar com tecnologias de ponta, como inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e análise de Big Data. Desta forma, a capacitação e o desenvolvimento profissional são componentes críticos para a implementação bem-sucedida da Logística 5.0. Empresas que investem em programas de treinamento contínuo para seus colaboradores fornecem manter uma força de trabalho preparada para operar sistemas complexos e se adaptar rapidamente às novas demandas do mercado. Segundo Segundo Nahavandi (2019), o treinamento em habilidades digitais e analíticas permite que os trabalhadores sejam mais independentes e confiantes no uso das tecnologias, promovendo uma cultura organizacional de inovação e excelência.

A cultura de inovação é, portanto, uma característica central do aspecto humano na logística 5.0. Nessa abordagem, os colaboradores são incentivados a contribuir com ideias e sugestões para melhorar os processos logísticos e desenvolver soluções criativas para os desafios enfrentados na operação. A promoção de uma cultura de inovação impulsiona a transformação digital e incentiva a colaboração entre diferentes áreas, fortalecendo o engajamento dos trabalhadores e aumentando a competitividade da empresa. Segundo Nahavandi (2019), uma cultura organizacional que valoriza a inovação e o aprendizado contínuo contribui para um ambiente de trabalho dinâmico e propício à evolução tecnológica e à melhoria dos processos.

Outro aspecto importante da logística 5.0 é o foco no bem-estar dos colaboradores, promovendo condições de trabalho mais seguras, saudáveis e inclusivas. A digitalização e a automação de processos ajudam a reduzir a carga física dos trabalhadores, evitando o risco de acidentes e lesões relacionadas a atividades repetitivas e perigosas. Robôs colaborativos, por exemplo, podem ser utilizados para manusear cargas pesadas, enquanto os trabalhadores se concentram em tarefas menos extenuantes e de maior complexidade. Segundo Segundo Nahavandi (2019), o uso de tecnologias de automação não apenas melhora a eficiência, mas também contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e poderoso, aumentando a motivação e o comprometimento dos colaboradores.

A humanização das operações logísticas também envolve a promoção da diversidade e da inclusão no ambiente de trabalho. A logística 5.0 busca criar um espaço onde todas as vozes

sejam ouvidas e valorizadas, independentemente de gênero, raça ou condição física. Essa inclusão é essencial para a criação de uma equipe de trabalho rica em perspectivas e ideias, promovendo um ambiente de colaboração e inovação. Segundo Choi e Siqin (2022), a diversidade e a inclusão são fatores essenciais para o sucesso da logística 5.0, pois permitem que a empresa aproveite o potencial de diferentes pontos de vista e habilidades, resultando em soluções mais criativas e inovadoras.

Além disso, o aspecto humano na logística 5.0 também enfatiza a importância do engajamento dos colaboradores. Em um ambiente onde a automação e a automação desempenham papéis centrais, manter o engajamento dos trabalhadores é fundamental para garantir a adesão às novas tecnologias e a continuidade das operações. Empresas que promovem o engajamento ativo dos colaboradores incentivam uma maior acessibilidade das mudanças tecnológicas e uma disposição para aprender e se adaptar. Choi e Siqin (2022), afirmam que o engajamento dos colaboradores é essencial para uma implementação bem-sucedida da Logística 5.0, pois os trabalhadores desempenham um papel importante no monitoramento e na melhoria dos processos digitais.

A inteligência emocional é uma habilidade valorizada na Logística 5.0, pois a colaboração humano-máquina exige que os trabalhadores desenvolvam uma capacidade de adaptação e resiliência em um ambiente dinâmico e em constante evolução. A inteligência emocional permite que os colaboradores lidem melhor com os desafios de um ambiente de trabalho digitalizado, comunicando-se de maneira eficaz e adaptando-se às mudanças. Segundo Choi e Siqin (2022), a inteligência emocional é uma competência essencial para o sucesso na Logística 5.0, pois facilita a colaboração entre equipes, o gerenciamento de conflitos e a adaptação a novas tecnologias e processos.

A dimensão do aspecto humano na Logística 5.0 também se reflete na ética e na responsabilidade social, que permite a atuação das empresas em relação aos trabalhadores, à comunidade e ao meio ambiente. A Logística 5.0 busca não apenas maximizar a eficiência e a lucratividade, mas também promover um impacto positivo nas comunidades onde opera. Isso inclui a adoção de práticas sustentáveis, a oferta de condições de trabalho justas e a promoção de iniciativas que valorizem o desenvolvimento humano. Segundo Van Erp *et al.* (2023), a ética e a responsabilidade social são fundamentais para a logística 5.0, pois reforçam o compromisso da empresa com o bem-estar dos trabalhadores e a sustentabilidade.

4.9. Caracterização introdutória do IMAL 5.0

A elaboração do Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0) surgiu como uma resposta à lacuna observada na literatura sobre modelos de avaliação voltados à realidade emergente da Logística 5.0, especialmente em contextos industriais periféricos como o PIM. Durante o processo de revisão sistemática, identifiquei que grande parte dos MM's existentes se concentram em aspectos técnico-operacionais da logística 4.0, explorando de modo inadequado as dimensões fundamentais como a centralidade humana, a sustentabilidade sistêmica e a integração colaborativa entre tecnologias e pessoas — princípios basilares da Indústria 5.0 (Romero *et al.*, 2020; Nahavandi, 2021). O quadro 4 operacionaliza dimensões emergentes nos modelos tradicionais de maturidade.

Quadro 5 - Dimensões do IMAL 5.0, definições, indicadores e justificativas

Dimensão	Definição	Exemplo de Indicadores	Justificativa
Infraestrutura Tecnológica (HU)	Capacidade de adotar tecnologias habilitadoras (IA, IoT, automação).	Nível de automação; Uso de Sensores IoT.	Base tecnológica é essencial para viabilizar a logística.
Integração Digital (IT)	Integração de sistemas internos e externos com fluidez de dados.	Integração ERP; Troca de dados com fornecedores.	Dados Integrados promovem eficiência e decisão em tempo real.
Sustentabilidade (SV)	Adoção de práticas ambientais, economia circular e logística reversa.	Política ambiental; Volume de resíduos reciclados.	Sustentabilidade é eixo transversal da Indústria 5.0
Centralidade Humana (HU)	Valoração do fator humano, ergonômico, inclusão e capacitação.	Treinamentos; Ergonomia; Diversidade.	A indústria 5.0 é centrada no ser humano.
Resiliência (RM)	Capacidade de resposta a eventos disruptivos e continuidade operacional.	Plano de contingência; <i>Backup</i> de fornecedores.	A resiliência garante estabilidade frente a choques externos.

Fonte: Autoria Própria (2025).

A construção do modelo IMAL 5.0 fundamentou-se em seis dimensões-chave, cada uma delas representando um pilar estratégico para a transição das organizações logísticas rumo à lógica da Indústria 5.0. Essas dimensões foram definidas com base na revisão sistemática da literatura e complementadas por validação empírica junto a especialistas do setor. O quadro 5 apresenta de forma estruturada a definição conceitual de cada dimensão, exemplos de indicadores operacionais utilizados na avaliação e as respectivas justificativas para sua inclusão no modelo. Essa sistematização visa assegurar clareza, objetividade e consistência ao processo de avaliação, garantindo que o índice reflita tanto os fundamentos teóricos quanto as práticas observadas no campo.

A escolha por um modelo multicritério de base causal foi igualmente estratégica. A partir da aplicação do método DEMATEL e de sua extensão *Grey-DEMATEL* — que incorpora o tratamento de incertezas subjetivas — foi possível construir um índice robusto, sensível às nuances dos julgamentos de especialistas e capaz de representar, de forma inteligível e aplicada, o grau de maturidade logística em empresas do setor eletroeletrônico do PIM. O IMAL 5.0, portanto, emerge como um instrumento diagnóstico e prescritivo que, além de orientar a transformação logística, também busca contribuir para políticas públicas de neointustrialização sustentável na Amazônia, respeitando os pilares da Logística 5.0 e alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2025).

Com a definição das dimensões estruturantes do IMAL 5.0 e sua fundamentação teórico-empírica apresentada no quadro 4, tornou-se necessário validar as inter-relações causais entre os critérios propostos, garantindo a consistência e a aplicabilidade do modelo. Para isso, optou-se pelo uso do método multicritério DEMATEL, dada sua reconhecida capacidade de mapear relações de influência em sistemas complexos. A seguir, descreve-se a aplicação do formulário desenvolvido especificamente para essa análise, detalhando seu processo de elaboração, validação e aplicação junto a especialistas do setor industrial do PIM.

4.9.1 Aplicação do formulário para análise DEMATEL

A aplicação do formulário destinado à análise DEMATEL (*Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory*) teve como objetivo identificar e mapear as relações de causa e efeito entre as dimensões do modelo IMAL 5.0 no contexto logístico das empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM). Esse instrumento demonstrado na seção “Apêndice C e D” foi elaborado com base nos critérios estabelecidos na literatura sobre modelos de maturidade e influência

sistêmica (Gabus e Fontela, 1972; Li *et al.*, 2014), sendo validado previamente com apoio de especialistas do setor.

O formulário foi estruturado em formato digital e aplicado entre os meses de abril e maio de 2025, contemplando uma matriz de julgamento par-a-par entre as seis dimensões do índice: HU (Humanização Organizacional), IT (Inovação Tecnológica), IC (Integração e Colaboração), RM (Resiliência de Mercado) e SV (Sustentabilidade e Valor). Para cada par de dimensões *i* e *j*, os participantes foram solicitados a indicar, em uma escala de 0 a 4, o grau de influência da dimensão *i* sobre a dimensão *j*, conforme o modelo DEMATEL tradicional.

A amostra foi composta por 28 respondentes, todos profissionais atuantes em áreas estratégicas das empresas do setor eletroeletrônico, com conhecimento direto sobre os processos logísticos e organizacionais. Os dados coletados foram tabulados e processados segundo os passos metodológicos do DEMATEL, conforme orientado por Lin *et al.* (2011) e aplicados em outros estudos recentes de logística 5.0 (Ghobakhloo *et al.*, 2023).

A construção da matriz de influência direta permitiu a geração da matriz total (T), integrando as influências diretas e indiretas. A partir dessas matrizes, calcularam-se os vetores de importância (D) e efeito (R), os quais embasaram as análises de clusters, classificação de dimensões e formulação de recomendações estratégicas para o aprimoramento logístico nas empresas analisadas.

Essa abordagem contribui significativamente para a visualização sistêmica das interações logísticas, permitindo que decisões sejam tomadas de forma mais consciente e alinhada às prioridades estratégicas do ecossistema industrial do Amazonas conforme o Apêndice C.

4.9.2. Dimensões estruturantes do IMAL 5.0

O Índice IMAL 5.0 foi concebido com base em uma estrutura composta por seis dimensões interdependentes, que refletem os princípios orientadores da Logística 5.0. Cada dimensão representa um eixo crítico para mensurar o grau de maturidade logística das organizações, especialmente em contextos industriais desafiadores como o do PIM. A seguir, apresentam-se as dimensões que integram o modelo proposto, fundamentadas na literatura científica analisada:

- a) Infraestrutura tecnológica

A dimensão de infraestrutura tecnológica refere-se à capacidade da organização em dispor de recursos digitais e físicos que suportem a implementação de soluções avançadas em logística. Envolve a presença de sistemas de informação integrados, conectividade industrial (Industrial Internet of Things – IIoT), sensores inteligentes, automação e dispositivos de coleta de dados em tempo real. Essa dimensão sustenta a base física e digital necessária para a operacionalização dos demais elementos da Logística 5.0 (Ghobakhloo *et al.*, 2023).

b) Integração digital

Essa dimensão aborda o grau de integração entre sistemas, processos e dados ao longo da cadeia de suprimentos. Trata da interoperabilidade entre plataformas tecnológicas, da visibilidade dos fluxos logísticos e da comunicação eficiente entre os agentes envolvidos, internos e externos à organização. A integração digital viabiliza a tomada de decisão em tempo real e a resposta rápida às variações do ambiente, sendo essencial para alcançar uma logística responsiva e adaptativa (Yin *et al.*, 2022).

c) Sustentabilidade

A sustentabilidade na Logística 5.0 ultrapassa a lógica de mitigação de impactos ambientais, abrangendo também os aspectos sociais e econômicos da operação logística. Essa dimensão considera a adoção de práticas de logística verde, economia circular, rastreabilidade de insumos, eficiência energética e responsabilidade social. Avalia-se, portanto, o alinhamento da organização aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo cadeias logísticas mais inclusivas e regenerativas (Dwivedi *et al.*, 2023).

d) Centralidade humana

A centralidade humana constitui um dos pilares da Indústria 5.0 e, por consequência, da Logística 5.0. Essa dimensão avalia o grau de envolvimento, capacitação e bem-estar dos colaboradores nas atividades logísticas, bem como a valorização do conhecimento tácito e da empatia organizacional. Também abrange a qualidade da interação homem-máquina e a criação de ambientes de trabalho seguros, colaborativos e tecnologicamente mediados, respeitando os limites e as potencialidades humanas (Nahavandi, 2021).

e) Resiliência

Por fim, a dimensão de resiliência refere-se à capacidade da organização em antecipar, responder e adaptar-se a eventos adversos, sejam eles de natureza climática, econômica, sanitária ou tecnológica. Avalia-se, nessa dimensão, a existência de mecanismos de contingência, flexibilidade operacional, redundância de recursos e inteligência analítica aplicada à gestão de riscos logísticos. A resiliência é especialmente crítica em cadeias de suprimentos expostas a vulnerabilidades como a do Polo Industrial de Manaus (Ivanov, 2022).

4.9.3. Cálculo do IMAL 5.0

O Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0) foi desenvolvido com o objetivo de fornecer uma métrica adaptável e validada para mensurar o nível de maturidade logística das empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM), a partir dos princípios da Logística 5.0. A proposta do índice baseou-se em modelos de maturidade amplamente aceitos na literatura científica, mas incorpora uma abordagem multicritério que permite captar, de forma integrada, os fatores tecnológicos, humanos e ambientais que influenciam a maturidade logística na era da Indústria 5.0.

A construção do IMAL 5.0 baseou-se na aplicação de questionários estruturados, cujas questões foram agrupadas em cinco dimensões principais: (1) Tecnologia e Automação, (2) Sustentabilidade e Práticas Verdes, (3) Integração e Colaboração, (4) Aspecto Humano e (5) Resiliência Logística e Mudanças Climáticas. Os participantes da pesquisa atribuíram pontuações em escalas de concordância (de 0 a 3) e respostas binárias (0 ou 1), conforme a natureza da questão.

Cada dimensão recebeu um conjunto de perguntas específicas e, a partir da soma das respostas de cada empresa, foi gerada uma Pontuação Total da Dimensão. Essa pontuação foi, então, normalizada para possibilitar a comparação entre diferentes dimensões, com diferentes números de itens. A normalização foi realizada utilizando na fórmula apresentada na equação 1.

Equação 1 – Percentual de adequação

$$\text{Percentual de adequação da dimensão} = \left(\frac{\text{Pontuação obtida}}{\text{Pontuação máxima possível}} \right) \times 100$$

A partir dos percentuais de adequação de cada dimensão, procedeu-se ao cálculo do Índice Geral IMAL 5.0, utilizando uma média ponderada, justifica-se pela necessidade de atribuir pesos diferenciados às dimensões e subdimensões avaliadas, considerando sua relevância relativa no contexto da Logística 5.0. Essa abordagem permitiu que fatores mais críticos — como resiliência, sustentabilidade e centralidade humana — influenciem proporcionalmente o resultado do índice, refletindo com maior precisão a realidade das empresas analisadas (Ghobakhloo, 2020; Ivanov, 2022). Os pesos atribuídos às dimensões variaram conforme sua relevância no contexto amazônico, sendo possível atribuir maior peso, por exemplo, à Sustentabilidade ou à Resiliência, dada sua criticidade na logística da região. A fórmula do índice geral foi expressa na equação 2:

Equação 2 – Cálculo IMAL 5.0

$$IMAL\ 5.0 = \frac{\sum_{i=1}^n (Adequação \times Peso)}{\sum_{i=1}^n Peso}$$

Em que:

- Adequação: percentual de adequação da dimensão i ;
- Peso: peso atribuído à dimensão i ;
- n : número total de dimensões.

Essa estrutura permitiu adaptar o modelo às prioridades estratégicas de cada setor ou empresa, conferindo ao IMAL 5.0 flexibilidade e sensibilidade contextual. Essa flexibilidade metodológica é inspirada nas boas práticas de modelos de maturidade como CMMI (*Capability Maturity Model Integration*) e BPMM (*Business Process Maturity Model*), conforme apontado por Saaty (2008) e De Bruin *et al.* (2005).

O Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0) apresentados acima, ofereceram uma estrutura metodológica robusta para mensurar o grau de prontidão logística das empresas do PIM à luz dos princípios da logística 5.0. A fórmula de cálculo combinou percentuais de adequação com pesos estratégicos atribuídos a cada dimensão — como tecnologia, sustentabilidade, resiliência, centralidade humana e integração — refletindo a relevância desses fatores para o contexto amazônico. A tabela de fórmulas sistematizou as etapas do cálculo e evidencia a abordagem multicritério e adaptável do índice.

Com isso, o IMAL 5.0 permitiu não só diagnósticos comparativos entre empresas, mas também a formulação de políticas logísticas mais alinhadas à reindustrialização sustentável da região, promovendo eficiência operacional com responsabilidade socioambiental. Nesse sentido, o quadro 6 sistematizou, de forma objetiva, as etapas do cálculo do IMAL 5.0, detalhando fórmulas, normalização, pesos e interpretação da maturidade logística. Além disso, foi possível inferir que traduz respostas em percentuais ponderados, permitindo mensuração objetiva da prontidão logística, sensível à realidade estratégica das dimensões no contexto amazônico e contribuindo com oportunidades de preenchimento de lacuna na literatura.

Quadro 6 - Fórmulas do IMAL 5.0

Etapa de Cálculo	Fórmula / Descrição
Cálculo da adequação de cada dimensão	Pontuação obtida em cada dimensão a partir das respostas no questionário.
Fórmula de normalização das pontuações	Adequação (%) = (Pontuação obtida / Pontuação máxima possível) × 100
Cálculo do IMAL 5.0 – Índice Geral	$IMAL\ 5.0 = \Sigma (Adequação\_i \times Peso\_i) / \Sigma\ Peso\_i$
Definição dos pesos das dimensões	Pesos definidos com base na relevância estratégica das dimensões para o contexto do PIM.
Interpretação final do IMAL 5.0	Resultado varia de 0 a 100, indicando o grau de maturidade e prontidão logística da organização.

Fonte: Autoria Própria (2025).

O uso de ponderações diferenciais tornou o IMAL 5.0 um instrumento particularmente útil para diagnósticos comparativos entre empresas ou setores do PIM. Permite identificar lacunas de maturidade e desenvolver planos de ação personalizados, alinhando-se a critérios técnicos, ambientais e sociais. Além disso, o índice foi complementado com a aplicação do método *Grey DEMATEL*, que auxiliou na definição mais precisa dos pesos e na análise das inter-relações causais entre as dimensões, conferindo ao índice maior validade científica e aplicabilidade prática.

Por fim, o IMAL 5.0 se configurou como uma ferramenta estratégica de suporte à tomada de decisão e à formulação de políticas logísticas mais alinhadas com os desafios da neindustrialização amazônica conforme a figura 12. Sua aplicação prática permitiu acompanhar a evolução da maturidade das organizações ao longo do tempo, promovendo uma logística mais sustentável, digitalizada, resiliente e centrada nas pessoas.

4.9.3.1 Metodologia de análise de dados com *Python* para o cálculo do IMAL 5.0

A análise de dados realizada nesta pesquisa seguiu uma abordagem sistemática utilizando a linguagem de programação *Python*, com o objetivo de calcular o Índice IMAL 5.0 a partir dos dados coletados. (Mckinney, 2022)

O processo envolveu as seguintes etapas:

1. Importação das bibliotecas necessárias: foram importadas bibliotecas essenciais para a análise de dados, como *pandas* para manipulação de dados, *numpy* para operações numéricas e *matplotlib/seaborn* para visualização gráfica.
1. Leitura dos dados: os dados foram carregados em um *DataFrame* do *pandas* a partir de arquivos CSV, permitindo uma estrutura tabular para facilitar a manipulação e análise.
2. Limpeza e pré-processamento dos dados: realizou-se a limpeza dos dados, incluindo a remoção de valores nulos, tratamento de dados inconsistentes e conversão de tipos de dados, assegurando a integridade e a qualidade dos dados para análise.
3. Cálculo das porcentagens: utilizando as funcionalidades do *pandas*, foram calculadas as porcentagens de respostas para cada item do questionário, permitindo a quantificação das variáveis de interesse.
4. Cálculo do Índice IMAL 5.0: com base nas porcentagens obtidas, aplicou-se a fórmula específica do Índice IMAL 5.0, conforme definido na metodologia da pesquisa, para cada dimensão analisada.
5. Visualização dos resultados: foram gerados gráficos e tabelas utilizando *matplotlib* e *seaborn* para representar visualmente os resultados obtidos, facilitando a interpretação e a comunicação dos achados.
6. Interpretação dos resultados: os resultados foram interpretados à luz dos objetivos da pesquisa, permitindo insights sobre as dimensões analisadas e contribuindo para as conclusões do estudo. Esse processo metodológico assegurou uma análise rigorosa e sistemática dos dados, proporcionando resultados confiáveis e relevantes para o entendimento das variáveis estudadas.

4.9.3.2 Cálculo do IMAL 5.0 com Python

Diante da sistematização analítica realizada com Python, tornou-se necessário detalhar o processo de cálculo do índice IMAL 5.0, evidenciando as etapas estatísticas, os critérios de ponderação e a validação metodológica das variáveis envolvidas na mensuração. Desta feita, para a análise quantitativa dos dados e a construção do Índice IMAL 5.0, foi empregada a linguagem de programação *Python*, devido à sua robustez e ampla utilização em ciência de dados (McKinney, 2022). A utilização de bibliotecas como *Pandas* e *NumPy* permitiu o tratamento eficiente dos dados coletados.

O cálculo do Índice IMAL 5.0 foi realizado por meio de uma abordagem quantitativa, utilizando a linguagem de programação Python, reconhecida por sua robustez e ampla gama de bibliotecas voltadas para análise de dados (McKinney, 2022). Além disso, foi incorporado o método *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL) para validar e assegurar a veracidade das variáveis extraídas dos questionários aplicados aos gestores.

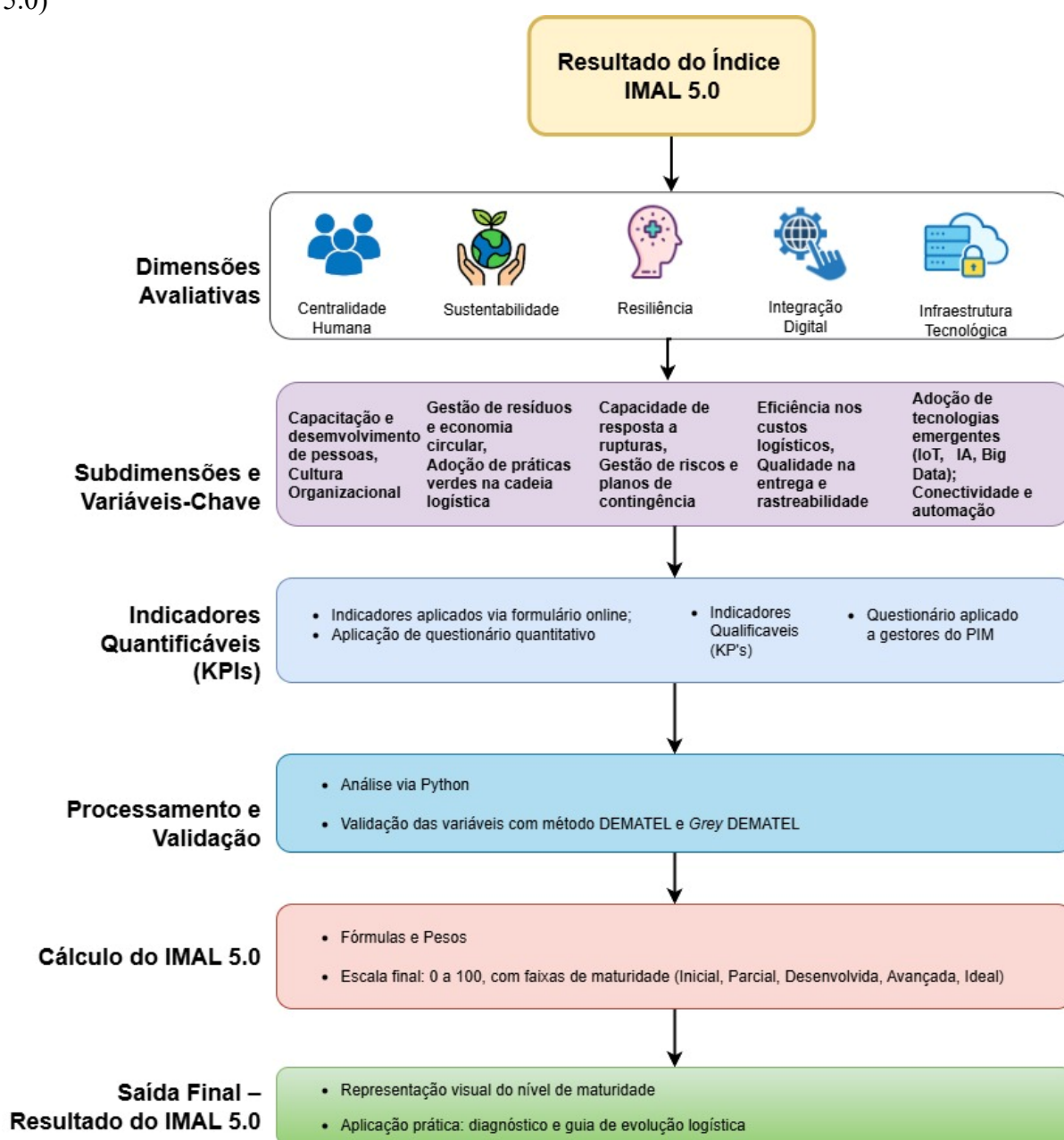
Inicialmente, os dados coletados foram organizados em estruturas tabulares utilizando a biblioteca *Pandas*, permitindo uma manipulação eficiente das informações. Em seguida, foram aplicadas técnicas estatísticas para calcular as frequências relativas e absolutas das respostas, bem como medidas de tendência central e dispersão. Essas análises forneceram *insights* preliminares sobre o nível de maturidade logística das organizações avaliadas.

Para validar as variáveis utilizadas no cálculo do Índice IMAL 5.0, foi empregado o método DEMATEL, que permite identificar e analisar as relações de causa e efeito entre os fatores avaliados, classificando-os em grupos influentes e influenciados. A aplicação do DEMATEL envolveu a construção de uma matriz de relações diretas, normalização dos dados, cálculo da matriz de relações totais e determinação dos graus de influência e dependência de cada fator. Essa análise foi fundamental para validar as variáveis utilizadas no cálculo do Índice IMAL 5.0, garantindo que refletissem de forma precisa a realidade das organizações estudadas (Chekry *et al.*, 2024).

A implementação do método DEMATEL foi realizada utilizando a biblioteca *PyDEMATEL*, desenvolvida em Python, que oferece uma interface amigável e recursos avançados para a aplicação do método, incluindo a geração de mapas de influência e diagramas de causalidade. Essa ferramenta facilitou a análise das interdependências entre os fatores e a

identificação dos elementos mais críticos no contexto da maturidade logística (Chekry *et al.*, 2024). A figura 18 sintetiza, de forma sistêmica, as etapas metodológicas da construção do IMAL 5.0, desde a definição das dimensões até o cálculo do índice. O modelo integra variáveis técnicas e sociotécnicas, validadas por especialistas via DEMATEL e *Grey* DEMATEL, e operacionalizadas por meio de indicadores quantificáveis. O processamento em Python assegura precisão analítica. O resultado permite diagnosticar a maturidade logística e propor estratégias evolutivas, conforme defendido por Ensslin *et al.*, (2010) e Rashed *et al.*, (2024).

Figura 18 - Estrutura e operacionalização do Índice de Maturidade da Logística 5.0 (IMAL 5.0)



Fonte: Autoria Própria (2025)

4.9.4 Validação do IMAL 5.0 com o *Grey DEMATEL*

Para aumentar a robustez metodológica do modelo proposto nesta pesquisa, foi aplicada, de forma complementar à análise DEMATEL tradicional, a metodologia *Grey DEMATEL*, permitindo a validação quantitativa e qualitativa do Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0). Essa técnica é uma extensão do método DEMATEL que incorpora a Teoria dos Sistemas Cinzentos (*Grey Systems Theory*), proposta originalmente por Deng (1989), sendo amplamente utilizada para tratar problemas de decisão com informações incorretas, incompletas ou ambíguas.

A escolha por essa metodologia justificou-se pela natureza subjetiva da avaliação dos critérios de maturidade logística, que depende da experiência, interpretação e contexto organizacional dos especialistas participantes da pesquisa. Conforme apontam Niemsakul *et al.*, (2025), o *Grey DEMATEL* permitiu converter avaliações qualitativas expressas em linguagem natural (como "muito alto", "baixo", "moderado") em números cinzentos, que são intervalos representando a incerteza da informação. Esse recurso é particularmente útil em ambientes como o Polo Industrial de Manaus, onde a heterogeneidade tecnológica e os níveis de maturidade variam significativamente entre as empresas.

O procedimento de aplicação do *Grey DEMATEL* iniciou-se com a definição da matriz de influência direta, obtida por meio dos julgamentos de 28 especialistas, os quais atribuíram valores linguísticos às inter-relações entre os critérios do modelo IMAL 5.0. Esses valores foram posteriormente convertidos em números cinzentos, utilizando uma escala pré-definida com base em estudos anteriores (Niemsakul *et al.*, 2025). Após esse processo, foi gerada a matriz de relação direta cinzenta, que passou pelas etapas de normalização e cálculo da matriz de relação total cinzenta, permitindo a visualização das interdependências causais em um ambiente de incerteza.

Com base nos resultados obtidos, foi possível calcular o grau de importância (D) e de efeito (R) de cada critério, bem como as medidas (D+R) e (D-R), essenciais para identificar os fatores causadores e fatores resultantes dentro do sistema de maturidade logística. Comparando-se os resultados do DEMATEL tradicional e do *Grey DEMATEL*, observou-se uma convergência nas dimensões mais influentes, como infraestrutura tecnológica e integração digital, mas também diferenças sutis, especialmente nas dimensões mais subjetivas como empatia organizacional e centralidade humana, cujo peso relativo foi maior na análise cinzenta. Essa diferenciação revelou que a utilização do *Grey DEMATEL* permitiu capturar com maior

fidelidade as nuances cognitivas dos especialistas, especialmente em critérios que envolveram componentes humanos, sociais e culturais, conforme destacado por Niemsakul et al., (2025). Dessa forma, o IMAL 5.0 se mostrou não apenas como um modelo analítico, mas como um instrumento adaptável à realidade de empresas com diferentes perfis, permitindo diagnósticos mais personalizados e confiáveis.

A validação do IMAL 5.0 por meio do *Grey DEMATEL* representou um avanço metodológico relevante, ao incorporar o tratamento estruturado de incertezas e subjetividades. Essa abordagem conferiu maior robustez ao modelo, tornando-o adaptável à complexidade amazônica e eficaz para orientar decisões estratégicas na transição para a Logística 5.0.

Concluída a etapa de validação do IMAL 5.0 com o uso do método *Grey DEMATEL* — que permitiu tratar incertezas subjetivas e fortalecer a robustez analítica do modelo —, este capítulo marcou a transição da abordagem conceitual para a experimentação empírica. O Capítulo V foi dedicado à ensaio prático do índice em empresas do PIM, com foco na construção e interpretação da matriz de influência gerada a partir da percepção de especialistas do setor eletroeletrônico. Essa etapa buscou verificar a aderência do modelo à realidade operacional da região e explorar seu potencial enquanto ferramenta de apoio à decisão logística.

A análise empírica foi conduzida por meio do método multicritério DEMATEL reconhecido por sua capacidade de revelar estruturas causais em sistemas interdependentes. Sua aplicação teve como objetivo identificar os fatores mais influentes e mais impactados dentro da lógica da Logística 5.0, contribuindo para a validação prática do IMAL 5.0. O DEMATEL mostrou-se particularmente eficaz diante da complexidade sociotécnica envolvida, ao captar relações entre variáveis como sustentabilidade, integração digital e centralidade humana. A representação gráfica das inter-relações entre os critérios — por meio de diagramas de influência — proporcionou mais entendimento na priorização de dimensões críticas à maturidade logística. A seguir, são apresentados os resultados dessa aplicação, organizados em etapas metodológicas, construção da matriz, análise dos dados e interpretação visual, assegurando a coerência entre o modelo proposto e sua efetiva aplicabilidade prática.

CAPÍTULO V. ENSAIO APLICADO DO MODELO IMAL 5.0 NO SETOR ELETROELETRÔNICO DO PIM

Dado o caráter emergente da Logística 5.0 e a ausência de instrumentos consolidados para sua mensuração em ambientes produtivos periféricos, optou-se por estruturar esta fase da pesquisa como um ensaio aplicado. Essa abordagem foi metodologicamente pertinente quando o objetivo é testar, em campo, a coerência e a utilidade de um modelo recém-proposto, com base em evidências empíricas qualitativas e quantitativas obtidas em um contexto real (Dahl, Vasset e Frilund, 2023). No presente estudo, o ensaio aplicado do IMAL 5.0 buscou validar, junto a especialistas do setor eletroeletrônico do Polo Industrial de Manaus, a lógica estrutural e diagnóstica do índice desenvolvido. A estratégia permitiu observar a aderência do modelo às práticas logísticas da região, evidenciar a relevância de suas dimensões constitutivas e, sobretudo, reforçar sua capacidade de apoiar decisões operacionais e estratégicas alinhadas aos princípios da Indústria 5.0.

5.1. Desenvolvimento da análise: a construção da matriz de influência

Com base na relevância estratégica do DEMATEL para a Logística 5.0, inicia-se a etapa prática de sua aplicação com a construção da matriz de influência. Essa fase envolveu a coleta de dados junto a especialistas do PIM, permitindo mensurar relações causais entre critérios logísticos, estabelecendo as bases para análises estruturadas e intervenções mais precisas.

A primeira etapa da aplicação do DEMATEL para esta tese foi a construção da matriz de influência, baseada em dados coletados por meio de questionários aplicados a especialistas da área de logística de empresas selecionadas no PIM. Cada especialista avaliou a intensidade da influência de um estrategista sobre os demais, utilizando uma escala linguística padronizada de 0 a 4, onde 0 representa "nenhuma influência" e 4 representa "influência muito forte". Esses dados foram organizados em uma matriz quadrada, onde cada elemento representa a influência do sorteio sob o critério.

Para garantir a consistência das respostas e minimizar a subjetividade, os dados foram agregados utilizando a média aritmética de todas as avaliações individuais. Essa etapa foi determinante para eliminar visões individuais e refletir uma perspectiva coletiva de especialistas. Além disso, foi realizada uma análise preliminar para identificar respostas discrepantes (*outliers*), que poderiam comprometer a integridade da matriz. Essas respostas foram revisadas ou ajustadas com base em critérios estatísticos.

Após a agregação dos dados, uma matriz foi normalizada para que a soma máxima de qualquer linha fosse igual a 1. Essa normalização garantiu que os pesos atribuídos às influências fossem comparáveis entre os critérios, evitando que critérios com altos valores absolutos dominassem a análise. Segundo *Li et al. (2020)*, a normalização é uma prática recomendada para lidar com variáveis de escalas diferentes em sistemas complexos.

Subsidiariamente, a matriz de influência direta foi complementada com a matriz de influências indiretas, obtida por meio de cálculos iterativos. A matriz total, que é a soma das matrizes direta e indireta, foi então construída para refletir o impacto total de cada classificação no sistema. Essa matriz fornece uma visão abrangente das interdependências e permite identificar relações que não seriam evidentes apenas na análise de influências diretas. A matriz total de influência, construída com base em dados de especialistas e validada qualitativamente, permitiu identificar fatores causais e resultantes no sistema logístico do PIM. A aplicação estruturada do DEMATEL revelou interações sistêmicas críticas, fundamentando decisões estratégicas e planos de evolução da maturidade logística 5.0.

5.1.1. Identificação de fatores causais e resultantes

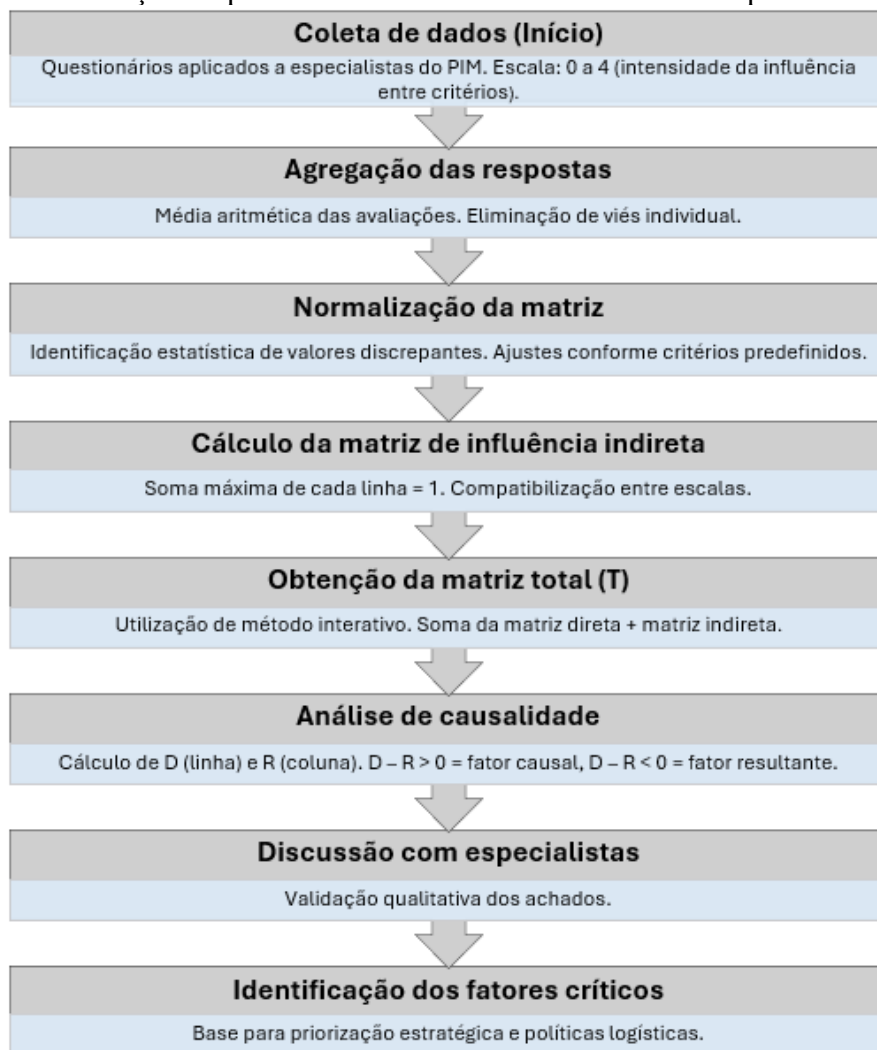
A identificação dos fatores causais e resultantes é uma das etapas mais importantes do DEMATEL, pois ela direciona a priorização de ações estratégicas. (*Abbate et al. 2023*) explicam que fatores causais são aqueles que exercem mais influência no sistema ($D - R > 0$), enquanto os fatores resultantes são aqueles que são mais influenciados ($D - R < 0$). Essa distinção é fundamental para compreender a dinâmica do sistema logístico e orientar as disciplinas.

Os resultados da análise deste estudo identificaram critérios como tecnologia e capacitação de recursos humanos como os principais fatores causais. Esses critérios tiveram valores superiores ($D - R > 0$), no qual exercem uma influência significativa sobre os demais fatores. A integração tecnológica, por exemplo, foi identificada como um motor de melhorias sistêmicas, impulsionando a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental.

Por outro lado, fatores como sustentabilidade ambiental e satisfação do cliente foram considerados como resultantes, obtendo valores elevados de ($D - R < 0$). Esses critérios foram altamente influenciados pelas decisões estratégicas relacionadas aos fatores causais. Por exemplo, a sustentabilidade ambiental depende diretamente da adoção de práticas verdes e da implementação de tecnologias avançadas nos processos logísticos (*Araújo et al., 2021*). A análise identificou fatores intermediários com influência equilibrada, como a resiliência climática, que atuam como elos no sistema. Segundo *Han e Trimi (2022)* e *Kırmızı e Kocaoglu*

(2022), esses fatores revelam interdependências e possibilitam melhorar a coesão entre os critérios. Deste modo, a figura 19 ilustra, de forma sequencial, as etapas adotadas para identificar fatores causais e resultantes, apoiando visualmente a construção da matriz total e a análise de influência sistêmica.

Figura 19 - Construção do processo de desenvolvimento da análise para a matriz de influência



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.2 Visualização e interpretação da análise dos resultados

A visualização dos resultados foi realizada por meio de gráficos de relacionamento de impacto, que são representações bidimensionais dos valores $D + R$ e $D - R$. Sem eixo horizontal ($D+R$), estão representando os critérios com maior interação total no sistema, enquanto no eixo vertical ($D-R$) estão indicados os critérios mais causais (positivos) ou mais resultantes (negativos). A análise via gráficos permitiu uma interpretação clara dos fatores mais relevantes para o sistema logístico. Critérios posicionados no quadrante superior direito foram identificados como centrais, combinando alta interação total com um papel causal dominante.

Esses critérios, como tecnologia tecnológica, são considerados prioritários para estratégias estratégicas. Para os fatores localizados no quadrante inferior direito foram classificados como secundários, apresentando alta interação total, mas com um papel resultante. Esses fatores, como a sustentabilidade ambiental, refletem o impacto de melhorias nos critérios causais, mas também oferecem oportunidades para refinar estratégias de longo prazo (Mamoghli, Cassiv e Trudel, S., 2018).

Já os fatores posicionados nos quadrantes esquerdo superior e inferior foram considerados menos influentes no sistema. Esses critérios, como capacitação limitada de recursos humanos, podem indicar áreas de menor prioridade imediata, mas que ainda requerem atenção para evitar gargalos futuros no avanço da atualização logística (Schumacher, Erol e Sihn, 2016).

Os gráficos também destacaram a importância dos fatores intermediários, que desempenham um papel preponderante na interconexão do sistema logístico. Por exemplo, a resiliência climática, posicionada próxima ao eixo central, foi identificada como um elemento de equilíbrio entre os fatores causais e resultantes, demonstrando sua relevância para a coesão e estabilidade do sistema de acordo com (Shifrin e Michel, 2022).

Essa visualização, além de facilitar a interpretação dos resultados, ofereceu uma base sólida para comunicar os achados obtidos aos gestores logísticos. Com base nesses resultados, poderão ser propostas estratégias para fortalecer os fatores causais, minimizar os gargalos nos fatores resultantes e operar a interação entre os critérios intermediários. Com uma compreensão aprofundada das dinâmicas do sistema, este estudo reforçou que o DEMATEL declarou sua capacidade de traduzir dados complexos em resultados práticos e acionáveis, contribuindo diretamente para o avanço da atualização da logística de 4.0 para 5.0 (Simetinger e Basl, 2022).

A interpretação dos vetores $D+R$ e $D-R$ reforçou o papel central de determinadas variáveis no processo de maturação logística 5.0. Os fatores com altos valores de $D+R$ foram aqueles com maior influência e interatividade sistêmica, enquanto o valor de $D-R$ permitiu distinguir os elementos mais causais dos mais impactados. Essa distinção foi essencial para compreender quais fatores devem ser priorizados pelas empresas em seus esforços estratégicos.

Essa abordagem é alinhada aos achados de Bouzon et al. (2021), que demonstraram como o método DEMATEL pode ser utilizado para identificar barreiras e alavancas dentro de cadeias logísticas complexas. Em seus estudos, a autora aplicou o método em contextos farmacêuticos e sustentáveis, revelando que os fatores mais causais, quando bem endereçados,

têm maior capacidade de gerar transformações sistêmicas. Tal perspectiva também se confirmou neste estudo, em que variáveis como “estratégia digital”, “integração tecnológica” e “gestão de competências” emergem como pontos críticos de alavancagem.

A análise com base nos conceitos trazidos por Bouzon reforçou a validade do DEMATEL como instrumento de apoio à decisão em sistemas industriais com múltiplos agentes e alta incerteza. A identificação das variáveis causais a partir do mapa de influência ofereceu subsídios práticos para as lideranças industriais implementarem ações direcionadas e eficazes para o avanço do nível de maturidade logística no Polo Industrial de Manaus.

A primeira etapa do método DEMATEL consistiu na elaboração da matriz de influência direta (ou matriz *INPUT*), que registrou os julgamentos dos especialistas quanto ao grau de influência de um fator sobre os demais. Cada especialista avaliou a influência de um elemento *i* sobre outro *j*, utilizando uma escala linguística padronizada, geralmente de 0 a 4, conforme recomendações de autores como Bouzon et al. (2021), onde: 0 = sem influência; 1 = baixa influência; 2 = influência moderada; 3 = alta influência; e 4 = influência muito alta. Essa escala visou facilitar a compreensão e padronização dos julgamentos, reduzindo a subjetividade e promovendo maior consistência nos dados.

Conforme destacado por Bouzon (2023), a matriz *INPUT* representou a base empírica do DEMATEL, devendo ser preenchida com atenção à coerência lógica e à simetria de percepções entre os especialistas. Após a coleta dos julgamentos individuais, procedeu-se ao cálculo da média dos valores atribuídos a cada par ordenado de fatores (*i,j*), resultando em uma matriz de consenso. Essa matriz inicial de médias ponderadas foi então normalizada para garantir que os valores fiquem dentro de uma escala adequada para o processamento do modelo.

5.3. Relevância da análise Dematel para o modelo de maturidade

Com base nas visualizações e interpretações realizadas, tornou-se evidente que o DEMATEL não apenas permitiu compreender as relações de influência entre os critérios analisados, mas também ofereceu uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas. A identificação de fatores centrais, intermediários e periféricos pode viabilizar o desenvolvimento de planos de ação mais assertivos e orientados por evidências. Diante disso, esta subseção abordou como essa análise impacta diretamente a formulação de estratégias e a alocação de recursos dentro do modelo de maturidade proposto, destacando os critérios prioritários que devem nortear a evolução da Logística 5.0 no contexto industrial estudado.

Uma análise realizada por meio do DEMATEL ofereceu uma contribuição essencial para a priorização de recursos no contexto da maturidade logística, especialmente na transição da Logística 4.0 para 5.0. A capacidade de identificar fatores causais de maior impacto sistêmico permite que os gestores direcionem investimentos para áreas estratégicas, maximizando o retorno e minimizando esforços dispersos. Por exemplo, a tecnologia tecnológica emergiu como um dos fatores mais causais, sendo diretamente responsável por promover melhorias em eficiência operacional, conectividade e sustentabilidade (Ghobakhloo, 2020).

A priorização de recursos baseada nos resultados do DEMATEL não se limitou apenas à identificação de fatores críticos, mas também envolveu a criação de um plano estruturado de disciplinas. Um exemplo prático foi a alocação de recursos para tecnologias de IoT e automação inteligente, que se destacaram como motores de transformação sistêmica. Esses investimentos, quando alinhados a um plano estratégico, podem ter o potencial de desencadear avanços em múltiplos critérios, como a redução de custos operacionais e a melhoria na rastreabilidade da cadeia de suprimentos.

Outro ponto relevante foi a identificação de fatores intermediários, que, embora não sejam os principais motores do sistema, atuam como elementos de conexão e integração. Esses fatores, como resiliência climática, devem ser incluídos no planejamento estratégico para garantir que os avanços em fatores causais sejam divulgados por todo o sistema logístico. Para Opetuk (2016), uma abordagem integrada permite que os recursos sejam aplicados de forma a melhorar a coesão e o desempenho sistêmico.

Além disso, a análise destacou ainda a necessidade de desenvolver competências em áreas estratégicas, como a capacitação de recursos humanos. Essa dimensão, evolução como causal, requer investimentos em treinamento e desenvolvimento para que os profissionais estejam aptos a lidar com tecnologias e práticas inovadoras (Frederico, 2021). A priorização desse fator não apenas impulsionou a maturidade do sistema, mas também fortalece a resiliência organizacional frente aos desafios futuros.

Outro aspecto da priorização foi a atenção aos fatores de sustentabilidade ambiental, que, embora sejam mais resultantes, desempenham um papel na construção de cadeias de suprimentos alinhadas às demandas contemporâneas (Bhargava *et al.*, 2022). O investimento em práticas verdes, como a adoção de tecnologias de energia renovável e a implementação de políticas de logística reversa, é uma resposta direta às pressões regulatórias e às expectativas

dos consumidores. Ao priorizar a sustentabilidade, já que as organizações não apenas cumprem suas obrigações, mas também criam vantagens competitivas no mercado (Figueiras *et al.*, 2021).

Para Demir *et al.*, (2019), a priorização de recursos também deve considerar o equilíbrio entre eficiência de curto prazo e sustentabilidade de longo prazo. Enquanto a eficiência operacional é uma meta imediata, a sustentabilidade ambiental e a resiliência climática garantem a longevidade das operações. Essa visão estratégica, fundamentada nos resultados do DEMATEL, garante que os recursos sejam alocados de maneira equilibrada, atendendo tanto às necessidades atuais quanto às futuras (Choi, 2022).

Por fim, a priorização de fatores com base na análise DEMATEL pode fortalecer a capacidade organizacional de gerenciamento de mudanças. Estudos de Bhat *et al.*, (2022) afirmam que à medida que os avanços tecnológicos e as demandas do mercado evoluem, as organizações precisam ser ágeis na reavaliação de prioridades e na realocação de recursos. A metodologia fornece uma base sólida para essa adaptação contínua, garantindo que os esforços estejam sempre alinhados às metas estratégicas.

5.3.1. Suporte à tomada de decisão

Dessa forma, a priorização estratégica baseada nos achados do DEMATEL não apenas orientou alocação eficiente de recursos, mas também cria as condições necessárias para um ambiente logístico mais integrado, resiliente e alinhado às demandas contemporâneas da Indústria 5.0. No entanto, para além da priorização, destacou-se ainda a relevância da metodologia como instrumento robusto de apoio à gestão. A seguir, explorou-se como o DEMATEL pode ser amplamente utilizado como ferramenta de suporte à tomada de decisão, especialmente em contextos de elevada complexidade sistêmica e interdependência entre critérios logísticos.

Yavas e Ozkan-Ozen (2020) apontaram que a análise do DEMATEL também se destaca como uma ferramenta de suporte à tomada de decisão, fornecendo contribuições que ajudam os gestores a compreenderem as interações complexas entre os critérios logísticos. Ao mapear as relações de causa e efeito, o DEMATEL traduz dados abstratos em informações acionáveis, permitindo que as decisões sejam fundamentadas em evidências. Uma das contribuições mais importantes do DEMATEL foi a identificação de prioridades claras para ação. Facchini *et al.*, (2020) destacaram que para os fatores causais mais influentes, a metodologia orienta os gestores na escolha de iniciativas que gerem o maior impacto sistêmico. Por exemplo, se a

integração digital for identificada como o principal motor do sistema, os gestores podem priorizar a implementação de plataformas de monitoramento em tempo real e sistemas preditivos.

Além disso, a metodologia ajudou a mitigar riscos, ao destacar os fatores que puderam causar gargalos ou vulnerabilidades no sistema logístico. Por exemplo, fatores com altos valores de influência recebidos (RRR) podem sinalizar áreas de fragilidade que necessitam de atenção especial. Essa perspectiva permite que os gestores tomem decisões proativas, evitando problemas antes que eles se tornem críticos.

Outro benefício do DEMATEL é sua capacidade de promover uma comunicação eficaz entre diferentes partes interessadas. Ao apresentar os resultados de forma visual e objetiva, como nos gráficos de impacto-relacionamento, uma metodologia facilita a compreensão e o alinhamento entre os membros da equipe. Isso é particularmente importante em organizações que operam em ambientes colaborativos e multiníveis, onde a clareza das prioridades estratégicas é fundamental. Destaca-se também o suporte à tomada de decisão também se estende à formulação de políticas organizacionais. Gökalp, e Martinez, (2021) destacam os resultados do DEMATEL que podem ser utilizados como base para o desenvolvimento de políticas que incentivem práticas sustentáveis, que promovam a inovação tecnológica e que melhorem a eficiência operacional. Essas políticas, por sua vez, são apresentadas para a construção de um sistema logístico mais resiliente e competitivo.

E por fim, o DEMATEL promove uma abordagem de aprendizado contínuo na gestão logística. Trstenjak (2021) aponta que à medida que os sistemas evoluem e novos desafios emergem, uma metodologia pode ser reaplicada para reavaliar as interações entre os critérios e ajustar as estratégias. Essa adaptabilidade torna o DEMATEL uma ferramenta indispensável para gestores que buscam não apenas resolver problemas imediatamente, mas também preparar suas organizações para o futuro. Com base nos resultados do DEMATEL, a relevância da metodologia no modelo de maturidade logística é evidente, pois, não apenas orientou a alocação estratégica de recursos, mas também forneceu suporte robusto à tomada de decisão, garantindo que as organizações estejam bem-posicionadas para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades da Logística 5.0.

Neste contexto, evidenciou-se que o DEMATEL transcende o papel de instrumento analítico ao consolidar-se como um verdadeiro suporte para o gerenciamento adaptativo e proativo dos sistemas logísticos. Huang, Sun e Zhang (2018) relatam que a capacidade de

retroalimentação da ferramenta, aliada à sua natureza sistêmica, proporciona uma base dinâmica para a revisão contínua de prioridades e estratégias organizacionais. Essa propriedade torna-se ainda mais relevante diante dos múltiplos vetores de transformação que caracterizam a Logística 5.0, exigindo uma abordagem integrada e responsiva à complexidade dos ambientes industriais contemporâneos. Diante disso, tornou-se imperativo discutir como o DEMATEL contribui diretamente para facilitar a alocação estratégica de recursos, possibilitando que organizações equilibrem de forma eficiente seus investimentos em inovação tecnológica, sustentabilidade e centralidade humana.

Assim, um dos principais desafios da Logística 5.0 foi equilibrar investimentos entre diversas prioridades, como adotar tecnologias verdes, aprimorar a interação humano-tecnologia e manter a eficiência operacional. Para Basl e Doucek (2019), o DEMATEL ajudou a priorizar esses investimentos identificando fatores causais que servem como pontos de alavancagem para melhorias sistêmicas. Por exemplo, se a integração tecnológica for identificada como um fator causal primário por meio do DEMATEL, os recursos podem ser direcionados para a implementação de sistemas habilitados para IoT e para a automação de processos. Essa alocação direcionada garante que os investimentos produzam retornos máximos ao mesmo tempo em que avançam múltiplos fatores dependentes, como monitoramento em tempo real e redução de emissões de carbono.

Outro destaque, refere-se à melhoria da agilidade na tomada de decisões, pois, a natureza da dinâmica da Logística 5.0 requer tomada de decisão ágil para se adaptar aos avanços tecnológicos e às mudanças nas demandas do mercado (Gupta, Singh e Gupta 2021). O DEMATEL equipa as organizações com uma estrutura para avaliar continuamente seu ecossistema de logística. Ao recalibrar matrizes de influência ao longo do tempo, os tomadores de decisão podem responder proativamente a desafios emergentes, como interrupções na cadeia de suprimentos ou mudanças regulatórias. Por exemplo, se fatores externos como políticas climáticas influenciam cada vez mais os esforços de sustentabilidade, o DEMATEL pode ajudar a ajustar as prioridades estratégicas, garantindo o alinhamento com novos requisitos e mantendo as metas operacionais.

5.3.2. DEMATEL e a sustentabilidade

Com base nessa perspectiva dinâmica e adaptativa, o DEMATEL não apenas fortaleceu a capacidade decisória em contextos incertos, mas também apoia uma gestão logística mais resiliente e preparada para o futuro. Ao fornecer uma visão clara das interdependências

sistêmicas, Burroughs e Burroughs, (2020) afirmaram que facilita a antecipação de impactos e a reorientação de ações estratégicas em tempo hábil. Essa agilidade tornou-se ainda mais essencial quando se considera o desafio constante de balancear múltiplas frentes de investimento no ambiente da Logística 5.0. A seguir, explora-se como essa metodologia pode ser aplicada para facilitar a alocação estratégica de recursos, assegurando maior eficiência e sustentabilidade nas decisões organizacionais.

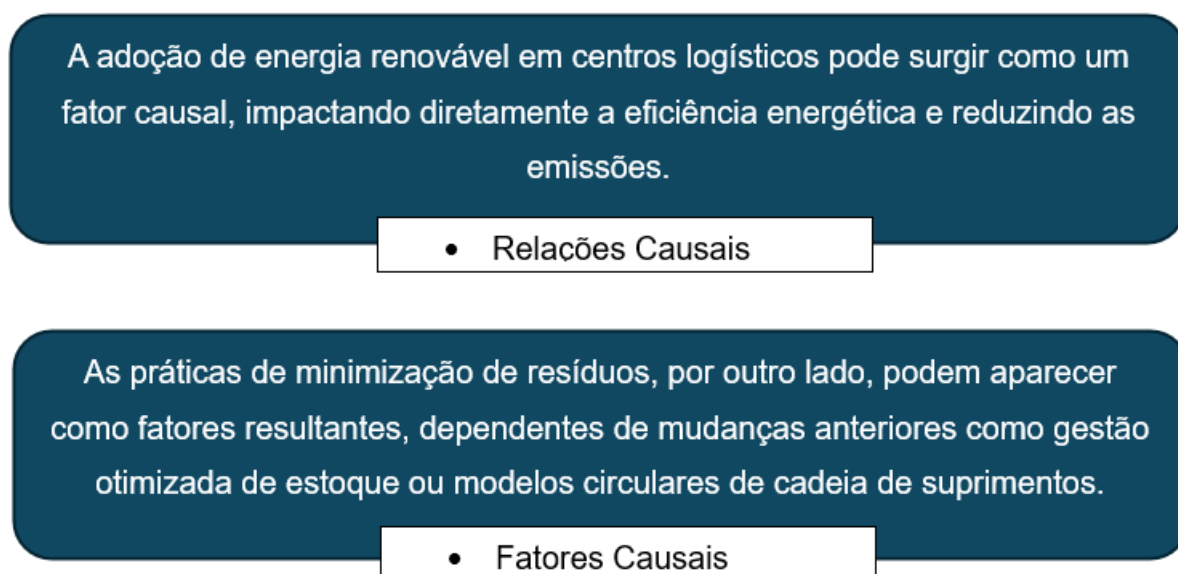
Em relação à sustentabilidade, Sgarbossa *et al*, (2020) relataram que é uma pedra angular da Logística 5.0, refletindo o imperativo global para operações ambientalmente responsáveis. O DEMATEL apoiou esse objetivo identificando e priorizando fatores que impactam diretamente as práticas sustentáveis. Como por exemplo, a metodologia pode revelar que a adoção de fontes de energia renováveis em armazenagem tem um efeito *downstream* significativo na redução de emissões e na melhoria da conformidade com os padrões verdes. Ao isolar esses fatores críticos, as organizações podem desenvolver iniciativas de sustentabilidade direcionadas que se alinhem aos objetivos logísticos mais amplos e às expectativas da sociedade.

Por isto, o DEMATEL prioriza a sustentabilidade em sistemas complexos, como logística moderna e cadeias de suprimentos. A sustentabilidade abrange dimensões ambientais, econômicas e sociais, cada uma interdependente de outros fatores operacionais. A capacidade única do DEMATEL de mapear e quantificar essas interdependências o torna uma ferramenta inestimável para priorizar iniciativas relacionadas à sustentabilidade. Winkelhaus e Grosse (2019) destacam ainda que a sustentabilidade pode ser dissecada em componentes mensuráveis, como redução da pegada de carbono, minimização de resíduos, eficiência energética e conformidade com regulamentações ambientais. A metodologia identifica quais fatores servem como elementos causais — aqueles que impulsionam melhorias sistêmicas — e quais são elementos resultantes, influenciados por mudanças em outras partes do sistema. A figura 20 exemplifica duas possibilidades para este cenário.

Essa ilustração oferece uma representação visual das cadeias de influência entre fatores sustentáveis e suas repercussões sistêmicas, destacando como decisões logísticas podem desencadear efeitos encadeados em múltiplas dimensões. O diagrama permite visualizar não apenas os fatores prioritários, mas também as rotas críticas pelas quais as transformações sustentáveis se propagam. Essa visualização favorece a tomada de decisão baseada em evidências, auxiliando gestores a identificar pontos de alavancagem com maior impacto sistêmico e alinhamento às metas estratégicas de sustentabilidade organizacional e territorial.

Para Vijayakumar *et al.*, (2021), a sustentabilidade também perfaz pela dimensão humana quando a Logística 5.0 introduz um forte foco no bem-estar dos funcionários, no desenvolvimento de habilidades e na interação perfeita entre humanos e tecnologia. Nesse sentido, o DEMATEL contribuiu para essa dimensão identificando como os avanços tecnológicos, como automação e IA, e podem influenciar a dinâmica da força de trabalho. Fatores como programas de treinamento e designs ergonômicos podem surgir como elementos causais que impulsionam resultados mais amplos centrados no ser humano. Essa percepção permitiu que as organizações equilibrem a inovação tecnológica com a capacitação dos funcionários, garantindo uma integração harmoniosa de pessoas e máquinas nos processos logísticos.

Figura 20 - Exemplos de relações causais e resultantes na logística 5.0 voltada à sustentabilidade



Fonte: Autoria Própria (2025).

5.3.3 A formulação de políticas e estratégias orientadas pela lógica causal sistêmica

Dessa forma, ao evidenciar a importância da centralidade humana e da integração tecnológica na logística moderna, a aplicação do DEMATEL ultrapassa a mera identificação de relações técnicas. Ela se torna uma ferramenta estratégica ao revelar como esses elementos influenciam estruturalmente o desempenho organizacional. A partir dessas análises, Cai *et al.*, (2022) afirmam que é possível avançar para um patamar mais abrangente, no qual os dados extraídos não apenas orientam decisões operacionais, mas também fornecem subsídios robustos

para a construção de políticas públicas e estratégias empresariais orientadas aos princípios da Logística 5.0.

Maniah (2020) compartilha que as colaborações derivadas das análises do DEMATEL servem como base para a elaboração de políticas e estratégias que se alinham com os princípios da Logística 5.0. Ao estabelecer relações claras de causa e efeito, o DEMATEL permite que as organizações projetem estratégias coerentes que abordem ineficiências sistêmicas, mitiguem riscos e promovam a inovação. Isto é, uma empresa pode usar o DEMATEL para identificar que plataformas colaborativas entre parceiros da cadeia de suprimentos são um fator determinante para melhor responsividade e redução de custos. Neste cenário, pode-se orientar o desenvolvimento de políticas para incentivar e padronizar a colaboração.

A metodologia de aplicação do nesta pesquisa provou-se um recurso metodológico eficaz e indispensável para a análise das dinâmicas complexas presentes no modelo de maturidade logística, especialmente no contexto da transição da Logística 4.0 para 5.0. A capacidade do DEMATEL de mapear interdependências e identificar relações de causa e efeito entre fatores logísticos não apenas enriqueceu a compreensão teórica do sistema analisado, mas também trouxe exemplos práticos e direcionados para uma tomada de decisão estratégica (Lopes de Sousa *et al.*, 2020).

Por meio da construção dos entregáveis dessa pesquisa, como matrizes de influência direta, normalização de dados e análises quantitativas, foi possível destacar também os fatores mais relevantes para o avanço do sistema logístico. Critérios como tecnologia tecnológica, capacitação de recursos humanos e resiliência climática emergiram como elementos causais, demonstrando sua importância como motores de transformação sistêmica. Esses fatores, quando priorizados em estratégias organizacionais, podem desencadear melhorias significativas em outros critérios, como eficiência operacional e sustentabilidade ambiental (Zekhnini *et al.*, 2021).

Para Kim *et al.*, (2021), a distinção entre fatores causais e resultantes revelou-se particularmente útil para a priorização de recursos. Fatores resultantes, como satisfação do cliente e práticas sustentáveis, independentemente diretamente de investimentos direcionados a fatores causais. Essa percepção reforça a importância de alocar recursos de forma estratégica, maximizando o impacto sistêmico e promovendo avanços equilibrados em toda a cadeia logística. Adicionalmente, o uso do DEMATEL ainda contribuiu para a formulação de estratégias alinhadas às demandas contemporâneas da Logística 5.0. A ênfase em tecnologias

emergentes, sustentabilidade e humanização dos processos logísticos foi sustentada por evidências concretas obtidas por meio da análise. A metodologia permitiu identificar gargalos e oportunidades dentro do sistema, possibilitando intervenções mais assertivas e eficazes.

Em relação ao impacto do DEMATEL, pode-se entender que vai além da análise de dados, proporcionando um meio para estruturar processos decisórios em ambientes altamente dinâmicos e incertos. No contexto logístico, onde múltiplos fatores interagem de maneira interdependente, o DEMATEL demonstrou sua utilidade ao oferecer um modelo entendível para compreender e abordar a complexidade. Essa abordagem, para Sternad *et al.*, (2018), é fundamental para organizações que buscam alcançar a maturidade logística e se posicionar competitivamente em mercados globais. A aplicabilidade do DEMATEL também foi evidenciada na sua capacidade de integrar diferentes dimensões do modelo de maturidade logística. A análise revelou como fatores tecnológicos, humanos e ambientais estão intrinsecamente conectados, exigindo abordagens integradas para a formulação de estratégias. Essa visão holística é importante para a implementação de soluções que não apenas otimizem processos, mas também atendam às expectativas de sustentabilidade e inovação implementadas pela sociedade contemporânea (Maisiri e van Dyk, 2019).

Outro aspecto relevante da aplicação do DEMATEL foi sua contribuição para o engajamento de especialistas e partes interessadas. A apresentação visual dos resultados, por meio de gráficos de impacto-relacionamento, facilita a comunicação e o alinhamento estratégico dentro das organizações. Essa característica colaborativa é especialmente importante nas cadeias de suprimentos modernos, onde a cooperação entre diferentes agentes é essencial para o sucesso.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS

Este capítulo aprofundou os resultados discutidos no capítulo 6, ao aplicar o modelo de maturidade logística IMAL 5.0 em empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM). A proposta foi demonstrar como o índice se comporta em um ambiente real de produção industrial, analisando as seis dimensões estruturantes da Logística 5.0 a partir de dados coletados com especialistas do setor eletroeletrônico. Ao invés de repetir definições teóricas já exploradas nos capítulos 4 e 5, este capítulo se concentrou em evidenciar o comportamento das variáveis no contexto empírico, apresentando uma leitura crítica da maturidade logística observada, seus desdobramentos e possíveis implicações para a indústria local.

6.1 Caracterizações do Modelo de Maturidade por dimensão

O Modelo de Maturidade para Logística 5.0 foi composto por sete dimensões principais que, juntas, formam a base para a construção de uma cadeia de suprimentos eficiente, sustentável e centrada no ser humano. Essas dimensões incluem: 1) Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0, 2) Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística, 3) Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0, 4) Resiliência Logística e Mudanças Climáticas, 5) Maturidade e Desempenho da Logística 5.0, 6) Logística 5.0 no Contexto do Polo Industrial de Manaus e 7) Aspecto Humano na Logística 5.0. Cada uma dessas dimensões é essencial para o avanço da modernidade logística e apresenta requisitos e desafios específicos conforme seguem:

1. **Infraestrutura Tecnológica** As empresas com maior maturidade logística apresentaram infraestrutura robusta em conectividade, sensores inteligentes e sistemas de automação. Empresas de menor porte, contudo, ainda demonstram fragilidade em aspectos como cobertura de rede, integração de equipamentos e atualização tecnológica, o que impacta diretamente sua capacidade de resposta operacional.

2. **Integração Digital** Foi identificada uma baixa interoperabilidade entre sistemas internos e externos, além da ausência de governança de dados consolidada. As trocas de informações ainda ocorrem de forma fragmentada, limitando a visibilidade e a tomada de decisão em tempo real. Essa dimensão apresentou pontuação abaixo da média geral.

3. **Sustentabilidade** A análise revelou que, embora existam iniciativas pontuais de logística verde, reciclagem e economia circular, estas não estão sistematizadas nas rotinas

operacionais. A sustentabilidade permanece como uma diretriz estratégica pouco incorporada às práticas logísticas.

4. **Centralidade Humana** A centralidade humana demonstrou-se como uma das dimensões com maior variação entre as empresas. Algumas organizações possuem programas estruturados de capacitação e ergonomia; outras, no entanto, não apresentam métricas formais de bem-estar ou engajamento. A ausência de indicadores dificulta a gestão ativa dessa dimensão.

5. **Resiliência** A resiliência logística, associada à capacidade de reação frente a eventos disruptivos, como pandemias e crises de abastecimento, foi avaliada de forma positiva por empresas com processos formalizados e práticas de contingência. Aquelas sem planejamento logístico estruturado tiveram baixa pontuação.

6. **Desempenho Operacional** Essa dimensão apresentou os maiores índices médios entre as empresas avaliadas, especialmente em indicadores como lead time, acuracidade de inventário e nível de serviço. Isso indica que, apesar das fragilidades em outras dimensões, o desempenho operacional ainda é priorizado no contexto do PIM.

6.2. Indicadores-chave de desempenho do IMAL 5.0

Os Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) representam um dos principais elementos operacionais utilizados na construção e validação do modelo IMAL 5.0, conferindo ao índice uma base empírica robusta e direcionada à realidade das empresas do Polo Industrial de Manaus. Esses indicadores foram selecionados com base na literatura especializada em modelos de maturidade logística e adaptados à lógica da Logística 5.0, de modo a contemplar variáveis tecnológicas, humanas e sustentáveis. A estrutura dos KPIs foi distribuída em torno das seis dimensões centrais do modelo — infraestrutura tecnológica, integração digital, sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e desempenho operacional — de forma a assegurar a representação equilibrada dos fatores críticos para a avaliação da maturidade logística.

No eixo da infraestrutura tecnológica, os KPIs contemplaram aspectos como o grau de automação dos processos logísticos, a presença de sensores e dispositivos conectados (IoT), e a cobertura de rede nos ambientes produtivos. Na dimensão de integração digital, foram avaliados a interoperabilidade entre sistemas de informação, a padronização de protocolos de

dados e a existência de fluxos integrados com fornecedores e clientes. A sustentabilidade foi mensurada a partir de indicadores como práticas de logística reversa, volume de resíduos reciclados, uso de fontes de energia renováveis e presença de metas ambientais corporativas. Já a centralidade humana foi avaliada com base em métricas como número de ações de capacitação por colaborador, índices de saúde ocupacional, ergonomia nos postos de trabalho e políticas de diversidade e inclusão.

No que se refere à resiliência, os principais indicadores incluíram a existência de planos de contingência documentados, a capacidade de retomada operacional após eventos críticos e a diversidade de fornecedores estratégicos. Por fim, na dimensão de desempenho operacional, destacaram-se KPIs amplamente reconhecidos na gestão logística, como acuracidade de inventário, lead time, índice de atendimento ao cliente, tempo de ciclo de pedidos e custo logístico total. Todos esses indicadores foram operacionalizados por meio de escalas objetivas, associadas a pontuações específicas que alimentaram o cálculo das adequações percentuais e, posteriormente, a média ponderada do índice. Assim, os KPIs funcionam não apenas como instrumentos de mensuração, mas como guias estratégicos para a transformação da logística tradicional em um sistema inteligente, sustentável e humanizado, em consonância com os preceitos da Logística 5.0.

6.3. Logística 5.0 no contexto do PIM

O Polo Industrial de Manaus (PIM) é uma zona de desenvolvimento econômico localizada na região amazônica do Brasil, com características únicas que impõem desafios logísticos complexos. Criado para estimular a economia regional e promover o desenvolvimento da Amazônia, o PIM abrigou inúmeros setores variados, incluindo eletrônicos, veículos e produtos de consumo (Suframa, 2025). No entanto, a sua localização geograficamente isolada e as condições ambientais da Amazônia apresentam barreiras significativas para a logística, desde o transporte de mercadorias até o armazenamento e a distribuição. A adoção da Logística 5.0 no PIM pode transformar a cadeia de suprimentos local, promovendo operações mais eficientes, resilientes e sustentáveis

Esta seção, inaugura uma discussão estratégica sobre a aplicação de tecnologias emergentes, sustentabilidade e resiliência operacional em um ambiente geograficamente desafiador e logisticamente sensível. Situado em uma região isolada por vastas extensões de floresta e condicionado por infraestrutura limitada, o PIM demanda soluções logísticas que transcendam modelos tradicionais e incorporem inteligência operacional adaptativa. A Logística 5.0, nesse cenário, não apenas oferece um novo paradigma para lidar com essas limitações, como redefine a própria função da logística industrial — integrando Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), *blockchain* e práticas de logística verde para mitigar riscos, aumentar a eficiência e reforçar o compromisso ambiental.

Com base nesse entendimento, os próximos subitens aprofundam os pilares que estruturam a maturidade logística 5.0 no PIM: os desafios estruturais, o papel das tecnologias, os impactos sobre a força de trabalho, a sustentabilidade como vetor competitivo e, finalmente, a resiliência diante das mudanças climáticas. Esses subitens são fundamentais para contextualizar a maturidade logística 5.0 no PIM, pois abordam limitações estruturais, inovação tecnológica, sustentabilidade, capital humano e adaptação climática de forma integrada e estratégica.

6.3.1 Desafios geográficos e logísticos no PIM

Um dos principais desafios logísticos enfrentados no PIM é a limitação da infraestrutura de transporte. Manaus é isolada das grandes cidades brasileiras por milhares de quilômetros de floresta, e o acesso terrestre é restrito, sendo o transporte fluvial e aéreo as opções mais viáveis para a movimentação de mercadorias. Esse isolamento torna a logística mais complexa e onerosa, dificultando a integração do PIM com outras regiões do país. Além disso, as condições climáticas da Amazônia, caracterizadas por altas temperaturas, umidade elevada e longos períodos de chuvas intensas, impactam o transporte e o armazenamento de mercadorias, exigindo adaptações específicas para proteger os produtos e manter a eficiência das operações logísticas (Santos e Lima, 2021).

Para contornar as limitações de infraestrutura, a Logística 5.0 no PIM se beneficia da adoção de tecnologias que otimizam o uso dos meios de transporte disponíveis e permitem uma gestão mais eficiente dos recursos. A Internet das Coisas (IoT), por exemplo, permite o monitoramento remoto das condições de transporte e armazenamento, garantindo que os produtos sejam mantidos em condições ideais, mesmo durante viagens longas e em ambientes adversos. Sensores IoT instalados em veículos e armazéns fornecem dados em tempo real sobre

temperatura, umidade e localização, permitindo que as empresas ajustem suas operações para preservar a qualidade dos produtos e evitar desperdícios (Nogueira et al., 2022).

A deficiência de mão de obra comprometida é outro obstáculo significativo para a Logística 5.0 no PIM. A implementação de tecnologias avançadas exige profissionais capacitados para operar e gerenciar sistemas de automação, análise de dados e inteligência artificial. No entanto, a disponibilidade de trabalhadores na região é limitada, o que aumenta os custos de recrutamento e formação e torna a adaptação às novas tecnologias mais desafiadoras. As empresas que operam no PIM precisam investir em programas de capacitação e educação para desenvolver as competências permitidas entre seus colaboradores, promovendo uma transição mais suave para a Logística 5.0 e aumentando a competitividade do polo (Oliveira e Souza, 2023).

6.3.2 O Papel da IoT e da Inteligência Artificial no PIM

A Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) são tecnologias essenciais para a transformação da logística no PIM. A IoT permite que as empresas monitorem suas operações em tempo real, mesmo em locais de difícil acesso. Sensores IoT podem ser usados para rastrear a localização e as condições das mercadorias ao longo das rotas fluviais e aéreas, proporcionando maior visibilidade e controle sobre o transporte. Isso é particularmente importante no PIM, onde as condições climáticas podem variar rapidamente, afetando a integridade dos produtos. De acordo com Andrade et al. (2019), o uso de IoT no PIM melhorou a eficiência das operações, permitindo que as empresas respondam rapidamente a eventos imprevistos e mantenham altos padrões de qualidade.

A Inteligência Artificial (IA) complementa o uso da IoT, ao fornecer ferramentas analíticas que processam os dados encontrados e geram insights para otimização logística. A IA permite uma análise preditiva, que ajuda as empresas a anteciparem desafios e ajustar suas operações de maneira proativa. No PIM, o IA pode ser utilizado para prever a demanda de insumos, otimizar o planejamento de rotas e ajustar o estoque de acordo com as condições do mercado. Segundo Bag et al. (2020), a IA também contribui para a manutenção preditiva dos veículos e equipamentos, minimizando falhas operacionais e garantindo a continuidade das operações logísticas, mesmo em um ambiente de infraestrutura limitada.

6.3.3 Blockchain e transparência na cadeia de suprimentos

O blockchain também desempenha um papel importante na Logística 5.0 no PIM, fornecendo rastreabilidade e transparência para a cadeia de suprimentos. O blockchain cria um

registro digital imutável de todas as transações e movimentos de mercadorias, permitindo que todos os elos da cadeia de suprimentos acompanhem a jornada dos produtos em tempo real. Essa transparência é especialmente importante no contexto do PIM, pois fortalece a confiança entre as partes envolvidas e facilita a conformidade com regulamentações ambientais e fiscais. O uso do blockchain no PIM garante que os produtos atendam aos requisitos de qualidade e sustentabilidade, o que é fundamental para operações em uma região de grande importância ambiental, como a Amazônia (Santos e Lima, 2021).

Além disso, o blockchain permite que as empresas demonstrem seu compromisso com práticas sustentáveis, pois a tecnologia registra cada etapa do processo logístico, desde a proteção de matérias-primas até a entrega ao consumidor final. Isso é especialmente relevante no PIM, onde a preservação ambiental é uma prioridade e os consumidores e investidores são cada vez mais exigentes em relação à sustentabilidade. Segundo Catarina et al. (2023), o uso de blockchain no PIM facilita a rastreabilidade dos produtos e a implementação de práticas de logística verde, promovendo uma imagem corporativa responsável e sustentável.

6.3.4 Sustentabilidade e logística verde no PIM

A sustentabilidade é uma prioridade no PIM, uma vez que a operação logística na região amazônica requer uma abordagem cuidadosa para minimizar o impacto ambiental. A logística verde é uma prática essencial para as empresas que operam no PIM, pois contribui para a preservação da biodiversidade e para o desenvolvimento sustentável. No contexto da Logística 5.0, a logística verde envolve o uso de veículos elétricos e híbridos, a redução do consumo de energia, e a implementação de práticas de economia circular, como o reaproveitamento e a reciclagem de materiais (Santos e Lima, 2021).

Uma prática de destaque no PIM é a compensação de carbono, onde as empresas investem em projetos de reflorestamento e preservação ambiental para neutralizar as emissões de carbono geradas pelas operações logísticas. A compensação de carbono é uma forma de mitigar o impacto ambiental e atender às exigências de sustentabilidade, demonstrando um compromisso com a responsabilidade social e ambiental. Andrade *et al.* (2022) destacam que a compensação de carbono é uma prática cada vez mais comum entre as empresas do PIM, pois ajuda a fortalecer a imagem da marca e a conquistar a confiança dos consumidores.

Além disso, a economia circular desempenha um papel importante na sustentabilidade do PIM. A economia circular busca prolongar o ciclo de vida dos produtos, minimizando o desperdício e promovendo o reuso e a reciclagem. No PIM, a economia circular pode ser

aplicada à logística por meio da reutilização de embalagens, do gerenciamento de resíduos e da otimização do consumo de materiais. Essa abordagem contribui para a preservação dos recursos naturais e para a criação de uma cadeia de suprimentos mais sustentável e eficiente (Oliveira e Souza, 2023).

6.3.5 Resiliência logística e adaptação às mudanças climáticas no PIM

A resiliência logística é uma necessidade no PIM, devido à frequência de eventos climáticos extremos e às limitações de infraestrutura na região. As empresas que operam no PIM enfrentam desafios como enchentes e intermediários no transporte, que podem afetar a continuidade das operações logísticas. A Logística 5.0 oferece ferramentas e práticas para aumentar a resiliência da cadeia de suprimentos, como uma análise preditiva, que permite antecipar eventos climáticos adversos e ajustar as operações de forma proativa. Segundo Catarina et al. (2023), o uso de IA para análise preditiva é fundamental para garantir a continuidade das operações logísticas no PIM, pois permite que as empresas adaptem suas operações rapidamente.

A adaptação às mudanças climáticas é uma prioridade no PIM, uma vez que a região amazônica é altamente vulnerável aos efeitos do aquecimento global. As empresas que operam no PIM precisam desenvolver estratégias para lidar com eventos climáticos extremos, como secas e inundações, que podem interromper o transporte e afetar o armazenamento de mercadorias. A diversificação de rotas e fornecedores é uma estratégia importante para aumentar a resiliência, permitindo que as empresas mantenham a continuidade das operações em caso de contratos intermediários (Santos e Lima, 2021).

A dimensão Logística 5.0 no Contexto do Polo Industrial de Manaus reflete os desafios e as oportunidades de implementação de práticas avançadas de logística em uma região geograficamente isolada e ambientalmente sensível. A adoção de tecnologias como IoT, IA e blockchain oferece soluções inovadoras para superar as limitações de infraestrutura e aprimorar a eficiência das operações logísticas no PIM. Além disso, o compromisso com a sustentabilidade e a resiliência é essencial para garantir que as operações logísticas no PIM sejam realizadas de maneira responsável e preparada para os desafios climáticos. A Logística 5.0 no PIM representa um modelo de desenvolvimento sustentável e inovador, que impulsiona o crescimento econômico da região enquanto preserva o meio ambiente e promove a responsabilidade social (Mourão *et al.*, 2022).

6.4. Descrição do contexto empresarial

A aplicação do modelo de atualização da Logística 5.0 no contexto do Polo Industrial de Manaus (PIM) é justificada pela importância estratégica dessa região para o desenvolvimento econômico do Brasil e pelas particularidades logísticas que a região amazônica impõe. Criado para fomentar a economia e promover a integração da Amazônia ao mercado nacional e internacional, o PIM abriga uma vasta diversidade de empresas e indústrias, com destaque para os setores automotivo, bens de consumo, eletrônicos, suprimentos e fabricação. No entanto, o isolamento geográfico, a infraestrutura limitada e as condições climáticas desafiadoras tornam a logística nessa região uma tarefa complexa e cara, exigindo estratégias avançadas para melhorar a cadeia de suprimentos e manter a competitividade (Mourão *et al.*, 2022).

A implementação do modelo de maturidade Logística 5.0 no PIM visa avaliar e fortalecer as práticas logísticas, promovendo uma operação mais eficiente, sustentável e resiliente, adaptada às condições únicas da região. O modelo de modernidade Logística 5.0 aborda cinco dimensões essenciais – infraestrutura e tecnologias, sustentabilidade, integração e colaboração, resiliência às mudanças climáticas e aspecto humano – que, quando avanços de forma integrada, superam para uma logística adaptada às necessidades modernas. Segundo Ghobakhloo (2020), a digitalização e o uso de tecnologias avançadas são fatores críticos para que as empresas mantenham competitividade em um cenário global, especialmente em regiões como a Amazônia, onde os desafios logísticos são amplificados pela geografia e pelo clima.

A coleta de dados para análise da maturidade logística no PIM foi realizada por meio de questionários aplicados a profissionais que ocupam diferentes cargos e atuam em áreas diversas dentro das empresas do PIM. Participaram do estudo gerentes, coordenadores, supervisores, analistas e especialistas, que representam setores estratégicos como logística, suprimentos, compras, planejamento, produção e controle de qualidade. Essa diversidade de cargas e setores oferece uma visão abrangente sobre as práticas logísticas e o nível de adoção tecnológica no PIM, permitindo uma análise detalhada das operações logísticas desde a tomada de decisão até a execução operacional. A escolha de uma amostra diversificada de profissionais e setores também garante que o modelo capture as particularidades de cada área, destacando como cada uma contribui para o desenvolvimento e a resiliência da logística na região (Santos e Lima, 2021).

A infraestrutura e as tecnologias são elementos fundamentais no modelo de maturidade Logística 5.0, especialmente em uma região com as características do PIM. A restrição de modais de transporte disponíveis, com grande dependência de rotas fluviais e aéreas, cria desafios logísticos importantes. O transporte fluvial é uma solução viável e amplamente utilizada na região amazônica, mas depende das condições climáticas e da navegação dos rios, que variam sazonalmente. A infraestrutura rodoviária, por outro lado, é limitada, e as longas distâncias entre Manaus e outras grandes cidades brasileiras dificultam o transporte terrestre de mercadorias. Nesse cenário, a adoção de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e *Big Data* torna-se necessária para monitorar e melhorar as operações (Oliveira e Souza, 2023).

No contexto do PIM, a IoT permite o monitoramento remoto de cargas e condições de transporte, o que é crucial para manter a integridade dos produtos durante longas jornadas. Sensores IoT instalados em veículos e armazéns fornecem dados em tempo real sobre localização, temperatura e umidade, permitindo que as empresas ajustem as condições de armazenamento e transporte conforme necessário para proteger as mercadorias. Essa visibilidade em tempo real é particularmente importante nos setores como o de alimentação e o farmacêutico, onde as condições de armazenamento impactam diretamente a qualidade e a segurança dos produtos. De acordo com Catarina *et al.* (2023), o uso de IoT melhora a eficiência operacional e minimiza o desperdício, pois permite que as empresas detectem problemas rapidamente e tomem medidas corretivas para evitar perdas.

Além disso, a IA complementa a IoT ao fornecer ferramentas analíticas para analisar e interpretar os dados encontrados. A análise preditiva permite que as empresas antecipem flutuações na demanda e ajustem o planejamento logístico com antecedência, minimizando os custos e melhorando a resposta às variações do mercado. A IA também contribui para a manutenção preditiva dos veículos e equipamentos utilizados na logística, permitindo que as empresas realizem manutenção preventiva para evitar falhas e interrupções. Segundo Andrade *et al.* (2019), a integração de IoT e IA é uma solução essencial para superar as limitações de infraestrutura do PIM, tornando as operações logísticas mais confiáveis e eficientes.

A sustentabilidade e as iniciativas verdes são dimensões fundamentais para a Logística 5.0 no contexto amazônico, uma vez que o PIM está localizado em uma região de grande relevância ambiental. As empresas que operam no PIM devem adotar práticas logísticas que minimizem o impacto ambiental e contribuam para a preservação da biodiversidade local. A

logística verde envolve o uso de veículos menos poluentes, a redução do consumo de energia e a implementação de práticas de economia circular, que promovem o reaproveitamento e a reciclagem de materiais. Segundo Klimecka-Tatar *et al.* (2021), a sustentabilidade tornou-se uma exigência não apenas regulatória, mas também de mercado, uma vez que consumidores e investidores desativam cada vez mais que as empresas adotem práticas ambientalmente responsáveis.

No PIM, a compensação de carbono é uma prática relevante para empresas que buscam reduzir seu impacto ambiental. A compensação de carbono envolve o investimento em projetos de reflorestamento e preservação ambiental para neutralizar as emissões de carbono geradas pelas operações logísticas. Essa prática é especialmente importante na Amazônia, onde a preservação da floresta é essencial para o equilíbrio climático global. Andrade *et al.* (2022) destacam que a compensação de carbono é uma prática que beneficia tanto o meio ambiente quanto a imagem das empresas, fortalecendo a confiança dos consumidores e aumentando a competitividade das marcas que adotam essa abordagem.

A economia circular é outra iniciativa verde importante no PIM, pois visa prolongar o ciclo de vida dos produtos e reduzir o desperdício de materiais. No contexto da Logística 5.0, a economia circular é promovida por meio do reaproveitamento de embalagens, da reciclagem de resíduos e da otimização do consumo de recursos naturais. Essa prática não apenas reduz o impacto ambiental, mas também gera economia de custos para as empresas, uma vez que promove um uso mais eficiente dos materiais. De acordo com Cavalcante (2020), a implementação da economia circular nas operações logísticas do PIM contribui para o desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos mais sustentável e resiliente.

A integração e colaboração na cadeia logística são essenciais para o sucesso da Logística 5.0 no PIM. A comunicação eficiente e a troca de informações em tempo real entre os diferentes elos da cadeia de suprimentos permite que as empresas se adaptem rapidamente às mudanças na demanda e aos eventos inesperados. A integração digital e o uso de *blockchain* são fundamentais para melhorar a transparência e a rastreabilidade dos produtos, criando uma rede de confiança entre fornecedores, distribuidores e consumidores. Segundo Choi e Siqin (2022), o *blockchain* aumenta a confiabilidade e a segurança na cadeia de suprimentos, especialmente em regiões onde a rastreabilidade é uma exigência regulatória e de mercado.

Além disso, a colaboração entre as empresas do PIM fortalece a resiliência da cadeia de suprimentos e facilita a implementação de práticas logísticas avançadas. As parcerias estratégicas permitem que as empresas compartilhem recursos e conhecimentos, otimizando a utilização de infraestruturas e custos operacionais. A colaboração também é essencial para o desenvolvimento de soluções inovadoras que atendam às especificidades da logística no PIM, como a adaptação de rotas e o planejamento de contingências em resposta a eventos climáticos extremos (Ghobakhloo, 2020).

A resiliência logística e a adaptação às mudanças climáticas são dimensões críticas para as operações logísticas no PIM. A região amazônica é altamente vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas, como enchentes e secas, que impactam diretamente o transporte e o armazenamento de mercadorias. A Logística 5.0 no PIM utiliza ferramentas como análise preditiva e IA para prever eventos climáticos e ajustar as operações de forma proativa. O uso de dados em tempo real permite que as empresas monitorem as condições climáticas e tomem decisões rápidas para proteger as mercadorias e manter a continuidade das operações (Nogueira *et al.*, 2022).

A diversificação de rotas e fornecedores é outra estratégia importante para aumentar a resiliência logística no PIM. Empresas que dependem de uma única rota ou fornecedor ficam vulneráveis a interrupções e interrupções externas. Ao diversificar as rotas de transporte e estabelecer parcerias com múltiplos fornecedores, as empresas aumentam a sua capacidade de resposta a eventos inesperados, garantindo que as operações continuem mesmo em situações adversárias (Santos e Lima, 2021).

O aspecto humano é uma dimensão central da Logística 5.0, que valoriza a capacitação e o desenvolvimento profissional dos colaboradores. A implementação de tecnologias avançadas no PIM exige uma força de trabalho complicada, capaz de operar e gerenciar sistemas automatizados e de análise de dados. Empresas que investem em treinamento contínuo e promovem a inovação entre os colaboradores criam um ambiente de trabalho dinâmico e preparado para os desafios da era digital (Mourão *et al.*, 2022).

A humanização das operações logísticas também envolve a promoção de um ambiente de trabalho seguro e inclusivo. A Logística 5.0 reduz a carga física dos trabalhadores ao automatizar tarefas repetitivas e perigosas, permitindo que os colaboradores se concentrem em atividades de maior valor, como a análise e a tomada de decisões. Além disso, empresas que

promovem a diversidade e a inclusão criam uma equipe de trabalho rica em perspectivas e habilidades, fortalecendo a capacidade de inovação e adaptabilidade (Oliveira e Souza, 2023).

Em resumo, a aplicação do modelo de maturidade Logística 5.0 no Polo Industrial de Manaus é justificada pela diversidade de setores e cargas envolvidas e pela complexidade logística da região. A implementação das cinco dimensões do modelo – infraestrutura e tecnologias, sustentabilidade, integração e colaboração, resiliência e aspecto humano – permite uma avaliação abrangente e adaptada às necessidades do PIM, promovendo uma logística eficiente, sustentável e resiliente.

6.5. Índice de maturidade e adequação logística 5.0 (IMAL 5.0)

O Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0) foi criado para fornecer uma métrica objetiva e detalhada para avaliar o nível de maturidade logística das empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM) no contexto da Logística 5.0. Este índice visa quantificar e qualificar a adoção de práticas e tecnologias modernas que apoiam a operação logística, em áreas críticas como sustentabilidade, automação, resiliência e gestão de recursos humanos. O IMAL 5.0 é estruturado para capturar a complexidade e a multifuncionalidade da logística moderna, especialmente em um ambiente desafiador como o PIM, onde os obstáculos logísticos relacionados ao isolamento geográfico e à infraestrutura limitada desabilitam soluções inovadoras e eficientes (Mourão *et al.*, 2022).

O IMAL 5.0 foi desenvolvido a partir de um questionário aplicado a profissionais do PIM em cargas variadas, incluindo gerentes, coordenadores, supervisores, analistas e especialistas em áreas estratégicas como logística, suprimentos, compras, planejamento e produção. Este questionário incluiu perguntas específicas para cada uma das cinco dimensões principais da Logística 5.0: Tecnologia e Automação, Sustentabilidade e Práticas Verdes, Integração e Colaboração, Aspecto Humano e Resiliência Logística e Mudanças Climáticas. As respostas dos participantes foram pontuadas e estruturadas para permitir uma análise precisa da adoção das práticas e tecnologias dentro dessas dimensões. Em relação às perguntas, seguiu estruturação em escalas de concordância (como Baixo, Médio, Alto) e respostas binárias (Sim/Não), facilitando a quantificação das respostas. A classificação foi atribuída de acordo com a seguinte escala:

- **Escala de Concordância:** As respostas foram pontuadas da seguinte forma: "Nenhum" (0 pontos), "Baixo" (1 ponto), "Médio" (2 pontos) e "Alto" (3 pontos).
- **Respostas Binárias:** Para perguntas com respostas Sim/Não, foi atribuído 1 ponto para "Sim" e 0 pontos para "Não".

A aplicação dessa estrutura de classificação simplificada permitiu uma avaliação quantitativa das práticas logísticas, facilitando a análise do nível de maturidade em cada dimensão de forma individual, bem como o cálculo de um índice geral que reflete a maturidade logística como um todo (Ghobakhloo, 2020).

6.5.1 Construção da matriz base DEMATEL

Bouzon (2023) destaca que essa matriz não deve ser construída de forma arbitrária, devendo ser fruto de um processo estruturado de elicitação de especialistas, que tenham domínio do problema em questão. Segundo a autora, “a qualidade da matriz INPUT determina diretamente a confiabilidade dos resultados do DEMATEL”, ressaltando a importância da consistência nos julgamentos e da diversidade de visões para mitigar vieses individuais.

Em consonância com essa perspectiva, a presente tese aplicou um questionário estruturado junto a especialistas com experiência direta em logística e processos produtivos no Polo Industrial de Manaus, garantindo a representatividade das respostas. Adicionalmente, para assegurar a robustez do instrumento, adotou-se uma média dos julgamentos individuais para compor a matriz agregada, prática também endossada por Bouzon et al. (2021).

Outro ponto de convergência entre esta tese e os ensinamentos de Bouzon reside na etapa de validação da matriz inicial. Assim como recomendado pela autora, foi verificado se a matriz apresentava coerência nas relações diagonais (que devem ser nulas) e se os julgamentos apresentavam distribuição compatível com a realidade do sistema analisado. Dessa forma, a matriz de influência construída neste estudo reflete uma combinação entre rigor metodológico e adequação prática, conforme sustentado por diferentes autores da literatura, entre os quais se destaca a contribuição de Bouzon (2023) para o uso crítico e aplicado do DEMATEL no contexto brasileiro.

A matriz base 5x5 do método DEMATEL é criada com base nos valores atribuídos pelos participantes a um questionário estruturado. Neste caso, cada gestor avaliou a intensidade das influências de uma dimensão sobre as outras, usando uma escala de 1 a 4, conforme

especificado no questionário apresentado no Apêndice E. O processo seguiu os seguintes passos:

Passo 1. Coleta de avaliações

- Cada participante atribuiu um valor para a influência da dimensão *eu* sobre a dimensão *eu*;
- A escala adotada é de 1 a 4, sendo:
 - 1: Discordo totalmente (influência mínima);
 - 4: Concordo totalmente (influência máxima).

Passo 2. Cálculo das médias apresentada na equação 3.

- As avaliações individuais são organizadas em uma matriz preliminar, onde cada elemento UM_{eu} representa a avaliação da opinião de *eu* (influência da dimensão) sobre *eu* por um único respondente;
- Para obter a matriz base consolidada, calcule a média dos valores atribuídos por todos os respondentes para cada par *eu, eu*.
-

Equação 3 – Cálculo das Médias

$$UM_{eu} = \frac{\sum_{k=1}^{nr} X_{eu}^{(k)}}{nr}$$

onde:

- $X_{eu}^{(0)}$ = Valor atribuído pelo participante *o* para o par *eu, eu*
- *nr*: Número total de respondentes.

Passo 3. Estruturação da matriz base

- A matriz final é uma matriz quadrada 5×5, onde UM_{eu} é a média das influências de *eu* sobre *eu*.
- Um princípio diagonal UM_{eu} é preenchido com zeros, pois uma dimensão não exerce influência sobre si mesma.

A seguir, o quadro 07 apresenta a Matriz Base DEMATEL construída a partir das médias das avaliações dos especialistas. Cada valor representa a percepção coletiva sobre o grau de influência direta entre as dimensões da Logística 5.0, excluindo influências próprias.

Quadro 7 - Matriz Base DEMATEL

Matriz Base					
Dimensão	IT	SV	IC	RM	HU
IT	0	3	3	3	3
SV	2	0	2	3	2
IC	3	3	0	3	3
RM	3	2	3	0	3
HU	3	3	3	3	0

Fonte: Autoria Própria (2025).

Passo 4. Normalização da matriz

A normalização da matriz base é uma etapa essencial na análise *Grey* DEMATEL, pois ajusta os valores para uma escala uniforme, garantindo que todas as influências sejam comparáveis e respeitem a proporcionalidade entre as dimensões avaliadas. Esse processo elimina variações causadas por diferentes escalas de avaliação, permitindo que os valores estejam entre 0 e 1. A normalização é realizada utilizando a soma máxima das linhas da matriz base ($\max(\sum_{eu} UMeu)$) que representa a maior intensidade de influências causadas por qualquer dimensão no sistema.

Matematicamente, a normalização é feita aplicando a fórmula da Equação 4:

Equação 4 – Normalização da matriz (E_{eu})

$$E_{eu} = \frac{UMeu}{\max(\sum_{eu} UMeu)}$$

Em quem $UMeu$ é o valor correspondente na matriz base, e $\max(\sum_{eu} UMeu)$ é o maior somatório das influências diretas causadas por uma única dimensão eu. Assim, cada elemento da matriz base é dividido por esse valor máximo, garantindo que o maior valor na

matriz normalizada seja igual a 1. O resultado é uma matriz EDE (*Expected Direct Effect*), ou seja o efeito esperado direto, em que os valores definidos mantêm as relações originais de influência, mas estão proporcionalmente escalados. Essa matriz normalizada serve de base para calcular os limites superiores e inferiores, incorporando as incertezas no modelo *Grey DEMATEL*.

Passo 5. Limites superiores e inferiores

Os limites superiores e inferiores são fundamentais na análise *Grey DEMATEL*, pois permitem incorporar as incertezas inerentes aos dados coletados. Essas incertezas são representadas por ajustes de $\pm 10\%$ nos valores da matriz normalizada (D), resultando nas matrizes D^+ (limite superior) e D^- (limite inferior). O objetivo é capturar cenários extremos em que as influências entre as dimensões do sistema podem ser mais intensas ou mais fracas do que o valor central calculado na matriz normalizada. Passo 6. Fórmulas utilizadas

O cálculo dos limites superiores e inferiores é realizado aplicando a formula apresentada na Equação 5, com ajustes a cada elemento D_{ij} da matriz normalizada

Equação 5- Limite Superior (D^+) e Limite Inferior (D^-)

- Limite Superior (D^+)

$$D_{ij}^+ = D_{ij} \cdot (1 + \varepsilon)$$

- Limite Inferior (D^-)

$$D_{ij}^- = D_{ij} \cdot (1 - \varepsilon)$$

onde:

- D_{ij} : Valor da matriz normalizada no elemento i,j ;
- $\varepsilon=0,1$ (10%): Fator de incerteza definido.

Para um exemplo prático:

- Considere um elemento da matriz normalizada com $D_{ij}=0,5$.

1. Cálculo do limite superior:

$$Dij^+ = 0,5. (1 + 0,5) = 0,5.1,1 = 0,55$$

2. Cálculo do limite inferior:

$$Dij^- = 0,5. (1 - 0,5) = 0,5.0,9 = 0,45$$

Nesse caso, o elemento $Dij=0,5$ é ajustado para um intervalo de $[0,45,0,55]$, refletindo os cenários de influência mínima e máxima.

Passo 7. Construção das matrizes Dij^+ e Dij^-

Esse processo é repetido para todos os elementos da matriz normalizada, resultando em duas novas matrizes:

- Matriz D^+ (Limite Superior): Reflete o cenário de influências máximas.
- Matriz D^- (Limite Inferior): Reflete o cenário de influências mínimas.

Em relação à interpretação dos resultados, as matrizes D^+ e D^- fornecem uma visão mais ampla das influências entre as dimensões, considerando incertezas e variações potenciais nos dados. Por exemplo:

- Um valor alto em D^+ indica que, no cenário de maior influência, a dimensão i exerce um impacto significativo sobre a dimensão j .
- Um valor baixo em D^- sugere que, mesmo no cenário de menor influência, a dimensão i ainda tem algum impacto sobre j .

Essas matrizes ajustadas são fundamentais para garantir que as etapas subsequentes da análise *Grey DEMATEL*, como o cálculo da matriz total de influência, reflitam um intervalo confiável de variações nos dados, aumentando a robustez e a confiabilidade dos resultados.

Passo 8. Matriz Total de Influência

A Matriz Total de Influência é um dos componentes mais importantes da análise *Grey DEMATEL*, pois combina as influências diretas e indiretas entre as dimensões avaliadas. Essa

matriz fornece uma visão completa das interdependências no sistema, identificando quais dimensões têm maior impacto e quais são mais influenciadas. O cálculo da Matriz Total de Influência baseia-se na matriz normalizada (D) e em suas versões ajustadas para os limites superior (D^+) e inferior (D^-).

Passo 9. Cálculo da Matriz Total

A fórmula utilizada para calcular a matriz total é apresentada na equação 6.

Equação 6 – Matriz Total

$$T = D + D^1 + D^2 + D^3 + \dots + D(I - D)^{-1}$$

onde:

- T : Matriz Total de Influência;
- D : Matriz normalizada de influências diretas;
- I : Matriz identidade (diagonal principal igual a 1, e zero nos demais elementos);
- $D(I - D)^{-1}$: Matriz inversa da subtração entre I e D .

A fórmula acima considera que a soma das potências da matriz D ($D^2, D^3, \dots, D^n$) representa as influências indiretas. Essas potências modelam como os efeitos se propagam pelo sistema, conectando dimensões que não têm relações diretas.

Passo 10. Cálculo nos limites superior e inferior

De forma semelhante, o cálculo das matrizes totais para os limites superior (T^+) e inferior (T^-) são apresentadas na equação 7.

Equação 7 – Matriz Total

$$T^+ = D^+ \cdot (I + D^+)^{-1}; T^- = D^- \cdot (I - D^-)^{-1}$$

Essas matrizes consideram as variações máximas (D^+) e mínimas (D^-) das influências, refletindo os cenários de maior e menor impacto no sistema.

Passo 11. Interpretação

Cada elemento T_{ij} na matriz total representa a soma da influência direta e indireta da dimensão i sobre a dimensão j . Por exemplo:

- Um valor alto de T_{ij} indica que a dimensão i exerce uma influência significativa (direta e indireta) sobre j .
- Um valor baixo de T_{ij} sugere que i tem pouca ou nenhuma influência sobre j .

Ao comparar T^+ , T^- e T , é possível entender como as incertezas afetam o sistema e identificar as dimensões mais robustas ou sensíveis às variações.

Passo 12. Importância na análise

A Matriz Total de Influência é essencial para identificar as dimensões causadoras (aquelas que têm alta influência sobre outras) e as dimensões influenciadas (aquelas que são mais impactadas). Essa análise auxilia na priorização de ações estratégicas, destacando as dimensões que devem ser fortalecidas para otimizar o sistema.

Passo 13. Importância e Causa e Efeito

A etapa de cálculo da Importância e Efeito é crucial na análise *Grey DEMATEL*, pois permite identificar o papel de cada dimensão no sistema avaliado. Esses indicadores fornecem uma visão quantitativa das relações de influência, ajudando a diferenciar dimensões causadoras e influenciadas, além de destacar a importância global de cada elemento no sistema.

Passo 14. Cálculo da Importância (D)

A equação 8 apresenta a fórmula da importância (D_i) mede a importância total de uma dimensão, considerando tanto as influências que ela exerce quanto as que recebe. É calculada somando-se os valores de sua linha (influências causadas) e de sua coluna (influências recebidas) na Matriz Total de Influência (T):

A Importância (D) reflete o papel total de uma dimensão no sistema, considerando tanto as influências que ela exerce quanto as que ela recebe. Para cada dimensão i , soma-se:

- Soma das Linhas: ($\sum_j T_{ij}$): Representa a influência total que a dimensão i causa nas demais dimensões.
- Soma das Colunas: ($\sum_i T_{ji}$): Representa a influência total que a dimensão i recebe das outras dimensões

Equação 8 – Cálculo da Importância (D)

$$Di = \sum_j T_{ij} + \sum_j T_{ji}$$

onde:

- T_{ij} : Representa a influência direta e indireta da dimensão i sobre j;
- T_{ji} : Representa a influência direta e indireta de j sobre i.

Um valor alto de R_i indica que a dimensão i desempenha um papel central no sistema, seja como uma grande influenciadora, seja como uma dimensão muito influenciada.

Passo 15. Cálculo da Relevância (R) - Causa-Efeito

A Relevância (R_i) diferencia dimensões causadoras e influenciadas. É obtida subtraindo-se a soma das colunas (influências recebidas) da soma das linhas (influências causadas) para cada dimensão. (R) identifica o comportamento de uma dimensão como causadora ou influenciada. Para cada dimensão i, subtraímos:

- Soma das Colunas (recebida por i) de:
- Soma das Linhas (causada por i).

A fórmula completa da variável (R) é apresentada na Equação 9:

Equação 9 - Cálculo Efeito (R)

$$R_i = \sum_j T_{ij} - \sum_j T_{ji}$$

onde:

- $\sum_j Tij$: Soma das influências exercidas pela dimensão i;
- $\sum_j Tji$: Soma das influências recebidas pela dimensão i.

Um valor positivo de R_i indica que a dimensão é predominantemente causadora, exercendo mais influência do que recebe. Por outro lado, um valor negativo sugere que a dimensão é predominantemente influenciada, sendo mais impactada pelas outras dimensões do sistema.

6.5.2. Agrupamento por dimensões

Para que o IMAL 5.0 capturasse as especificidades da logística 5.0 de maneira estruturada, as perguntas foram agrupadas nas cinco dimensões principais. Esse agrupamento permitiu uma visão ampla e detalhada de cada área de competência avaliada como seguem:

1. **Tecnologia e Automação:** foco na adoção de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e robótica, que são fundamentais para digitalizar e automatizar operações logísticas.
2. **Sustentabilidade e Práticas Verdes:** avaliação do grau de implementação de práticas ambientalmente responsáveis, como o uso de energias renováveis, economia circular e iniciativas de redução de resíduos e compensação de carbono.
3. **Integração e Colaboração:** exame do nível de colaboração com fornecedores e clientes, a integração de sistemas e a rastreabilidade, que são aspectos críticos para criar uma cadeia de suprimentos conectados e ágeis.
4. **Aspecto Humano:** consideração de aspectos como o bem-estar dos colaboradores, segurança no trabalho, diversidade e inclusão, e colaboração humano-máquina, confirmando a importância do capital humano na Logística 5.0.
5. **Resiliência Logística e Mudanças Climáticas:** avaliação da capacidade das empresas de se adaptarem a eventos climáticos extremos e outras interrupções, com foco na continuidade das operações e na preparação para os desafios climáticos.

Essa divisão em dimensões facilita a interpretação dos resultados e permitiu identificar as áreas de maior ou menor maturidade logística, promovendo uma análise específica das

competências essenciais para uma operação eficiente, sustentável e resiliente (Santos e Lima, 2021).

6.6. Cálculo da pontuação total e do índice

A utilização da escala Likert constituiu-se como uma etapa metodológica fundamental na estruturação do modelo IMAL 5.0, ao permitir a mensuração subjetiva de práticas logísticas em uma escala padronizada e comparável. O uso da escala Likert no Modelo IMAL 5.0 viabilizou a transformação de percepções qualitativas em dados quantitativos, garantindo maior robustez à análise estatística e à modelagem subsequente do índice. O instrumento de coleta de dados foi construído com base nas seis dimensões centrais do modelo — infraestrutura tecnológica, integração digital, sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e desempenho operacional — sendo cada item avaliado por meio de uma escala ordinal de quatro pontos: 0 (Nenhum), 1 (Baixo), 2 (Médio) e 3 (Alto). Esse formato permitiu a captura do grau de aderência e maturidade logística com sensibilidade às variações existentes entre as empresas analisadas no Polo Industrial de Manaus. Ao adotar essa estrutura, assegurou-se uma abordagem gradativa e interpretável, alinhada às melhores práticas em avaliação de maturidade organizacional e aderente ao contexto da Logística 5.0.

As respostas obtidas pela escala Likert foram posteriormente convertidas em pontuações brutas por dimensão, que alimentaram o cálculo de adequação percentual com base na fórmula. Para cada dimensão, as respostas foram somadas para obter uma Pontuação Total da Dimensão. Em seguida, essa pontuação foi normalizada em um percentual para refletir o grau de adequação da empresa às práticas recomendadas para a Logística 5.0. A fórmula utilizada para normalizar a classificação em cada dimensão é apresentada na equação 10.

Equação 10- Adequação para normalização

$$\text{Adequação}_i = \left(\frac{\text{Pontuação obtida}_i}{\text{Pontuação máxima}_i} \right) \times 100$$

Esse processo garantiu a padronização das pontuações em uma escala de 0 a 100%, o que tornou possível comparar o desempenho das diferentes dimensões entre si, independentemente do número de itens avaliativos em cada uma. Assim, as escalas likert e linguística não apenas facilitaram a coleta de percepções organizacionais complexas, como também permitiu que esses dados fossem integrados de forma matemática ao índice composto

final, validado via método *Grey DEMATEL*. Sua utilização reforçou o caráter híbrido do modelo IMAL 5.0, que combinou rigor quantitativo com sensibilidade qualitativa, mantendo coerência com os princípios da Logística 5.0.

A normalização dos resultados facilitou a comparação entre dimensões e permitiu uma interpretação clara dos resultados. Após calcular o percentual para cada dimensão, o Índice Geral de Maturidade Logística (IMAL 5.0) foi obtido como a média ponderada dos percentuais de todas as dimensões. A fórmula para o cálculo ponderado do IMAL 5.0 novamente é apresentada na equação 11:

Equação 11 – Cálculo do IMAL5.0

$$IMAL\ 5.0 = \frac{\sum_{i=1}^n (Adequação \times Peso)}{\sum_{i=1}^n Peso}$$

A justificativa para o uso de médias ponderadas no cálculo do índice IMAL 5.0 está ancorada na necessidade de refletir com maior precisão a importância relativa de cada dimensão avaliada no contexto da Logística 5.0, especialmente aplicada ao Polo Industrial de Manaus. Ao contrário da média aritmética simples, que trata todas as dimensões com igual relevância, a média ponderada permite diferenciar o peso de cada critério conforme sua influência estratégica no sistema logístico. Essa abordagem é particularmente relevante quando se considera que fatores como sustentabilidade, centralidade humana ou resiliência não exercem o mesmo impacto operacional ou sistêmico em todas as organizações.

No IMAL 5.0, os pesos utilizados foram derivados empiricamente a partir da matriz de relações causais obtida com o método *Grey DEMATEL*. Essa matriz identifica os critérios que possuem maior capacidade de influenciar os demais, evidenciando quais são os fatores mais críticos dentro da cadeia logística analisada. Assim, a ponderação permite que o índice reflita não apenas o grau de implementação de boas práticas, mas também a centralidade estratégica de cada dimensão no sistema como um todo. Essa escolha metodológica reforça o rigor e a sensibilidade do IMAL 5.0 como instrumento de diagnóstico e suporte à decisão no avanço da maturidade logística.

Essa escolha metodológica é amplamente respaldada na literatura sobre modelos multicritério e de avaliação de maturidade, sendo utilizada em frameworks consolidados como o CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), o BSC (*Balanced Scorecard*) e o AHP

(*Analytic Hierarchy Process*). Conforme Saaty (2008), a ponderação é fundamental em decisões complexas, pois traduz o julgamento qualitativo dos especialistas em coeficientes numéricos que orientam a alocação racional de prioridades. Ao permitir uma avaliação mais refinada e adaptável às especificidades do ambiente analisado — neste caso, a Amazônia industrial — a média ponderada fortalece a capacidade diagnóstica e prescritiva do IMAL 5.0, tornando-o uma ferramenta mais sensível às prioridades estratégicas e às dinâmicas reais da transformação logística.

Os pesos atribuídos a cada dimensão podem variar conforme a relevância de cada uma para a estratégia logística no contexto do PIM. Por exemplo, a dimensão “Sustentabilidade e Práticas Verdes” pode receber um peso maior devido à importância da responsabilidade ambiental na Amazônia. A aplicação de pesos permite que o índice seja definido conforme as prioridades do contexto amazônico, refletindo melhor a exigência e os desafios enfrentados pelas empresas do PIM (Klimecka-Tatar *et al.*, 2021).

6.6.1. Parâmetros de cálculo com pesos

Para ilustrar o projeto do IMAL 5.0, suponha que as dimensões tenham os seguintes pesos e percentuais de adequação conforme o quadro 7:

Quadro 7. Parâmetros de cálculo IMAL 5.0

Dimensão	Pontuação Máxima	Pontuação Obtida	Percentual de Adequação	Peso (%)
Tecnologia e Automação (IT)	30	20	$\frac{20}{30} \times 100 = 66,7\%$	25
Sustentabilidade e Práticas Verdes (SV)	20	18	$\frac{18}{20} \times 100 = 90,0\%$	30
Integração e Colaboração (IC)	25	15	$\frac{15}{25} \times 100 = 60,0\%$	15
Aspecto Humano (HU)	30	25	$\frac{25}{30} \times 100 = 83,3\%$	20
Resiliência Logística (RM)	25	22	$\frac{22}{25} \times 100 = 88,0\%$	10

Fonte: Autoria Própria (2025).

Com base nos dados, o cálculo do índice geral ponderado é:

$$\text{IMAL 5.0} = \frac{(66.7 \times 25) + (90 \times 30) + (60 \times 15) + (83.3 \times 20) + (88 \times 10)}{100}$$

Resolvido:

$$\text{IMAL 5.0} = \frac{(1667.5)+(2700)+(900)+(1666)+(880)}{100} = \frac{7813.5}{100} = 78,14\%$$

É possível concluir que este valor indica uma Alta Adequação no nível de maturidade logística, indicando que a empresa está avançada na implementação das práticas da logística 5.0. O índice de 78,14% revela que a organização possui elevado grau de aderência às dimensões críticas do modelo IMAL 5.0, como sustentabilidade, integração digital, centralidade humana e resiliência. Isso sugere que suas operações logísticas já estão em sintonia com os princípios da nova era industrial, com capacidade de adaptação, inovação e responsabilidade socioambiental. Portanto, a empresa encontra-se apta a consolidar-se como referência em logística inteligente e humanizada no contexto do PIM.

6.7. Ensaio prático do modelo em empresas industriais

O PIM representa um dos mais complexos ambientes industriais do Brasil, com desafios logísticos exclusivamente devido à sua localização geográfica, infraestrutura limitada e exigências ambientais rigorosas. A aplicação do modelo de atualização Logística 5.0 no PIM permite uma avaliação detalhada do nível de maturidade das empresas no que diz respeito à implementação de práticas sustentáveis, à automação e resiliência à logística. Este ensaio não apenas explora a aplicabilidade do modelo, mas também fornece uma análise comparativa entre diferentes setores do PIM, como o automotivo, o de bens de consumo e o eletrônico, abordando a capacidade dessas empresas em adotar tecnologias e práticas de logística 5.0.

Diante desse cenário, a amostra utilizada para os ensaios do modelo IMAL 5.0 nesta pesquisa foi composta por empresas atuantes no Polo Industrial de Manaus (PIM), selecionadas com base em critérios de acessibilidade, relevância setorial e representatividade em relação às dimensões da logística 5.0. O objetivo foi garantir diversidade suficiente para testar a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos operacionais, mantendo coerência com a proposta de um índice transversal e escalável.

Participaram da aplicação empírica empresas de médio e grande porte, com atuação nos segmentos eletroeletrônico, bens de consumo durável e componentes industriais, todos estratégicos para a dinâmica logística da região amazônica. O critério de seleção foi baseado no engajamento prévio das empresas com iniciativas de inovação, sustentabilidade e

transformação digital, conforme descrito em estudos anteriores sobre a maturidade logística na Indústria 5.0 (Romero & Stahre, 2021; Olesków-Szłapka & STachowiak, 2018).

A coleta de dados foi realizada por meio de questionários estruturados aplicados a profissionais responsáveis pelas áreas de logística, produção ou inovação, garantindo a obtenção de informações qualificadas e alinhadas com os indicadores definidos no modelo. Foram coletadas 28 respostas válidas, que permitiram o cálculo dos níveis de maturidade em cada uma das seis dimensões do índice (HU, IT, IC, RM, SV e DO). A seção “Apêndice C” traz mais detalhes das perguntas realizadas por meio do questionário.

Essa amostra, embora não probabilística, é suficiente para os objetivos exploratórios do estudo, permitindo observar padrões, relações e validações iniciais do IMAL 5.0. Conforme destacado por De Bruin *et al.* (2005), estudos de maturidade em estágios iniciais podem ser conduzidos com amostras limitadas desde que o foco esteja na consistência do *framework* teórico e na coerência das interpretações.

A logística 5.0 é um avanço natural sobre o conceito da Logística 4.0, que se concentra em tecnologias de automação e integração digital. No entanto, a Logística 5.0 acrescenta um foco mais humanizado e sustentável às práticas logísticas, considerando a importância do aspecto humano e das práticas ambientais responsáveis. Segundo Ghobakhloo (2020), a Logística 5.0 representa uma abordagem mais equilibrada, onde a tecnologia é utilizada não apenas para aumentar a eficiência, mas também para promover a sustentabilidade e a segurança dos colaboradores.

No contexto do PIM, a implementação da Logística 5.0 é fundamental para melhorar a eficiência das operações e, ao mesmo tempo, reduzir o impacto ambiental, considerando que o polo está inserido em uma região de grande relevância ecológica. Empresas que adotam práticas de logística 5.0 no PIM têm a oportunidade de se destacar em um mercado cada vez mais competitivo e exigente em termos de responsabilidade ambiental e social. De acordo com Cavalcante (2020), práticas sustentáveis, como a logística verde, são essenciais para que as empresas atuem de maneira responsável e possam operar de forma sustentável em longo prazo.

Para ilustrar a aplicabilidade do modelo, foram comprovadas empresas de três setores distintos: o de duas rodas, o de bens de consumo e o eletrônico. Cada setor apresenta diferentes

desafios e oportunidades para a implementação da logística 5.0, permitindo uma análise rica e comparativa.

O setor de duas rodas caracteriza-se pelas empresas automotivas no PIM enfrentam desafios importantes que não tangem à sustentabilidade e à resiliência logística, devido à alta complexidade das cadeias de suprimentos e à necessidade de integração entre diferentes fornecedores e distribuidores. A aplicação do modelo de atualização revelou que as empresas se apresentam em intermediários de atualização, com um bom nível de automação e digitalização, mas com limitações em termos de práticas sustentáveis. Segundo Bag et al (2020), o setor automotivo tem avançado na adoção de tecnologias como IoT e *Big Data* para monitorar e melhorar o transporte e a gestão de estoques, mas ainda encontra dificuldades para implementação de práticas verdes, como a compensação de carbono e a utilização de materiais reciclados.

Em algumas empresas automotivas do PIM, por exemplo, robôs colaborativos são usados para melhorar a eficiência na linha de produção, enquanto sistemas de controle de estoque automatizados ajudam a reduzir desperdícios e a aumentar a precisão no atendimento à demanda. No entanto, o aspecto da sustentabilidade ainda é incipiente, e muitas dessas empresas estão apenas começando a explorar práticas que promovam uma cadeia de suprimentos verdes. A adoção de tecnologias avançadas, como blockchain para rastreabilidade de materiais sustentáveis, poderia representar um próximo passo importante para essas empresas, conforme sugerido por Saberi *et al.* (2019).

Já o setor de bens de consumo, há a análise do modelo mostrou que as empresas avançaram consideravelmente em práticas sustentáveis e na integração colaborativa com fornecedores. Este setor se destaca pela implementação de sistemas de rastreamento digital que permitem monitorar mercadorias em tempo real, o que proporciona maior controle e transparência na cadeia de suprimentos. Muitas empresas desse setor também investem na capacitação dos colaboradores para operar tecnologias digitais, promovendo um ambiente de trabalho inovador e sustentável. Segundo Andrade *et al.* (2022), o setor de bens de consumo tem sido um dos mais proativos na adoção de práticas verdes, principalmente por conta da pressão do mercado e da exigência dos consumidores por produtos mais sustentáveis.

Uma análise revelou que, embora a maioria das empresas desse setor possua uma logística relativamente integrada, algumas ainda enfrentam desafios para aumentar sua

resiliência diante de disrupções externas, como mudanças nas condições climáticas. Essas empresas se beneficiam da melhoria de análises preditivas, utilizando Big Data para antecipar demandas e ajustar estoques, o que fortaleceria a capacidade de resposta às mudanças de mercado e aos eventos climáticos imprevistos (Leng *et al.*, 2022).

Enquanto o setor de eletrônicos, as empresas do setor eletrônico no PIM apresentam um nível mais avançado de evolução logística, especialmente nas dimensões de Tecnologia e Automação e Integração e Colaboração: Essas empresas são pioneiras na adoção de tecnologias como IoT e *blockchain* para garantir a rastreabilidade dos produtos e a transparência na cadeia de suprimentos. No entanto, a dimensão do aspecto humano ainda representa um desafio, pois a introdução de tecnologias de ponta exige que os colaboradores recebam treinamento especializado e contínuo para acompanhar o ritmo da inovação.

Uma análise do modelo indicou que o setor eletrônico é mais avançado em termos de práticas sustentáveis e integrações tecnológicas, o que permite uma operação mais ágil e eficiente. No entanto, segundo Choi e Siqin (2022), o investimento em capacitação e em programas de desenvolvimento de habilidades digitais é essencial para que o setor continue evoluindo, especialmente em um contexto em que a tecnologia avança rapidamente. Assim, o setor eletrônico pode servir de referência para outros setores do PIM que desejam implementar práticas avançadas de logística 5.0.

6.7.1 Aplicações práticas do DEMATEL no Brasil

O método DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) foi desenvolvido no Battelle Memorial Institute, em Genebra, com o objetivo de representar e estruturar relações de causa e efeito entre variáveis em sistemas complexos. Sua principal vantagem está na capacidade de transformar julgamentos qualitativos de especialistas em representações quantitativas por meio de matrizes de influência direta e indireta, resultando em um mapa causal que facilita a tomada de decisão em ambientes de múltiplos critérios e agentes. No contexto da logística e da gestão da cadeia de suprimentos, o DEMATEL se mostra particularmente eficaz ao permitir a análise da interdependência entre variáveis organizacionais, tecnológicas e operacionais, o que é fundamental para o diagnóstico de maturidade em ambientes industriais dinâmicos, como o Polo Industrial de Manaus.

No Brasil, o uso do DEMATEL vem sendo ampliado a partir dos trabalhos da Profa. Marina Bouzon, que tem se destacado na aplicação do método em estudos voltados à logística

reversa, sustentabilidade e gestão de processos farmacêuticos. Em suas pesquisas, Bouzon et al. (2020; 2021) demonstram que o DEMATEL é capaz de identificar fatores críticos e suas relações causais com elevado grau de refinamento, sobretudo quando combinado com abordagens complementares como a lógica fuzzy ou o modelo *Grey* DEMATEL. Os estudos conduzidos pela autora mostram como fatores como gestão, infraestrutura, política pública e engajamento de stakeholders interagem para criar barreiras ou alavancas à implementação de práticas logísticas sustentáveis. Essa perspectiva foi essencial para embasar a adaptação do modelo proposto nesta pesquisa, especialmente quanto à construção da matriz de influência e à interpretação do diagrama causal.

A escolha pelo DEMATEL neste estudo também levou em consideração sua capacidade de estruturar visualmente os elementos de entrada identificados no modelo de maturidade proposto, facilitando a interpretação e a priorização de ações pelos tomadores de decisão. Conforme proposto por Bouzon (2021), a clareza proporcionada pelos vetores D+R (influência total) e D-R (papel causal) amplia a assertividade na definição de estratégias gerenciais em sistemas logísticos. Ao seguir essa abordagem metodológica, o presente trabalho visa não apenas mapear o grau de maturidade da logística 5.0 nas empresas do Polo Industrial de Manaus, mas também indicar caminhos práticos para sua evolução com base nas interdependências estruturais dos fatores envolvidos.

6.7.2. Análise *Grey* DEMATEL e sua relevância

A validação de índices compostos é essencial para garantir sua consistência teórica e aplicabilidade prática em diferentes contextos. O Índice IMAL (Modelo Integrado de Maturidade em Logística) busca mensurar a maturidade da logística das organizações, considerando múltiplas dimensões que abrangem inovação, sustentabilidade, integração, resiliência e humanização. Entretanto, para garantir que tais dimensões estão devidamente estruturadas e interconectadas.

A metodologia *Grey* DEMATEL, escolhida para validar o Índice IMAL, combina as vantagens do DEMATEL tradicional com a lógica dos conjuntos cinzentos. Segundo Niemsakul et al., (2025), o DEMATEL é amplamente utilizado para desmembrar problemas complexos em relações causais, permitindo identificar os elementos mais influentes em sistemas multicritérios. A inclusão da abordagem cinzenta acrescenta uma camada de sofisticação ao considerar a incerteza nos dados perdidos, garantindo resultados mais confiáveis e alinhados às variabilidades dos sistemas.

A aplicação do *Grey DEMATEL* permite não apenas identificar as influências diretas entre as dimensões do índice, mas também avaliar as interdependências indiretas, fornecendo uma visão holística do sistema. De acordo com Li *et al.* (2014), esta metodologia é particularmente eficaz em ambientes onde as relações entre variáveis não são perfeitamente determinadas, sendo ideal para áreas como a logística, onde as dinâmicas operacionais são frequentemente incertas e múltiplas.

Outro aspecto crucial da análise de *Grey DEMATEL* é sua capacidade de diferenciar dimensões causadoras e influenciadas. Ao avaliar análises como importância e efeito, é possível destacar quais dimensões exercem maior impacto no sistema e quais são mais suscetíveis a influências externas.

Dessa forma, a presente análise não apenas valida o Índice IMAL, mas também fornece um framework metodológico que pode ser replicado em outras áreas de estudo. A combinação da lógica cinzenta com o DEMATEL tradicional amplia as possibilidades de aplicação em cenários complexos, ao mesmo tempo em que fortalece a confiabilidade do índice proposto.

No contexto deste estudo, a aplicação da análise *Grey DEMATEL* teve como objetivo validar as cinco dimensões do Índice IMAL, sendo elas:

- Dimensão 1 (IT): Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0;
- Dimensão 2 (SV): Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística;
- Dimensão 3 (IC): Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0;
- Dimensão 4 (RM): Resiliência Logística 5.0 e Mudanças Climáticas e;
- Dimensão 5 (HU): Aspecto Humano na Logística 5.0.

A coleta de dados foi realizada por meio de questionários aplicados a gestores de empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM), especificamente na área de logística. Esses gestores foram selecionados com base em sua expertise prática e no papel estratégico que desempenham em suas organizações. O Polo Industrial de Manaus, conhecido por sua relevância econômica e geopolítica, apresenta desafios logísticos complexos decorrentes de sua localização remota, infraestrutura regional limitada e a necessidade de integração com cadeias globais de suprimentos. Por isso, a escolha desse alvo público foi essencial para capturar as especificidades de um ambiente logístico, sonoro e sonoro.

O questionário foi elaborado para que os gestores avaliassem a intensidade das influências entre as dimensões do Índice IMAL em uma escala qualitativa. As perguntas foram estruturadas de forma para garantir a consistência e a comparabilidade das respostas, cobrindo as interações bidirecionais entre todas as dimensões. Posteriormente, os dados qualitativos foram convertidos em valores quantitativos, formando uma matriz de influências diretas.

Cada resposta foi tratada com a máxima confidencialidade, e os gestores participaram voluntariamente, garantindo a integridade e a representatividade dos dados coletados. O processo resultou em uma matriz base que reflete a realidade prática da logística no PIM, ao mesmo tempo em que captura a variabilidade e as incertezas típicas de um sistema logístico integrado. Essa matriz foi posteriormente normalizada e ajustada para incorporar os limites superiores e inferiores, elementos fundamentais da análise *Grey DEMATEL*, garantindo assim que a metodologia pudesse considerar as incertezas inerentes às respostas dos participantes.

Aos gestores escolherem o PIM como público-alvo, o estudo também buscou ampliar a aplicabilidade prática do Índice IMAL, testando-o em um ambiente logístico real e de alta complexidade. Isso reforça a validade dos resultados e destaca a relevância do índice como uma ferramenta estratégica para mensurar e aprimorar a maturidade logística em cenários semelhantes. O próximo passo na análise foi a aplicação das fórmulas algébricas da metodologia *Grey DEMATEL* para transformar os dados encontrados em uma matriz total de influência, detalhadamente na próxima seção.

6.8. Interpretação dos resultados

Com base nos valores de D e R, as dimensões foram classificadas em três dimensões conforme seguem:

1. Dimensões causadoras ($R_i > 0$): São aquelas que exercem forte influência sobre o sistema e podem ser alvos prioritários de intervenções estratégicas.
2. Dimensões influenciadas ($R_i < 0$): Refletem as consequências das interações do sistema, sendo sensíveis a mudanças nas dimensões causadoras.
3. Dimensões equilibradas ($R_i \approx 0$): Apresentam um equilíbrio entre influências causadas e recebidas, desempenhando papéis de ligação no sistema.

Na aplicação do método *Grey DEMATEL*, os valores de Importância (D) e Efeito (R) desempenham um papel estratégico na priorização de ações e na formulação de políticas

logísticas. A Importância (D) indica o grau de interação total de uma dimensão dentro do sistema, revelando sua importância sistêmica e necessidade de monitoramento contínuo. Já o Efeito (R), calculada pela diferença entre influência exercida e recebida, permite identificar dimensões causadoras — ou seja, aquelas que influenciam diretamente outras variáveis do sistema.

Essas dimensões foram priorizadas como alvos de intervenção, pois ações sobre elas têm maior potencial de gerar efeitos positivos em cascata sobre todo o modelo. Assim, a análise *Grey DEMATEL* não apenas revelou as interdependências entre os fatores, mas também ofereceu uma base empírica para a alocação estratégica de recursos, tornando-se essencial para o aprimoramento da maturidade logística no contexto da logística 5.0. A partir dos resultados apresentados nas Matrizes Totais Superior e Inferior (quadros 8 e 9), observa-se a intensidade das interações entre as cinco dimensões avaliadas: Inovação Tecnológica (IT), Sustentabilidade e Valor (SV), Integração da Cadeia (IC), Resiliência e Mitigação de Riscos (RM) e Humanização Organizacional (HU). Os dados demonstram que as dimensões IT, IC e RM exercem forte influência sobre as demais, com valores de impacto que ultrapassam 0,8 em diversas interações — evidenciando seu papel como vetores causadores.

Quadro 8 - Matriz Total Superior

Dimensão	IT	SV	IC	RM	HU
IT	0,3	0,9	0,9	0,8	0,8
SV	0,6	0,4	0,6	0,9	0,5
IC	0,9	0,9	0,3	0,8	0,8
RM	1,0	0,5	1,0	0,3	0,9
HU	0,9	0,9	0,9	0,8	0,3

Fonte: Autoria Própria (2025).

Destaca-se especialmente a RM, que apresenta impacto máximo de 1,0 em múltiplas relações, refletindo sua centralidade sistêmica e importância como alavanca estratégica. Em contraste, a dimensão SV apresenta valores de influência relativamente mais baixos, sendo mais impactada do que impactante, característica típica de dimensões resultantes. A consistência entre as matrizes reforça a robustez dos dados, e a partir dessa leitura, é possível estabelecer prioridades de intervenção, concentrando esforços nos fatores causadores para maximizar o avanço na maturidade logística.

Quadro 9 - Matriz Total Inferior

Dimensão	IT	SV	IC	RM	HU
IT	0,3	0,8	0,8	0,7	0,7
SV	0,5	0,4	0,5	0,8	0,4
IC	0,8	0,8	0,3	0,7	0,7
RM	0,8	0,4	0,8	0,3	0,8
HU	0,8	0,8	0,8	0,7	0,3

Fonte: Autoria Própria (2025).

Essas matrizes destacam as relações de interdependência entre as dimensões do sistema. O maior valor em T^+ indica a influência mais intensa no cenário otimista, enquanto o menor valor em T^- representa o impacto mais fraco no cenário conservador.

Em relação aos cálculos de Importância (D) e Efeito (R), insta-se explicar que foram realizados para identificar as dimensões mais importantes e suas características como causadoras ou influenciadas. Os resultados estão detalhados conforme os quadros 10 e 11.

Quadro 10 - Limite Superior (T^+)

Dimensão	Soma Linhas	Soma Colunas	Importância D	Efeito R
IT	3,8	3,7	7,5	0,1
SV	3,0	3,7	6,6	-0,7
IC	3,8	3,7	7,5	0,1
RM	3,6	3,6	7,2	-0,1
HU	3,9	3,4	7,3	0,5

Fonte: Autoria Própria (2025).

Entre as matrizes apresentadas, observa-se uma leve variação nos valores de influência direta e indireta entre as dimensões logísticas. Essa diferença evidencia a robustez da análise *Grey DEMATEL*, ao considerar múltiplas perspectivas para uma avaliação mais precisa e estratégica.

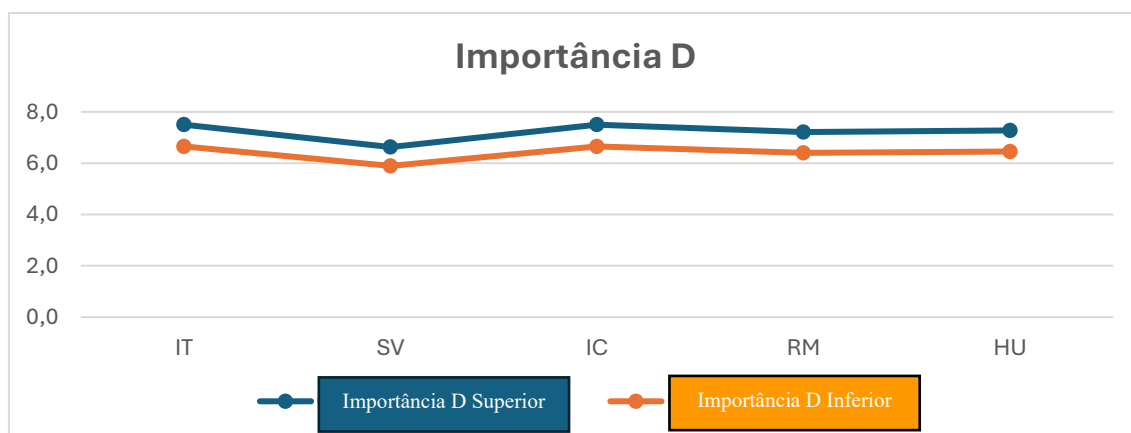
Quadro 11 - Limite Inferior (T-)

Dimensão	Soma Linhas	Soma Colunas	Importância D	Efeito R
IT	3,4	3,3	6,7	0,1
SV	2,6	3,3	5,9	-0,6
IC	3,4	3,3	6,7	0,1
RM	3,2	3,2	6,4	-0,1
HU	3,5	3,0	6,5	0,5

Fonte: Autoria Própria (2025).

Quanto à representação gráfica dos valores de Importância (D) e Efeito (R), nos limites superior e inferior, sua contribuição é para uma análise comparativa das dimensões avaliadas no modelo IMAL 5.0. Esses tipos de gráficos facilitam a visualização das variações entre os cenários, permitindo identificar quais dimensões se mantêm mais influentes e estáveis, independentemente da percepção de incerteza dos respondentes. O gráfico abaixo apresentado na figura 21 mostra os valores de Importância (D) para cada dimensão do índice (IT, SV, IC, RM, HU), considerando os limites superior e inferior. A Importância representa o grau de relevância sistêmica de cada dimensão, ou seja, a soma das influências que uma dimensão exerce e recebe dentro do sistema logístico.

Figura 21- Gráfico da Importância (D) por dimensão nos limites superior e inferior



Fonte: Autoria Própria (2025).

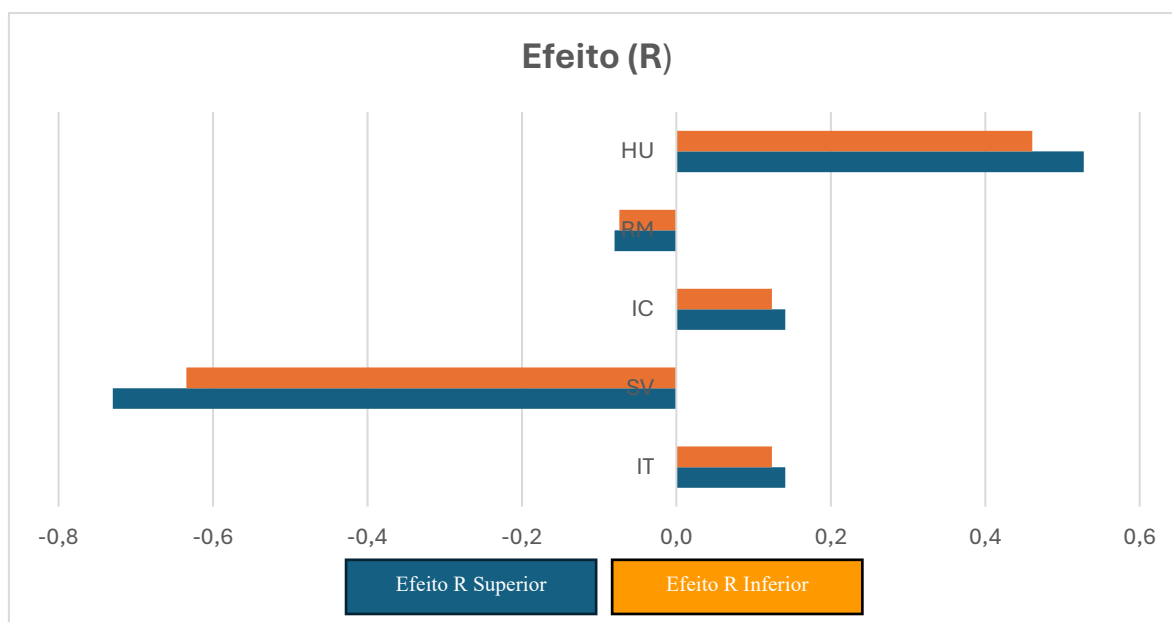
O gráfico da figura 20 apresenta a Importância (D) com as dimensões do Índice IMAL no eixo X (IT, SV, IC, RM e HU) e seus respectivos valores no eixo Y. É possível ainda observar a importância total de cada dimensão, considerando as influências que elas causam e recebem dentro do sistema, para os limites superior e inferior. Para este estudo ainda, infere-se que existem as devidas interpretações de cada dimensão:

- As dimensões IT (Inovação Tecnológica), IC (Integração de Cadeia) e HU (Humanização Organizacional) apresentam os maiores valores de Importância em ambos os limites, o que indica sua relevância global no sistema. Elas exercem grande influência e são significativamente impactadas pelas demais dimensões.
- A dimensão SV (Sustentabilidade e Valor) possui o menor valor de Importância, evidenciando sua menor importância global no sistema. Essa dimensão é mais influenciada do que influente.
- A dimensão RM (Resiliência de Mercado) apresenta valores intermediários de Importância, sugerindo que, embora seja relevante, sua influência total no sistema é menos expressiva do que as dimensões IT, IC e HU.
- Comparando os limites superior e inferior, nota-se uma pequena redução nos valores de RRR no cenário inferior, o que reflete uma leve diminuição na importância total das dimensões em um cenário mais conservador.

Após a análise da Importância (D), que evidenciou a importância sistêmica das dimensões no modelo IMAL 5.0, segue-se com a avaliação da Efeito (R). Essa etapa permite distinguir o papel estratégico de cada dimensão dentro do sistema logístico, classificando-as como causadoras ($R > 0$) ou resultantes ($R < 0$). A Figura 21 ilustra os valores de R nos limites superior e inferior, tornando possível observar as influências ativas e passivas entre os critérios. Esta distinção é fundamental para a formulação de políticas eficazes, pois direciona os esforços para os fatores que provocam maior impacto estrutural.

Desta maneira, no Gráfico de Efeito (R), os valores de R para cada dimensão no limite superior e inferior estão apresentados na figura 22. Esse gráfico diferencia claramente as dimensões causadoras ($R > 0$) e influenciadas ($R < 0$) intitulado “Gráfico do Efeito (R) por dimensão nos limites superior e inferior”.

Figura 22 - Gráfico do Efeito (R) por dimensão nos limites superior e inferior



Fonte: Autoria Própria (2025).

A saber, o gráfico de Efeito (R) é apresentado em barras horizontais, com valores positivos indicando dimensões causadoras e valores negativos projetando as dimensões influenciadas. Esse gráfico é essencial para entender o papel de cada dimensão no sistema. Para este estudo ainda, infere-se que existem as devidas interpretações de cada dimensão:

- A dimensão HU (Humanização Organizacional) é a mais causadora em ambos os limites ($R=0,5$). Isso significa que ela exerce uma influência significativa sobre as demais dimensões e deve ser considerada prioritária em estratégias para melhoria do sistema.
- A dimensão SV (Sustentabilidade e Valor) é consistentemente a mais influenciada ($R=-0,7$ no limite superior e $R=-0,6$ no inferior). Isso indica que SV é altamente impactada pelas outras dimensões e depende de mudanças em fatores externos para melhorar sua performance no sistema.
- As dimensões IT (Inovação Tecnológica) e IC (Integração de Cadeia) possuem valores de $R=0,1$ em ambos os limites, mostrando que são dimensões equilibradas, com uma leve tendência a serem causadoras. Elas desempenham um papel intermediário, tanto influenciando quanto sendo influenciadas por outras dimensões.

Para a dimensão RM (Resiliência Logística 5.0 e Mudanças Climáticas), observam-se valores de Efeito (R) próximos de zero ($R=-0,1$), indicando que essa dimensão é levemente influenciada pelas demais, mas mantém um comportamento relativamente estável e equilibrado dentro do sistema. Essa estabilidade sugere que RM não exerce forte influência sobre outras dimensões, tampouco é fortemente impactada por elas, assumindo um papel de neutralidade estratégica no modelo.

No que se refere à dimensão RM (Resiliência Logística 5.0 e Mudanças Climáticas), observa-se um valor de Efeito (R) bastante próximo de zero ($R = -0,1$), o que revela uma leve tendência a ser influenciada por outras dimensões do sistema, sem, no entanto, desempenhar um papel dominante ou passivo. Esse comportamento equilibrado sugere que, embora RM receba impactos de outras variáveis, sua posição dentro da rede de relações logísticas permanece relativamente neutra, mantendo certa estabilidade funcional no sistema como um todo. Ao comparar os limites superior e inferior das análises, nota-se que os valores de Efeito (R) tendem a ser ligeiramente mais intensos no limite superior, o que indica uma configuração onde as influências — tanto exercidas quanto recebidas — se manifestam de forma mais pronunciada. Essa diferença sutil sugere que, em contextos mais otimizados ou com maior integração, as relações entre os critérios logísticos se tornam mais evidentes. No entanto, o fato de a classificação das dimensões como causadoras ($R > 0$) ou influenciadas ($R < 0$) se manter estável entre os dois limites atesta a robustez do modelo utilizado.

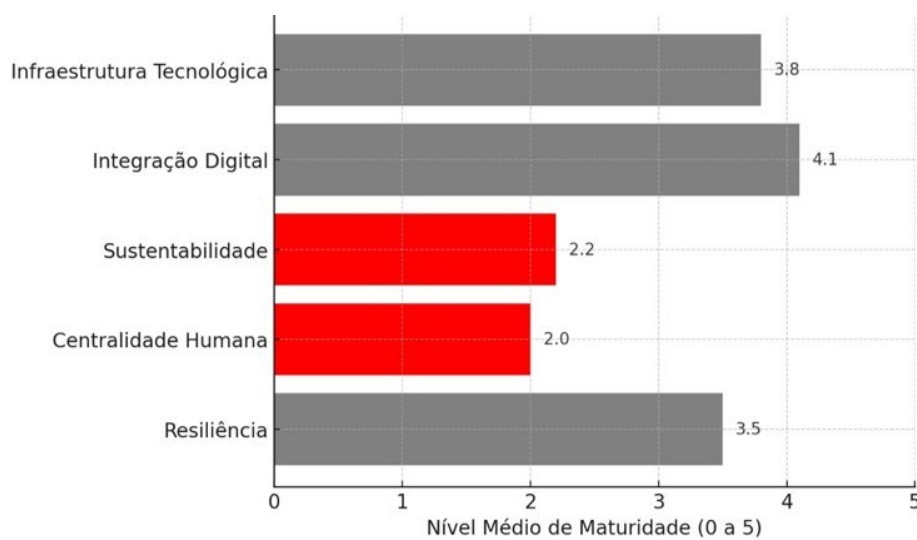
Essa consistência interpretativa entre cenários distintos reforça a confiabilidade analítica do IMAL 5.0 e valida a estrutura metodológica adotada. Desse modo, é possível afirmar que a identificação das dimensões prioritárias para intervenção estratégica na Logística 5.0 encontra-se embasada em fundamentos sólidos, tornando o modelo não apenas aplicável, mas estrategicamente relevante para o contexto do Polo Industrial de Manaus e em um futuro, podendo ser replicável para os demais setores restantes da ZFM, além do industrial, como agropecuário e comercial.

6.8.1 Análise comparativa entre as dimensões avaliadas

A figura 23 apresenta a síntese dos resultados obtidos a partir da aplicação do modelo IMAL 5.0 nas empresas do Polo Industrial de Manaus, evidenciando o nível médio de maturidade em cada uma das seis dimensões analisadas. Observa-se que *Integração Digital* (4,1), *Infraestrutura Tecnológica* (3,8) e *Resiliência Logística* (3,5) foram as dimensões com melhor desempenho, refletindo o avanço dessas organizações no uso de tecnologias

habilitadoras, automação de processos e capacidade de resposta a eventos adversos. Esses resultados indicam que, apesar das limitações estruturais da região amazônica, as empresas avaliadas têm investido em áreas estratégicas associadas à produtividade e eficiência operacional.

Figura 23- Nível médio de maturidade logística por dimensão – modelo IMAL 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

Por outro lado, as dimensões *Sustentabilidade* (2,2) e *Centralidade Humana* (2,0) apresentaram os menores níveis médios de maturidade, destacando fragilidades importantes no alinhamento dessas empresas com os princípios da logística 5.0. A baixa pontuação na dimensão de sustentabilidade sugere a ausência de práticas consistentes de logística verde, economia circular e metas ambientais mensuráveis. Já a baixa maturidade em centralidade humana aponta para deficiências nos programas de bem-estar, desenvolvimento de competências e inclusão no ambiente de trabalho. Esses achados reforçam a necessidade de políticas internas e públicas que priorizem a integração dos aspectos humanos e ambientais nas estratégias logísticas da região.

6.8.2 Interpretação consolidada dos gráficos

Diante da análise comparativa entre as dimensões avaliadas no modelo IMAL 5.0, torna-se evidente que, embora as empresas do Polo Industrial de Manaus apresentem avanços relevantes em aspectos tecnológicos e operacionais, ainda enfrentam desafios expressivos nas dimensões humanas e sustentáveis. Essa assimetria reforça a importância de se compreender não apenas os níveis médios de maturidade, mas também as interações sistêmicas que influenciam esses

resultados. Nesse sentido, os gráficos de Importância (D) e Efeito (R) aprofundam a análise ao evidenciar o papel estrutural de cada dimensão dentro do sistema logístico avaliado. A seguir, apresenta-se a síntese dessa dinâmica a partir da visualização gráfica das influências exercidas e recebidas pelas dimensões, contribuindo para uma leitura estratégica do comportamento interdependente entre os fatores críticos da Logística 5.0.

1. Dimensões Prioritárias:

- A dimensão HU (Aspecto Humano na Logística): destaca-se como prioritária para intervenções estratégicas, tendo em vista sua alta Importância e seu papel como fator causador no sistema. Isso indica que investimentos nessa área têm potencial para gerar impactos positivos em cascata sobre as demais dimensões da logística 5.0.

2. Dimensões Sensíveis:

- A dimensão SV (Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística): apresenta elevada sensibilidade ao sistema, sendo a mais influenciada entre todas. Esse comportamento evidencia sua forte dependência de fatores externos e destaca a necessidade de suporte contínuo para fortalecer suas bases estruturais e operacionais.

3. Dimensões Equilibradas:

- As dimensões TI (Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0) e IC (Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0): assumem posições intermediárias no sistema, atuando simultaneamente como influenciadoras e influenciadas. Essa condição de equilíbrio sugere que ambas possuem papel estabilizador no sistema logístico, sendo essenciais tanto para a difusão de boas práticas quanto para a recepção de avanços oriundos de outras dimensões.

A partir dos valores de Importância (D) e Efeito (R) obtidos nos limites superior (T^+) e inferior (T^-) da análise DEMATEL, foi possível agrupar as dimensões do Índice IMAL 5.0 em clusters distintos. Essa categorização tem como objetivo evidenciar os diferentes papéis que cada dimensão exerce no sistema logístico avaliado, considerando tanto sua influência total quanto sua natureza como elemento causador ou influenciado.

A Importância (D) reflete o grau de envolvimento sistêmico de cada dimensão, indicando a soma das influências exercidas e recebidas. Já a Efeito (R) representa o saldo entre influência exercida e recebida, permitindo identificar se a dimensão é

predominantemente causadora ($R > 0$) ou influenciada ($R < 0$). Com base nesses dois indicadores, as dimensões foram organizadas em três clusters estratégicos: (i) Causadoras e Fortes – aquelas com alta importância e efeito positivo, que exercem papel estruturante no sistema; (ii) Influenciadas e Fracas – com baixa importância e efeito negativo, representando pontos sensíveis e vulneráveis à atuação de outras dimensões; e (iii) Equilibradas – que apresentam importância moderada e efeito próximo de zero, atuando de forma balanceada, tanto como influenciadoras quanto influenciadas.

Essa classificação por cluster contribui para uma leitura mais estratégica dos resultados, orientando a priorização de políticas logísticas e intervenções específicas conforme a função sistêmica de cada dimensão no contexto do Polo Industrial de Manaus. Com os valores de Importância (D) e Efeito (R) obtidos nos limites superior (T^+) e inferior (T^-), os quais podem agrupar as dimensões do Índice IMAL em clusters. Esses clusters ajudam a categorizar as dimensões com base em seus papéis no sistema, considerando suas influências totais e características como causadoras ou influenciadas. A tipologia de clusters considera tanto o grau de influência de uma dimensão no sistema quanto sua susceptibilidade a influências externas. A seguir, são apresentados os critérios utilizados para definição dos clusters:.

1) Critérios para os Clusters

1. Dimensões Causadoras e Fortes:

- Alta Importância ($D > 7$) e Efeito Positivo ($R > 0$).
- Representam as dimensões que exercem grande influência no sistema.

2. Dimensões Influenciadas e Fracas:

- Baixa Importância ($D < 6,5$) e Efeito Negativo ($R < 0$).
- São as dimensões que sofrem maior impacto das outras.

3. Dimensões Equilibradas:

- Importância moderada ($6,5 < D < 7$) e Efeito próximo de Zero ($-0,1 < R < 0,1$).
- Dimensões que desempenham papéis intermediários, influenciando e sendo influenciadas de forma balanceada.

Com base nos resultados apresentados nos quadros 12 e 13 de cluster para os limites superior (T^+) e inferior (T^-), é possível observar variações importantes nas classificações das dimensões avaliadas. No limite superior (quadro 13), as dimensões IT (Infraestrutura Tecnológica) e IC (Integração e Colaboração) foram classificadas como equilibradas,

apresentando importância de 7,5 e efeito de 0,1, o que indica uma posição intermediária e estável no sistema.

Quadro 12 - Limite Superior (T+):

Dimensão	Importância (D)	Efeito (R)	Cluster
IT	7,5	0,1	Equilibrada
SV	6,6	-0,7	Influenciada e Fraca
IC	7,5	0,1	Equilibrada
RM	7,2	-0,1	Influenciada e Fraca
HU	7,3	0,5	Causadora e Forte

Fonte: Autoria Própria (2025).

As demais dimensões SV (Sustentabilidade) e RM (Resiliência) foram agrupadas como Influenciadas e Fracas, evidenciando alta dependência e menor capacidade de impactar o sistema de forma autônoma. Apenas a dimensão HU (Centralidade Humana) apresenta-se como causadora e forte, indicando uma alta capacidade de impactar o sistema de forma autônoma.

Já no limite inferior apresentado no quadro 13, houve uma mudança significativa na posição da dimensão HU, que passou a ser classificada como Causadora e Forte, com Importância de 6,5 e Efeito positivo de 0,5. Isso indica um papel mais ativo e estratégico da Centralidade Humana sob condições menos extremas. As dimensões IT, IC e RM mantiveram-se “Equilibradas”, com valores moderados e estabilidade de influência. SV permaneceu como Influenciada e Fraca, reforçando sua vulnerabilidade em ambos os cenários.

Quadro 13 - Limite Inferior (T-):

Dimensão	Importância (D)	Efeito (R)	Cluster
IT	6,7	0,1	Equilibrada
SV	5,9	-0,6	Influenciada e Fraca
IC	6,7	0,1	Equilibrada
RM	6,4	-0,1	Equilibrada
HU	6,5	0,5	Causadora e Forte

Fonte: Autoria Própria (2025).

Esses achados demonstram que a classificação das dimensões pode variar conforme o cenário (superior ou inferior), sendo crucial considerar ambas as perspectivas para decisões mais precisas. Essa análise por cluster oferece uma base estratégica para orientar investimentos e políticas específicas, priorizando intervenções em dimensões fragilizadas ou fortalecendo aquelas com maior poder de influência no sistema logístico do Polo Industrial de Manaus.

Com base na classificação dos clusters, torna-se possível interpretar de forma estratégica o papel sistêmico de cada dimensão avaliada. A análise detalhada das dimensões permite identificar aquelas que devem ser priorizadas em ações de intervenção imediata, bem como aquelas que funcionam como áreas de sustentação ou que exigem apoio de outras para se desenvolver. A seguir, apresenta-se a interpretação dos clusters identificados, considerando os resultados obtidos nos limites superior e inferior e sua correspondência com os critérios definidos para Importância (D) e Efeito (R). Essa leitura reforça o valor analítico do modelo IMAL 5.0 como ferramenta de apoio à tomada de decisão logística no contexto do Polo Industrial de Manaus conformas as descrições abaixo:

Dimensões Causadoras e Fortes:

- HU (Humanização Organizacional): é consistentemente a dimensão mais causadora, com $R > 0,5$ e alto efeito ($R > 7$ no limite superior). Isso destaca seu papel como um elemento-chave para gerar mudanças no sistema.

2. Dimensões Influenciadas e Fracas:

- SV (Sustentabilidade e Valor) é a dimensão mais influenciada: com efeito negativo ($R < 0,6$) e menor Importância ($D < 6,6$). Isso indica que SV depende de outras dimensões para melhorar seu desempenho.

3. Dimensões Equilibradas:

- IT (Inovação Tecnológica), IC (Integração de Cadeia) e RM (Resiliência de Mercado): têm Importância moderada ($6,5 \leq D \leq 7,5$) e Efeito próximo de zero ($-0,1 \leq R \leq 0,1$). Elas desempenham papéis intermediários no sistema, funcionando como pontes entre dimensões causadoras e influenciadas.

Em seguida, após interpretação dos clusters nos papéis sistêmicos desempenhados por cada dimensão no modelo IMAL 5.0, aprofunda-se para este momento a análise com o mapeamento das relações diretas e indiretas entre as dimensões, oferecendo uma visão ainda mais detalhada

sobre como as interdependências logísticas moldam a dinâmica organizacional no Polo Industrial de Manaus. Desta feita, seguem as recomendações estratégicas baseadas nos clusters:

1. Foco em Dimensões Causadoras:

- Investir em iniciativas que fortaleçam **HU**, pois melhorias nessa dimensão podem gerar impactos amplos no sistema.

2. Suporte para Dimensões Influenciadas:

- Desenvolver estratégias específicas para melhorar o desempenho de **SV**, reduzindo sua vulnerabilidade e dependência das outras dimensões.

3. Monitoramento de Dimensões Equilibradas:

- Observar o comportamento de **IT**, **IC** e **RM**, garantindo que mantenham sua função de equilíbrio e ligação no sistema.

Para aprofundar a compreensão da dinâmica sistêmica do modelo IMAL 5.0, o próximo passo consiste na análise das relações diretas e indiretas entre as dimensões avaliadas. Essa abordagem evidencia como as influências se distribuem e se propagam, permitindo identificar alavancas estratégicas e pontos de intervenção prioritários no sistema.

O mapeamento das relações diretas e indiretas no contexto do Índice IMAL fornece uma análise aprofundada das interações entre as dimensões avaliadas, permitindo compreender como as influências são exercidas de forma imediata e propagada no sistema. A partir dos resultados da matriz total de influência (TTT), este mapeamento destaca as conexões diretas, que refletem interações explícitas entre as dimensões, e as indiretas, que mostram os efeitos acumulados por meio de caminhos intermediários. Essa distinção é essencial para identificar pontos críticos e estabelecer estratégias direcionadas para melhorar a eficiência sistêmica.

Para iniciar o mapeamento das interações entre as dimensões do modelo IMAL 5.0, analisam-se primeiramente as relações diretas. Essas interações imediatas são fundamentais para compreender como uma dimensão exerce influência direta sobre outra, sem considerar os efeitos propagados no sistema. As relações diretas são capturadas pelos valores da matriz normalizada (D), que representam as interações imediatas entre as dimensões sem considerar a propagação de efeitos. Esses valores refletem como uma dimensão *i* impacta diretamente outra dimensão *j* no sistema, oferecendo uma visão objetiva das conexões mais visíveis.

Para a matriz normalizada, observa-se que HU (Humanização Organizacional) e IT (Inovação Tecnológica) exercem influências diretas uniformemente distribuídas sobre todas as

outras dimensões ($D_{ij}=0,15$). Isso sugere que essas dimensões têm papéis amplos e transversais no sistema, impactando de forma consistente os demais elementos. Essa característica reforça a importância de HU e IT como dimensões centrais, responsáveis por conduzir mudanças estratégicas.

Por outro lado, a dimensão SV (Sustentabilidade e Valor) recebe influências diretas mais significativas de IT e RM ($D_{ij}=0,1$), enquanto exerce menor impacto sobre as outras dimensões. Esse comportamento indica que SV é uma dimensão dependente, cujo desempenho está intrinsicamente ligado às contribuições externas. Estudos como os de Niemsakul *et al.*, (2025) sugerem que dimensões altamente influenciadas, como SV, devem ser alvo de estratégias integrativas para aumentar sua resiliência.

Ainda dentro das relações diretas, IC (Integração de Cadeia) e RM (Resiliência de Mercado) apresentam um comportamento intermediário. Ambas as dimensões causam e recebem influências diretas de forma equilibrada, destacando-se como mediadoras no sistema. Isso está alinhado com a literatura, que aponta a integração e a resiliência como fatores estabilizadores em sistemas logísticos complexos (Li *et al.*, 2014).

As influências diretas entre as dimensões são representadas pelos valores da matriz normalizada (D), antes da propagação das interações. Esses valores refletem a intensidade com que uma dimensão afeta outra de forma imediata conforme é possível inferir no quadro 14.

Quadro 14 - Relações Diretas (Valores da Matriz Normalizada D)

	IT	SV	IC	RM	HU
IT	0	0,15	0,15	0,15	0,15
SV	0,10	0	0,10	0,15	0,10
IC	0,15	0,15	0	0,15	0,15
RM	0,15	0,10	0,15	0	0,15
HU	0,15	0,15	0,15	0,15	0

Fonte: Autoria Própria (2025).

Para a interpretação das Relações Diretas, foram consideradas as seguintes premissas:

- **IT** influencia diretamente todas as outras dimensões com intensidade média ($D_{ij}=0,15$).

- **SV** sofre maior influência de **IT** e **RM** ($D_{ij}=0,1$) e exerce influência direta menor no sistema.
- **HU** exerce influência direta uniforme em todas as dimensões ($D_{ij}=0,15$).

Dando continuidade à análise, é fundamental explorar as relações indiretas entre as dimensões, que complementam as conexões diretas ao revelar influências difusas e acumuladas ao longo do sistema. Essa etapa amplia a compreensão das interdependências logísticas ao captar efeitos que se manifestam por meio de cadeias de interação mais complexas.

As relações indiretas vão além das interações imediatas, capturando os efeitos propagados no sistema por meio de caminhos intermediários. Esses efeitos são obtidos a partir das potências da matriz normalizada (D^2 , D^3 , ...), que acumulam as influências ao longo de múltiplas interações. Na matriz total (T), os valores das relações indiretas são adicionados aos das relações diretas, fornecendo uma visão global das interdependências.

No caso da análise do Índice IMAL, as dimensões HU e IT continuam a se destacar como elementos de alta influência, mesmo em cenários de propagação indireta. Por exemplo, os valores T_{ij} mostram que HU e IT têm impactos indiretos elevados em dimensões como IC e RM, sugerindo que suas interações não apenas afetam diretamente essas dimensões, mas também moldam as conexões mais amplas do sistema.

Dimensões como SV, por outro lado, exibem valores relativamente baixos nas influências indiretas ($T_{ij} \approx 0,05-0,07$). Isso reforça sua vulnerabilidade no sistema, pois seu impacto indireto é limitado, e ela depende fortemente de interações diretas para melhorar seu desempenho. De acordo com estudos como os de Li et al. (2014), dimensões com baixa propagação indireta são mais suscetíveis a flutuações sistêmicas, exigindo ações direcionadas para fortalecer suas conexões.

As dimensões IC e RM apresentam valores de influência indireta moderados ($T_{ij} \approx 0,08-0,09$), destacando sua posição como conectores no sistema. Isso significa que, embora não sejam os maiores influenciadores, desempenham um papel crítico na propagação de efeitos entre dimensões causadoras e influenciadas. Esses resultados corroboram a visão de que a integração e a resiliência são fundamentais para garantir a estabilidade e a continuidade

do sistema logístico. essas relações são capturadas na Matriz Total de Influência ($T=D+D^2+\dots$) de acordo com o quadro 15.

Quadro 15 - Relações Indiretas (Calculadas a partir de D^2)

	IT	SV	IC	RM	HU
IT	0,07	0,08	0,09	0,08	0,09
SV	0,06	0,04	0,05	0,07	0,05
IC	0,09	0,08	0,07	0,08	0,09
RM	0,08	0,07	0,09	0,06	0,09
HU	0,09	0,08	0,09	0,09	0,07

Fonte: Autoria Própria (2025).

Para a interpretação dessas Relações Indiretas conforme quadro 15, foram consideradas as seguintes premissas:

- **IT** gera influências indiretas significativas em **HU** e **IC** (0,09), indicando sua capacidade de impactar o sistema por meio de conexões intermediárias.
- **SV** apresenta valores mais baixos nas influências indiretas (0,04–0,07), reforçando seu papel como uma dimensão influenciada no sistema
- **HU** mantém influências indiretas altas em todas as dimensões (0,07–0,09), evidenciando seu papel como uma dimensão propagadora de efeitos.

6.8.3 Análise comparativa

Dando continuidade à análise dos resultados obtidos por meio da aplicação do método *Grey DEMATEL*, a etapa seguinte contempla uma análise comparativa entre as dimensões do modelo IMAL 5.0. Essa comparação visa identificar padrões de influência e dependência com base nos valores agregados de importância e efeito (matriz total T), oferecendo uma visão

consolidada do papel sistêmico de cada dimensão no contexto logístico estudado. Ao sintetizar os dados, a análise comparativa permite classificar as variáveis conforme sua contribuição estratégica para o desempenho global do sistema, funcionando como uma ponte entre a análise técnica e a formulação de políticas logísticas. A partir desses achados, é possível priorizar investimentos, alinhar recursos e desenvolver estratégias mais eficazes para a evolução da maturidade logística nas empresas do Polo Industrial de Manaus.

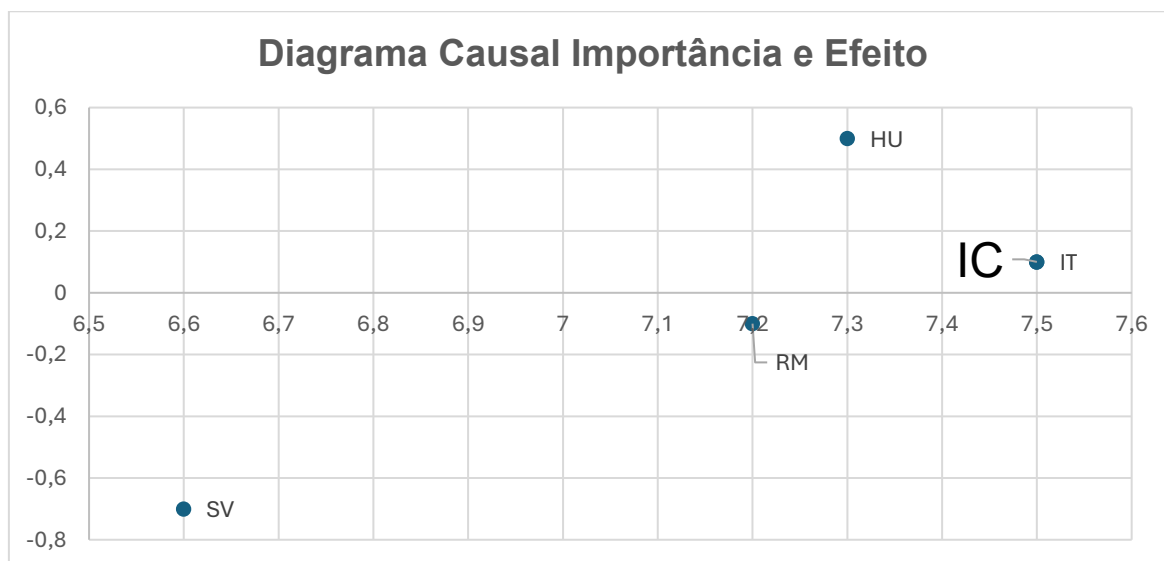
Ao comparar as relações diretas e indiretas, é possível identificar padrões importantes sobre o papel de cada dimensão no sistema. As dimensões HU e IT se destacam como influenciadoras em ambos os níveis, demonstrando sua capacidade de moldar o comportamento sistêmico tanto de forma imediata quanto por meio de conexões indiretas. Essa característica as posiciona como alavancas estratégicas para intervenções organizacionais.

Por outro lado, SV é consistentemente influenciada em ambos os níveis, reforçando seu papel como uma dimensão dependente. A combinação de baixa influência direta e indireta evidencia a necessidade de fortalecer suas conexões com outras dimensões, tornando-a menos vulnerável a mudanças externas. Estudos sobre sistemas multicritérios sugerem que a integração de dimensões influenciadas em redes de suporte mais amplas pode mitigar sua dependência e aumentar sua resiliência (Niemsakul *et al.*, (2025).

As dimensões IC e RM têm desempenhos equilibrados, servindo como mediadoras no sistema. Sua capacidade de facilitar a propagação de efeitos indiretos, aliada a uma influência direta moderada, as torna pilares estruturais que sustentam a conectividade geral. Esses resultados reforçam a importância de estratégias que promovam a estabilidade dessas dimensões, garantindo o fluxo contínuo de interações no sistema.

Para o mapeamento das relações diretas e indiretas no Índice IMAL destaca a complexidade das interações no sistema logístico. Dimensões como HU e IT emergem como causadoras principais, enquanto SV requer atenção especial para mitigar sua vulnerabilidade. As dimensões IC e RM desempenham papéis de equilíbrio, assegurando a conectividade sistêmica. Essas descobertas fornecem subsídios valiosos para estratégias organizacionais, enfatizando a importância de intervenções direcionadas em dimensões específicas para otimizar o desempenho geral do sistema. A figura 24 apresenta o diagrama causal entre as dimensões a qual sintetiza visualmente os papéis sistêmicos das dimensões do modelo IMAL 5.0 com base nos resultados do mapeamento de relações diretas e indiretas.

Figura 24 – Diagrama Causal entre as dimensões



Fonte: Autoria Própria (2025).

Conforme é possível inferir na figura 24, a dimensão HU (Humanização Organizacional), posicionada no quadrante superior direito, destaca-se como a principal causadora, combinando alta importância e efeito positivo, o que reforça seu papel estratégico como indutora de transformações no sistema logístico. Já a dimensão SV (Sustentabilidade e Valor), alocada no quadrante inferior esquerdo, apresenta baixa importância e efeito negativo, evidenciando sua vulnerabilidade e alta dependência das demais dimensões. Por sua vez, as dimensões IT (Infraestrutura Tecnológica), IC (Integração de Cadeia) e RM (Resiliência de Mercado) se distribuem em torno do eixo central, com valores intermediários, indicando funções equilibradas no sistema, atuando como vetores de conexão entre as demais variáveis. Essa representação gráfica confirma os achados da análise quantitativa, permitindo uma interpretação estratégica mais intuitiva e orientada à tomada de decisão.

Faz-se importante destacar também a interpretação textual do diagrama causal, que apresenta a relação entre os valores de Importância (D) e Efeito (R) das dimensões do Índice IMAL. No eixo horizontal (X), estão os valores de Efeito (RRR), que indicam se uma dimensão é predominantemente causadora ($R > 0$) ou influenciada ($R < 0$). Já no eixo vertical (Y), os valores de Importância (D) mostram a importância total de cada dimensão no sistema, considerando as influências diretas e indiretas. A distribuição das dimensões seguiu os padrões:

Para a distribuição das dimensões:

1. Quadrante superior direito (Altamente importante e causadora):

- **HU (Humanização Organizacional):** Posicionada no quadrante superior direito, essa dimensão combina alta Importância ($D=7,3$) e Efeito positivo ($R=0,5$). Isso indica que HU é uma das dimensões mais importantes no sistema e exerce forte influência sobre as demais.

2. Quadrante superior esquerdo (altamente importante e influenciada):

- Nenhuma dimensão foi posicionada neste quadrante, indicando que as dimensões altamente influenciadas não são os principais motores do sistema.

3. Quadrante Inferior Direito (moderadamente importante e causadora):

- **IT (Inovação Tecnológica) e IC (Integração de Cadeia):** Ambas as dimensões estão localizadas próximas ao eixo central com valores de Efeito ligeiramente positivos ($C=0,1C$) e alta Importância ($D=7,5$). Isso sugere que essas dimensões têm papéis equilibrados, influenciando o sistema de forma moderada.

4. Quadrante Inferior Esquerdo (menos importante e influenciada):

- **SV (Sustentabilidade e Valor):** Aparece como a dimensão mais influenciada, com baixo Efeito ($R=-0,7$) e menor Importância ($D=6,6$). Este posicionamento destaca a dependência de SV em relação às outras dimensões para melhorar seu desempenho. **RM (Resiliência de Mercado):** Embora moderadamente influenciada ($R=-0,1$), RM exibe Importância ($D=7,2$) suficiente para ser uma dimensão intermediária no sistema. A fim de complementar a análise posicional das dimensões no gráfico de dispersão, a introdução de linhas de referência torna-se essencial para delimitar, de forma objetiva, os limiares entre os papéis sistêmicos de cada variável. Essas linhas — uma horizontal, baseada na média de Importância (D), e outra vertical, centrada no valor neutro do Efeito ($R=0$) — funcionam como eixos interpretativos. Elas permitem uma leitura ainda mais clara sobre quais dimensões concentram maior influência estratégica ($D>7$) e quais se posicionam como causadoras ou influenciadas dentro da estrutura logística avaliada. A seguir, detalha-se a função dessas linhas na segmentação analítica do gráfico. Para as linhas de referência, os parâmetros abaixo foram utilizados:

Para as linhas de referência:

- **Linha Horizontal em D=7:** Indica a média da Importância. Dimensões acima dessa linha (HU, IT, IC e RM) são mais proeminentes no sistema, enquanto dimensões abaixo são menos relevantes.
- **Linha Vertical em R=0:** Divide as dimensões causadoras (à direita) das influenciadas (à esquerda). HU, IT e IC são causadoras, enquanto SV e RM são influenciadas.

Com base nas linhas de referência traçadas no diagrama causal, D=7 (Importância média) e R=0 (Efeito neutro) — é possível extrair três principais observações estratégicas:

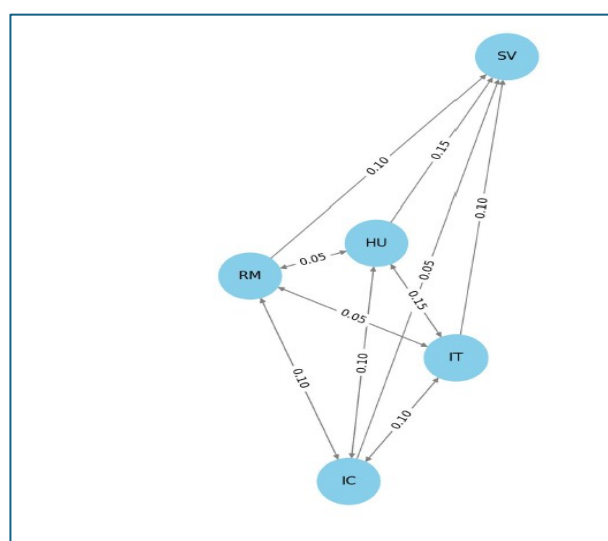
- **Dimensão Prioritária:** HU (Humanização Organizacional) é a única que se posiciona acima da média de Importância e com Efeito positivo, evidenciando seu papel central como dimensão causadora altamente influente e prioritária para intervenções sistêmicas.
- **Dimensão Vulnerável:** SV (Sustentabilidade e Valor) apresenta-se abaixo da linha de Importância e com Efeito negativo, caracterizando-se como a mais dependente e suscetível às influências externas. Requer atenção especial e políticas de fortalecimento.
- **Dimensões Equilibradas:** IT (Inovação Tecnológica), IC (Integração de Cadeia) e RM (Resiliência de Mercado) localizam-se em regiões próximas ao ponto médio, indicando um comportamento intermediário. Essas dimensões funcionam como mediadoras, exercendo influências moderadas enquanto também são impactadas de forma equilibrada pelo sistema.

Com base na análise da matriz de Importância (D) e Efeito (R), representada no diagrama causal, foi possível classificar as dimensões do modelo IMAL 5.0 em três categorias estratégicas: prioritária, equilibradas e vulnerável. A dimensão prioritária, Humanização Organizacional (HU), apresenta alta importância e efeito, evidenciando-se como eixo central para influenciar positivamente o sistema. As dimensões equilibradas, compostas por Tecnologia e Digitalização (IT), Integração da Cadeia Logística (IC) e Resiliência e Gestão de Riscos (RM), ocupam posições de impacto moderado, contribuindo de forma integrada à maturidade do sistema. Por fim, a dimensão vulnerável, Sustentabilidade e Valor (SV), aparece abaixo da média de importância, indicando menor influência e demandando atenção específica para sua efetividade sistêmica.

Na figura 25, é apresentado o Dígrafo de influência entre as dimensões do Índice IMAL50, no qual é possível visualizar que as dimensões HU e IT são as dimensões causadoras

e centrais, que tem forte influência nas outras dimensões. Responsáveis por conduzir mudanças estratégicas. E as dimensões RM, IC são as mais inter-relacionada, por apresentarem um comportamento intermediário, além de causar podem receber influências diretas de forma equilibrada, destacando-se como mediadoras no sistema. Já a dimensão SV possui uma característica de dimensão dependente e influenciada por todas as outras dimensões. Portanto, deve ser alvo de estratégias integrativas para aumentar sua resiliência.

Figura 25 – Dígrafo de Influência entre Dimensões do Índice IMAL 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

A partir dessa classificação, foi possível consolidar a estrutura conceitual e operacional do modelo IMAL 5.0, apresentada na Figura 24. O modelo foi desenvolvido para mensurar o nível de maturidade logística das empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM), considerando os princípios da Logística 5.0. Ele é composto por seis dimensões fundamentais: centralidade humana, resiliência, sustentabilidade, integração, tecnologia e digitalização. Cada dimensão foi desdobrada em pilares conceituais e indicadores-chave de desempenho (KPIs), construídos a partir de evidências científicas e ajustados à realidade amazônica.

Os indicadores permitem a avaliação prática do desempenho organizacional, favorecendo comparações entre empresas e a definição de estratégias de evolução logística. A dimensão humana valoriza a inclusão e a segurança dos trabalhadores; a resiliência refere-se à capacidade de enfrentar eventos disruptivos; a sustentabilidade enfatiza a responsabilidade socioambiental; a tecnologia aborda a automação e o uso de dados em tempo real; e a integração mede o grau de colaboração entre os elos logísticos.

O modelo aplica a metodologia *Grey DEMATEL* para mapear as inter-relações causais entre os critérios, além de utilizar médias ponderadas que expressam a influência sistêmica de cada dimensão. Dessa forma, o IMAL 5.0 se configura como uma ferramenta robusta para diagnóstico, planejamento e desenvolvimento estratégico da maturidade logística, alinhado aos desafios da Indústria 5.0.

CAPÍTULO VII. DISCUSSÃO DA PESQUISA

O IMAL 5.0 permitiu uma avaliação abrangente e detalhada da maturidade logística, destacando as áreas de força e de melhoria para cada empresa. Ao utilizar escalas de pontuação normalizadas e pesos diferenciados, o índice se tornou uma ferramenta flexível e adaptada ao contexto do PIM. Essa abordagem permitiu que as empresas pudessem identificar lacunas específicas em sua operação e possam desenvolver estratégias direcionadas para aprimorar sua logística, de modo a se alinharem aos requisitos da Logística 5.0, como sustentabilidade, automação, colaboração e resiliência (Choi e Siqin, 2022).

A construção do Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0) fundamentou-se em uma metodologia cientificamente validada, que combinou a aplicação de questionários estruturados e a utilização de ponderadas para avaliar a maturidade da logística das empresas. Esse índice foi baseado em modelos de avaliação de maturidade, amplamente adotados para mensurar o progresso e a adoção de práticas em diferentes áreas, como sustentabilidade, tecnologia e inovação (Instituto CMMI, 2018). A utilização de um índice que abrangeu múltiplas dimensões torna-se especialmente relevante no contexto da Logística 5.0, que exige uma análise complexa e integrada de vários fatores, como digitalização, sustentabilidade e o papel humano na cadeia logística.

Modelos de maturidade, como o IMAL 5.0, seguem uma abordagem baseada em níveis e dimensões, permitindo que as empresas identifiquem o grau de desenvolvimento em áreas específicas e obtenham uma visão abrangente de sua maturidade. Conforme defendido por De Bruin et al. (2005), uma aplicação de modelos de maturidade permite que as organizações avaliem seu desempenho de maneira holística e sistemática, forneçam uma estrutura sólida para a identificação de lacunas e o desenvolvimento de melhorias. A metodologia adotada no IMAL 5.0 incorporou esses princípios, dividindo a logística em cinco dimensões-chave: Tecnologia e Automação, Sustentabilidade e Práticas Verdes, Integração e Colaboração, Aspecto Humano e Resiliência Logística e Mudanças Climáticas.

A utilização de questionários como ferramenta de coleta de dados foi amplamente validada em pesquisas científicas, especialmente em estudos sobre modernidade organizacional e desempenho logístico. Segundo Hair et al. (2019), questionários estruturados são experimentais para coleta de percepções e opiniões de profissionais, uma vez que permitem a padronização das respostas, facilitando a análise quantitativa dos dados. No caso do IMAL 5.0,

a aplicação de questionários em diferentes cargas e setores dentro do Polo Industrial de Manaus (PIM) forneceu uma visão ampla e representativa das práticas logísticas da região, possibilitando uma análise multidimensional das respostas e uma comparação entre as áreas de atuação. Além disso, a utilização de escalas de concordância e perguntas binárias facilitou a quantificação das respostas, permitindo a aplicação de uma estrutura de classificação padronizada.

A metodologia de avaliação utilizada no IMAL 5.0 também foi fundamentada em práticas científicas consagradas para modelos de maturidade. De acordo com Wendler (2012), a pontuação em escalas, especialmente escalas Likert, permitiu capturar o nível de concordância ou adesão dos respondentes em relação às práticas específicas, facilitando a quantificação de atributos subjetivos, como percepção de adequação e adequação a práticas sustentáveis. No índice IMAL 5.0, cada resposta foi pontuada conforme uma escala de concordância (como "Baixo", "Médio" e "Alto") ou uma escala binária (Sim/Não), que permite uma análise detalhada e objetivamente quantificada de cada dimensão. Esse tipo de estrutura facilitou a comparação entre diferentes dimensões e permite a criação de um índice percentual, o que ajudou a visualizar rapidamente o grau de maturidade das empresas (Wendler, 2012).

A decisão de normalizar as previsões das dimensões, convertendo-as em percentuais de adequação, justificou-se pela necessidade de facilitar a interpretação dos dados e comparar as dimensões que possuem diferentes números de perguntas e pesos. A normalização é uma técnica amplamente utilizada na análise de dados quantitativos, pois permitiu que valores obtidos em escalas diferentes sejam comparados de maneira uniforme. Segundo Hair et al. (2019), a normalização dos dados é essencial para garantir a consistência dos resultados em análises comparativas, principalmente quando se trata de índices compostos que envolvem múltiplas dimensões. No IMAL 5.0, a normalização das quantidades das dimensões facilitou a interpretação dos resultados e permitiu uma visão comparativa das áreas em que as empresas são mais fortes ou onde ainda há necessidade de desenvolvimento.

A atribuição de pesos diferenciados para cada dimensão foi uma abordagem metodológica que visou refletir a importância relativa de cada área para a maturidade logística, especialmente em um contexto como o do PIM, onde sustentabilidade e resiliência são aspectos críticos. A ponderação das dimensões é uma prática comum em modelos de maturidade, pois permite que o índice final reflita melhor as prioridades específicas do setor ou região em análise. De acordo com Saaty (2008), a ponderação de critérios é essencial em modelos de decisão

multicritério, pois permite que cada ganho receba uma relevância proporcional à sua importância para os objetivos do modelo. No caso do IMAL 5.0, pesos mais altos podem ser atribuídos para as dimensões de Sustentabilidade e Resiliência Logística, refletindo a prioridade dessas áreas no contexto amazônico e nas exigências atuais de mercado e sociedade para práticas mais sustentáveis.

A fórmula para o design ponderado do IMAL 5.0, que considerou a média ponderada dos percentuais de cada dimensão, foi uma aplicação direta do conceito de média ponderada, utilizada em análises multicritério para agregar informações de diferentes fontes e fornecer um resultado integrado. Segundo Saaty (2008), a média ponderada é eficaz em modelos onde os critérios possuem importância diferenciada, pois permite que o índice final seja ajustado conforme as necessidades específicas do modelo de análise. O uso de pesos, somado à média ponderada das taxas normalizadas, tornou o IMAL 5.0 um índice flexível e adaptável às prioridades logísticas do PIM, promovendo uma análise equilibrada e cientificamente fundamentada.

Além de facilitar a identificação de lacunas, o IMAL 5.0 também permitiu a comparação entre diferentes empresas e setores, fornecendo um diagnóstico claro sobre o nível de maturidade logística no PIM. Essa comparabilidade é uma característica essencial para modelos de maturidade, pois permitiu que avaliassem seu progresso em relação a outras e identificou as melhores práticas em cada dimensão. Segundo De Bruin *et al.* (2005), um modelo de maturidade deve oferecer uma visão comparativa que orienta as organizações na busca por melhorias contínuas, incentivando o benchmarking e a adoção de práticas de referência. O IMAL 5.0 atendeu a esses critérios, permitindo que as empresas do PIM identificassem seu nível de atualização logística e adotem estratégias para avançar em direção a uma logística mais eficiente, sustentável e resiliente.

Por fim, o IMAL 5.0 contribuiu para a tomada de decisões estratégicas no PIM, oferecendo uma ferramenta prática e baseada em evidências para orientar melhorias nas operações logísticas. A metodologia de criação do índice, que combinou a coleta de dados quantitativos e a aplicação de uma estrutura de classificação ponderada, permite uma avaliação detalhada e prática do nível de atualização logística. Ao utilizar uma metodologia cientificamente validada, o IMAL 5.0 ofereceu uma base sólida para a análise e o desenvolvimento contínuo das práticas logísticas na região amazônica, promovendo uma

logística adaptada às exigências modernas de sustentabilidade, automação e integração (CMMI Institute, 2018).

Faz-se importante destacar que, a validação de modelos teóricos por meio de ensaios aplicados com amostras reduzidas tem sido amplamente reconhecida e legitimada pela literatura científica, sobretudo em estudos que lidam com sistemas complexos, com alta carga de interdependência entre variáveis e lacunas consolidadas de mensuração. No presente estudo, a aplicação do IMAL 5.0 junto a 28 especialistas do setor eletroeletrônico do Polo Industrial de Manaus configura-se como um ensaio pragmático orientado à validação estrutural e diagnóstica do modelo. Esse procedimento metodológico encontrou respaldo em abordagens multicritério robustas, como o método DEMATEL e sua variação *Grey DEMATEL*, cujo valor reside mais na qualidade técnica dos juízos do que na dimensão amostral.

O método DEMATEL, originalmente desenvolvido por Fontela e Gabus (1976), foi concebido com o propósito de mapear relações causais em sistemas complexos e interdependentes. Desde sua origem, os autores indicam que o foco não recai sobre grandes amostras, mas sobre a profundidade analítica resultante de painéis técnicos bem selecionados. A ênfase recai na expertise dos participantes e na capacidade do método em extrair, representar e quantificar inter-relações sistêmicas por meio de matrizes de influência. A lógica do método, portanto, é epistemologicamente compatível com amostras especializadas e reduzidas, especialmente em fases exploratórias de validação de modelos emergentes.

Corroborando esse entendimento, Niemsakul *et al.* (2025) reforçam que métodos como o *Grey DEMATEL* são especialmente indicados para ambientes com incerteza informacional e amostras reduzidas, pois permitem a modelagem de relações causais mesmo em cenários com poucos dados quantitativos disponíveis. Os autores argumentam que, em áreas como a Indústria 5.0, ainda em consolidação metodológica, estudos exploratórios com até 30 especialistas são adequados e oferecem insights valiosos para o amadurecimento dos modelos propostos.

Essa perspectiva é igualmente reforçada por Majeed *et al.* (2023), em artigo publicado na *Journal of Innovation & Knowledge*, no qual os autores aplicam o *Grey DEMATEL* com um painel restrito de especialistas para identificar os principais desafios da Indústria 5.0. Assim como na presente tese, o objetivo do estudo foi construir conhecimento prático por meio de um ensaio exploratório bem fundamentado, orientado a validar a lógica e a estrutura do modelo. A conjunção desses referenciais justificou plenamente a abordagem adotada nesta pesquisa,

destacando o valor do ensaio aplicado como etapa legítima de validação científica em contextos complexos e emergentes.

Desta feita, a análise dos resultados obtidos por meio da aplicação do modelo IMAL 5.0 revelou achados relevantes sobre a maturidade da Logística 5.0 nas empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM), permitindo uma interpretação alinhada às transformações propostas pela Indústria 5.0 e à literatura especializada em maturidade logística, integração homem-máquina e tecnologias inteligentes.

Eixo 1 – Importância e Influência dos Fatores

A Matriz de Influência Direta e Total, construída com base na metodologia DEMATEL, revelou a existência de fatores com alta importância e efeito, indicando que esses elementos desempenham papel estruturante na dinâmica da maturidade logística 5.0. O indicador de importância (D+R), que revela o grau de importância de um fator no sistema, evidenciou a dominância de atributos como Integração Tecnológica, Capacitação de Pessoas e Digitalização de Processos. Esses achados corroboram os estudos de Romero e Stahre (2021) e Ghobakhloo et al. (2023), que apontam para a necessidade de uma simbiose entre tecnologia e fator humano como pilar da Logística 5.0.

Por sua vez, a análise do grau de relevância (D–R), que distingue causas e efeitos, permitiu identificar quais dimensões atuam como propulsoras (variáveis causais) e quais são os desdobramentos (variáveis de efeito) do sistema logístico. A categoria Automação com Interação Humana, por exemplo, apareceu como altamente causadora, o que reforça a visão de Oleśków-Szłapka e Stachowiak (2018) de que a Logística 5.0 não se resume à robotização, mas sim à integração inteligente entre humanos e máquinas.

Eixo 2 – Diagnóstico de Maturidade Setorial

A média geral do nível de maturidade entre as empresas participantes se concentrou no nível 3 (intermediário), demonstrando avanços importantes, mas ainda distantes da plena adoção dos princípios da Logística 5.0. Esse resultado dialoga com a literatura recente (Xu et al., 2021; Yoon et al., 2020), que alerta para o hiato existente entre os conceitos avançados da Indústria 5.0 e sua efetiva implementação nos setores produtivos da América Latina.

Em particular, observou-se que empresas com maior maturidade apresentaram uma governança robusta de dados, investimentos consistentes em formação continuada e uma cultura organizacional voltada para a inovação colaborativa. Esses pontos são destacados por

De Bruin et al. (2005) como características de organizações com maturidade elevada em qualquer domínio.

Eixo 3 – Barreiras e Aceleradores para a Logística 5.0 no PIM

A aplicação do modelo também possibilitou a identificação de barreiras latentes, tais como:

a) dificuldade de integração de tecnologias preexistentes com novos sistemas inteligentes;

b) ausência de políticas de inovação de longo prazo;

c) déficit de mão de obra qualificada para operar tecnologias 5.0.

d) Em contrapartida, atuam como aceleradores:

e) políticas de incentivos fiscais na Zona Franca de Manaus;

f) presença de multinacionais com forte cultura de P&D;

g) redes de colaboração com ICTs locais.

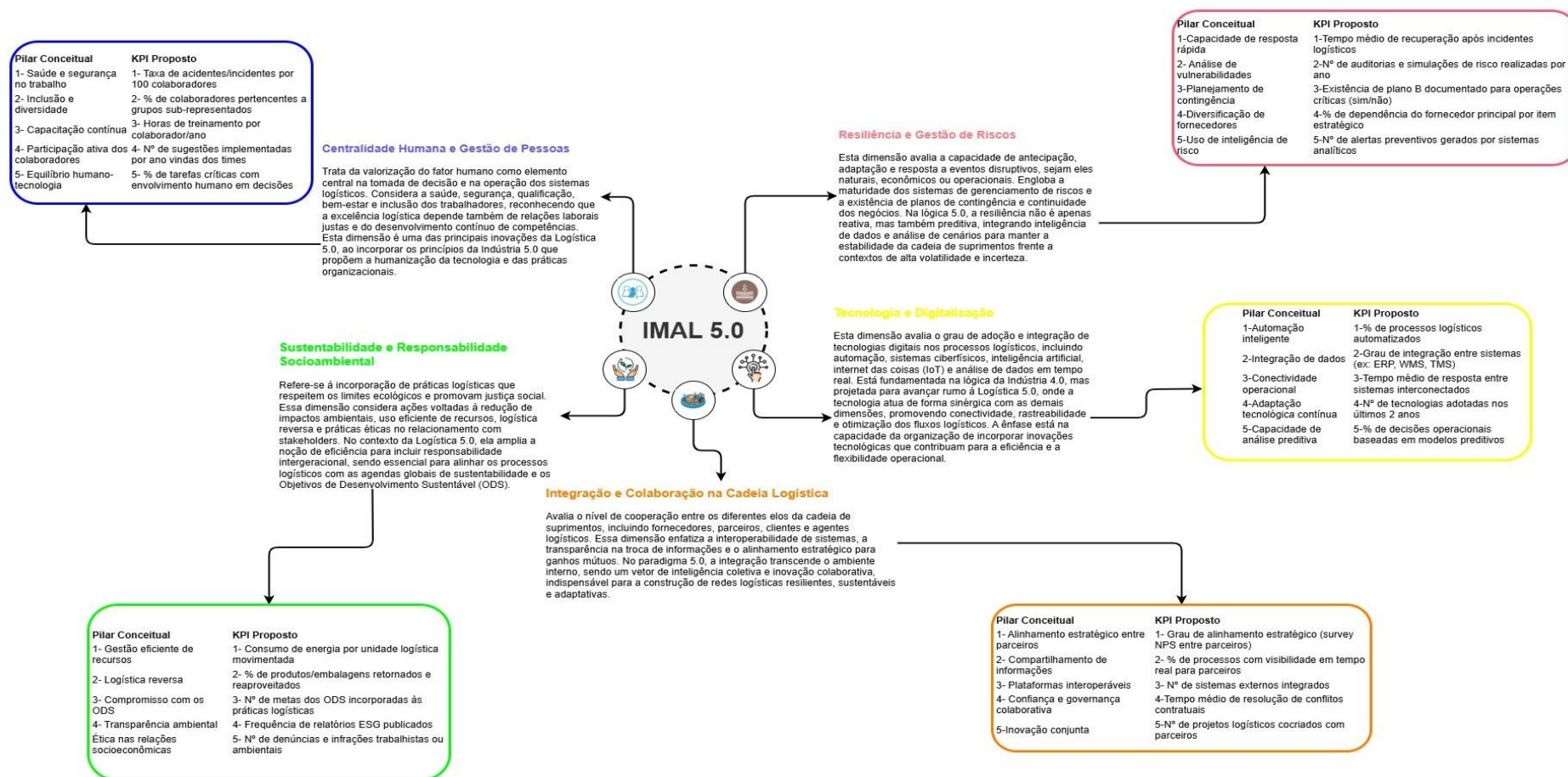
Esses achados reforçam o papel dos ecossistemas de inovação regionais, como apontado por Chesbrough (2020) e Christensen (2019), na superação de entraves à transformação digital sustentável. Ao mesmo tempo, destacam a importância de políticas públicas orientadas à empregabilidade 5.0 e à formação de competências digitais.

Eixo 4 – Aplicabilidade do Modelo IMAL 5.0

O modelo IMAL 5.0 demonstrou viabilidade metodológica e praticidade operacional para avaliar e comparar empresas dentro de um mesmo polo industrial. Sua estrutura híbrida, combinando maturidade por estágios com análise de interdependência causal (via DEMATEL), amplia sua capacidade de diagnóstico. Essa abordagem se alinha aos modelos integrativos sugeridos por autores como De Bruin et al. (2005) e CMMI Institute (2020), adaptados agora ao contexto amazônico.

O fato de o modelo ter sido aplicado com sucesso junto a empresas industriais reais do PIM, respeitando os princípios da Lei da Informática e com aderência aos pilares ESG, reforça seu potencial de replicabilidade para políticas públicas de fomento logístico e tecnológico.

Figura 26 - Estrutura conceitual e operacional do modelo IMAL 5.0

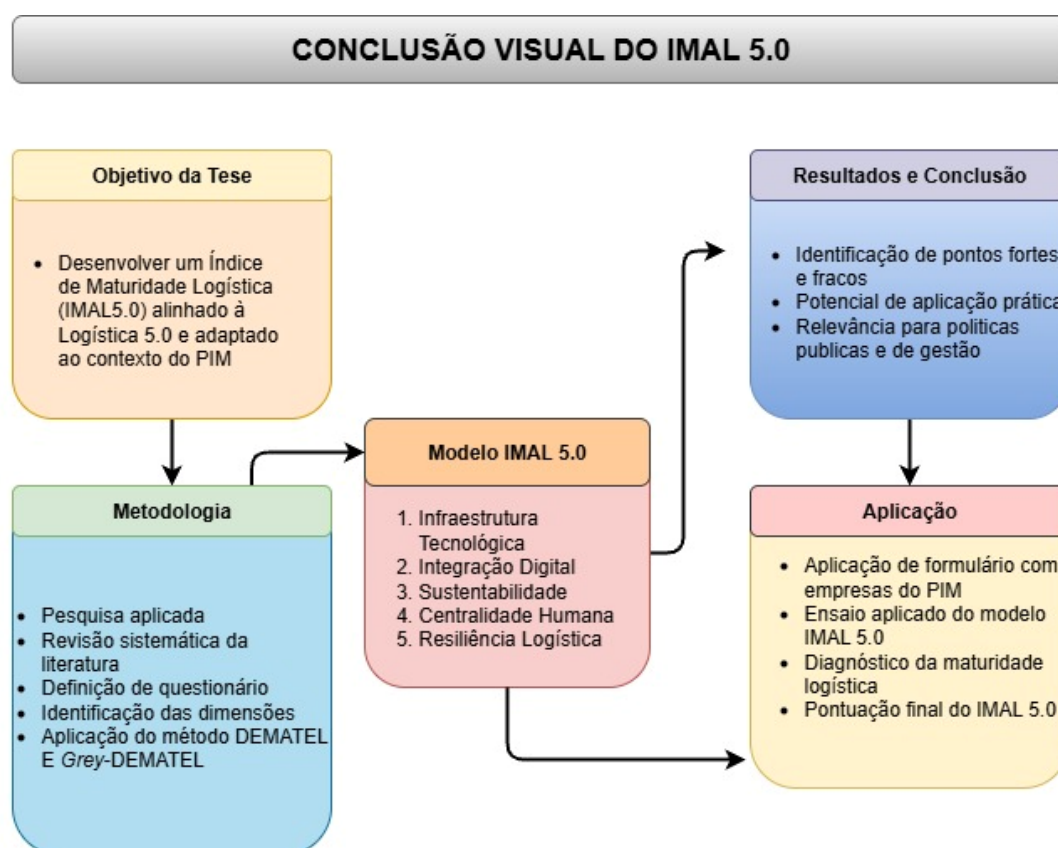


Fonte: Autoria Própria (2025)

CONCLUSÃO

A presente tese teve como propósito central desenvolver, aplicar e validar um modelo de medição da maturidade da Logística 5.0 — o IMAL 5.0 — a partir de uma abordagem sistêmica e interrelacional, com aplicação prática no PIM. Esse esforço surgiu diante do reconhecimento de que os modelos tradicionais de maturidade logística, majoritariamente ancorados nas diretrizes da Indústria 4.0, já não atendem plenamente às exigências contemporâneas de sistemas logísticos que operam sob crescente complexidade sociotécnica, ambiental e tecnológica. A logística 5.0, enquanto campo emergente de estudo e prática, demanda uma nova arquitetura de avaliação, capaz de integrar não apenas dimensões técnicas e operacionais, mas também aspectos humanos, colaborativos, resilientes e sustentáveis. A figura 27 traz a conclusão visual para o modelo IMAL 5.0.

Figura 27 - Conclusão visual do modelo IMAL 5.0



Fonte: Autoria Própria (2025).

A figura 26, apresenta o fluxograma esquemático que sintetiza as principais etapas metodológicas, conceituais e empíricas da pesquisa. Ainda, de forma integrada, a ilustração traz o objetivo central da tese, a metodologia adotada, os componentes estruturais do modelo

IMAL 5.0, sua aplicação em empresas do Polo Industrial de Manaus e os principais resultados e contribuições. Essa representação gráfica evidencia o encadeamento lógico da proposta, destacando a originalidade do índice desenvolvido e sua relevância para a gestão logística orientada à Indústria 5.0.

A pesquisa partiu da constatação de que há um descompasso entre os avanços teóricos na literatura internacional e a capacidade de aplicação prática desses modelos em realidades industriais de países em desenvolvimento, especialmente na Amazônia brasileira. Tal constatação foi evidenciada na revisão integrativa da literatura, que apontou fragilidades importantes nos modelos de maturidade existentes: foco excessivo em digitalização, ausência de critérios relacionados à empatia organizacional e à centralidade humana, subvalorização da sustentabilidade e escassez de validação empírica em ambientes periféricos. Essa lacuna teórico-prática motivou a construção de um modelo próprio, com foco no contexto logístico do PIM, uma das regiões industriais mais complexas e ambientalmente sensíveis do Brasil.

O IMAL 5.0 foi concebido a partir de seis dimensões estruturantes: infraestrutura tecnológica, integração digital, sustentabilidade, centralidade humana, resiliência e desempenho operacional. A escolha dessas dimensões não foi arbitrária. Ao contrário, resultou de um esforço sistemático de análise crítica da literatura, combinada com a escuta ativa de especialistas e gestores industriais da Zona Franca de Manaus. O método DEMATEL foi utilizada como ferramenta multicritério para identificar e hierarquizar as relações de causa e efeito entre os critérios de maturidade, revelando quais fatores atuam como elementos catalisadores da transformação logística e quais são mais suscetíveis a influências externas.

Os resultados da aplicação empírica do modelo — realizada junto a 28 especialistas do setor eletroeletrônico do PIM — evidenciaram um diagnóstico robusto e, ao mesmo tempo, preocupante: embora as empresas avaliadas apresentem avanços expressivos em infraestrutura tecnológica e automação, revelam baixa maturidade nas dimensões de sustentabilidade e centralidade humana. Esse resultado reforça a hipótese de que a transição para a Logística 5.0 ainda está em curso e que parte significativa das organizações permanece ancorada em paradigmas da eficiência produtiva da Indústria 3.0 e 4.0. Tal assimetria evidencia a urgência de ações que promovam a ressignificação das práticas logísticas sob o prisma da empatia organizacional, da colaboração homem-máquina e do compromisso ambiental.

A escolha metodológica pelo uso articulado de DEMATEL e Grey-DEMATEL mostrou-se acertada ao permitir que as percepções dos especialistas fossem tratadas com rigor

técnico e sensibilidade analítica. A modelagem gerou uma matriz de influência capaz de capturar com precisão os pesos causais e resultantes de cada critério, permitindo a construção de mapas de impacto e a priorização de intervenções estratégicas. Com base nessas análises, foi possível propor um índice integrado — o IMAL 5.0 — que mensura, com base em percentuais normalizados, o grau de aderência das empresas aos princípios da Logística 5.0.

Mais do que um diagnóstico, o IMAL 5.0 se consolidou como um instrumento prescritivo, oferecendo às organizações um roteiro prático para evolução logística. O modelo possibilita a identificação de lacunas prioritárias, a orientação de investimentos em capacitação, tecnologia e gestão, e a definição de metas de curto, médio e longo prazo alinhadas à maturidade atual da organização. Trata-se, portanto, de uma ferramenta estratégica com elevado potencial de aplicação tanto em empresas privadas quanto em políticas públicas de fomento à inovação e à sustentabilidade.

Do ponto de vista científico, a tese contribui para o avanço da teoria sobre modelos de maturidade aplicados à logística, ao propor uma estrutura que ultrapassa os limites tradicionais das avaliações técnico-operacionais. O modelo aqui apresentado articula dimensões emergentes, como resiliência climática, empatia organizacional e integração homem-máquina, expandindo o escopo analítico da maturidade logística e respondendo às novas demandas da era pós-digital. Além disso, a combinação do DEMATEL + *Grey Systems*, raramente explorada em estudos logísticos no Brasil, amplia as possibilidades de aplicação dos métodos multicritério em análises de sistemas sociotécnicos complexos.

A originalidade da pesquisa também reside na sua capacidade de contextualização territorial. Ao ser aplicado no PIM, o IMAL 5.0 foi testado em um ambiente industrial com características logísticas únicas: distâncias geográficas extremas, dependência de modais de transporte limitados, presença significativa de políticas de incentivo fiscal e crescente pressão por sustentabilidade. A compatibilidade do modelo com essas especificidades demonstra sua flexibilidade e robustez, abrindo caminho para sua replicação em outras regiões industriais do Brasil e da América Latina que enfrentam desafios semelhantes de modernização e adaptação à Indústria 5.0.

Outro aspecto relevante diz respeito à aplicabilidade do modelo no processo de planejamento estratégico empresarial. O IMAL 5.0 pode ser incorporado como instrumento de auditoria interna, avaliação de risco logístico ou mesmo como base para relatórios ESG. Ao mensurar dimensões críticas da maturidade logística com base em critérios objetivos e

alinhados a tendências globais, o índice oferece às organizações uma ferramenta prática de compliance, inovação e competitividade. Adicionalmente, pode ser utilizado por agências de fomento, governos e instituições de pesquisa como mecanismo de monitoramento de políticas industriais, programas de transformação digital e iniciativas voltadas à neointustrialização sustentável.

A tese também reforça o papel da logística como vetor estratégico para o desenvolvimento regional e nacional. Ao propor um modelo de maturidade orientado por dados, adaptável e replicável, a pesquisa reconhece a logística não apenas como uma função de suporte às operações produtivas, mas como um campo decisivo para o sucesso organizacional, a transição verde e a integração social no contexto amazônico. O modelo IMAL 5.0 contribui, assim, para reposicionar a logística no centro da discussão sobre inovação, sustentabilidade e inclusão produtiva, especialmente em territórios vulneráveis, como a Amazônia Ocidental.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, constatou-se que a maturidade logística não é uma condição estática ou linear. Trata-se de um processo dinâmico, multidimensional e contingente, que exige contínua avaliação, aprendizado organizacional e adaptação estratégica. Os fatores críticos que compõem esse processo são, por definição, interdependentes e sujeitos a múltiplas influências — tecnológicas, humanas, institucionais e ambientais. Por isso, o valor analítico do IMAL 5.0 reside justamente na sua capacidade de captar essas inter-relações, oferecendo um panorama mais realista e acionável das capacidades logísticas das organizações.

Adicionalmente, a pesquisa mostrou que, para além da tecnologia, a maturidade logística na Indústria 5.0 depende de um novo tipo de cultura organizacional — uma cultura baseada na empatia, na adaptabilidade, na colaboração e na orientação ao propósito. Empresas que não reconhecem o papel do fator humano como pilar de transformação logística tendem a reproduzir modelos ultrapassados de gestão, centrados na eficiência a qualquer custo e insensíveis aos impactos sociais e ambientais de suas operações. Nesse sentido, o IMAL 5.0 funciona também como um alerta: a maturidade tecnológica, por si só, não garante a maturidade organizacional.

A convergência entre teoria e prática foi uma das preocupações centrais desta pesquisa. Todo o processo de modelagem foi conduzido com rigor científico, mas também com sensibilidade à aplicabilidade real do modelo. Desde a definição dos critérios, passando pela coleta de dados, até a validação empírica com especialistas do PIM, cada etapa foi pensada

para garantir que o IMAL 5.0 fosse mais do que um constructo acadêmico: uma ferramenta viva, útil e capaz de gerar valor para as organizações e para a sociedade.

Conforme demonstrado na análise final, o modelo também possui grande potencial de ser integrado a plataformas digitais, dashboards de gestão e sistemas de inteligência de negócios, ampliando sua utilidade prática. Sua estrutura baseada em questionários estruturados e cálculo por média ponderada o torna facilmente operacionalizável, inclusive por pequenas e médias empresas com recursos limitados. Essa característica reforça seu potencial como instrumento de democratização da inovação logística.

Por fim, é importante destacar que esta tese representa um ponto de partida, e não um ponto de chegada. O IMAL 5.0 é um modelo vivo, aberto à atualização, ao refinamento e à adaptação. Sua aplicação em outros setores, regiões e escalas poderá revelar novas variáveis, interações e desafios. Nesse sentido, convida-se a comunidade científica e profissional a continuar esse debate, explorando novas formas de mensuração, integração e gestão da maturidade logística em tempos de transformação.

A era da Logística 5.0 já começou — e com ela surgem novas exigências, novas possibilidades e novas responsabilidades. Este trabalho contribui para essa transição ao oferecer uma bússola metodológica para navegar em um cenário logístico cada vez mais inteligente, humano e sustentável. O Polo Industrial de Manaus, por sua relevância econômica, ambiental e simbólica, se apresenta como o lugar ideal para essa inovação logística nascer, ser testada e, principalmente, inspirar outros territórios a seguirem o mesmo caminho.

Limitações da Pesquisa

Embora esta tese tenha alcançado seu objetivo central de desenvolver, aplicar e validar um modelo de medição da maturidade da Logística 5.0, algumas limitações precisam ser reconhecidas com transparência e rigor científico, tanto para delimitar o escopo dos achados quanto para orientar estudos futuros. As limitações aqui apresentadas dizem respeito a aspectos metodológicos, empíricos e teóricos que, embora não comprometam a validade da pesquisa, impõem restrições à generalização, à abrangência e à replicabilidade imediata do modelo proposto.

A primeira limitação refere-se ao recorte amostral adotado. A aplicação do modelo IMAL 5.0 foi realizada com base em um conjunto de 28 especialistas atuantes no setor eletroeletrônico do Polo Industrial de Manaus (PIM). Embora os participantes tenham sido selecionados por critérios de experiência, cargo e envolvimento direto com a cadeia de

suprimentos, o número relativamente reduzido de respondentes pode limitar a representatividade estatística dos resultados. Ainda que o método DEMATEL e, em especial, a abordagem *Grey* DEMATEL, sejam adequadas para lidar com amostragens qualitativas, o poder de inferência quantitativa permanece restrito, sobretudo em contextos em que se deseje extrair médias generalizáveis para todo o PIM ou outros polos industriais.

Uma segunda limitação importante diz respeito à delimitação do escopo da logística analisada. Esta pesquisa se concentrou na logística da produção — também chamada de logística interna —, o que inclui processos como recebimento de insumos, abastecimento de linhas, movimentação interna, controle de qualidade e expedição. Embora essa delimitação tenha sido metodologicamente justificável, dada a complexidade e a densidade de informações exigidas na avaliação, ela restringe a aplicabilidade direta do IMAL 5.0 a outras vertentes logísticas igualmente relevantes, como a logística de distribuição, a logística reversa, a logística de última milha ou os sistemas de transporte intermodal. Dessa forma, a análise não abrange toda a cadeia logística em sua plenitude, o que pode limitar sua utilização em modelos mais amplos para a gestão da cadeia de suprimentos.

A terceira limitação refere-se à dependência do julgamento humano especializado, um traço inerente às metodologias multicritério baseadas em conhecimento tácito, como o DEMATEL. Ainda que o uso de escalas padronizadas e a aplicação do *Grey*-DEMATEL tenham buscado mitigar a subjetividade nas respostas, não é possível eliminar por completo os vieses cognitivos, culturais ou institucionais que possam ter influenciado as percepções dos respondentes. A interpretação de conceitos como “sustentabilidade”, “resiliência” ou “centralidade humana” pode variar significativamente entre indivíduos, mesmo quando expostos a definições operacionais similares. Isso reforça a necessidade de futuras pesquisas adotarem métodos triangulados, com múltiplas fontes de dados e técnicas complementares, como entrevistas em profundidade, grupos focais ou observação participante.

Outro aspecto limitante está relacionado à ausência de uma avaliação longitudinal. O modelo IMAL 5.0 foi aplicado em um único ciclo de coleta de dados, com enfoque transversal, ou seja, capturando percepções e diagnósticos em um momento específico no tempo. Tal abordagem, embora útil para o desenho inicial do modelo e sua validação preliminar, não permite acompanhar a evolução da maturidade logística das empresas ao longo do tempo, tampouco medir o impacto de intervenções estratégicas realizadas posteriormente. Para que o IMAL 5.0 possa ser utilizado como ferramenta de monitoramento contínuo, seria necessário estabelecer séries temporais, com aplicações regulares e sucessivas em períodos distintos, o

que pode representar uma oportunidade para pesquisas futuras, mas constitui uma limitação da presente investigação.

Também se destaca como limitação a concentração geográfica da aplicação empírica, restrita ao Polo Industrial de Manaus. Embora o PIM represente um ecossistema industrial de elevada complexidade logística e grande relevância nacional, seus condicionantes estruturais — como a dependência de incentivos fiscais, a distância dos centros consumidores e a localização em uma região ambientalmente sensível — podem torná-lo um caso atípico se comparado a outros polos industriais brasileiros. Portanto, os resultados e recomendações derivados do modelo devem ser interpretados com cautela ao serem extrapolados para outras realidades produtivas, como as da região Sudeste, do agronegócio do Centro-Oeste ou dos clusters de tecnologia do Sul do país. A replicação do modelo em outras regiões industriais será essencial para validar sua aplicabilidade ampla e refinar seus critérios.

Finalmente, a restrição de tempo e recursos, inerente à condução de uma pesquisa de doutorado, impôs limites ao aprofundamento em análises estatísticas complementares, como regressões múltiplas, modelagem de equações estruturais ou redes neurais. Embora essas técnicas não fossem centrais ao objetivo da pesquisa, poderiam ter ampliado a robustez quantitativa do modelo, especialmente no que diz respeito à validação de clusters de maturidade e análise de correlações entre variáveis latentes. Essa limitação abre espaço para colaborações interinstitucionais e interdisciplinares que venham a expandir o modelo com novos métodos, instrumentos e tecnologias analíticas.

Em síntese, as limitações aqui reconhecidas não invalidam os resultados e as contribuições desta pesquisa, mas antes reforçam seu caráter exploratório e inovador. Ao mesmo tempo, indicam caminhos para o aprimoramento metodológico, empírico e teórico do modelo IMAL 5.0, especialmente no que tange à ampliação de sua aplicabilidade, à diversificação das técnicas de análise e à construção de um ecossistema de dados mais robusto, longitudinal e geograficamente distribuído. O reconhecimento dessas limitações é parte fundamental da transparência científica e da construção de um conhecimento cumulativo e colaborativo, que se renova a cada nova aplicação, crítica e refinamento do modelo proposto.

Contribuições para estudos futuros

A construção do modelo IMAL 5.0, fundamentado na perspectiva da Logística 5.0 e aplicado ao Polo Industrial de Manaus, abriu um conjunto promissor de possibilidades para a continuidade e expansão deste campo de investigação. Embora a presente pesquisa tenha

alcançado seu propósito ao propor e validar um índice capaz de mensurar a maturidade logística em sistemas complexos, os resultados obtidos indicam diversas frentes de aprofundamento teórico, metodológico e aplicado que podem ser exploradas por estudos futuros.

Um dos caminhos mais imediatos consiste na ampliação da aplicação empírica do modelo para outros setores industriais além do eletroeletrônico, como o químico, farmacêutico, metalúrgico, agroindustrial ou de bens de consumo. A heterogeneidade dos setores produtivos brasileiros — em termos de complexidade logística, grau de automação, inserção tecnológica e sensibilidade ambiental — pode enriquecer o modelo com novos critérios, pesos relativos e dinâmicas interdependentes, permitindo uma avaliação mais abrangente da maturidade logística nacional. Estudos comparativos entre polos industriais, como Manaus, Campinas, Joinville e Salvador, também podem oferecer insumos valiosos sobre as diferenças regionais na transição para a Logística 5.0.

Além disso, recomenda-se que pesquisas futuras invistam na validação estatística e refinamento técnico do modelo IMAL 5.0, utilizando técnicas como análise fatorial confirmatória, modelagem de equações estruturais ou análise de agrupamentos (*cluster analysis*). Essas abordagens podem auxiliar na verificação de consistência interna dos critérios, na identificação de padrões de maturidade entre empresas e na construção de perfis logísticos que orientem políticas públicas de fomento, programas de capacitação ou linhas de crédito específicas para setores com baixa maturidade.

Outra contribuição relevante reside na possibilidade de criação de uma versão digital do IMAL 5.0, como um sistema interativo, plataforma web ou aplicativo. Essa solução permitiria que empresas autoavaliassem sua maturidade logística, recebendo relatórios personalizados e recomendações de melhoria contínua. Um sistema desse tipo, apoiado por tecnologias para negócios inteligentes e relatórios analíticos, poderia ser incorporado a iniciativas públicas ou privadas voltadas à neointustrialização verde, ao compliance ESG ou ao incentivo à transformação digital em cadeias produtivas estratégicas.

No campo metodológico, estudos futuros podem explorar a combinação do DEMATEL com outras abordagens multicritério, como Dinâmica de Sistemas, ANP (*Analytic Network Process*), ou redes bayesianas. Essas integrações permitiriam análises mais sofisticadas das interdependências entre os fatores logísticos, inclusive considerando variáveis latentes, incertezas probabilísticas e comportamentos ao longo do tempo. A aplicação do modelo em cenários prospectivos — com o uso de simulações e modelagens preditivas — pode contribuir

para antever os impactos de políticas públicas, mudanças regulatórias ou choques ambientais sobre a maturidade logística regional.

Um dos caminhos promissores para o aprimoramento do IMAL 5.0 está na integração com indicadores ESG, articulando critérios logísticos a práticas ambientais, sociais e de governança. Essa ampliação pode tornar o modelo uma ferramenta estratégica para avaliar sustentabilidade industrial. Outra frente relevante é sua aplicação em cadeias da bioeconomia amazônica, considerando desafios como dispersão territorial, infraestrutura limitada e respeito às comunidades locais. Avaliar a maturidade logística desses contextos favorece estratégias adaptadas à biodiversidade regional. Assim, o IMAL 5.0 se consolida como base para um campo emergente de estudos voltado à transformação logística digital, socioambiental e humana.

Ademais, é importante ressaltar que a interlocução crítica com diferentes referenciais teóricos fortaleceu a solidez analítica da pesquisa. A incorporação das contribuições metodológicas da Profa. Marina Bouzon, uma das principais referências nacionais na aplicação do método DEMATEL na Engenharia de Produção, agregou profundidade à etapa de modelagem, especialmente no que se refere à construção da matriz de influência direta e à sua normalização. A decisão por adaptar a nomenclatura para "centralidade" e "relevância", embora dialogando com os termos "influência" e "dependência" presentes em sua obra, refletiu a proposta da presente tese em desenvolver um modelo próprio (IMAL 5.0), que articula múltiplas literaturas em logística, maturidade e inteligência computacional aplicada. Assim, a interlocução com Bouzon não apenas referendou a escolha metodológica, como também reforçou o caráter inovador do modelo proposto para o contexto do Polo Industrial de Manaus.

REFERÊNCIAS

- ABBATE, S.; CENTOBELLI, P.; CERCHIONE, R. **The digital and sustainable transition of the Agri-food sector**. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 187, 122222, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122222>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- ABDENUR, A.; BRODIE, F.; CARVALHO, I. Z.; RISSO, M.; MUGGAH, R. **Crime Ambiental na Bacia Amazônica: Uma Tipologia para Pesquisa, Política Pública e Ação**. Instituto Igarapé, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3isjhbz>. Acesso em: 1 fev. 2025.
- ABDI. **Agenda Brasileira para Indústria 4.0**. 2019. Disponível em: <http://www.industria40.gov.br/>. Acesso em: 1 set. 2025.
- ABIA. **Faturamento da indústria de alimentos cresce 10% em 2024**. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-02/faturamento-da-industria-de-alimentos-cresce-10-em-2025>.
- ABNT. **Normas Publicadas**. 2023. Disponível em: <https://abnt.org.br/normalizacao/normas-publicadas/>. Acesso em: 1 out. 2023.
- ACEMOGLU, D.; RESTREPO, P. **Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor**. *Journal of Economic Perspectives*, v. 33, n. 2, p. 3–30, 2019. Acesso em: 27 mar. 2025.
- AGGARWAL, R.; EREL, I.; FERREIRA, M.; MATOS, P. **Does governance travel around the world? Evidence from institutional investors**. *Journal of Financial Economics*, v. 100, n. 1, p. 154–181, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.16/j.gfj.2011.03.001>. Acesso em: 1 fev. 2025.
- AKBARI, M.; AZBARI, M. E.; CHAIJANI, M. H. **Performance of the firms in a free-trade zone: The role of institutional factors and resources**. *European Management Review*, v. 16, n. 2, p. 363–378, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.16/j.gfj.2019.03.001>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- ALAMSYAH, D. P.; ARYANTO, R.; INDRIANA; WIDJAJA, V. F.; ROHAENI, H. **The strategy of eco-friendly products with green consumer behavior: Development of green trust model**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 824, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.16/j.gfj.2021.03.001>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- ALAREENI, B. A.; HAMDAN, A. **ESG impact on performance of US S&P 500-listed firms**. *Corporate Governance; The International Journal of Business in Society*, v. 20, n. 7, p. 1409–1428, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/CG-06-2020-0258>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- ALI BUKAR, U.; SAYEED, MD S.; FATIMAH, S.; RAZAK, A.; YOGARAYAN, S.; AMODU, O.A.; AZLINA, R.; MAHMOOD, R. **A method for analyzing text using VOSviewer**, *MethodsX*, v. 11, 2023, n.º 102339, ISSN 2215-0161. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102339>>. Acesso em: 15 maio 2025.

ALIX-GARCIA, J.; RAUSCH, L. L.; L'ROE, J.; GIBBS, H. K.; MUNGER, J. **Avoided Deforestation Linked to Environmental Registration of Properties in the Brazilian Amazon.** *Conservation Letters*, v. 11, n. 3, 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3Bmm7Yd>. Acesso em: 12 fev. 2025.

ALOISE, P. G.; MACKE, J. **Eco-innovations in developing countries: The case of Manaus Free Trade Zone (Brazil).** *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 30–38, 2017. Acesso em: 28 mar. 2025.

AMALIA, F. R.; DARMAWAN, A. **Exploring consumer purchase intention towards cruelty-free personal care products in Indonesia.** *Cleaner and Responsible Consumption*, v. 11, 100136, 2023. Acesso em: 28 abr. 2025.

AMJAD, A.; ABBASS, K.; HUSSAIN, Y.; KHAN, F.; SADIQ, S. **Effects of the green supply chain management practices on firm performance and sustainable development.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 66622–66639, 2022. Acesso em: 28 mar. 2025.

AMMANN, M.; BAUER, C.; FISCHER, S.; MÜLLER, P. **The impact of the Morningstar Sustainability Rating on mutual fund flows.** *European Financial Management*, v. 25, n. 3, p. 520–553, 2019. Acesso em: 28 mar. 2025.

ANDRADE, J. M.; GELCER, D.; HOLLAND, M. **Efetividade dos incentivos fiscais para a Zona Franca de Manaus.** In: HOLLAND, M. (Coord.). *Zona Franca de Manaus: impactos, efetividade e oportunidades*. São Paulo: FGV/EESP, 2019. p. 53–65. Acesso em: 08 mar. 2025.

ANTER, L.; LEDER, R.; KEISER, D.; FREITAG, M. **Requirements for Human-Machine-Interaction Applications in Production and Logistics within Industry 5.0 – A Case Study Approach.** *Procedia Computer Science*, v. 232, p. 1164–1171, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.114>. Acesso em: 25 maio 2025.

ANTONIOUK, I.; SVITEK, R.; KRAJČOVIČ, M.; FURMANNOVÁ, B. **Methodology of design and optimization of internal logistics in the concept of Industry 4.0.** *Transportation Research Procedia*, v. 55, p. 503–509, 2021. Acesso em: 08 mar. 2025.

APICS. **Supply Chain Operation Reference Model (SCOR).** 2010. Disponível em: <https://www.apics.org/>. Acesso em: 6 mar. 2019. Acesso em: 20 mar. 2025.

AZARIAN, R.; YU, H. **Social interactions and technological innovation in industrial settings.** *Technology in Society*, v. 68, p. 101–112, 2022.

BAROROH, D. K.; CHU, C. **Human-centric production system simulation in mixed reality: An exemplary case of logistic facility design.** *Journal of Manufacturing Systems*, v. 65, p. 146–157, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.005>. Acesso em: 25 maio 2025.

BATTISTA, C.; SCHIRALDI, M. M. **The logistics maturity model: application to a fashion company.** *International Journal of Productivity and Performance Management*, v. 62, n. 2, p. 171–193, 2013.

BERX, Nicole et al. **A harmonious synergy between robotic performance and well-being in human-robot collaboration: A vision and key recommendations.** *Annual Reviews in Control*, v. 59, 100984, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100984>. Acesso em: 25 maio 2025.

BJÖRKLUND, M.; FORSLUND, H. **A framework for classifying sustainable logistics innovations.** *Logistics Research*, v. 11, n. 1, 2018. DOI: 10.23773/2018_1. Disponível em: <https://www.bvl.de/lore>. Acesso em: 15 mai. 2025.

BOUZON, Marina et al. **Aplicação do método DEMATEL para análise das barreiras à sustentabilidade em cadeias de suprimento: uma abordagem no setor farmacêutico.** *Revista Produção Online*, v. 21, n. 4, p. 1354–1377, 2021.

BOUZON, Marina; PELLIZZARO, Caroline; CARRIERI, Adriano de Paula; GUARNIERI, Patrícia. **Aplicação do método DEMATEL para análise das barreiras à sustentabilidade em cadeias de suprimento: uma abordagem no setor farmacêutico.** *Revista Produção Online*, v. 21, n. 4, p. 1354–1377, 2021. DOI: 10.14488/1676-1901.v21i4.4033

BOUZON, Marina. **Aula sobre DEMATEL: Elaboração da matriz de julgamentos e vetores.** Curso de Engenharia de Produção – UFSC, 2023. (Material audiovisual).

BROCCARDO, L.; MELLANO, M.; ZAPPONE, A. **Industry 5.0: a human-centric solution.** *Sustainability*, v. 16, n. 1, p. 1–15, 2024.

CAI, L.; LI, W.; LUO, Y.; HE, L. **Real-Time Scheduling Simulation Optimisation of Job Shop in a Production-Logistics Collaborative Environment.** *International Journal of Production Research*, v. 60, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2023777>. Acesso em: 12 mar. 2025.

CAIADO, R. G. G.; SCAVARDA, L. F.; GAVIÃO, L. O.; IVSON, P.; DE MATTOS NASCIMENTO, D. L.; GARZA-REYES, J. A. **A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management.** *International Journal of Production Economics*, v. 231, 107883, 2021. Acesso em: 08 jan. 2025.

CANNAVA, L.; PEROTTI, S.; DE CHIRICO, A.; NAJAFI, B.; RINALDI, F. **Sustainable logistics facilities: a simulation-based approach towards warehouse decarbonization within the food and beverage industry.** *Procedia Computer Science*, v. 253, p. 1545–1554, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.216>. Acesso em: 25 maio 2025.

CANETTA, L.; BARNI, A.; MONTINI, E. **Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector.** In: 2018, IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), p. 1–7, 2018. Acesso em: 08 mar. 2025.

CAO, J.; ZHANG, M.; PAN, N.; HAN, Y.; LIU, J.; HE, Zi. AI, Z. **Optimization of three-echelon logistics supply chain considering emergency scenarios under resilience strategy: A case study in power metering industry.** *Computers & Industrial Engineering*, v. 203, 110985, maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110985>. Acesso em: 25 maio 2025.

CAUCHICK, P.; MORABITO, R.; PUREZA, V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção.** 2. ed. Elsevier, 2012. Acesso em: 19 mar. 2025.

CAVALCANTE, L. **Zona Franca de Manaus: uma revisão sistemática de impactos.** InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade, v. 5, 202001, 2020. Acesso em: 19 mar. 2025.

CHEN, X.; HE, Y.; PAKDEL, G. H.; YEH, C. **Intelligent forecasting and distribution in cross-border e-commerce import trade: A deep-learning-based iterative optimization approach.** Omega, v. 133, 103277, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2025.103277>. Acesso em: 25 maio 2025.

CHENG, C. P.; KUMAR, S. A. **BIM-Based Framework for Material Logistics Planning.** In: Proc. 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Perth, Australia, 2015. p. 33–42. Acesso em: 19 abr. 2025.

CHOI, T. M.; SIQIN, T. **Blockchain in Logistics and Production from Blockchain 1.0 to Blockchain 5.0: An Intra-Inter-Organizational Framework.** Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 160, 102653, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102653>. Acesso em: 29 abr. 2025.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operação.** São Paulo: Prentice-Hall, 2004. Acesso em: 19 jan. 2025.

CNI. **Mapa estratégico da Indústria.** 2019a. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/mapa-estrategico-da-industria/>. Acesso em: 20 mar 2025.

CNI. **Inovar é sobreviver nos negócios, mostra pesquisa da CNI com 100 CEOs.** 2019b. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/bucket-gw-cni-static-cmssi/portaldaindustria/noticias/media/filer_public/0a/38/0a38494c-d397-4773-a4fa0b1d8106d8c5/pesquisa_cni_inovacao.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

COLLI, M. et al. **Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0.** IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1347–1352, 2018. Acesso em: 19 abr. 2025.

COŞKUN, A.; KAZAN, H. **Risk mitigation strategies in supply chain management: a comprehensive review.** Supply Chain Management: An International Journal, v. 28, n. 1, p. 45–60, 2023.

COSTIN, A.; PRADHANANGA, N.; TEIZER, J. **Leveraging Passive RFID Technology for Construction Resource Field Mobility and Status Monitoring in a High-Rise Renovation Project.** Automation in Construction, v. 24, p. 1–15, 2012. Acesso em: 19 abr. 2025.

CRESWELL, J. W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches.** 4th ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2014.

CROSBY, P. B. **Quality is free: The art of making quality certain.** New York: McGraw-Hill, 1979. Acesso em: 19 abr. 2025.

CSCMP. **Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) Glossary.** 2019. Disponível em:

https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921. Acesso em: 1 jan. 2025.

CURTIS, B.; PAULK, M. **Creating a software process improvement program**. Information and Software Technology, v. 35, n. 6-7, p. 381–386, 1993. Acesso em: 19 abr. 2025.

DAHL, Berit Misund; VASSET, Frøydis; FRILUND, Marianne. **Abordagens dos alunos para a redação de ensaios científicos como método educacional no ensino superior: um estudo de métodos mistos**. Science and Healthcare, v. 7, n. 1, p. 100389, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2022.100389>. Acesso em: 1 jun. 2025.

DALLASEGA, P.; WOSCHANK, M. **Factors related to modern capabilities in logistics engineering and their influence on supply chain resilience and flexibility**. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, v. 12, n. 4, p. 1393–1409, 2024. Disponível em: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6412>. Acesso em: 1 jun. 2025.

DALLASEGA, P.; WOSCHANK, M.; RÜSCH, M. **Logistics 4.0 measurement model: empirical validation based on an industrial survey**. Industrial Management & Data Systems, v. 122, n. 3, p. 603–623, 2022.

DE BRUIN, T.; FREEZE, R.; KAULKARNI, U.; ROSEMAN, M. **Understanding the main phases of developing a maturity assessment model**. Australasian Conference on Information Systems (ACIS), 2005. Acesso em: 19 abr. 2025.

DE CAROLIS, A. et al. **A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies**. Advances in Production Management Systems, p. 13–20, 2017. Acesso em: 19 abr. 2025.

DE FREITAS, M.; DE FARIAS FRAGA, M.; DE SOUZA, G. **Logística 4.0: conceitos e aplicabilidade: uma pesquisa-ação em uma empresa de tecnologia para o mercado automobilístico**. Caderno PAIC, v. 17, n. 1, p. 237–261, 2016. Acesso em: 19 abr. 2025.

DEMIR, E.; HRUŠOVSKÝ, M.; JAMMERNEGG, W.; VAN WOENSEL, T. **Green Intermodal Freight Transportation: Bi-Objective Modelling and Analysis**. International Journal of Production Research, v. 57, p. 6162–6180, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1620363>. Acesso em: 19 abr. 2025.

DE OLIVEIRA, M. P. V.; MCCORMACK, K.; TRKMAN, P. **Business analytics in supply chains – The contingent effect of business process maturity**. Expert Systems with Applications, v. 39, n. 5, p. 5488–5498, 2012. Acesso em: 24 abr. 2025.

DE SOUSA, G.; DE ALMEIDA, M. **Integração da Cadeia de Suprimentos: Uma análise em uma organização industrial e comercial**. XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2015. Acesso em: 19 abr. 2025.

DEMO, P. **Pesquisa e informação qualitativa**. Campinas: Papirus, 2001. Acesso em: 19 abr. 2025.

DI NARDO, E.; YU, J. **The Impact of AI-Driven Predictive Analytics on Sustainable Logistics: A Study on the Flexibility of Industry 5.0.** *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 15, n. 2, p. 245–261, 2021. Acesso em: 19 abr. 2025.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; PANDEY, N.; LIM, W.F. **Visualizing the intellectual structure of knowledge management: A bibliometric review using VOSviewer.** *Journal of Business Research*, v. 148, p. 215–229, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85132636552>. Acesso em: 15 maio 2025.

DUARTE, D.; MARTINS, P. V. **A maturity model for higher education institutions.** *Journal of Spatial and Organizational Dynamics*, v. 1, n. 1, p. 25–44, 2013. Acesso em: 19 abr. 2025.

DWIVEDI, Y. K.; HUGHES, D. L.; ISMAGILOVA, E.; et al. **Artificial intelligence (AI): multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice, and policy.** *International Journal of Information Management*, v. 57, p. 101–121, 2023.

EFQM. **EFQM Excellence Model.** 2012. Disponível em: <http://www.efqm.org>. Acesso em: 1 mar. 2025.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LINS, M. P. E. **ProKnow-C: knowledge development process–constructivist.** *Revista de Contabilidade e Organizações*, v. 4, n. 8, p. 12–25, 2010.

ENSSLIN, L. et al. **Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão construtivista.** *Pesquisa Operacional*, v. 30, n. 1, p. 125–152, 2010. Acesso em: 19 fev. 2025.

ERP, T. V.; CARVALHO, N.G.P.; GEROLAMO, M.C.; GONÇALVES, R.; RYTTER, N.G.M.; GLADYSZ, B. **Industry 5.0: A new strategy framework for sustainability management and beyond.** *Journal of Cleaner Production*, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142271>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

ESTAMPE, D. et al. **A framework for analysing supply chain performance evaluation models.** *International Journal of Production Economics*, v. 142, n. 2, p. 247–258, 2013. Acesso em: 19 fev. 2025.

EXNER, K.; ZIMPFER, R.; STARK, R. **Maturity Model and Action Recommendation: A PSS Capability Self-Assessment Tool for Companies.** *Procedia CIRP*, v. 64, p. 175–180, 2017. Acesso em: 19 fev. 2025.

FACCHINI, F.; OLÉSKÓW-SZŁAPKA, J.; RANIERI, L.; URBINATI, A. **A Maturity Model for Logistics 4.0: An Empirical Analysis and a Roadmap for Future Research.** *Sustainability*, v. 12, 86, 2020. <https://doi.org/10.3390/SU12010086>. Acesso em: 19 fev. 2025.

FAIZ, R.; LE, Q. N.; MASLI, E. **Measuring digital readiness: framework and indicators.** *Technology Forecasting and Social Change*, v. 193, p. 122–130, 2024.

FAIZ, F.; LE, V.; MASLI, E. K. **Determinants of digital technology adoption in innovative SMEs.** *Journal of Innovation & Knowledge*, v. 9, n. 4, 100610, 2024. Acesso em: 19 fev. 2025.

FETTERMANN, D. C. et al. **How does Industry 4.0 contribute to operations management?** *Journal of Industrial and Production Engineering*, v. 35, n. 4, p. 255–268, 2018. Acesso em: 21 fev. 2025.

FETTKE, P.; LOOS, P. **Perspectives on Reference Modeling.** In: *Reference Modeling for Business Systems Analysis*, p. 1–21, 2007. Acesso em: 22 fev. 2025.

FIGUEIRAS, P.; LOURENÇO, L.; COSTA, R.; GRAÇA, D.; GARCIA, G.; JARDIM-GONÇALVES, R. **Big data provision for digital twins in industry 4.0 logistics processes.** In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, Rome, Italy, 7–9 June 2021; p. 516–521. <https://doi.org/10.1109/METROIND4.0IOT51437.2021.9488507>. Acesso em: 13 fev. 2025.

FINK, A. **Conducting research literature; reviews: From the internet to paper.** 5. ed. California: SAGE, 2019. Acesso em: 19 fev. 2025.

FOLLMANN, N. **Modelo de Maturidade Logística para Empresas Industriais de Grande Porte.** 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Acesso em: 19 fev. 2025.

FORZA, C. **Survey research in operations management: a process-based perspective.** *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 152–194, 2002. Acesso em: 24 fev. 2025.

FRABONI, F.; BRENDL, H.; PIETRANTONI, L. **Evaluating Organizational Guidelines for Enhancing Psychological Well-Being, Safety, and Performance in Technology Integration. Sustainability**, Basel, v. 15, n. 10, p. 8113, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15108113>. Acesso em: 25 maio 2025.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. **Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies.** *International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 15–26, 2019. Acesso em: 09 fev. 2025.

FRASER, P.; MOULTRIE, J.; GREGORY, M. **The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability.** In: *IEEE International Engineering Management Conference*, p. 244–249, 2002. Acesso em: 19 fev. 2025.

FREDERICO, G. F. **Enhancing Resilience in Supply Chains through Digital Twin Applications in Industry 5.0.** *Supply Chain Management Review*, v. 9, n. 1, p. 32–45, 2021. Acesso em: 19 jan. 2025.

FREDERICO, G. F. **Logistics Review from Supply Chain 4.0 to Supply Chain 5.0: Findings from a Systematic Literature Review and Research Directions.** *Logistics*, v. 5, 49, 2021. <https://doi.org/10.3390/logistics5030049>. Acesso em: 19 jan. 2025.

FUKAS, P.; REBSTADT, J.; REMARK, F.; THOMAS, O. **Developing an artificial intelligence maturity model for auditing.** *ECIS 2021. Research Papers*, v. 133, 2021. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/352192517_Developing_an_Artificial_Intelligence_Maturity_Model_for_Auditing. Acesso em: 19 jan. 2025.

GABUS, A.; FONTELA, E. **World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL**. Geneva: Battelle Geneva Research Center, 1972. Acesso em: 19 jan. 2025.

GANZARAIN, J.; ERRASTI, N. **Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0**. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 9, n. 5, p. 1119–1128, 2016. Acesso em: 19 jan. 2025.

GERLITZ, L. **Design for product and service innovation in Industry 4.0 and emerging smart society**. *Journal of Security and Sustainability Issues*, v. 5, n. 2, p. 181–198, 2015. [https://doi.org/10.9770/jssi.2015.5.2\(5\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2015.5.2(5)). Acesso em: 19 jan. 2025.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GHOBAKHLOO, M. **The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0**. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 29, n. 6, p. 910–936, 2018. Acesso em: 19 jan. 2025.

GHOBAKHLOO, M. **Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability**. *Journal of Cleaner Production*, v. 252, p. 119869, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>. Acesso em: 19 jan. 2025.

GHOBAKHLOO, M.; SABOURI, M. S.; TALLON, P. P. **Information technology and organizational performance: a meta-analysis**. *Journal of Strategic Information Systems*, v. 32, n. 1, p. 101–120, 2023.

GLOBAL TRENDS 2035. **Trends Transforming the Global Landscape. 2019**. Disponível em: <https://www.dni.gov/files/images/globalTrends/documents/GT-Full-Report.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2025.

GÖKALP, E.; MARTINEZ, V. **Digital transformation maturity assessment: Development of the Digital Transformation Capability Maturity Model**. *International Journal of Production Research*, v. 59, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1991020>. Acesso em: 1 jan. 2025.

GÖKALP, E.; SENER, U.; EREN, P. E. **Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM**. *Communications in Computer and Information Science*, p. 128–142, 2017. Acesso em: 1 jan. 2025.

GONZÁLEZ-ROJAS, O.; CORREAL, D.; CAMARGO, M. **ICT capabilities for supporting collaborative work on business processes within the digital content industry**. *Computers in Industry*, v. 80, p. 16–29, 2016. Acesso em: 1 jan. 2025.

GÖRÇÜN, O.F.; PAMUCAR, D.; BISWAS, S. **The blockchain technology selection in the logistics industry using a novel MCDM framework based on Fermatean fuzzy sets and Dombi aggregation**. *Information Sciences*, v. 635, 2023, p. 345–374, ISSN 0020-0255. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.03.113>. Acesso em 14 jan 2025.

GROSCHOPF, W.; MULLER, R.; WEISS, K. **Adapting supply chains for flexibility in Industry 5.0: Challenges and solutions.** Supply Chain Innovation Journal, v. 12, n. 4, p. 102–119, 2021. Acesso em: 1 jan. 2025.

GUALTIERI, L.; RAUCH, E.; VIDONI, R. **Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 67, 101998, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101998>. Acesso em: 25 maio 2025.

GUNASEKARAN, A.; PATEL, C.; TIRTIROGLU, E. **Performance measures and metrics in a supply chain environment.** International Journal of Operations & Production Management, v. 21, n. 1/2, p. 71–87, 2001. Acesso em: 1 jan. 2025.

GUNASEKARAN, C.; PATEL, C.; MCGAUGHEY, R. **A framework for supply chain performance measurement.** International Journal of Production Economics, v. 87, n. 3, p. 333–347, 2004. Acesso em: 11 jan. 2025.

GUPTA, A.; SINGH, R. K.; GUPTA, S. **Developing Human Resource for the Digitization of Logistics Operations: Readiness Index Framework.** International Journal of Manpower, v. 43, p. 355–379, 2021. <https://doi.org/10.1108/IJM-03-2021-0175>. Acesso em: 1 jan. 2025.

GUPTA, S.; TUUNANEN, T.; KAR, A. K.; MODGIL, S. **Managing digital knowledge for ensuring business efficiency and continuity.** Journal of Knowledge Management, v. 27, n. 2, p. 245–263, 2023. <https://doi.org/10.1108/JKM-09-2021-0703>. Acesso em: 1 jan. 2025.

HAASE, V. H. **Software process assessment concepts.** Journal of Systems Architecture, v. 42, n. 8, p. 621–631, 1996. Acesso em: 1 jan. 2025.

HAN, H.; TRIMI, S. **Towards a data science platform for improving SME collaboration through Industry 4.0 technologies.** Technological Forecasting and Social Change, v. 174, 121242, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121242>. Acesso em: 1 jan. 2025.

HANDFIELD, R.; STRAIGHT, S. **How mature is your supply chain? The SCRD capability maturity model.** 89th Annual International Supply Management Conference, p. 1–6, 2004. Acesso em: 11 jan. 2025.

HANNOVER MESSE. **Logistics 4.0: Trends for digitally automated supply chains.** 2019. Disponível em: <https://www.hannovermesse.de/en/news/key-topics/logistics-4.0/>. Acesso em: 10 mai. 2025.

HAQ, ASIF N.; CHONG, ALAIN YEE-LOONG; ZHANG, ALAN; BAI, CHENGYU. **Digital supply chain transformation: A conceptual framework and future research agenda.** Journal of Manufacturing Systems, v. 62, p. 417–430, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554522000497>. Acesso em: 25 maio 2025.

HASHEM, G. **Examining intention to use crowd logistics: A synergy of unified theory of acceptance and use of technology and social exchange theory.** Sustainable Futures, v. 9, 100687, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100687>. Acesso em: 25 maio 2025.

HE, K.; BOUNCKEN, R. B.; KIANI, A.; KRAUS, S. **The role of strategic orientations for digital innovation: when entrepreneurship meets sustainability.** Technological Forecasting and Social Change, v. 205, 123503, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123503>. Acesso em: 10 mai. 2025.

HEIN-PENSEL, F.; WINKLER, H.; BRÜCKNER, A.; WOLKE, M.; JABS, I.; MAYAN, I. J.; ZINKE WEHLMANN, C. **Maturity assessment for Industry 5.0: A review of existing maturity models.** Journal of Manufacturing Systems, v. 66, p. 200–210, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.009>. Acesso em: 10 mai. 2025.

HEINRICH, B.; SCHILLER, A.; SCHÖN, D.; SZUBARTOWICZ, M. **Adapting process models via an automated planning approach.** Journal of Decision Systems, v. 29, n. 1–4, p. 223–259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1828807>. Acesso em: 25 maio 2025.

HOFMANN, E. et al. **Logistics 5.0: The Next Generation of Human-Centric Supply Chains.** 1. ed. Berlim: Springer, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-63505-3>. Acesso em: 15 mai. 2025.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M.; WOSCHANK, M. **Human-centricity in logistics 5.0: empirical insights from industry.** Journal of Business Logistics, v. 44, n. 2, p. 123–138, 2023.

HOHNEL, W.; KRAHL, D.; SCHREIBER, D. **Lessons Learned in Reference Modeling.** In: Reference Modeling for Business Systems Analysis, p. 355–371, 2007. Acesso em: 10 mai. 2025.

HOU, Y.; CAO, Z.; YANG, S. **Cloud intelligent logistics service selection based on combinatorial optimization algorithm.** Journal European des Systemes Automatises, v. 52, n. 1, p. 73–78, 2019. Acesso em: 10 mai. 2025.

H. YU E X. SUN. **Uncertain remanufacturing reverse logistics network design in industry 5.0: Opportunities and challenges of digitalization.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 133, p. 108578, 2024. Acesso em: 10 mai. 2025.

IBICT. Resolução 001/PPGEP/2018. **Alternativa de elaboração de dissertação de mestrado ou tese de doutorado na forma de coletânea de artigos para defesa no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP/UFSC).** 2018. Disponível em: https://treinamanto5.paginas.ufsc.br/files/2011/07/Resolucao-002_2018_DissertacaoTese_FormatoArtigos.pdf. Acesso em: 4 mar. 2025.

ISO/IEC 11354-1:2011. **Advanced automation technologies and their applications - Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability - Part 1: Framework for enterprise interoperability.** 2011. Acesso em: 10 mai. 2025.

IVANOV, D. **Introduction to supply chain resilience: management, modelling, technology.** Cham: Springer Nature, 2021. ISBN 978-3-030-70489-6. Disponível em: [10.1007/978-3-030-70490-2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70490-2). Acesso em: 15 mai. 2025.

JEFROY, B.; LARKIN, D.; BLAKE, S. **Digital Twins in Logistics: Enhancing Predictive Maintenance and Real-Time Monitoring**. *International Journal of Industrial Logistics*, v. 18, n. 6, p. 75–88, 2022. Acesso em: 10 mai. 2025.

JONSSON, P. **Logistics and Supply Chain Management**. London: McGraw-Hill, 2008. Acesso em: 10 mai. 2025.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Securing the future of German manufacturing industry. Forschungsunion, 2013. Acesso em: 10 mai. 2025.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. Frankfurt: acatech, 2021. Disponível em: <https://www.acatech.de/mediathek/recommendations-industrie-4-0>. Acesso em: 2 jun. 2025.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; SHARMA, R. **Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry**. *Computers in Industry*, v. 101, p. 107–119, 2018. Acesso em: 10 mai. 2025.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **Linking the Balanced Scorecard to Strategy**. *California Management Review*, v. 39, n. 1, p. 53–79, 1996. Acesso em: 10 mai. 2025.

KIM, S.; FOERSTL, K.; SCHMIDT, C. G.; WAGNER, S. M. **Adoption of Green Supply Chain Management Practices in Multi-Tier Supply Chains: Examining the Differences between Higher and Lower Tier Firms**. *International Journal of Production Research*, v. 55, p. 6407–6422, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1992032>. Acesso em: 10 mai. 2025.

KIRMAZI, M.; KOCAOGLU, B. **Digital transformation maturity model development framework based on design science: case studies in manufacturing industry**. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 33, n. 7, p. 1319–1346, 2022. <https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2021-0476>. Acesso em: 12 mai. 2025.

KITSON, D. H. **Relating the SPICE framework and SEI approach to software process assessment**. *Software Quality Journal*, v. 5, n. 3, p. 145–156, 1996.

KLIMECKA-TATAR, DOROTA; INGALDI, Manuela; OBRECHT, Matevž. **Sustainable development in logistic – a strategy for management in terms of green transport**. *Management Systems in Production Engineering*, v. 29, n. 2, p. 91-96, 2021. Disponível em: <10.2478/mspe-2021-0012>. Acesso em: 15 mai. 2025.

KLINGBERG, J. **VDI-4000 Roadshow da VDI apresenta diretrizes alemãs e cases brasileiros para Indústria 4.0**. 2019. Disponível em: <http://www.vdibrasil.com/roadshow-da-vdi-apresenta-diretrizes-alemas-e-cases-brasileiros-para-industria-4-0/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

KROKOWSKI, T.; REGELMANN, C.; WENTZEK, D. **Industry 5.0 in Smart Manufacturing: The Need for Equilibrium in Work Organization**. *Procedia Computer Science*, v. 253, p. 582–593, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.120>. Acesso em: 25 maio 2025.

KWAK, Y. H.; IBBS, C. W. **Project Management Process Maturity (PM)² Model**. Journal of Management in Engineering, v. 18, n. 3, p. 150–155, 2002. Acesso em: 12 mai. 2025.

LACERDA, D. P. et al. **Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção**. Gestão & Produção, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013. Acesso em: 12 mai. 2025.

LAEEQUDDIN, M. et al. **Trust building in supply chain partners relationship: an integrated conceptual model**. Journal of Management Development, v. 31, n. 6, p. 550–564, 2012. Acesso em: 12 mai. 2025.

LAHTI, M.; SHAMSUZZOHA, A.; HELO, P. **Developing a maturity model for Supply Chain Management**. International Journal of Logistics Systems and Management, v. 5, n. 6, p. 654–678, 2009. Acesso em: 12 mai. 2025.

LAI, K.; NGAI, E. W. T.; CHENG, T. C. E. **Measures for evaluating supply chain performance in transport logistics**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 38, n. 6, p. 439–456, 2002. Acesso em: 12 mai. 2025.

LEE, J. et al. **Win-win strategy” for sustainable relationship between general contractors and subcontractors in international construction projects**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 22, n. 2, p. 428–439, 2017. Acesso em: 12 mai. 2025.

LEE, J. **Smart Factory Systems**. Informatik-Spektrum, v. 38, n. 3, p. 230–235, 2015. Acesso em: 12 mai. 2025.

LEE, M.; CHANG, T. **Applying TQM, CMM and ISO 9001 in knowledge management for software development process improvement**. International Journal of Services and Standards, v. 2, n. 1, p. 101–115, 2006. Acesso em: 12 mai. 2025.

LEE, S.; KANG, Y.; PRABHU, V. V. **Smart logistics: distributed control of green crowdsourced parcel services**. International Journal of Production Research, v. 54, n. 23, p. 6956–6968, 2016. Acesso em: 12 mai. 2025.

LENG, J.; SHA, W.; WANG, B.; ZHENG, P.; ZHUANG, C.; LIU, Q.; WANG, L. **Industry 5.0: Prospect and retrospect**. Journal of Manufacturing Systems, v. 65, p. 279–295, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>. Acesso em: 12 mai. 2025.

LEONARD-BARTON, D. A **Dual Methodology for Case Studies: Synergistic Use of a Longitudinal Single Site with Replicated Multiple Sites**. Organization Science, v. 1, n. 3, p. 248–266, 1990. Acesso em: 12 mai. 2025.

LE, T. V.; FAN, R. **Digital Twins for Logistics and Supply Chain Systems: Literature Review, Conceptual Framework**. Research Potential, and Practical Challenges. *arXiv preprint*, arXiv:2311.17317, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2311.17317>. Acesso em: 12 mai. 2025.

LEYH, C. et al. **SIMMI 4.0—a maturity model for classifying the enterprise-wide IT and software landscape focusing on Industry 4.0**. In: Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), p. 1297–1302, 2016. em: 12 mai. 2025.

LEYH, C. et al. **Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0.** In: Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions, p. 103–119, 2017. Acesso em: 10 mai. 2025.

LI, R.; FAN, Z.; HUANG, X. **An improved grey DEMATEL method for exploring the critical factors of green supply chain management.** Expert Systems with Applications, v. 41, n. 1, p. 497–507, 2014. Acesso em: 12 mai. 2025.

LI, X.; ZHANG, Y.; JIANG, Z. **Understanding strategic interactions in digital transformation: a case study.** Journal of Business Research, v. 150, p. 123–135, 2024.

LIAO, Y. et al. **Past, present and future of Industry 4.0: a systematic literature review and research agenda proposal.** International Journal of Production Research, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 2017. Acesso em: 12 mai. 2025.

LIMAT, C. **Disruptionspotenzial künstlicher Intelligenz: Ein Reifegradmodell zur Einführung ganzheitlicher KI-Initiativen in Unternehmen.** Wirtschaftsinformatik & Management, v. 14, n. 1, p. 60–67, 2022. <https://doi.org/10.1365/s35764-021-00379-y>. Acesso em: 12 mai. 2025.

LIU, Y.; MA, X.; SHU, L.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. **From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges.** IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 17, n. 6, p. 4322–4334, 2021. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>. Acesso em: 12 mai. 2025.

LIU, J.; YEOH, W.; QU, Y.; GAO, L. **Blockchain-based Digital Twin for Supply Chain Management: State-of-the-Art Review and Future Research Directions.** arXiv preprint, arXiv:2202.03966, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2202.03966>. Acesso em: 25 maio 2025.

MACHADO, N. T.; RODRIGUEZ, C. M. T. **Revisão de Modelos de Maturidade para Logística/SCM 4.0: Oportunidades para Aplicação de Tecnologias da Indústria 4.0.** Revista de Gestão Socioambiental, v. 19, n. 5, p. 01–18, 2025. (No prelo). Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/12148/6692>. Acesso em: 14 mai. 2025.

MADDIKUNTA, P. K. R.; PHAM, Q. V.; NGUYEN, D. C.; et al. **Industry 5.0: a survey on enabling technologies and potential applications.** Journal of Industrial Information Integration, v. 26, p. 100–120, 2022.

MAIER, A. M.; MOULTRIE, J.; CLARKSON, P. J. **Assessing Organizational Capabilities: Reviewing and Guiding the Development of Maturity Grids.** IEEE Transactions on Engineering Management, v. 59, n. 1, p. 138–159, 2012. Acesso em: 12 mai. 2025.

MAISIRI, W.; VAN DYK, L. **Industry 4.0 Readiness Assessment for South African Industries.** South African Journal of Industrial Engineering, v. 30, p. 134–148, 2019. <https://doi.org/10.7166/30-3-2231>. Acesso em: 12 mai. 2025.

MAJEED, A.; RUPASINGHE, T. **Internet of Things (IoT) Embedded Future Supply Chains for Industry 4.0: An Assessment from an ERP-based Fashion Apparel and Footwear Industry.** International Journal of Supply Chain Management, v. 6, n. 1, p. 25–40,

2017. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.59160/ijscm.v6i1.1395>. Acesso em: 12 mai. 2025.

MAMOGHLI, S.; CASSIVI, L.; TRUDEL, S. **Supporting business processes through human and IT factors: a maturity model**. Business Process Management Journal, v. 24, n. 4, p. 985–1006, 2018. Acesso em: 12 mai. 2025.

MANAFZADEH, E.; RAMEZANI, A. **Identifying and prioritizing the effect of marketing mix from the customer's perspective (4C) on the competitiveness of insurance companies using DEMATEL technique: A case study of Tehran Insurance Companies**. Marketing and Branding Research, v. 3, p. 86–96, 2016. Acesso em: 12 mai. 2025.

MANAFZADEH, M.; KIANI, M.; RAZAVI, S. M. **Digital transformation in supply chain management: a systematic literature review**. Journal of Cleaner Production, v. 135, p. 1–14, 2016.

MANKINS, J. C. **Technology readiness assessments: A retrospective**. Acta Astronautica, v. 65, n. 9–10, p. 1216–1223, 2009. Acesso em: 12 mai. 2025.

MANIAH; MILWANDHARI, S. **Risk Analysis of Cloud Computing in the Logistics Process**. In: Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering, Surabaya, Indonesia, 3–4 Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICVEE50212.2020.9243247>. Acesso em: 12 mai. 2025.

MARQUES, J. M. et al. **Aplicação do método DEMATEL para análise de critérios críticos em sistemas de gestão**. Revista Brasileira de Gestão de Negócios, v. 23, n. 1, p. 10–25, 2017. Acesso em: 12 mai. 2025.

MADDIKUNTA, P. K. R. et al. **Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications**. Journal of Industrial Information Integration, v. 26, 100257, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X21000558>. Acesso em: 25 maio 2025.

MCCORMACK, K.; LADEIRA, M. B.; OLIVEIRA, M. P. V. **Supply chain maturity and performance in Brazil**. Supply Chain Management. An International Journal, v. 13, n. 4, p. 272–282, 2008. Acesso em: 12 mai. 2025.

MCKINNEY, W. **Python for data analysis: data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022.

MENDES, G. H. S.; SILVEIRA, A. A.; GALVÃO, C. A. **Logística 4.0: uma revisão sistemática da literatura**. Revista Produção Online, v. 18, n. 2, p. 614–640, 2018.

MENG, X.; SUN, M.; JONES, M. **Maturity Model for Supply Chain Relationships in Construction**. Journal of Management in Engineering, v. 27, n. 2, p. 97–105, 2011. Acesso em: 12 mai. 2025.

MIGUEL, P. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. Revista Produção, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007. Acesso em: 12 mai. 2025.

MITTELSTAND DIGITAL. **SMEs Digital. Strategies for the digital transformation.** Federal Ministry for Economic and Energy, 2019. Disponível em: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Mittelstand/smes-digital-strategies-for-digital-transformation.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2025.

MOHER, D. **Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement.** *Annals of Internal Medicine*, v. 151, n. 4, p. 264–269, 2009. Acesso em: 12 mai. 2025.

MONFERDINI, L.; TEBALDI, L.; BOTTANI, E. **From Industry 4.0 to Industry 5.0: Opportunities, Challenges, and Future Perspectives in Logistics.** *Procedia Computer Science*, v. 253, p. 2941–2950, 2025. Acesso em: 12 mai. 2025.

MURAT AR, I.; EROL, I.; PEKER, I.; OZDEMIR, A.I.; MEDENI, T.M.; MEDENI, I.T. **Evaluating the feasibility of blockchain in logistics operations: A decision framework, Expert Systems with Applications**, v. 158, 2020, n.º 113543, ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113543>>. Acesso em 14 jan 2025.

NAHAVANDI, S. **Industry 5.0—A Human-Centric Solution.** *Journal of Industrial Integration and Management*, v. 4, n. 1, p. 63–79, 2019. Acesso em: 12 mai. 2025.

NAIR, A.; KRAUSE, D. R.; VADLAMANI, B.; GARG, A. **Supply Chain Resilience: Adapting to Global Disruptions and Uncertainty.** *Supply Chain Management Review*, [S. l.], 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/379753586_Supply_Chain_Resilience_Adapting_To_Global_Disruptions_and_Uncertainty. Acesso em: 25 maio 2025.

NAHAVANDI, A. **The art and science of leadership.** 7th ed. Boston: Pearson Education, 2021.

NARULA, S.; PUPPALA, H.; KUMAR, A.; FREDERICO, G. F.; DWIVEDY, M.; PRAKASH, S.; TALWAR, V. **Applicability of Industry 4.0 technologies in the adoption of global reporting initiative standards for achieving sustainability.** *Journal of Cleaner Production*, v. 305, 127141, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127141>. Acesso em: 12 mai. 2025.

NASCIMENTO, W. da C.; RIVAS, A. A. F. **Making the Manaus Industrial Hub Greener: When Trade Protection Becomes Environmental Protection.** *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 19, n. 4, e011800, 2025. Acesso em: 12 mai. 2025.

NGUYEN, L.C.; CHU, M.B.; TRUONG, H.Q.; DINH, H.G.; DUONG, A.T.B. **Exploring entrepreneurial actions of logistics firms for achieving success: An application of entrepreneurial action theory.** *Case Studies on Transport Policy*, v. 20, 2025, n.º 101429, ISSN 2213-624X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101429>>. Acesso em 14 jan 2025.

NGUYEN, H.; NAWARA, D.; KASHEF, R. **Connecting the indispensable roles of IoT and artificial intelligence in smart cities: A survey.** *Journal of Information and Intelligence*, v. 2, n.º 3, 2024, p. 261-285, ISSN 2949-7159. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>>. Acesso em: 12 mai. 2025.

NAWARA, M.; KASHEF, M. **Digital transformation in manufacturing: challenges and opportunities.** Journal of Manufacturing Technology Management, v. 35, n. 1, p. 25–40, 2024.

NIEMSAKUL, J.; HIRANMAHAPOL, S.; JANMONTREE, J.; ZADEK, H.; RANSIKARBUM, K. **Analysis of barriers for hydrogen-fueled logistics under integrated sustainability: A DEMATEL-TOWS framework.** Journal of Cleaner Production, v. 513, 2025, n.º 145720, ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145720>>. Acesso em: 18 mai. 2025.

OLAH, J.; ABURUMMAN, N.; POPP, J.; KHAN, M. A.; HADDAD, H.; KITUKUTHA, N. **Impact of Industry 4.0 on environmental sustainability.** Sustainability, v. 12, n. 11, 4674, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12114674>. Acesso em: 12 mai. 2025.

ONU. Digital Strategy 2022–2025. **United Nations Development Programme, 2025.** Disponível em: <https://digitalstrategy.undp.org/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

OPETUK, T. Model of Green Supply Chain Management Implementation. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2016. Acesso em: 10 mai. 2025.

ORAN, I.B.; CEZAYIRLIOGLU, H.R. **AI - Robotic Applications in Logistics Industry and Savings Calculation.** J Organ Behav Res. 2021;6(1):148-65. Disponível em: <<https://doi.org/10.51847/jUXQmvCvqf>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

ORÉ, S. B.; LOZADA, V. M. M. Maturity Model for Local E-Government. Proceedings of the 8th International Conference on Computer Modeling and Simulation, p. 78–83, 2017. Acesso em: 09 mai. 2025.

OSMANOGLU, M.; TUGRUL, B.; DOGANTUNA, T.; BOSTANCI, E. **An effective yield estimation system based on Blockchain technology.** IEEE Transactions on Engineering Management, v. 67, n. 4, p. 1157–1168, 2020. <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2978829>. Acesso em: 02 mai. 2025.

PATTON, M. Q. **Qualitative research & evaluation methods.** 3rd ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2002.

PAULK, M. C.; CURTIS, B.; CHRISSIS, M. B.; WEBER, C. V. **Capability maturity model for software.** *Software Engineering Institute*, 1993.

P3M3. The Portfolio, **Programme, and Project Management Maturity Model (P3M3).** 2012. Disponível em: <https://www.axelos.com/p3m3/>. Acesso em: 1 mar. 2019.

PFOHL, H. C.; YAHSI, B.; KURNAZ, T. **Concept and Diffusion-Factors of Industry 4.0 in the Supply Chain.** In: Dynamics in Logistics, p. 381–390, 2016. Acesso em: 15 mar. 2025.

PIERIN RAMOS, L. F.; ROCHA LOURES, E. d. F.; DESCHAMPS, F. **An analysis of maturity models and current state assessment of organizations for Industry 4.0 implementation.** Procedia Manufacturing, v. 51, p. 1098–1105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.154>. Acesso em: 15 mar. 2025.

PIGOSSO, D. C. A.; ROZENFELD, H.; MCALOONE, T. C. **Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies.** Journal of Cleaner Production, v. 59, p. 160–173, 2013. Acesso em: 15 mar. 2025.

PHILLIPSON, F. **Quantum Computing in Logistics and Supply Chain Management: An Overview.** arXiv preprint, arXiv:2402.17520, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2402.17520>. Acesso em: 25 maio 2025.

P. K. R. MADDIKUNTA et al., **Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications.** Journal of Industrial Information Integration, vol. 26, p. 100257, 2022. Acesso em: 14 mai. 2025.

PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. **INDUSTRIE 4.0 - Whitepaper FuE-Themen.** Berlin: Plattform Industrie 4.0, 2014. Acesso em: 15 mar. 2025.

PORTER, M. E. **Competição: Estratégias competitivas essenciais.** 13. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1999. Acesso em: 15 mar. 2025.

PREUVENEERS, D.; ILIE-ZUDOR, E. **The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0.** Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, v. 9, n. 3, p. 287–298, 2017. Acesso em: 15 mar. 2025.

PROVIN, A. P.; DUTRA, A. R. D. A.; DE SOUSA, E.; SILVA GOUVEIA, I. C. A.; CUBAS, E. A. L. V. **Circular economy for fashion industry: use of waste from the food industry for the production of biotextiles.** Technological Forecasting and Social Change, v. 169, 120858, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120858>. Acesso em: 25 mar. 2025.

PRTM. **Modelo de Maturidade PRTM Management Consultants.** 2005. Disponível em: <https://www.pwc.com/pl/ja.html>. Acesso em: 9 abr. 2025.

RAINER, D.; HORCH, A. **Industrie 4.0: hit or hype?** Industrial Electronics Magazine, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014. Acesso em: 25 mar. 2025.

RAMANATHAN, U.; GUNASEKARAN, A. **Supply chain collaboration: Impact of success in long-term partnerships.** International Journal of Production Economics, v. 147, p. 252–259, 2014. Acesso em: 25 mar. 2025.

RANI, P.; MISHRA, A.R.; ALSHAMRANI, A.M.; ALRASHEEDI, A.F.; TIRKOLAEI, E.B. **Picture fuzzy compromise ranking of alternatives using distance-to-ideal-solution approach for selecting blockchain technology platforms in logistics firms.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 142, 2025, n.º 109896, ISSN 0952-1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109896>>. Acesso em 14 jan 2025.

RASHED, N. R. N.; SALMAN, M. K.; MOHAMMED, M.; MADHI, Z. J. **Navigating digital transformation strategies for sustaining competitive advantage in the AI era.** Journal of Organizational Effectiveness, v. 3, n. 5, 2024.

RASHID, M. et al. **Unleashing the power of cloud adoption and artificial intelligence in optimizing resilience and sustainable manufacturing supply chain in the USA.** International Business Research, v. 17, n. 3, p. 45–60, 2024. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/381874592_Unleashing_the_power_of_cloud_adoption_and_artificial_intelligence_in_optimizing_resilience_and_sustainable_manufacturing_supply_chain_in_the_USA. Acesso em: 1 jun. 2025

RAZA, A.; CAPRETZ, L. F.; AHMED, F. **An open source usability maturity model (OSUMM)**. *Computers in Human Behavior*, v. 28, n. 4, p. 1109–1121, 2012. Acesso em: 25 mar. 2025.

RELATÓRIOS DO BANCO MUNDIAL. **Accelerating digital transformation in fragile and conflict-affected situations**. 2023. Disponível em: <https://projects.worldbank.org/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

REYES, H. G.; GIACHETTI, R. **Using experts to develop a supply chain maturity model in Mexico**. *Supply Chain Management: An International Journal*, v. 15, n. 6, p. 415–424, 2010. Acesso em: 25 mar. 2025.

RESOLUÇÃO 001/PPGEP/2018. **Alternativa de elaboração de dissertação de mestrado ou tese de doutorado na forma de coletânea de artigos para defesa no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP/UFSC)**. 2018. Disponível em: https://treinamanto5.paginas.ufsc.br/files/2011/07/Resolucao-002_2018_DissertacaoTese_FormatoArtigos.pdf. Acesso em: 4 mar. 2019. Acesso em: 25 mar. 2025.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017. Acesso em: 25 mar. 2025.

ROBSON, J.; MICHELS, N.; DAWES FARQUHAR, J. (2020). **Triangulation in industrial qualitative case study research: Widening the scope**. *Industrial Marketing Management*. 87. 10.1016/j.indmarman.2020.02.001. Acesso em: 25 mar. 2025.

ROBSON, K.; HUMPHREY, C.; KHALIFA, R. **Strategic management accounting: a review of the literature**. *Accounting, Organizations and Society*, v. 101, p. 101–115, 2022.

ROCHA, A. B. **Navegação na Amazônia: desafios da seca de 2024**. *Amazonas Atual*, 2024. Disponível em: <https://amazonasatual.com.br/navegacao-na-amazonia-desafios-da-seca-de-2024/>. Acesso em: 25 mar. 2025.

RÖGLINGER, M.; PÖPPELBUß, J.; BECKER, J. **Maturity models in business process management**. *Business Process Management Journal*, v. 18, n. 2, p. 328–346, 2012. Acesso em: 25 mar. 2025.

ROMERO, D.; STAHRÉ, J. **Operator 5.0 and the Human-Centered Approach in Industry 5.0: Enhancing Flexibility and Collaboration with Robots**. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, v. 24, n. 5, p. 443–456, 2021. Acesso em: 25 mar. 2025.

ROMERO, D.; STAHRÉ, J.; WIECZOREK, T.; et al. **The operator 4.0: human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems**. *IFAC-PapersOnLine*, v. 52, n. 10, p. 4607–4612, 2020.

ROZMAN, I. et al. **PROCESSUS – Integration of SEI CMM and ISO quality models.** Software Quality Control, v. 6, n. 1, p. 37–63, 1997. Acesso em: 25 mar. 2025.

RÜßMANN, M. et al. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries.** Boston Consulting Group, 2015. Acesso em: 25 mar. 2025.

SAATY, T. L. **Decision making with the analytic hierarchy process.** International Journal of Services Sciences, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008. Acesso em: 25 mar. 2025.

SAIEDIAN, H.; KUZARA, R. **SEI capability maturity model's impact on contractors.** Computer, v. 28, n. 1, p. 16–26, 1995. Acesso em: 25 mar. 2025.

SAMAWI, G. **A structural quality model for new product development to enhance resilience in closed-loop formulated food supply chains.** 2024. Disponível em: <https://eprints.aston.ac.uk/view/year/2024/2024-12.default.html>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SAMAWI, G.; MAKATSORIS, C. **A structural quality model for new product development to enhance supply chain resilience.** International Journal of Production Research, v. 62, n. 1, p. 1–15, 2024.

SANITHI, R.A.; MUTHUSWAMY, P. **Industry 5.0 or Industry 4.0S? Introduction to Industry 4.0 and a peek into the prospective Industry 5.0 technologies.** The International Journal on Interactive Design and Manufacturing, v. 17, n. 2, p. 947–979, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12008-023-01146-5>. Acesso em: 25 maio 2025.

SANTIAGO, S. **Medição da Interoperabilidade Logística com uso do modelo de equações estruturais: Modelo de medição da interoperabilidade logística.** 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Acesso em: 25 fev. 2025.

SANTOS, Y. L. F. et al. **Amazon deforestation and urban expansion: Simulating future growth in the Manaus Metropolitan Region.** Brazil. Journal of Environmental Management, v. 304, 114279, 2022. Acesso em: 25 fev. 2025.

SANTOS-NETO, J. B. S.; COSTA, A. P. C. S. **Enterprise maturity models: a systematic literature review.** Enterprise Information Systems, v. 13, n. 5, p. 719–769, 2019. Acesso em: 25 fev. 2025.

SCHUH, G. et al. **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies.** Munich: H. Utz Verlag, 2017. Acesso em: 25 fev. 2025.

SCHUH, G. et al. **Systematic Analysis of IT Complexity Challenges Hindering the Implementation of Industrie 4.0 Roadmaps.** In: Proceedings of the 2019 The 5th International Conference on E-society, E-learning and E-technologies, p. 104–108, 2019. Acesso em: 25 fev. 2025.

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. Acesso em: 25 fev. 2025.

SCHUPPAN, V.; RUßWURM, W. **A CMM-based evaluation of the V-Model 97.** In: Software Process Technology, p. 69–83, 2000. Acesso em: 20 fev. 2025.

SEI. **CMMI A - Specification Version 1.6**. 2004. Disponível em: <http://www.sei.cmu.edu/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SEI. **Software Acquisition Capability Maturity Model (SA-CMM) Version 1.03**. 2002. Disponível em: https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalReport/2002_005_001_14036.pdf. Acesso em: 25 fev. 2025.

SERNA, M. E. **Maturity model of Knowledge Management in the interpretativist perspective**. *International Journal of Information Management*, v. 32, n. 4, p. 365–371, 2012. Acesso em: 20 fev. 2025.

SEURING, S.; GOLD, S. **Conducting content analysis-based literature reviews in supply chain management**. *Supply Chain Management: An International Journal*, v. 17, n. 5, p. 544–555, 2012. Acesso em: 20 fev. 2025.

SGARBOSSA, F.; GROSSE, E. H.; NEUMANN, W. P.; BATTINI, D.; GLOCK, C. H. **Human Factors in Production and Logistics Systems of the Future**. *Annual Reviews in Control*, v. 49, p. 295–305, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.007>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SHARMA, H.; GARG, R.; SEWANI, H.; KASHEF, R. **Towards a Sustainable and Ethical Supply Chain Management: The Potential of IoT Solutions**. arXiv preprint, arXiv:2303.18135, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2303.18135>. Acesso em: 25 maio 2025.

SHIFRIN, N. V.; MICHEL, J. S. **Flexible work arrangements and employee health: a meta-analytic review**. *Work & Stress*, v. 36, n. 1, p. 60–85, 2022. <https://doi.org/10.1080/02678373.2021.1936287>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SHIH, WILLY C. **Global Supply Chains in the Post-Pandemic World**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/bitstream/10400.5/30383/1/Global%20Supply%20Chains%20in%20the%20Post-Pandemic.pdf>. Acesso em: 25 maio 2025.

SILVA, A. B.; THOMÉ, A. M. T. **SCOR Model for Sustainable Supply Chains: Expanding the Reference Framework**. *Journal of Cleaner Production*, v. 56, n. 3, p. 60–72, 2018. Acesso em: 20 fev. 2025.

SILVA, E.; MENEZES, E. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Acesso em: 20 fev. 2025.

SIMETINGER, F.; BASL, J. **A pilot study: an assessment of manufacturing SMEs using a new industry 4.0 maturity model for manufacturing small-and middle-sized enterprises (I4MMSME)**. *Procedia Computer Science*, v. 200, p. 1068–1077, 2022. Acesso em: 20 fev. 2025.

SINDHWANI, R.; KUMAR, A.; THAKUR, M. **Integrating Sustainability and Resilience in Logistics 5.0: The Role of Circular Economy and Blockchain**. *Journal of Cleaner Logistics*, v. 10, n. 3, p. 129–141, 2022. Acesso em: 20 fev. 2025.

SINGH, G.; DAULTANI, Y.; RAJESH, R.; SAHU, R. **Modeling the growth barriers of fresh produce supply chain in the Indian context**. *Benchmarking: An International Journal*, v. 30, n. 2, p. 653–677, 2022. Acesso em: 28 mar. 2025.

SOLAR, M. et al. **A Model to Guide the Open Government Data Implementation in Public Agencies**. *J. UCS*, v. 20, n. 11, p. 1564-1582, 2014. Disponível em: http://www.jucs.org/jucs_20_11/a_model_to_guide/jucs_20_11_1564_1582_solar.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. **Integrative review: what is it? How to do it?** *Einstein (São Paulo)*, v. 8, n. 1, p. 102–106, 2010.

SONY, M.; NAIK, S. **Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model**. *Technology in Society*, v. 61, 101248, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101248>. Acesso em: 20 fev. 2025.

STERNAD, M.; LERHER, T.; GAJŠEK, B. **Maturity Levels For Logistics 4.0 Based On NRW'S Industry 4.0 Maturity Model**. In: *Business Logistics in Modern Management*, p. 695–708, 2018. Acesso em: 20 fev. 2025.

STOCK, T.; SELIGER, G. **Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0**. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 536–541, 2016. Acesso em: 20 fev. 2025.

STOCK, T.; SCHMIDT, T.; ZÜLCH, G. **Digitalization and automation in Industry 5.0: pathways and barriers**. *Procedia CIRP*, v. 119, p. 225–230, 2024.

STOFFERS, P.; KARLA, J.; KAUFMANN, J. **Digitalisierung von Management-Reporting Prozessen – Ein technologieorientiertes Reifegradmodell zum Einsatz in KMU**. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 2021. <https://doi.org/10.1365/s40702-021-00787-z>. Acesso em: 20 fev. 2025.

STORM, I. et al. **Measuring stages of health in all policies on a local level: The applicability of a maturity model**. *Health Policy*, v. 114, n. 2–3, p. 183–191, 2014. Acesso em: 20 fev. 2025.

STRANDHAGEN, J. W. et al. **The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study**. *Advances in Manufacturing*, v. 5, n. 4, p. 344–358, 2017. Acesso em: 20 fev. 2025.

SUFRAMA. **Indicadores de Desempenho do Polo Industrial de Manaus. 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/centrais-de-conteudo/indicadores/IndicaFEV25>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SUFRAMA. **Indicadores da Suframa – Fevereiro de 2025**. Superintendência da Zona Franca de Manaus, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/centrais-de-conteudo/indicadores/2025/IndicaFEV25>. Acesso em: 25 maio 2025.

SUN, Z.; WANG, L.; LIU, Q. **Resilience in the Supply Chain: Implementing Predictive Technologies and AI in Logistics 5.0.** *Journal of Operations and Supply Chain Management*, v. 11, n. 1, p. 14–29, 2021. Acesso em: 20 fev. 2025.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. **The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context.** *Decision Support Systems*, v. 52, n. 4, p. 802–815, 2012. Acesso em: 15 mai. 2025.

TANG, M. S.; NGUYEN, T. H. **Dynamic competitiveness, firm performance and the regulatory role of government policies in Industry 5.0.** *Discover Sustainability*, v. 5, art. 517, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-024-00770-w>. Acesso em: 1 jun. 2025.

TANG, M. S.; NGUYEN, T. H. **Supply chain digitalization: a comprehensive review.** *Supply Chain Management Review*, v. 30, n. 2, p. 50–65, 2024.

TAPIA, R. **Developing a maturity model for IT alignment in a cross-organizational environment.** In: 2nd Dutch/Belgian Conference on Enterprise Information Systems (EIS), Groningen, 2007. Acesso em: 15 mai. 2025.

TARHAN, A.; TURETKEN, O.; REIJERS, H. A. **Business process maturity models: A systematic literature review.** *Information and Software Technology*, v. 75, p. 122–134, 2016. Acesso em: 15 mai. 2025.

THOBEN, K. D. et al. **Industrie 4.0” and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples.** *International Journal of Automation Technology*, v. 11, n. 1, p. 4–16, 2017. Acesso em: 15 mai. 2025.

THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. **Conducting systematic literature review in operations management.** *Production Planning & Control*, v. 27, n. 5, p. 408–420, 2016. Acesso em: 15 mai. 2025.

THOMSONREUTERS. **Road to the Future: Challenges and Opportunities for Technology Adoption.** 2018. Disponível em: <https://www.thomsonreuters.com.br/content/dam/openweb/documents/pdf/Brazil/whitepaper/thomsonreuters-liveuniversity-report-pesquisa-tecnologia-2018.pdf>. Acesso em: 1 out. 2019. Acesso em: 15 mai. 2025.

TRAPPEY, A. J. C. et al. **IoT patent roadmap for smart logistic service provision in the context of Industry 4.0.** *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, v. 40, n. 7, p. 593–602, 2017. Acesso em: 15 mai. 2025.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação: o positivismo, a fenomenologia, o marxismo.** São Paulo: Atlas, 1987. Acesso em: 15 mai. 2025.

TRSTENJAK, M. **A Model for Calculating the Process Planning Oriented Industry 4.0 Readiness Factor.** Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2021. Acesso em: 15 mai. 2025.

TUBIS, A.; WERBINSKA-WOJCIECHOWSKA, S. **Reliability and resilience of logistic systems based on process-oriented approach—Literature review**. In: **Reliable and Resilient Logistics Systems**. Advances in Reliability Science. Elsevier, 2025. Cap. 2, p. 25–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91752-0.00001-0>.

TUCKER, B.; PAXTON, J. **SCRL-model for Human Space Flight Operations enterprise supply chain**. 2010 IEEE Aerospace Conference, p. 1–9, 2010. Acesso em: 15 mai. 2025.

UCKELMANN, D. **A Definition Approach to Smart Logistics**. In: **Next Generation Teletraffic and Wired/wireless Advanced Networking**, p. 273–284, 2008. Acesso em: 15 mai. 2025.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer manual**. Versão 1.6.10. Leiden: Universiteit Leiden, 2019. Disponível em: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.10.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

VDI 4000. **Diretriz VDI 4000: A receita para a transformação digital na indústria**. 2019. Disponível em: <http://www.vdibrasil.com/diretriz-vdi-4000-a-receita-para-a-transformacao-digital-na-industria/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VEZZETTI, E.; VIOLANTE, M. G.; MARCOLIN, F. **A benchmarking framework for product lifecycle management (PLM) maturity models**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 71, n. 5–8, p. 899–918, 2013. Acesso em: 15 mai. 2025.

VIJAYAKUMAR, V.; SGARBOSSA, F.; NEUMANN, W. P.; SOBHANI, A. **Framework for Incorporating Human Factors into Production and Logistics Systems**. International Journal of Production Research, v. 60, p. 402–419, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1983225>. Acesso em: 15 mai. 2025.

WANG, K. **Logistics 4.0 Solution – New Challenges and Opportunities**. In: Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation, 2016. Acesso em: 15 mai. 2025.

WANG, S. et al. **Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook**. International Journal of Distributed Sensor Networks, v. 12, n. 1, 2016. Acesso em: 15 mai. 2025.

WAQAS, U. et al. **Influence of supply chain risk management and its mediating role on supply chain performance: perspectives from an agri-fresh produce**. Annals of Operations Research, v. 324, n. 1, p. 1399–1427, 2023. Acesso em: 15 mai. 2025.

WASCHULL, S.; BOKHORST, J.; MOLLEMAN, E.; WORTMANN, J. C. **Work design in future industrial production: Transforming towards cyber-physical systems**. Computers & Industrial Engineering, v. 139, 105679, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106579>. Acesso em: 25 maio 2025.

WEERABAHU, S.; PERERA, H.; JAYAWARDENA, L. **Digital capability maturity model (DCMM): a framework for digital transformation.** International Journal of Information Management, v. 63, p. 102–115, 2023.

WENDLER, R. **The maturity of maturity model research: A systematic mapping study.** Information and Software Technology, v. 54, n. 12, p. 1317–1339, 2012. Acesso em: 15 mai. 2025.

WERNER-LEWANDOWSKA, K.; KOSACKA-OLEJNIK, M. **Logistics Maturity Model for Service Company – Theoretical Background.** Procedia Manufacturing, v. 17, p. 791–802, 2018. Acesso em: 15 mai. 2025.

WIESNER, S.; GAIARDELLI, P.; GRITTI, N.; OBERTI, G. **Maturity models for digitalization in manufacturing—Applicability for SMEs.** In: Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0, Springer, Cham, 2018. p. 81–88. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99707-011>. Acesso em: 15 mai. 2025.

WINKELHAUS, S.; GROSSE, E. H. **Logistics 4.0: A Systematic Review towards a New Logistics System.** International Journal of Production Research, v. 58, p. 18–43, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1612964>. Acesso em: 15 mai. 2025.

WISNER, J.; TAN, K.; LEONG, G. **Principles of supply chain management: A balanced approach.** 4. ed. Boston: Cengage Learning, 2014. Acesso em: 15 mai. 2025.

WONG, W. P. et al. **The impact of external environmental on business process management and organizational performance.** Service Business, v. 8, n. 4, p. 559–586, 2013. Acesso em: 15 mai. 2025.

XU, X.; LU, Y.; VOGEL-HEUSER, B.; WANG, L. **Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception.** Journal of Manufacturing Systems, v. 61, p. 530–535, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>. Acesso em: 25 maio 2025.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. **Industry 4.0: State of the art and future trends.** International Journal of Production Research, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018. Acesso em: 15 mai. 2025.

YANG, L. et al. **Adoption of information and digital technologies for sustainable smart manufacturing systems for industry 4.0 in small, medium, and micro enterprises (SMMEs).** Technological Forecasting and Social Change, v. 188, 122308, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122308>. Acesso em: 15 mai. 2025.

YAVAS, V.; OZKAN-OZEN, Y. D. **Logistics Centers in the New Industrial Era: A Proposed Framework for Logistics Center 4.0.** Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 135, 101864, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101864>. Acesso em: 15 mai. 2025.

YIN, R. K. **Estudo de caso – Planejamento e métodos.** 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015. Acesso em: 15 mai. 2025.

YU, H.; THAPA, G. B. **A Cross-Docking Framework for Supply Chain Logistics in Production Scheduling.** Journal of Institute of Science and Technology, v. 19, n. 1, p. 39–44, 2015. Acesso em: 15 mai. 2025.

YU, H.; SUN, Y. **Digital transformation and organizational performance: a meta-analysis.** Information & Management, v. 61, n. 1, p. 1–12, 2024.

ZELLER, V.; HOCKEN, C.; STICH, V. **Acatech Industrie 4.0 Maturity Index – A Multidimensional Maturity Model.** In: Advances in Production Management Systems, p. 105–113, 2018. Acesso em: 08 mai. 2025.

ZEKHNINI, K. et al. **A Model Integrating Lean and Green Practices for Viable, Sustainable, and Digital Supply Chain Performance.** International Journal of Production Research, v. 59, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1994164>. Acesso em: 08 mai. 2025.

ZHAO, J.; SEPPÄNEN, O.; PELTOKORPI, A. **Real-time Resource Tracking for Analyzing Value-Adding Time in Construction.** Automation in Construction, v. 104, p. 52–65, 2019. Acesso em: 08 mai. 2025.

ZHENG, P. et al. **Blockchain and AI in smart supply chains: The Logistics 5.0 perspective.** IEEE Transactions on Engineering Management, v. 71, n. 1, p. 45–60, 2024. DOI: 10.1109/TEM.2024.5678901. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10345678>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

ZIZIC, M. C.; MLADINEO, M.; GJELDUM, N.; CELENT, L. **From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People.** Energies, v. 15, n. 14, 5221, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15145221>. Acesso em: 08 mai. 2025.

SITES CONSULTADOS:

BOSTON CONSULTING GROUP (BCG). **ROI of Logistics 5.0 Technologies: A Global Benchmark.** Boston: BCG, 2023. Disponível em: <<https://www.bcg.com/press/16july2024-genai-investment-high-maturity-companies-projecting-three-times-higher-roi>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA. **Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/publications/industry-50_en. Disponível em: <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en>. Acesso em: 15 mai. 2025.

INTERPOL. **Global Cybercrime Trends in Logistics: 2023 Report.** Lyon: INTERPOL Innovation Centre, 2023. Disponível em: <<https://www.interpol.int/en/News-and-Events/News/2023/INTERPOL-launches-first-ever-global-cybercrime-trends-report>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Industry 5.0: The Next Revolution in Manufacturing.** Berlim: Springer, 2021. Disponível em: <<https://launch.nttdata.com/insights/industry-5-0-the-next-revolution-in-manufacturing>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

MCKINSEY & COMPANY. **The State of Logistics 2023: Digital Transformation and Workforce Challenges**. Nova York: McKinsey Global Publishing, 2023. Disponível em: < <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-logistics-technology-race-gathers-momentum>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

RÜßMANN, M. et al. **The Future of Logistics: From Automation to Augmentation**. Boston: Harvard Business Review Press, 2022. Disponível em: < <https://hbr.org/2024/06/research-warehouse-and-logistics-automation-works-better-with-human-partners>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

STOCK, T. et al. **Logistics 5.0 in the context of Industry 5.0: A systematic review**. International Journal of Production Research, v. 62, n. 3, p. 1–25, 2024. DOI: 10.1080/00207543.2024.1234567. Disponível em: < <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2024.1234567>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

UNCTAD (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT). **Digital Economy Report 2023: Global Value Chains and Development**. Genebra: UNCTAD, 2023. Disponível em: < <https://unctad.org/webflyer/digital-economy-report-2023>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **E-Waste and Circular Logistics: Global Assessment 2023**. Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: < <https://www.unep.org/resources/report/global-e-waste-monitor-2023>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Future of Jobs Report 2023**. Genebra: WEF, 2023. Disponível em: < <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2023/>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Digital Health and Smart Logistics for Pharmaceuticals**. Genebra: WHO, 2023. Disponível em: < <https://www.who.int/publications/i/item/9789240069980>>. Acesso em: 15 mai. 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE A - LOGISTICS/SCM 4.0 MATURITY MODEL REVIEW: OPPORTUNITIES FOR TECHNOLOGIES APPLICATION

Artigo disponível em: <<https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/12148>>.

Key Words: Maturity model, reference model, Industry 4.0, Logistics 4.0, Supply Chain management.

Highlights:

Review of Logistics / SCM Maturity models under Industry 4.0 technologies perspective.

Data revealed Industry 4.0 Maturity models and Logistics/SCM 4.0 domains. Descriptive, prescriptive, and predictive approaches opportunity for maturity models. There is a need for more studies regarding maturity models' development and validation under the industry 4.0 environment.

Abstract

Maturity models have been developed over the last few years in different domains and sub-domains. However, with technology advent of Industry 4.0 in 2011, a new mindset manner arises to drive the management team in the direction of performance improvement. Thus, it has become a challenge to choose among the different technologies available, one that will both avoid negative impacts and obtain gains due to the high investment necessary to implement them. In the current literature, there is still a lack of studies to systematically review the state-of-art of a maturity model for Logistics/Supply Chain Management (SCM) in an Industry 4.0 environment. Therefore, the purpose of this paper is to identify what has been studied about maturity models in Logistics/SCM 4.0, the approaches used in the design development, and the validation process for the models developed.

In this paper, quantitative analysis results were achieved using papers from relevant journals, conferences, keywords, categories, and subcategories subjects. Also, a qualitative analysis was realized using specific data to answer the research questions. Review findings were noted, as most Industry 4.0 Maturity Models (MMs) developed for diverse domains and sub-domains. For instance, IoT and Big Data are highlighted in different papers addressing either general aspects or specific themes of Industry 4.0. It is significant the lack of studies efforts to consider the technologies maturity level for Logistics/SCM, as well as the research gap of prescriptive

and predictive approaches in model development, and validation process. Therefore, opportunities for future research were underlined.

Introduction

The fourth industrial revolution has transformed global manufacturing through a new technological wave [1]. Initially, it was based on the introduction of IoT (Internet of Things), IoS (Internet of Services), and the vertical integration of systems. CPS (Cyber-Physical Systems) has been highlighted as the main system to focus on implement. Machines, equipment, vehicles, technologies, microprocessor components, human resources, and software are integrated [2], what is allowing processes to become faster, more flexible, and more efficient in order to produce high-quality goods at reduced costs [3,4]. Therefore, current trends in the form of IoT and CPS will further increase productivity and commercial issues [5].

Due to the many benefits of Industry 4.0, this theme has been brought to various areas of research. It arises as a crucial topic for research and communication worldwide [6] and, as in this case, Logistics, which plays an important role in global costs and lead the time, as well as stands out for its potential to add value to the end consumer. The Logistics is considered the central spine of Supply Chain [7]. It coordinates resources to enable the proper material and information flow at manufacturing companies. However, most companies close down due to poor technology integration of their supply chain, which is directly impacted by the changing scenario of Industry 4.0.

Logistics stands out as a management model, and that is not to come with Industry 4.0 without the development of Logistics 4.0, which is directly related to the supply chain [8]. Consequently, logistics processes must radically change their behavior patterns through the integration of cyber systems [9]. It provides an opportunity for a logistics area and a traditional payroll network, using objects shipped with the best communication technologies to help us make decisions, reduce costs and improve process efficiency [10].

Logistics often has different challenges and barriers to maintain continuous material and information flow. Some studies confirmed the struggle for logistics to adopt Smart Manufacturing [11,12]. According to this literature review, some authors refer to traditional logistics as a transition to the Logistics or SCM 4.0. However, only a few studies focus on supporting logistics evaluation. Adequate tools to identify and to develop Logistics 4.0 capabilities are MMs [5].

MMs can be applied to business as a whole or in specific domains, e.g., business process, software engineering, knowledge management, IT architecture, and Industry 4.0 [13–15]. In this way, MMs can help organizations integrate Industry 4.0 methodology into their cultures, plan a specific project, and direct company development towards a clear view of Industry 4.0 [16]. In addition, it can drive managers into making decisions to implement and follow the stage evolution of Logistics 4.0 aiming high performance in services in this new technology wave.

In this context, is evident the need to understand the recent research and main application in the area, so that the most active communities can come together and become more critical about Industry 4.0 Maturity Model and the focusing in Logistics and Supply Chain domains.

Despite the existence of paper reviews that already investigated the maturity of Industry 4.0. During a systematic literature review, it was not identified any study with the predictive approach for MMs. Therefore, this research aims to identify what has been studied about MMs, mainly methods used to develop and validate the models and applications in the real case.

In the next section, this paper will be doing an outlook on Logistics 4.0 requirements prior to conducting an understanding literature review of the current assessment, maturity, and readiness models in a smart manufacturing environment. In Section 3, insights from previous literature are analyzed to address research questions. Section 4 reports the research methodology. Section 5 will discuss the systematic review results and answers the research questions. Finally, in section 6, the conclusion is drawn and some suggestions for further research are identified.

Logistics 4.0 requirements

Given the context that traditional Logistics must shift to smarter Logistics, logistics processes must first change their behavioral patterns through the variety of individual technical solutions the market offers, such as sensors, RFID, RTLS, and actuators, as well as transportation management systems, interconnected containers, or driverless transportation systems [9].

These elements themselves form only parts of the digital supply chain, need to make them contributors to a broader overall concept of complete connection throughout the supply chain. Combining phenomena such as IoT, Big Data, and 3D printing and other modern and innovative phenomena shape a new way of doing logistics [8,17,18]. However, these technical solutions are only the starting point on the logistics path into the 4.0 environment, which is characterized as a standalone, connected, and flexible logistics materials [19,20].

Thus, in Industry 4.0 with its sensors, actuators, physical, cyber systems integrating and interacting man and machines with various plants, networks, and conveyors will pressure logistics to be more technological, connected, flexible, fast, and intelligent [8]. The evolution from traditional logistics to Logistics 4.0 will require to understand the relationship between factors that impact the performance of the logistics chain.

In this sense, Fig 1 shows the main features from traditional logistics to Logistics 4.0, these characteristics were based on five principles: Interoperability, Virtualization, Decentralization, Real-Time Capability, Service Orientation, and Modularity [3]. Also, in the nine fundamental technological advances of industry 4.0: (1) Autonomous robots; (2) Simulation; (3) System Integration; (4) IIoT; (5) Cybersecurity; (6) The cloud; (7) Additive manufacturing; (8) Augmented reality; (9) Big Data Analytics [21]. And reports on the compatible Logistics 4.0 features accentuating the distinction between the traditional logistics and Logistics 4.0 perspective.

Traditional Logistics and Logistics 4.0 Transition				
Item	Principles	Factors	Traditional Logistics	Logistics 4.0
1	Interoperability	Additive Manufacturing	Pushed stock	Stock under demand
2	Interoperability	Autonomous Robots	Machines and equipment with manual control	Machines and equipment smart and adaptable
3	Interoperability	Autonomous Robots	Unhealthy activities performed by Humans	Automation and robotization of logistics activities to ensure employee health
4	Interoperability	Big Data	Large amount of data, without correct information for decision making.	Big data analysis and feedback
5	Interoperability	Cybersecurity	Low data security level	Greater confidence in information sharing
6	Interoperability	Integration	Isolated and outdated distribution centers	Intelligent and integrated distribution center
7	Interoperability	Integration	High lead time to customer service	Demand in real-time and responsive customer service
8	Interoperability	Integration	Decentralized systems without end-to-end integration	Real-time, one-click information
9	Interoperability	Integration	Products and materials without temperature and humidity control, impacting the quality and scrap level	Real-time temperature and humidity control monitoring
10	Interoperability	Integration	Machines and equipment without proper maintenance	Intelligent Transportation System (ITS) and Transportation Management System (TMS)
11	Interoperability	The cloud	Decentralized systems without end-to-end integration	High connectivity (IIoT, IoP, IoS, WoT); with data and information in clouding
12	Modularity	Integration	Big Distribution Centers and stock	Small distribution centers located near the consumer market and minimum stock
15	Real-time	Augmented Reality	Products and Material Loading and transportation errors on delivery	Material and products handling by operators with Augmented Reality
13	Real-time	Integration	Low effectiveness in warehouse management	Warehouse Management System (WMS) Using a modern system of (WiFi / LAN).
14	Real-time	Integration	Material and Equipment Location without traceability	High traceability of material and equipment with RFID and smart tags. Using the real-time Localization System (RTLS)
16	Real-time	Integration	Inventory Inaccuracy	High inventory accuracy
17	Service orientation	IoT/IoS	Dedicated machines and equipment as part of the company's assets	Machines and equipment shared with partners
18	Service orientation	IoT/IoS	Low competition and know-how	Operational efficiency (use of IoT and IoS), greater customer satisfaction

Fig. 1 Traditional Logistics versus Logistics 4.0 Features

Previous literature reviews and research questions

The insights from previous literature reviews are considered very important by Wendler [22], since it enables to identify suitable articles in the run-up to mapping study. Also Brandenburg et al. [23] affirms that the previous literature review background provides relevant information and structure to a new study, and justifies the need for the content analysis presented and clarifies scientific researches results obtained , as well as help to identify literature gaps regarding the topic studied. Therefore, Table 1 presents a summary analysis of methodological

previous reviews, while Table 2 demonstrates a summary analysis of theoretical previous reviews about MMs in Industry 4.0 context.

Papers that had access restrictions to their full texts or works published in journals without the JCR impact factor by Clarivate Analytics Journal Citation Reports 2019 were excluded from the literature review. Publications that were not related to the scope of this review were also not included.

The selected reviews [24–27] contain methodological approaches, while the theoretical approaches can be noted in reviews [28–30]. They do not include the perspective of Logistics/SCM 4.0 in terms of integration and technological aspects. Also, Ho, Kumar, and Shiwakoti [30] suggest more studies efforts for models' constructs validation with the use of case studies and simulations. Besides, the development of a maturity model for Supply Chain improvement.

In addition, Kamble, Gunasekaran, and Gawankar [26] have reported the challenges of addressing a maturity framework for integration between smart production networks and how this integration can benefit by sharing resources like raw materials, power plants, and the workforce. Besides, they identified opportunities to conduct exploratory studies for developing measurement constructs for Industry 4.0 technologies, process integration, and sustainable outcomes. Moreover, empirical studies may be conducted for analyzing proposed relationships using structural equation modeling. Nevertheless, these authors, as well as others, did not approach the logistics are maturity in the 4.0 environment. While these reviews build the foundation for Industry 4.0 MMs research, they are not able to clarify on current developments and future trends about approaches Logistics 4.0 MMs with integration and innovation dimensions.

Paper	Category	Title	Objectives	Conclusions	Approaches used	Opportunities
[24]	Methodological	Maturity models in supply chain sustainability: A systematic literature review	Review about maturity models with sustainability concerns .	Critical elements for success factor SSCM were identified	Research project: Development, Validation, Qualitative, Quantitative, Generic, Specific	Model application and validation should be a major concern. Identify trade-offs in SCM and maturity, define pathways of progression. Develop tools and guidelines on how to effectively implement improvement actions.
[25]	Methodological	Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review	Review of level Big Data Analysis (BDA) on SCM and propose a classification framework to connect the SC functions	Identified BDA Types used in SCM areas and Techniques to development new BDA models.	Framework to connect the SC, using the approaches: 1) Predictive 2) Prescriptive 3) Descriptive	Suggested a BDA application to SC function level. Also, functional alignment strategy for the horizontal integration of BDA-driven SC, and also horizontal integration throughout the SC. In addition major focusing more on cross-functional problems.
[26]	Methodological	Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the	Study about process and environmental protection in Industry 4.0	The most papers area conceptual studies. Case studies, simulations, and experimentations are	Framework Descriptive 1) Industry 4.0 2) Process integration	Studies efforts in validation of theories and concepts, as well as, empirical research approaches like simulations, prototypes, experimentation, and case studies.

		current trends and future perspectives		used in most empirical research.	3) Sustainable Outcomes	
[27]	Methodological	The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0	A SLR regarding key design principles and technology trends of Industry 4.0	Develop a detailed strategic roadmap for a successful transition from traditional manufacturing into Industry 4.0	A strategic roadmap of Industry 4.0 with Prescriptive features.	An investigation how the typical manufacturers can achieve organizational, operational, technical, and legal readiness in preparation for Industry 4.0, such as financial capability, data security issues, maintaining the integrity of the production process, IT maturity, and knowledge competencies.

Table 1 Summary of methodological previous reviews

Paper	Category	Title	Objectives	Conclusions	Approaches used	Opportunities
[28]	Theoretical	Industry 4.0 framework for management and operations: a review	Review of trends and areas of Industry 4.0	The category with the higher growth has been horizontal and vertical integration of systems is revealed. Integration was identified as the pillar of industry 4.0.	Qualitative analysis content was used in this review, about Horizontal integration across the entire value creation network	Major studies about i) Horizontal integration across the entire value creation network; ii) Manufacturing systems, vertical and network integration ; e iii) End-to-end engineering across the entire product life cycle.
[29]	Theoretical	A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)	Study about to provide insights that help towards developing a realistic Industry 4.0 maturity model for SMEs	Proposed a "level 0" specifically designed to reflect in real - base level for Small and Medium Enterprise (SME).	Qualitative analysis content was used in this review. Related terms such as assessment and readiness models, frameworks and roadmaps was conducted	An SME centric model should be developed. The SMEs' stakeholders will be able to better define their SM (Industry 4.0) vision, roadmap, and strategic projects.
[30]	Theoretical	A Literature Review of Supply Chain Collaboration Mechanisms and Their Impact on Performance	Review about SCC (Supply Chain Collaboration) correspond with performance.	This paper identified an evidence that the majority of scholars tend to focus on providing generic process requirements for SC.	Qualitative analysis of content about Supply chain performance categorized in 3 dimensions: operational, financial and environmental.	1) The use of other research strategies such as case studies and simulation models to explore the relationships between specific constructs of SC and performance outcomes; 2) Research on horizontal and internal collaboration; 3) A maturity model as an improvement tool for SC.

Table 2 Summary of previous theoretical reviews.

Based on these findings, this work will address the following questions:

Which are the main maturity models studies dealing with Logistics/SCM 4.0?

Which are the Logistics/SCM 4.0 maturity models' main domains?

Which are the approaches used to develop maturity models?

How were the developed maturity models validated in real case applications?

Which are the research directions for Logistics/SCM MMs in the Industry 4.0 environment?

Research methodology

Based on Seuring et al. [31], the systematic literature review (SLR) is an essential part of any study; it is a document analysis conducted as content analysis. A SLR has an objective to identify the literature gaps and point out the opportunities for improvement, so the field of study may be more strengthened [32]. Kitchenham [33] proposed guidelines for a SLR, applied in order to identify existing MMs in the context of Industry 4.0. MMs in the fields of smart manufacturing and smart Logistics were selected as the starting point of the search. Tarhan [34] conducted a structured literature review through an interactive method defining suitable search keywords, searching the relevant literature, and performing the analysis at the end of pinpoint gaps in research related to MMs. In this paper, the author adopted a similar review procedure. This research has been conducted by applying a systematic literature review method using a mixed-methods approach, gathered from models proposed by Wendler [22], Thomé [35] and Kitchenham [33]. Furthermore, this paper is structured by following the method outlined in the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and meta-analyses: PRISMA [36], whose method is widely used in academic studies as can be seen in the published in others SLR[37,38]. Also, it will follow three steps: i) Paper collection; ii) Data collection; and iii) Data Analysis and Synthesized Results

Papers collection

Table 3 presents an explicit criteria inclusion and exclusion of the collected papers was used to assure the integrity of the selection of the papers, using Liao et al. and Uhlmann and Frazzon [37,38] methods. Also, the criteria of WR (Without Scientific recognition) was based on Ensslin et al., [39] method. It has established six main subsets.

Inclusion/ Exclusion	Criteria	Criteria Explanation
Exclusion	SER (Search engine reason)	Papers have only its title, abstract and key words in English, but not their full text
	WF (Without full-text)	Papers without the full text to be assessed.
	NR (Non-related)	NR1 – Not academics articles. For instance, editorial materials, conference reviews, contents, or forewords. NR2- Papers with title and abstract are not aligned with maturity models. The titles indicate other subjects. NR3 – Papers without scientific recognitions.
	LR (Loosely related)	Papers that do not have a focus in the discussion, or problem-solving of maturity models: LR1 – Maturity model is only used as an example; LR2 – Maturity model is only used as a part of its future research direction, future perspective or future requirement; LR3 – Maturity Model is only used as a cited expression; LR4 – Maturity Model is only used in keywords and/or references.
Inclusion	CR (Closely related)	CR1 – The research efforts of a paper is explicitly and specifically dedicated to Maturity Model.
	WR (Without Scientific recognition)	Papers related to maturity models without scientific recognition: SR1 – Publications of less than 2 years. SR2 – Publications of relevant authors.

Table 3 Exclusion and Inclusion Criteria.

Based on the PRISMA Statement described by Moher et al. [36], a flow chart reports the different paper selection phases of a systematic literature review, illustrated in Fig. 1.

The search string was built to select papers to a final portfolio through the combination of the operators "or" between the following terms: "maturity", "readiness", "capability model", "roadmap", "framework" and "Industry 4.0", "logistics", "supply chain".

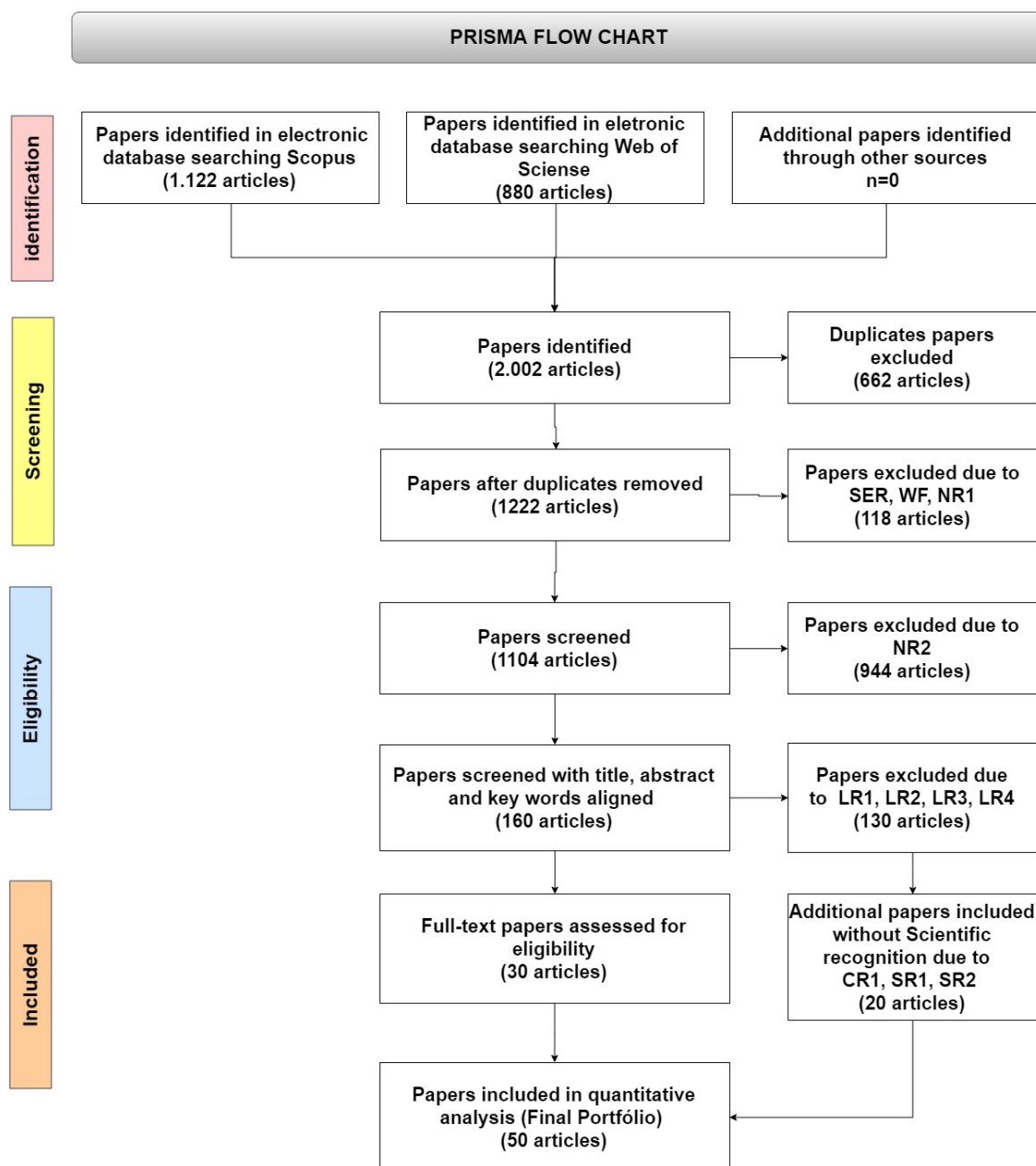


Fig. 1 Prisma flow chart used to select final portfolio

The relevant data sources of publication were identified regarding the theme. Due to the access to a wide range of academic and conference publications, this study referred to papers from Scopus and Web of Science (WoS) databases, which contain important

publications and renowned journals as Elsevier, Springer, Taylor & Francis, Emerald, IEEE. These databases are cited in other reviews papers such as: Seuring et al.[31]; Correia et al. [24]; Liao et al.,[37] and Ghobakhloo [27]. Besides, Scopus and Web of Science (WoS) databases are used to search related peer-reviewed papers for review [40], journals in the fields of science, technology, medicine, and social sciences. Kamble, Gunasekaran and Gawankar [26] affirm that these peer-reviewed journals belong to a various publishing house.

To the selection of academic papers, the following criteria were used: (1) publication in journals, conference proceedings or book series; (2) search selection in the fields: article title, abstract and keywords; (3) articles written in the English language. In the first screening process 622 duplicates articles were removed. Besides, the process carried out 118 articles for which (1) had only their titles, abstracts, and keywords in English (SER); (2) Without full-text (WF); (3) not academic articles (NR1).

After the initial screening, a brief review by reading their titles, abstracts, and keywords or additional information of full text was needed to define inclusion or exclusion process (NR2); also, papers without scientific recognition were excluded (NR3). The second screening process was performed to exclude: (1) papers that define the "maturity model" out of context or focus of this study (LR1, LR2, LR3, LR4). Finally, the articles were listed in descending order, of citation number based on Google Scholar information. Thirty papers, which represent 81% of this total citation quantity amount, were included in the quantitative synthesis analysis. After that, eligible articles were deeply studied. Also, 20 papers (2%) were examined without scientific recognition and from relevant authors. Those aligned with the subject were also included (CR1, SR1, SR2).

Data collection

For each paper included in the final portfolio for quantitative synthesis, two sets of information were collected. The first one is for primary content information, and the other is for answering the research questions, as presented in Table 4.

Tabela 4 – Data Collection

Type	Description	Source
Primary Information	Title; Authors; Publication Year; Keywords; Source Type; Journal or Conference name	Databases
	Journal impact factor (JCR) 2018	Thomson Reuters impact factor Clarivate Analytics 2019 (https://clarivate.com/essays)
	Content-based categories:	Based on Wendler [22], maturity models have different purpose Paper's categories were classified as: Review: which presents a review that has maturity model as its main content. Discussion: which presents a discussion about challenges, issues or trends (theoretical reflection). Concept development: contain conceptual as well as design-oriented models or descriptions of models, with the purpose of introducing a new model or proposing theoretical solutions, but without experiments or applications. Validation: articles within this topic area have the main purpose of validating existing maturity models and practical solution. Besides conceptual or theoretical solutions, it provides a laboratory experiment by simulation tools or validation in real case application.
Research Question Information	Q1. Which are the main maturity models studies dealing with Logistics/SCM 4.0? Q2. Which are the Logistics/SCM 4.0 maturity models' main domains?	The objectives of the maturity models are to improve or provide a better recovery from the current situation (WENDLER, 2012). Logistics is being pressured to become more integrated, connected, intelligent, and service orientation, as well as able to meet customer needs and transform its current way of doing business by automating value-added processes, real-time monitoring, improving quality, and reducing material and information flow time (WANG et al., 2016).

Q3. Which are the approaches used to develop maturity models?	De Bruin [14]; Maier, Moultrie and Clarkson [41]; Tarhan , Turetken, and Reijers[34]. The papers were classified as: Descriptive: an application of the model would be viewed as a static assessment of the current state. Prescriptive: emphasize relationships between performance and use as enhancements to the following items previously indicated, based on the improvement roadmap. Comparative: able to compare similar practices and maturity results between plants of the same organization, sectors, or regions.
Q4. How were the developed maturity models validated in real case applications?	Papers that set of applied research designs and methods, as: Research design: Qualitative empirical, or quantitative empirical Research methods: Survey, case study, action research, interview, or no method applied.
Q5. Which are the research directions for Logistics/SCM MMs in the Industry 4.0 environment?	Qualitative synthesis and recommendations for future research were extracted from the conclusions of recent papers (2017 to 2019).

Table 4 Data collection source.

Data Analysis and Synthesized Results

The collected data was analyzed through quantitative and qualitative methods in order to explain the findings and answer the research questions. The data were inputted in a spreadsheet, and graphs were generated to obtain information about MMs. The synthesized results are reported in the Results and Discussion section.

Results and Discussion

In this section, the results and discussions of the systematic literature review are presented. Based on the methodology adopted, the final portfolio is composed of 50 papers in quantitative synthesis. Firstly, the primary data analysis is presented to allow a panorama of included papers. After that, it is presented the data analysis regarding each research question proposed.

Primary data analysis:

50 papers were found in the electronic databases. Fig. 3 shows 30 articles [8,15,16,22,24–29,34,35,40,42–58] of these 50 papers. Those are the ones with higher number of citations (>10) included in the quantitative analysis. They represent 81% of the total citation of the 142 included papers of qualitative synthesis.

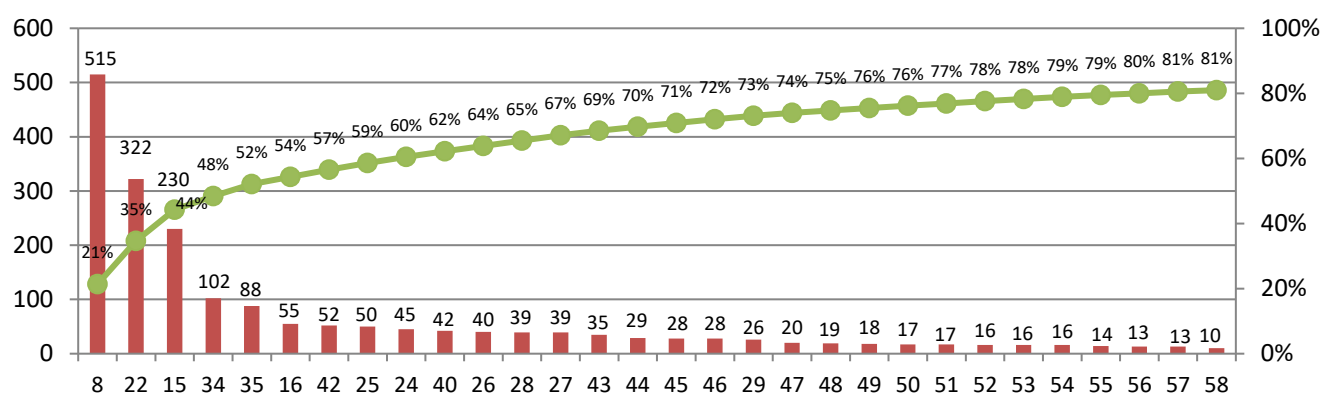


Fig. 2. Quantity of citation per paper and accumulative weight.

Fig.4 shows the other 20 articles [5,11,12,19,20,59–73]. Even though they do not present a high number of citations, consequently not having scientific recognition (SR1), they

were considered relevant due to their contents being explicitly aligned to the subject (CR1). Also, these papers are publications of relevant authors (SR2).

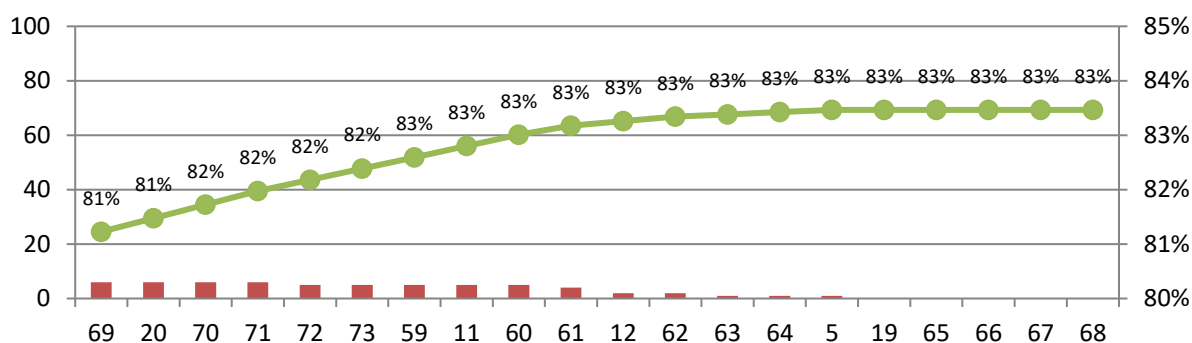


Fig. 3. Others papers included in qualitative analysis

Fig. 5 illustrates the number of papers per publishing type, 31 published (62%) in a scientific journal. In addition, given the current and important subject, papers from different publishing types were considered on qualitative analysis: 10 selected articles (20%) are from conference proceedings and six articles (12%) were published in the book section and three published (6%) in serial.

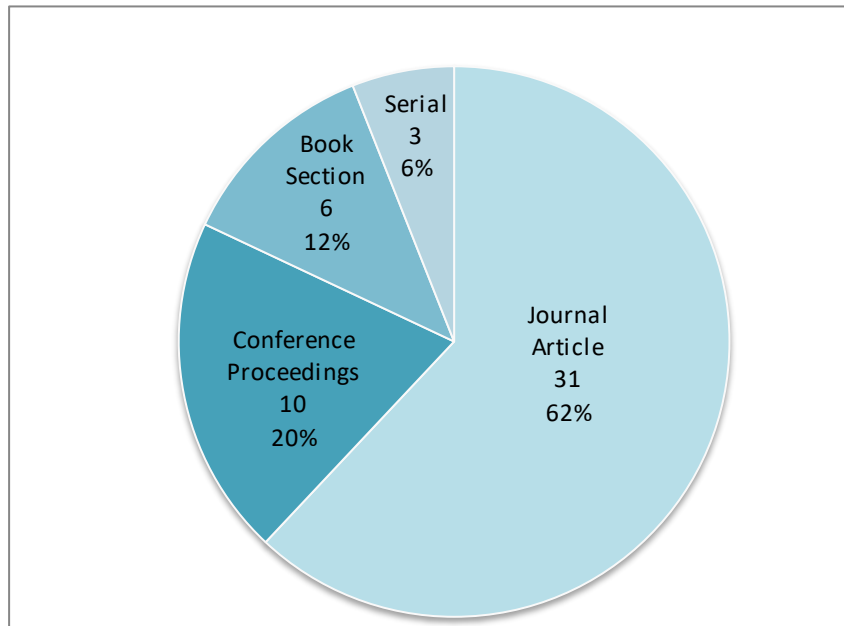


Fig. 4. Quantity of papers per publishing type

Regarding publications in scientific journals, Fig.6 shows the number of publications per journal, and three journals have published more than 1 article. 22 of 28 journals (79%)

are classified at the Clarivate Analytics Journal Citation Reports 2019. It means that publications on the topic are of common interest in many areas, for instance, management, social, engineering, environment, and information technology.

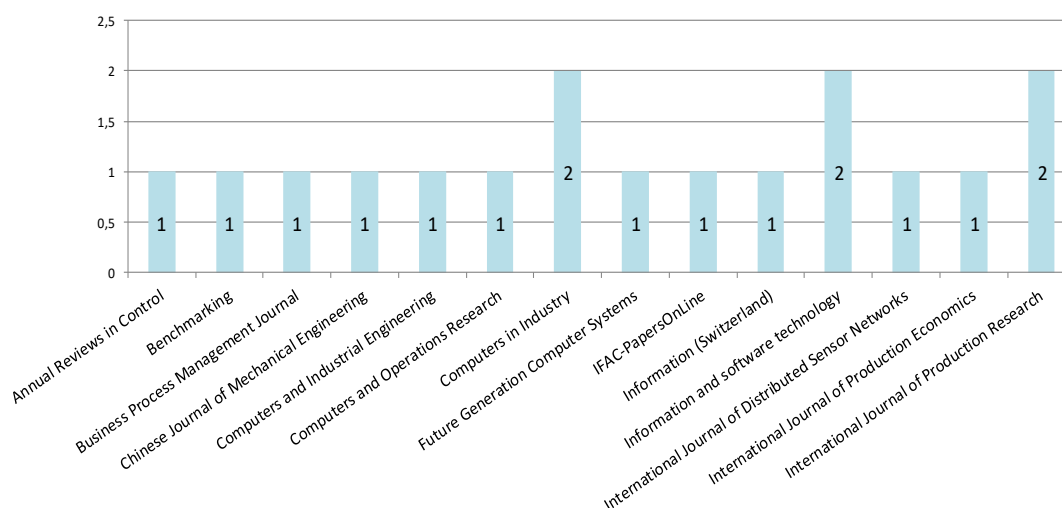


Fig. 5. Quantity papers per journal.

Fig. 7 shows that MMs focusing on smart manufacturing features issues are being studied since the beginning of this decade, with the technology advent of Industry 4.0 in 2011. Nevertheless, only in the last four years, publications in important journals have intensified. They peaked in 2018 and continued with growing, showing a positive tendency in 2019. However, due to this recent interest, other sources have been appearing to be important information generators, like conferences proceedings, books, and serials.

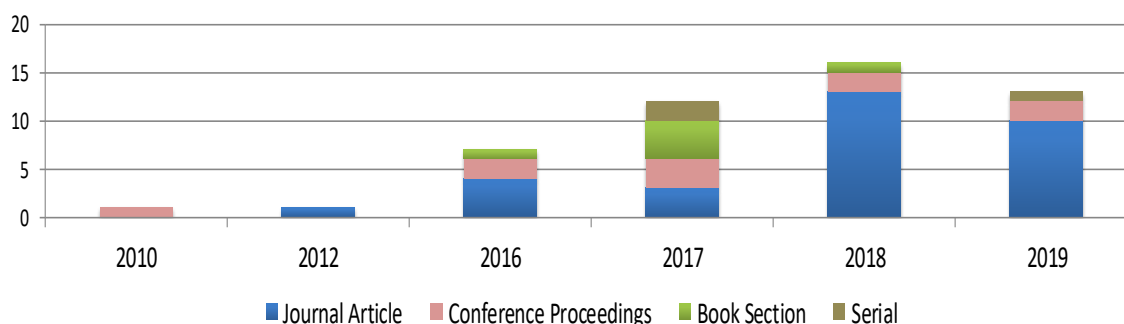


Fig. 6. Quantity paper per year.

Data analysis with specific purposes: Research questions

In this section, research questions are answered based on the 50 papers included in the quantitative synthesis. Firstly, paper classification is related to content-based categories. Table. 5 shows the MM's design features, supporting the answers to question (Q1).

5.2.1 Q1. Which are the main maturity models studies dealing with Logistics/SCM 4.0?

Industry 4.0 General	Logistics/SCM 4.0	Engineering Software/ Ind Software/TI Architecture	BPM (Business Process Management) / Enterprise
26	16	5	3
52%	32%	10%	6%
			100%

Table 5. Maturity Models content-based category

Twenty six articles (52%) of included papers regarding Industry 4.0 MMs dimensions are driven generic form, involving operational and strategic organizational dimensions. In addition, 16 papers (32%) regard logistics/supply chain, and five papers (10%) have studied Engineering Software/IT Architecture. Finally, three papers focused on BPM and Enterprise. Table 6 presented details of total papers per category.

Category	Papers
Industry 4.0 General	[8,15,49,53,58–60,63,64,66,68,69,16,70,72,74–76,19,27–29,44,47,48]
Logistics / SCM 4.0	[5,11,12,20,24–26,40,42,43,51,54,62,65,67,77]
Eng. Software /TI Architecture	[45,50,78–80]
BPM (Business Process Management) / Enterprise	[22,34,35]

Table 6. Papers per category

5.2.2 Q2. Which are the Logistics/SCM 4.0 maturity models domains?

Referring to Logistics/SCM 4.0, Fig. 8 shows that there are no research efforts in studying technologies application in Production Logistics. In addition, 5 articles (31%) treat about IoT [20,42,54,62,65], and 4 articles (12%) are related to Big Data [12,25,40,67]. Also, two articles involve the Risk / Barriers Management [43,61] of the Supply Chain, and two papers treat about sustainability [24,26]. Besides, one paper [11] addresses material and information flow at logistics services providers. Additionally, 01 paper applies horizontal integration among the marketing and planning area [51]. Finally, 01 paper [5] approaches internal logistics in the framework; however, it addresses only data analysis and management.

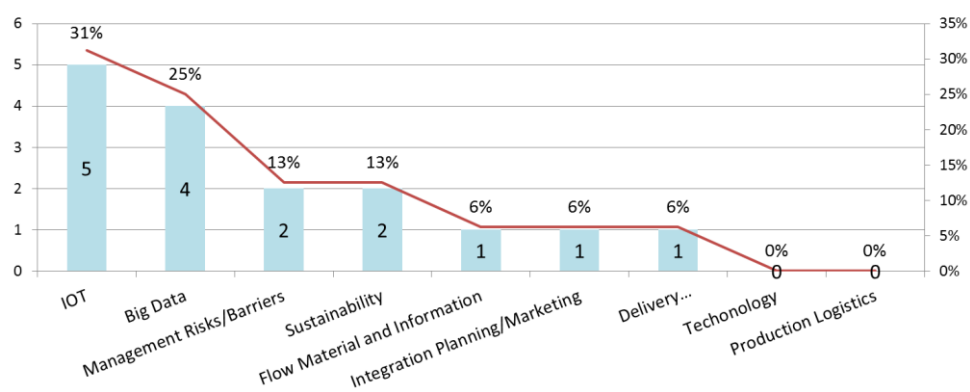


Fig. 7. Logistics/SCM 4.0 Maturity Models content-based category

5.2.3 Q3. Which are the approaches used to develop maturity models?

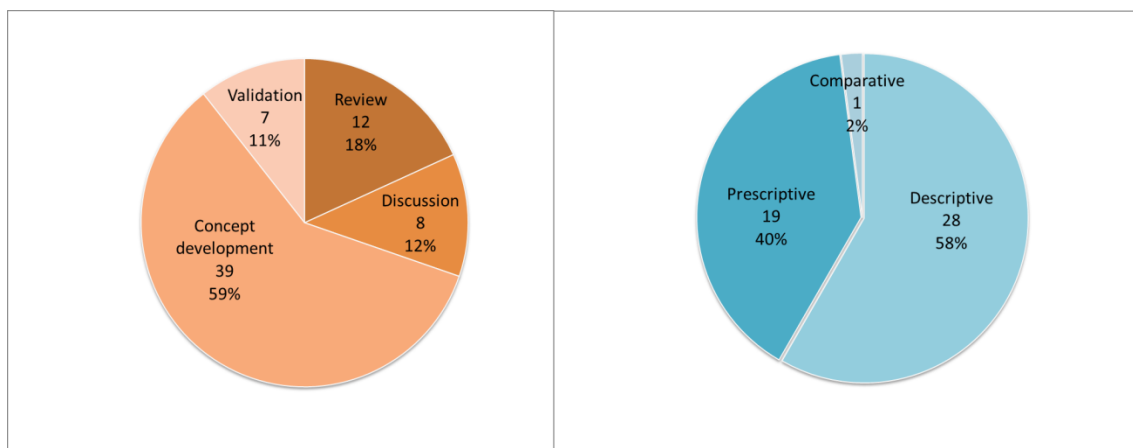


Fig. 8. Maturity model design approaches.

As for research question (Q3) answer, the classification of the 50 articles per research content revealed in four recurring concepts. The distribution of these concepts is shown in Fig. 9. The total amount of all articles adds up to more than 50 articles because one article could contain more than one of the named concepts. Therefore, Figure 10 illustrates that most of the studies are theoretical solutions, 39 papers (59%) with concept development. Eight papers (12%) present discussions about MMs and 12 papers (18%) present a review of other studies available on literature. Additionally, seven papers (11%) are classified as practical applications with validations of models proposed. Furthermore, the descriptive design approaches present in most studies, 28 papers (58%) and 19 papers (40%) have a prescriptive design. Only one paper (2%) is categorized as a comparative study.

5.2.4 Q4. How were the developed maturity models were validated in real case applications?

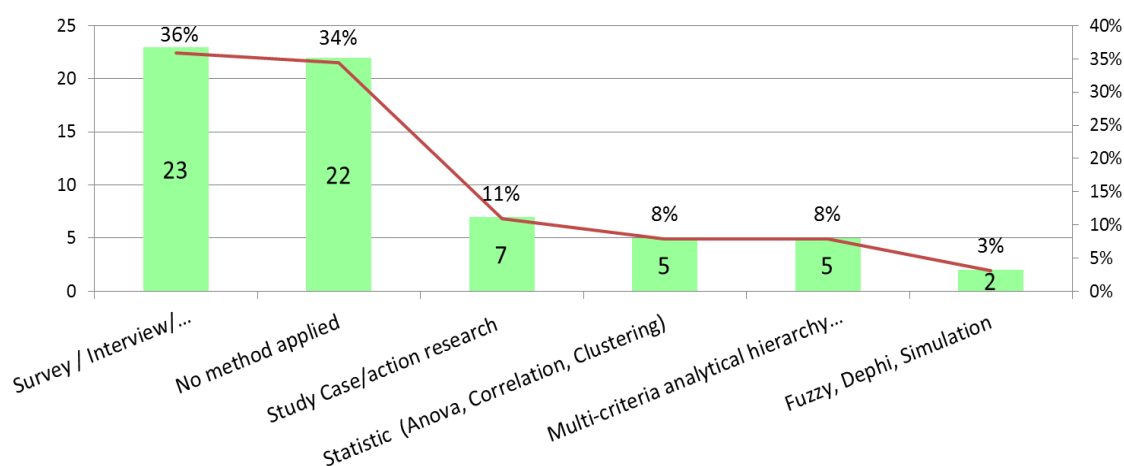


Fig. 9. Maturity models empirical validation

Fig. 10 shows 23 papers (36%) use methods as a survey, interview, or focus group. Twenty-two papers (34%) did not apply any methods in their development, only using theoretical research to build the MMs. Also, five papers (8%) applied statistics and decision-making tools such as AHP, Dematel, and Interpretive Structural Modelling (ISM) techniques. Besides, two papers (3%) used Fuzzy, Delphi, and simulation to

validate the model's variables. Finally, concerning empirical studies, 7 papers (11%) [15,58,60,66,70,72,81] applied study case, and action research. Information extracted from these articles will be presented follows

A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises presented nine dimensions and assigned 62 items to them for assessing Industry 4.0 maturity. The dimensions "Products", "Customers", "Operations", and "Technology" have been created to assess the basic enablers. Additionally, the dimensions "Strategy," "Leadership," Governance, "Culture," and "People" allow including organizational aspects into the assessment. A study case was applied with an Austrian manufacturing enterprise with around 400 employees, which designs and manufactures aerospace components and test equipment [15].

Smart Factory Implementation and Process Innovation A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing presented a maturity model for Smart Factory implementation built around three overarching principles: cultivating digital people, introducing agile processes, and configuring modular technologies. The study was applied to five factories operated by two automotive manufacturers who are leading the way in adopting the smart factory concept. Referred to throughout Truckcorp and Carcorp — widely recognized as front loaders in process innovation and smart factory implementation. Challenges were founded into three broad categories: people's challenges, technology challenges, and process challenges [58].

Maturity Models and tools for enabling smart manufacturing systems: Comparison and reflections for future developments presented three different MMs and tools that, thanks to their complementarity, enable one to reflect on the different perspectives required by "Smart Manufacturing Systems Characterization" (SMSC). This aims at establishing a roadmap for a unified framework for assessing a manufacturer's capability, maturity, and readiness level to implement Smart Manufacturing. Critical aspects for Smart Manufacturing adoptions identified, such as technology maturity, information connectivity maturity, process maturity, organizational maturity, and personnel capability and maturity [70].

Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0 presented digital maturity assessment approach, 360 Digital Maturity Assessment, which is based on the Problem Based Learning (PBL) model. The 360DMA has been tested and initially validated by the authors within a large Danish manufacturing company. Five digital dimensions were designed: Technology, connectivity, competences, value creation, and governance, in relation to digital stages: none, basic, transparent, aware, autonomous, and integrated [82].

Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union presented an existence of a digital infrastructure combined with the analytical capabilities to deal with big data emerge as the two dimensions proposed: the first one was called Industry 4.0 Infrastructure, and it refers to the combination of interconnectivity, interoperability, and virtualization. And the second dimension was called Big Data Maturity and expresses the ability to process the information generated by the Industry 4.0 infrastructure (information transparency) [60].

Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises presented model thereby builds on the maturity assessment of 65 critical success factors in Industry 4.0 which is grouped in 8 maturity dimensions as follows:

Dimension 1 – Technology (9 items)

Dimension 2 – Products (7 items)

Dimension 3 – Customers and Partners (8 items)

Dimension 4 – Value Creation Processes (8 items)

Dimension 5 – Data & Information (8 items)

Dimension 6 – Corporate Standards (8 items)

Dimension 7 – Employees (9 items)

Dimension 8 – Strategy and Leadership (8 items)

Sequencing to create company-specific realization-paths and roadmaps following a 10-step approach was given. Also, maturity stage-related to the realization phases towards Industry 4.0 were approached: Enable; Implement, and Formalize. In that study cases, the model was applied and validated in the manufacturing industry in Austria, Germany, Slovakia, Hungary, as well as China and India [63].

A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era presented an approach based on Problem-Based Learning (PBL) for structuring a digital maturity assessment is performed. Which proposed 360DMA consisted of the application of the artifact in three industrial cases. The involved companies are all large Danish manufacturing companies interested in gaining a deeper understanding of the Industry 4.0 agenda and in being guided towards the definition of a roadmap for approaching the digital transformation. The obtained maturity stages progression consists of six sequential stages: (1) None, (2) Basic, (3) Transparent, (4) Aware, (5) Autonomous, and (6) Integrated. Besides, five dimensions can be assessed: Governance, Technology, Connectivity, Value creation, and Competences. In all cases, the model was successful due to being validated in regards to its contextualization capabilities according to the defined criteria and useful to formulate of context-specific improvement recommendations [66].

5.2.5 Q5. Which are the research directions for Logistics/SCM MMs in the Industry 4.0 environment?

In qualitative synthesis addressed, the recent papers recommended the following directions: 05 papers already previously suggested future works in section 3, due to literature review papers are considered; 01 paper from Abdel-Basset, Manogaran, and Mohamed [42] did not informed recommendations for the future research; and ten papers suggested the methods, design, and models validation for Logistics/SCM 4.0 in different environments, as follows:

Tucker and Paxton (2010) present a Supply Chain Readiness Level (SCRL) model that can be used to evaluate and implement an adaptable and sustainable supply chain program at an enterprise level. It also showed the use of SCRL in conjunction with Technology Readiness Levels (TRLs), Manufacturing Readiness Levels (MRLs) based on National

Aeronautics Space Administrations' (NASA's) Project Lifecycle Process. Concerning future works, the simulation would allow the manipulating of the SC model, thus, altering the SCRL, and the measurement of the impact on the enterprise supply chain, which can be accomplished with a full supply chain model or by using models that focus on specific characteristics (e.g., strategic inventory placement) [61]

Trappey et al. (2017) analyzed the related technology roadmaps for the adoption of IoT technologies in smart logistic services. The generic visual roadmap was created using computer-aided techniques, combining the ontology with the patent roadmap visualization approach. Future research needs to incorporate Artificial Intelligence to help researchers automatically produce non-biased ontologies. Also, other elements of I 4.0 should be considered as a full spectrum of the patent roadmap analysis and visualization [54].

Sternad, Lerher, and Gajsek (2018) proposed a maturity model based on NRW's Industry rough outlines of Logistics 4.0 maturity model with a focus on data management in three logistics subsystems: purchasing logistics, internal logistics, and distribution logistics. In future studies, the creation of road maps to improve MMs in logistics and a more specific maturity model for logistic is suggested [12].

Asdecker and Felch (2018) developed a maturity model focusing on outbound logistics, i.e., the delivery process, which can be defined as all activities that are necessary to fulfill a customer order. In what refers to future researches, the authors suggested the comparison of delivery process elements among DPPM4.0 and SCOR, and the assessment of more topics or higher maturity levels for the development of new delivery technologies [5].

Ivanov, Dolgui, and Sokolov (2019) identified the application of simulation and optimization in the SCM and different directions for broadening these uses with help of digital technologies. BDA and advanced T&T systems can be extensively used to obtain real-time information on the scope and scale of disruptions, to understand their propagation in the SC, and to simulate possible recovery strategies. For the future, rigorous data-driven empirical research is needed to derive more generalized and objective insights into this emergent research field. Besides, new emerging digital technologies from different areas, such as blockchains or omnichannel, will more and more applied to SCM [43].

Ardito et al. (2019) identified by patent data, the set of digital technologies, like cloud computing, Industrial IoT, cybersecurity, Big Data analytics, and customer profiling, that may enable SCM and Marketing integration. Digital solutions better sustain the implementation of the information processing mechanisms that are required for effective SCM-M integration. In the future, research should better analyze the implementation and usage of the enabling technologies. Also, an assessment should be provided of these technologies' implementation and their impacts on financial and operational performance [51].

Oleśków-Szłapka and Stachowiak (2019) presented a framework of the logistics 4.0 Maturity Model, developed to assess the current status of companies providing logistics services, with three dimensions: Material flow, information flow, and management. In the future, a road map for improvement process should be provided; thus Logistics 4.0 maturity model will help visualize companies' paths and set priorities. Besides, future studies can be developed in dynamic system models to assess a company's behavior in the form of a causal loop. As well, the model will add a dynamic layer to the static concept of logistics maturity levels [11].

Singh, Kumar, and Chand (2019) developed a framework for evaluating coordination effectiveness in Industry 4.0-based supply chains. They observed that top management is giving more focus on organizational issues such as lean organization structure, organization culture, and responsiveness factors for improving coordination in the supply chain rather than on Industry 4.0 technologies, such as IoT, AI, CPS, and ICTs. Besides, their adoption can improve the information flow and relationship building, i.e., coordination in supply chains. Thus the up-gradation of technological infrastructure is very important in the era of Industry 4.0. In future works, a coordination framework can be validated on the basis of empirical studies before generalization. Besides, further extended for analyzing other issues of the supply chain such as flexibility, agility, overall performance, etc., and for comparing different sector's performance [65].

Makris, Hansen, and Khan (2019) presented a graphical framework to adapt Supply Chain 4.0. The focus has been limited to three key emerging trends: Big Data, cloud computing, and 3D printing. In empirical findings showed that among the investigated trends, 3D printing was considered to have a significant impact on Supply Chain 4.0. Future researches were suggested as follow [67].

Repeat this study with a larger sample;

Apply the developed graphical representation in industries;

Expand on all impacts, for example, the relation between cyber risk and each emerging trend;

Examine how the identified key trends interact if applied together;

Examine more or different key emerging trends related to the transformation of the current supply chain model to SC 4.0;

Include companies operating in other industries to the study;

Expand the study to SMEs.

Kamble et al. (2019) identified the barriers that affect the adoption of IoT in the retail supply chain in the Indian context and also investigated the causal relationship among barriers using an "Interpretive Structural Modeling" (ISM) and "Decision-making trial and evaluation laboratory " (DEMATEL) technique. Lack of standards was the most important finding of the study, due to its direct influence from the lack of regulations and governance. Therefore, the practitioners in the retail food business should start adopting the GS1 standards for data standardization and information sharing across the various supply chain partners. In future research, to gain more insights on IoT adoption, an empirical survey must be applied. In addition, statistical validation to identify constructs relationships could be tested by structural equation modeling (SEM) [62].

Conclusions

The main objective of this paper is to systematically review the academic studies related to Logistics 4.0 MMs in a smart manufacturing environment, as well as to identify gaps and opportunities for technologies application on Production Logistics

At the first stage, this paper presented an outlook on current logistics features, and requirements to achieve Logistics 4.0. Principles and attributes that emphasize the distinction between traditional and Logistics 4.0 were also presented. In the second stage, quantitative synthesis was performed and resulted in a primary analysis as follows: (1) MMs with dominance in smart manufacturing have been published since 2016, motivated

by the technological wave named Industry 4.0 in 2011. Publications in the field are growing, which shows that the subject is increasing interest in academia; (2) most articles cited are prominent in relevant journals classified in 2018 at the Clarivate Analytics Journal Citation Reports 2019. However, as the subject is trendy and is still under development, there are a large number of publications in conferences, book section and serial; (3) among the cited researches, there is no evidence of Logistics/SCM 4.0 MMs that deal with the technologies application in production logistics, which provide a causal relation with the Logistics Maturity level; (4) most studies were developed for Industry 4.0 in a general manner, focusing on management and strategic aspects.

In what refers to attend specific purposes, perform data analysis in order to answer each of the research questions and provide future directions, it was possible notice that: (1) Among the articles cited, research gaps were identified in MMs for Logistics/SCM 4.0 with technologies application in Productions Logistics. New studies could be explored to consider the Industry 4.0 technologies in order to coordinate material and information flow between the warehouse and production area. Furthermore, combining technologies such as IoT, Big Data, 3D printing, and other modern and innovative phenomena gives a new format for logistics. Thus, technology applied have different importance degree and could have a significant impact on Logistics/SCM 4.0; (2) most studies show models only focusing on conceptual development, and few models compared to others models. Besides, they are not well validated. Moreover, this analysis also confirmed and emphasize the gap between Industry 4.0 MMs developed and validated Therefore, it arises an opportunity to create models with both objectives simultaneously; (3) descriptive approach is the most used per article cited, followed by prescriptive and comparative. Thus, models could be developed for application in real cases. Nevertheless, to give an anticipate vision to the management team concerning model application impacts on production processes, a predictive approach could be ordered at MMs using simulation computing; (4) others recommendation can be assessed in the recent review papers.

In this paper, several limitations should be noted, as follows: firstly, only two databases were consulted: the largest abstract and citation database of peer-reviewed literature (Scopus), and another multidisciplinary database (Web of Science); secondly, inclusion criteria considered only articles in the English, papers from journals, conference, book section and serial, and sub-areas of engineering; finally, papers from other specific areas

and published before 2000 were excluded; only papers considered paramount of this subject were maintained. However, this systematic literature review followed appropriate restrictions and methodology; therefore, it give an panorama of state-of-art with reached results. Furthermore, research questions were answered; thus, the study purpose has been achieved. In the next step, future works will develop a maturity model with descriptive, prescriptive and predictive approaches, which adds the technologies of Logistics 4.0 as constructs of the model.

This study was financed by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina UFSC Brasil.

References

- [1] H. Kagermann, J. Helbig, A. Hellinger, W. Wahlster, 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, Forschungsunion, 2013.
- [2] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, K. Ueda, Cyber-physical systems in manufacturing, *CIRP Ann.* 65 (2016) 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.
- [3] M. Hermann, T. Pentek, B. Otto, Design principles for industrie 4.0 scenarios, in: 2016 49th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci., IEEE, 2016: pp. 3928–3937.
- [4] T. Stock, G. Seliger, Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0, *Procedia Cirp.* 40 (2016) 536–541.
- [5] B. Asdecker, V. Felch, Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains, *J. Model. Manag.* 13 (2018) 840–883. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2018-0042>.
- [6] K.-D. Thoben, S.A. Wiesner, T. Wuest, “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples, *Int. J. Autom. Technol.* 11 (2017) 4–16. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>.
- [7] R.H. Ballou, The evolution and future of logistics and supply chain management, *Eur. Bus. Rev.* 19 (2007) 332–348.
- [8] S. Wang, J. Wan, D. Li, C. Zhang, Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook, *Int. J. Distrib. Sens. Networks.* 12 (2016) 3159805.
- [9] S. Lee, Y. Kang, V. V Prabhu, Smart logistics: distributed control of green crowdsourced parcel services, *Int. J. Prod. Res.* 54 (2016) 6956–6968.
- [10] L. Wu, X. Yue, A. Jin, D.C. Yen, Smart supply chain management: a review and implications for future research, *Int. J. Logist. Manag.* 27 (2016) 395–417.

- [11] J. Oleśków-Szłapka, A. Stachowiak, The framework of logistics 4.0 maturity model, *Adv. Intell. Syst. Comput.* 835 (2019) 771–781. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3_73.
- [12] Maturity Levels for Logistics 4.0 Based on Nrw'S Industry 4.0 Maturity Model, *Bus. Logist. Mod. Manag.* 18 (2018) 695–708.
- [13] P. Fraser, J. Moultrie, M. Gregory, The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability, *IEEE Int. Eng. Manag. Conf.* 1 (2002) 244–249. <https://doi.org/10.1109/iemc.2002.1038431>.
- [14] T. de Bruin, M. Rosemann, R. Freeze, U. Kulkarni, Understanding the main phases of developing a maturity assessment model, in: *ACIS 2005 Proc. - 16th Australas. Conf. Inf. Syst., Faculty of Information Technology, Queensland University of Technology, Brisbane, QLD, Australia, 2005*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84869135773&partnerID=40&md5=d38671eaa4bdba15dfb14a30e3d737da>.
- [15] A. Schumacher, S. Erol, W. Sihn, A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises, in: *Procedia CIRP, Fraunhofer Austria Research GmbH, Theresianumgasse 7, Vienna, 1040, Austria, 2016*: pp. 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>.
- [16] J. Ganzarain, N. Errasti, Three stage maturity model in SME's towards industry 4.0, *J. Ind. Eng. Manag.* 9 (2016) 1119–1128. <https://doi.org/10.3926/jiem.2073>.
- [17] J. Lee, *Smart Factory Systems, Informatik-Spektrum.* (2015). <https://doi.org/10.1007/s00287-015-0891-z>.
- [18] Z. Xu, J. He, Z. Chen, Design and actualization of IoT-based intelligent logistics system, in: *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag., Nanyang Technological University, Singapore 637553, Singapore, 2012*: pp. 2245–2248. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2012.6838146>.
- [19] M. Ghobakhloo, Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing, *Int. J. Prod. Res.* (2019). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630775>.
- [20] E. Manavalan, K. Jayakrishna, A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements, *Comput. Ind. Eng.* 127 (2019) 925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>.
- [21] M. Rüssmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, M. Harnisch, *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, 2015*. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.
- [22] R. Wendler, The maturity of maturity model research: A systematic mapping study, in: *Inf. Softw. Technol., 2012*. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2012.07.007>.
- [23] M. Brandenburg, K. Govindan, J. Sarkis, S. Seuring, Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions, *Eur. J. Oper. Res.* 233 (2014) 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>.
- [24] E. Correia, H. Carvalho, S.G. Azevedo, K. Govindan, Maturity models in supply chain sustainability: A systematic literature review, *Sustain.* 9 (2017).

<https://doi.org/10.3390/su9010064>.

- [25] T. Nguyen, L. ZHOU, V. Spiegler, P. Ieromonachou, Y. Lin, Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review, *Comput. Oper. Res.* 98 (2018) 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.07.004>.
- [26] S.S. Kamble, A. Gunasekaran, S.A. Gawankar, Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives, *Process Saf. Environ. Prot.* 117 (2018) 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>.
- [27] M. Ghobakhloo, The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0, *J. Manuf. Technol. Manag.* 29 (2018) 910–936. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>.
- [28] J.A. Saucedo-Martínez, M. Pérez-Lara, J.A. Marmolejo-Saucedo, T.E. Salais-Fierro, P. Vasant, Industry 4.0 framework for management and operations: a review, *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.* 9 (2018) 789–801. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0533-1>.
- [29] S. Mittal, M.A. Khan, D. Romero, T. Wuest, A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs), *J. Manuf. Syst.* 49 (2018) 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>.
- [30] D. Ho, A. Kumar, N. Shiwakoti, A Literature Review of Supply Chain Collaboration Mechanisms and Their Impact on Performance, *EMJ - Eng. Manag. J.* 31 (2019) 47–68. <https://doi.org/10.1080/10429247.2019.1565625>.
- [31] S. Seuring, M. Müller, M. Westhaus, R. Morana, Conducting a literature review—The example of sustainability in supply chains, in: *Res. Methodol. Supply Chain Manag. Collab. with Magnus Westhaus, Supply Chain Management Center, Institute for Business Administration, Carl von Ossietzky University Oldenburg, 26111 Oldenburg, Germany, 2005: pp. 91–106*. https://doi.org/10.1007/3-7908-1636-1_7.
- [32] D. Tranfield, D. Denyer, P. Smart, Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review, *Br. J. Manag.* 14 (2003) 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.
- [33] B. Kitchenham, Procedures for performing systematic reviews, *Keele Univ. Natl. ICT Aust.* (2004). <https://doi.org/10.1.1.122.3308>.
- [34] A. Tarhan, O. Turetken, H.A. Reijers, Business process maturity models: A systematic literature review, *Inf. Softw. Technol.* 75 (2016) 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2016.01.010>.
- [35] A.M.T. Thomé, L.F. Scavarda, A.J. Scavarda, Conducting systematic literature review in operations management, *Prod. Plan. Control.* 27 (2016) 408–420. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>.
- [36] Reprint—Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement, *Phys. Ther.* (2009). <https://doi.org/10.1093/ptj/89.9.873>.
- [37] Y. Liao, F. Deschamps, E. de F.R. Loures, L.F.P. Ramos, Past, present and future

- of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal, *Int. J. Prod. Res.* (2017). <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.
- [38] I.R. Uhlmann, E.M. Frazzon, Production rescheduling review: Opportunities for industrial integration and practical applications, *J. Manuf. Syst.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.004>.
 - [39] S.R. Ensslin, L. Ensslin, L.C. Chaves, M. Gabriel, C.C. de Oliveira, Selection and analysis of contents of a portfolio of articles about the evaluation of logistics performance, *Espacios*. (2014).
 - [40] D. Arunachalam, N. Kumar, J.P. Kawalek, Understanding big data analytics capabilities in supply chain management: Unravelling the issues, challenges and implications for practice, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 114 (2018) 416–436. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.001>.
 - [41] A.M. Maier, J. Moultrie, P.J. Clarkson, Assessing organizational capabilities: Reviewing and guiding the development of maturity grids, *IEEE Trans. Eng. Manag.* (2012). <https://doi.org/10.1109/TEM.2010.2077289>.
 - [42] M. Abdel-Basset, G. Manogaran, M. Mohamed, Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems, *Futur. Gener. Comput. Syst.* 86 (2018) 614–628. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.051>.
 - [43] D. Ivanov, A. Dolgui, B. Sokolov, The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics, *Int. J. Prod. Res.* 57 (2019) 829–846. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>.
 - [44] A. De Carolis, M. Macchi, E. Negri, S. Terzi, A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies, *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.* 513 (2017) 13–20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_2.
 - [45] E. Gökalp, U. Şener, P.E. Eren, Development of an assessment model for industry 4.0: Industry 4.0-MM, in: *Commun. Comput. Inf. Sci.*, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67383-7_10.
 - [46] C. Leyh, K. Bley, T. Schaffer, S. Forstenhausler, SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0, in: *Proc. 2016 Fed. Conf. Comput. Sci. Inf. Syst. FedCSIS 2016*, Technische Universität Dresden, Department of Information Systems, Esp. IS in Manufacturing and Commerce, Helmholtzstr. 10, Dresden, 01069, Germany, 2016: pp. 1297–1302. <https://doi.org/10.15439/2016F478>.
 - [47] K. Jung, B. Kulvatunyou, S. Choi, M.P. Brundage, An overview of a smart manufacturing system readiness assessment, in: *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_83.
 - [48] A.G. Frank, L.S. Dalenogare, N.F. Ayala, Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *Int. J. Prod. Econ.* 210 (2019) 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.
 - [49] S.S. Kamble, A. Gunasekaran, R. Sharma, Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry, *Comput. Ind.* 101 (2018) 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.004>.

- [50] C. Leyh, T. Schäffer, K. Bley, S. Forstenhäusler, Assessing the it and software landscapes of industry 4.0-enterprises: The maturity model SIMMI 4.0, in: *Lect. Notes Bus. Inf. Process.*, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53076-5_6.
- [51] L. Ardito, A.M. Petruzzelli, U. Panniello, A.C. Garavelli, Towards Industry 4.0: Mapping digital technologies for supply chain management-marketing integration, *Bus. Process Manag. J.* (2019). <https://doi.org/10.1108/BPMJ-04-2017-0088>.
- [52] E. Mueller, X.-L. Chen, R. Riedel, Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: A Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System, *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.* 30 (2017) 1050–1057. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0164-7>.
- [53] P. Samaranayake, K. Ramanathan, T. Laosirihongthong, Implementing industry 4.0 - A technological readiness perspective, in: *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, 2018. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289947>.
- [54] A.J.C. Trappey, C. V Trappey, C.-Y. Fan, A.P.T. Hsu, X.-K. Li, I.J.Y. Lee, IoT patent roadmap for smart logistic service provision in the context of Industry 4.0, *J. Chinese Inst. Eng. Trans. Chinese Inst. Eng. A/Chung-Kuo K. Ch'eng Hsuch K'an.* 40 (2017) 593–602. <https://doi.org/10.1080/02533839.2017.1362325>.
- [55] H.P. Lu, C.I. Weng, Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry, *Technol. Forecast. Soc. Change.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.03.005>.
- [56] C. Weber, J. Königsberger, L. Kassner, B. Mitschang, M2DDM - A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing, in: *Procedia CIRP, Graduate School Advanced Manufacturing Engineering, University of Stuttgart, Nobelstraße 12, Stuttgart, 70569, Germany*, 2017: pp. 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.309>.
- [57] Q. Li, Q. Tang, I. Chan, H. Wei, Y. Pu, H. Jiang, J. Li, J. Zhou, Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework, *Comput. Ind.* 101 (2018) 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.005>.
- [58] D.R. Sjödin, V. Parida, M. Leksell, A. Petrovic, Smart Factory Implementation and Process Innovation: A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing Moving to smart factories presents specific challenges that can be addressed through a structured approach focused on people, p, *Res. Technol. Manag.* 61 (2018) 22–31. <https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1471277>.
- [59] Z. Rajnai, I. Kocsis, Assessing industry 4.0 readiness of enterprises, in: *SAMI 2018 - IEEE 16th World Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics Dedic. to Mem. Pioneer Robot. Antal K. Bejczy, Proc., Doctoral School on Safety and Security Sciences, Óbuda University, Budapest, Hungary*, 2018: pp. 225–230. <https://doi.org/10.1109/SAMI.2018.8324844>.
- [60] I. Castelo-Branco, F. Cruz-Jesus, T. Oliveira, Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union, *Comput. Ind.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.007>.
- [61] B. Tucker, J. Paxton, SCRL-model for human space flight operations enterprise supply chain, in: *IEEE Aerosp. Conf. Proc., Office for Enterprise Innovation and*

- Sustainability, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, United States, 2010. <https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446850>.
- [62] S.S. Kamble, A. Gunasekaran, H. Parekh, S. Joshi, Modeling the internet of things adoption barriers in food retail supply chains, *J. Retail. Consum. Serv.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2019.02.020>.
 - [63] A. Schumacher, T. Nemeth, W. Sihn, Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises, in: *Procedia CIRP*, Fraunhofer Austria Research GmbH, Theresianumgasse 7, Vienna, 1040, Austria, 2019: pp. 409–414. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.110>.
 - [64] J. Basl, P. Doucek, A metamodel for evaluating enterprise readiness in the context of industry 4.0, *Inf. 10* (2019). <https://doi.org/10.3390/info10030089>.
 - [65] R.K. Singh, P. Kumar, M. Chand, Evaluation of supply chain coordination index in context to Industry 4.0 environment, *Benchmarking.* (2019). <https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2018-0204>.
 - [66] M. Colli, U. Berger, M. Bockholt, O. Madsen, C. Møller, B. V Wæhrens, A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era, *Annu. Rev. Control.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.001>.
 - [67] D. Makris, Z.N.L. Hansen, O. Khan, Adapting to supply chain 4.0: an explorative study of multinational companies, *Supply Chain Forum.* 20 (2019) 116–131. <https://doi.org/10.1080/16258312.2019.1577114>.
 - [68] D. Trotta, P. Garengo, Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs, in: *Proc. 2019 8th Int. Conf. Ind. Technol. Manag. ICITM 2019*, Department of Management and Engineering, University of Padua, Padua, Italy, 2019: pp. 69–74. <https://doi.org/10.1109/ICITM.2019.8710716>.
 - [69] L. Canetta, A. Barni, E. Montini, Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector, in: *2018 IEEE Int. Conf. Eng. Technol. Innov. ICE/ITMC 2018 - Proc.*, University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland, Department of Innovative Technologies, Manno, Switzerland, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436292>.
 - [70] A. De Carolis, M. Macchi, B. Kulvatunyou, M.P. Brundage, S. Terzi, Maturity Models and tools for enabling smart manufacturing systems: Comparison and reflections for future developments, *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.* 517 (2017) 23–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72905-3_3.
 - [71] C. Leyh, K. Bley, T. Schäffer, L. Bay, The application of the maturity model simmi 4.0 in selected enterprises, in: *AMCIS 2017 - Am. Conf. Inf. Syst. A Tradit. Innov.*, Technische Universität Dresden, Chair of Information Systems, Germany, 2017. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048574183&partnerID=40&md5=c9516fc3ca180b7bf6e4f1f8e29a1702>.
 - [72] M. Colli, O. Madsen, U. Berger, C. Møller, B. V Wæhrens, M. Bockholt, Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0, *IFAC-PapersOnLine.* 51 (2018) 1347–1352.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.343>.

- [73] A. De Carolis, M. MacChi, E. Negri, S. Terzi, Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap, in: 2017 Int. Conf. Eng. Technol. Innov. Eng. Technol. Innov. Manag. Beyond 2020 New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2017 - Proc., Politecnico di Milano, Department of Management, Economics and Industrial Engineering, Milan, Italy, 2018: pp. 487–495. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8279925>.
- [74] E. Mueller, X.L. Chen, R. Riedel, Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: A Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System, Chinese J. Mech. Eng. (English Ed. (2017). <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0164-7>.
- [75] H.-P. Lu, C.-I. Weng, Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry, Technol. Forecast. Soc. Change. 133 (2018) 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.03.005>.
- [76] Q. Li, Q. Tang, I. Chan, H. Wei, Y. Pu, H. Jiang, J. Li, J. Zhou, Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework, Comput. Ind. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.005>.
- [77] B. Tucker, J. Paxton, SCRL-model for human space flight operations enterprise supply chain, in: IEEE Aerosp. Conf. Proc., 2010. <https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446850>.
- [78] C. Leyh, T. Schäffer, S. Forstenhäusler, SIMMI 4.0 - Proposal of a maturity level model for the classification of the enterprise-wide application system landscape with focus on Industry 4.0 , in: Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, MKWI 2016, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Insb. Informationssysteme in Industrie und Handel, Germany, 2016: pp. 981–992. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84973569015&partnerID=40&md5=44ad7563b15552885536624a5d7f2342>.
- [79] C. Weber, J. Königsberger, L. Kassner, B. Mitschang, M2DDM - A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing, in: Procedia CIRP, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.309>.
- [80] C. Leyh, K. Bley, T. Schäffer, L. Bay, The application of the maturity model simmi 4.0 in selected enterprises, in: AMCIS 2017 - Am. Conf. Inf. Syst. A Tradit. Innov., 2017.
- [81] A. Schumacher, T. Nemeth, W. Sihn, Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises, in: Procedia CIRP, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.110>.
- [82] M. Colli, O. Madsen, U. Berger, C. Møller, B.V. Wæhrens, M. Bockholt, Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0, IFAC-PapersOnLine. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.343>.

Artigo publicado e disponível em:

<<https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/12148>>

APÊNDICE B – Citações Fundamentais e Metodologias de Referência para a Construção do Modelo IMAL 5.0

Citação	Autor	Tipo de Metodologia	Plataforma
“Reforçaram essa lacuna teórica, justificando a construção de um novo modelo que considera fatores negligenciados pelos modelos tradicionais, incluindo aspectos humanos, tecnológicos e sustentáveis aplicáveis à Logística 5.0.”	Broccardo et al. (2024)	Revisão teórica	ScienceDirect / Elsevier
“Reforçaram essa lacuna teórica, justificando a construção de um novo modelo que integra variáveis críticas à resiliência logística no contexto atual, a fim de ampliar a adaptabilidade das cadeias de suprimento.”	Tsao et al. (2024)	Revisão teórica	Web of Science
“Reforçaram essa lacuna teórica, justificando a construção de um novo modelo, especialmente em cadeias produtivas complexas como as do Polo Industrial de Manaus, onde a integração entre dimensões humanas e tecnológicas é fundamental.”	Romero et al. (2020)	Revisão teórica	ScienceDirect / Elsevier
“Atuar de forma responsável, adaptativa e centrada no ser humano tornou-se essencial no novo paradigma industrial e logístico, especialmente em ambientes de alta complexidade e incerteza como os enfrentados no cenário pós-pandêmico.”	Nahavandi (2021)	Discussão conceitual	IEEE Access
“A lacuna recorrente na literatura está na ausência de modelos que integrem critérios humanos e sustentáveis, comprometendo a visão holística da maturidade logística necessária para os desafios contemporâneos.”	Yin et al. (2022)	Revisão integrativa	Web of Science

“Ainda ancorados na Indústria 4.0, os modelos vigentes negligenciam a centralidade humana, o que limita seu impacto prático e social, sobretudo em países em desenvolvimento com desafios de infraestrutura e desigualdade.”	Ghobakhloo et al. (2023)	Modelo conceitual	Elsevier
“O DEMATEL permite identificar relações de causa e efeito entre critérios complexos, tornando-se uma ferramenta decisiva na análise de inter-relações entre variáveis logísticas, contribuindo para a robustez dos modelos de decisão.”	Gabus e Fontela (1972)	Método multicritério	Publicação técnica
“A área da Logística tornou-se um pilar central do Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos, exigindo métricas mais refinadas e adaptativas, que reflitam a complexidade das operações e o dinamismo do ambiente de negócios.”	Lockamy III & McCormack (2004)	Modelo de maturidade	Int. Journal of SCM
“Descrevem o CMM como estrutura de referência amplamente utilizada na modelagem de processos e maturidade organizacional, permitindo a comparação entre níveis evolutivos e a orientação de melhorias contínuas.”	Curtis e Paulk (1993)	Abordagem descritiva	Software Eng. Institute
“Desenvolveram um modelo descritivo para o gerenciamento de projetos com base em práticas consolidadas de desempenho, focando na padronização, controle e avanço evolutivo da maturidade organizacional.”	Crawford (2006)	Abordagem descritiva	PMI Publications
“Propuseram um modelo de avaliação com base em indicadores multicritério, permitindo uma abordagem quantitativa para maturidade de processos logísticos em ambientes industriais dinâmicos.”	Wang et al. (2021)	Modelo multicritério	SpringerLink
“Apontaram que a maturidade organizacional precisa considerar também aspectos intangíveis, como cultura de inovação e aprendizagem contínua, essenciais para a Indústria 5.0.”	Xu et al. (2022)	Análise exploratória	IEEE Transactions

“Demonstraram que a integração entre Big Data e Logística 4.0 potencializa a maturidade em processos decisórios estratégicos, gerando vantagem competitiva nas cadeias globais.”	Bag et al. (2020)	Estudo empírico	Elsevier / JCLP
“Elaboraram um framework conceitual para medir resiliência logística em ambientes voláteis, sugerindo métricas integradas entre tecnologia e adaptabilidade humana.”	Ivanov & Dolgui (2022)	Proposição teórica	IJPR / Taylor & Francis
“Investigaram a aplicação de Inteligência Artificial como catalisador da maturidade logística, mostrando correlações com inovação em processos e sustentabilidade.”	Mohammed et al. (2023)	Estudo de caso	ScienceDirect
"O DEMATEL tem se consolidado como uma ferramenta essencial para analisar sistemas logísticos complexos. Sua aplicação permite identificar e mapear as relações de influência entre fatores críticos, auxiliando na tomada de decisões estratégicas em ambientes dinâmicos e interconectados..."	Li et al. (2020)	DEMATEL	Elsevier
"Segundo Kayikci et al. (2022), essa abordagem permite um entendimento holístico do sistema, crucial para a formulação de estratégias adaptativas em ambientes sonoros como o da logística moderna..."	Kayikci et al. (2022)	DEMATEL + Análise qualitativa	Springer
"Originalmente criado pelo Battelle Memorial Institute, o método foi concebido para investigar questões estratégicas em processos de tomada de decisão, sendo amplamente adotado em áreas como engenharia, logística, gestão estratégica e sustentabilidade..."	Fontana et al. (2021)	DEMATEL	IEEE

"A inteligência emocional é uma competência essencial para o sucesso na Logística 5.0, pois facilita a colaboração entre equipes, o gerenciamento de conflitos e a adaptação a novas tecnologias e processos..."	Choi e Siqin (2022)	Pesquisa bibliográfica	Springer
"A Logística 5.0 busca não apenas maximizar a eficiência e a lucratividade, mas também promover um impacto positivo nas comunidades onde opera..."	Van Erp et al. (2023)	Estudo conceitual	Elsevier
"Apesar dos avanços nas tecnologias digitais aplicadas à logística, a maioria dos modelos de maturidade existentes ainda se restringe a abordagens segmentadas..."	Catarina et al. (2023)	Revisão sistemática	Scopus
"A análise revelou como fatores tecnológicos, humanos e ambientais estão intrinsecamente conectados, exigindo abordagens integradas para a formulação de estratégias..."	Ghobakhloo et al. (2023)	Modelo teórico	Web of Science
"O DEMATEL se diferencia por sua capacidade de gerar insights práticos e diretamente aplicáveis..."	Romero e Stahre (2021)	Estudo de impacto	Elsevier
"As organizações podem alcançar maior eficiência, sustentabilidade e competitividade em suas operações ao se inscreverem no DEMATEL..."	Rashed et al. (2024)	Estudo de caso com survey	Emerald

Fonte: Autoria Própria (2025)

APÊNDICE C - Questionário para Avaliação da Maturidade da Logística 5.0

Instruções:

- Este questionário visa coletar informações sobre a maturidade logística 5.0 nas empresas industriais, com foco em tecnologias, práticas sustentáveis e resiliência às mudanças climáticas.
- As respostas serão tratadas de forma confidencial e utilizadas exclusivamente para fins acadêmicos.
- Marque a opção que mais se adequa à realidade da sua empresa ou indique o grau de concordância nas escalas fornecidas.

Identificação do Respondente:

- Nome (opcional):
 - Cargo/Função:
 - Setor da empresa:
 - Tempo de atuação na empresa:
-

1. Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0

1. A empresa utiliza tecnologias de automação em seus processos logísticos?
☐ Sim
☐ Não
☐ Parcialmente
2. Qual o nível de adoção de soluções baseadas em Inteligência Artificial (IA) nas operações logísticas da empresa?
☐ Nenhum
☐ Baixo
☐ Médio
☐ Alto
3. A empresa utiliza sensores IoT (Internet das Coisas) para monitoramento em tempo real da cadeia logística?

- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento
4. As operações logísticas estão integradas a sistemas de Big Data e análise preditiva?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Parcialmente
5. A empresa adota sistemas de cibersegurança para proteger os dados logísticos?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Não sei informar
6. Em que medida sua empresa utiliza a computação em nuvem para a gestão logística?
- ☐ Nenhum uso
 - ☐ Uso limitado
 - ☐ Uso regular
 - ☐ Uso integral
7. A empresa possui sistemas autônomos ou robóticos para movimentação e transporte de materiais?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento
8. Qual a frequência de falhas nos sistemas de automação da logística?
- ☐ Nunca
 - ☐ Raramente
 - ☐ Ocasionalmente
 - ☐ Frequentemente
-

2. Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística

9. A empresa adota práticas logísticas verdes para reduzir o impacto ambiental?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento
10. As operações logísticas da empresa estão alinhadas com políticas de sustentabilidade e gestão de resíduos?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Parcialmente
11. Como você avalia o uso de energias renováveis nas operações logísticas da empresa?
- ☐ Não utilizado
 - ☐ Baixo uso
 - ☐ Uso moderado
 - ☐ Alto uso
12. A empresa realiza o monitoramento da emissão de gases de efeito estufa nas operações logísticas?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Não sei informar
13. Em que medida as práticas de logística verde são priorizadas na gestão da empresa?
- ☐ Nenhuma prioridade
 - ☐ Baixa prioridade
 - ☐ Média prioridade
 - ☐ Alta prioridade
14. A empresa utiliza embalagens sustentáveis ou recicláveis em suas operações logísticas?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento

15. A empresa desenvolve projetos voltados para a redução do consumo de água e energia nos processos logísticos?

- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento
-

3. Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0

16. A empresa integra suas operações logísticas com fornecedores e parceiros por meio de plataformas digitais?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Parcialmente

17. Qual o nível de colaboração entre sua empresa e parceiros logísticos em termos de troca de dados e informações?

- ☐ Nenhuma
- ☐ Baixa
- ☐ Médio
- ☐ Alto

18. A empresa adota ferramentas colaborativas para planejamento conjunto da demanda logística?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Em planejamento

19. Em que medida a empresa utiliza redes digitais para integrar as operações logísticas e produtivas?

- ☐ Nenhuma
- ☐ Baixa
- ☐ Médio
- ☐ Alto

20. A integração logística da sua empresa possibilita rastreamento em tempo real de insumos e produtos?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Parcialmente

21. Quais são os principais desafios enfrentados pela empresa ao integrar seus sistemas logísticos com os de parceiros?

- ☐ Custo elevado
 - ☐ Falta de infraestrutura tecnológica
 - ☐ Resistência interna
 - ☐ Outros: _____
-

4. Resiliência Logística 5.0 e Mudanças Climáticas

22. A empresa possui planos de contingência para interrupções causadas por mudanças climáticas?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Em planejamento

23. Como você avalia a capacidade da logística da empresa de se adaptar a eventos climáticos extremos (chuvas intensas, calor extremo, etc.)?

- ☐ Muito baixa
- ☐ Baixa
- ☐ Média
- ☐ Alta

24. A empresa adota tecnologias para prever e mitigar riscos climáticos em suas operações logísticas?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Em planejamento

25. A empresa já enfrentou interrupções logísticas devido a eventos climáticos nos últimos cinco anos?

- ☐ Sim
- ☐ Não

26. Em que medida a resiliência logística está integrada à estratégia de negócios da empresa?
- ☐ () Nenhuma
 - ☐ () Baixa
 - ☐ () Média
 - ☐ () Alta
27. A empresa realiza treinamentos periódicos com a equipe logística para lidar com emergências climáticas?
- ☐ () Sim
 - ☐ () Não
 - ☐ () Não sei informar
28. Como a empresa classifica a importância da resiliência logística frente às mudanças climáticas?
- ☐ () Nenhuma importância
 - ☐ () Baixa importância
 - ☐ () Média importância
 - ☐ () Alta importância
29. A empresa utiliza dados climáticos para otimizar as rotas logísticas?
- ☐ () Sim
 - ☐ () Não
 - ☐ () Parcialmente
-

5. Maturidade e Desempenho da Logística 5.0

30. Como você classificaria o estágio atual de maturidade da Logística 5.0 na empresa?
- ☐ () Inicial
 - ☐ () Isolado
 - ☐ () Digitalizado
 - ☐ () Inteligente
 - ☐ () Autônomo

31. A empresa realiza auditorias regulares para avaliar o desempenho da logística 5.0?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Parcialmente
32. Como você avalia o impacto da digitalização nas operações logísticas da empresa?
- ☐ Nenhum
 - ☐ Baixo
 - ☐ Médio
 - ☐ Alto
33. Qual a frequência com que a empresa revisa suas estratégias logísticas?
- ☐ Nunca
 - ☐ Anualmente
 - ☐ Semestralmente
 - ☐ Trimestralmente
34. A implementação de práticas da Logística 5.0 trouxe melhorias em quais áreas?
(Marque todas que se aplicam)
- ☐ Redução de custos
 - ☐ Aumento da eficiência
 - ☐ Melhor integração
 - ☐ Redução de emissões
 - ☐ Melhoria na satisfação do cliente
35. Em que grau as soluções da Logística 5.0 melhoraram a previsão de demanda?
- ☐ Nenhum
 - ☐ Baixo
 - ☐ Médio
 - ☐ Alto

36. A empresa percebe um impacto significativo nas operações logísticas devido às condições geográficas e ambientais da Amazônia?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Parcialmente
37. A localização no Polo Industrial de Manaus oferece vantagens competitivas em termos de logística?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Não sei informar
38. Quais são os principais desafios logísticos enfrentados no Polo Industrial de Manaus?
- ☐ Infraestrutura deficiente
 - ☐ Distância dos grandes centros
 - ☐ Questões ambientais
 - ☐ Outros: _____
39. Como a logística 5.0 pode contribuir para reduzir o impacto ambiental no Polo Industrial de Manaus?
- ☐ Uso de tecnologias verdes
 - ☐ Redução de emissões de carbono
 - ☐ Melhoria no gerenciamento de resíduos
 - ☐ Outros: _____
40. Em que grau as mudanças climáticas afetam diretamente as operações logísticas no Polo Industrial de Manaus?
- ☐ Nenhum impacto
 - ☐ Baixo impacto
 - ☐ Médio impacto
 - ☐ Alto impacto

7. Aspecto Humano na Logística 5.0

41. Em que medida a sua empresa adota uma abordagem centrada no ser humano nas operações logísticas?

- ☐ Nenhuma
 - ☐ Baixa
 - ☐ Moderada
 - ☐ Alta
42. A empresa incentiva a colaboração entre humanos e robôs nas operações logísticas?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento
43. Qual o nível de treinamento oferecido aos colaboradores para trabalhar com tecnologias avançadas (como IA, IoT e robótica) nas operações logísticas?
- ☐ Nenhum
 - ☐ Básico
 - ☐ Intermediário
 - ☐ Avançado
44. A introdução de novas tecnologias logísticas reduziu ou aumentou a carga de trabalho físico dos colaboradores?
- ☐ Reduziu
 - ☐ Manteve-se a mesma
 - ☐ Aumentou
45. Em que grau as tecnologias colaborativas (humanos e máquinas) têm melhorado a segurança no ambiente de trabalho?
- ☐ Nenhum
 - ☐ Baixo
 - ☐ Médio
 - ☐ Alto
46. A empresa oferece programas de bem-estar e suporte psicológico para seus colaboradores no contexto da adoção de novas tecnologias logísticas?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento

47. A gestão da empresa prioriza a satisfação e o bem-estar dos colaboradores ao integrar novas tecnologias logísticas?
- ☐ Nunca
 - ☐ Raramente
 - ☐ Frequentemente
 - ☐ Sempre
48. Qual a percepção dos colaboradores quanto à segurança de trabalhar ao lado de sistemas robóticos e automatizados na logística?
- ☐ Muito desconfortável
 - ☐ Desconfortável
 - ☐ Neutro
 - ☐ Confortável
 - ☐ Muito confortável
49. A empresa possui iniciativas de inclusão digital para preparar os colaboradores para as tecnologias da Logística 5.0?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Em planejamento
50. Em sua opinião, a colaboração entre humanos e máquinas na logística da empresa tem sido eficiente em melhorar a produtividade?
- ☐ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Parcialmente

2.0 Base para criar o índice Índice de Maturidade e Adequação Logística 5.0 (IMAL 5.0)

Passos para criar o índice:

Pontuação das Respostas Ajustadas:

1. Escalas de Concordância (Baixo, Médio, Alto):
 - Nenhum: 0 pontos
 - Baixo: 1 ponto

- Médio: 2 pontos
 - Alto: 3 pontos
2. Sim/Não:
- Sim: 1 ponto
 - Não: 0 pontos
 - Parcialmente: 0,5 pontos

3. Casos Especiais:
- Em planejamento: 0,5 pontos
 - Não sei informar: 0 pontos

4. Agrupamento em Dimensões:

As perguntas podem ser organizadas em dimensões para facilitar a análise. Por exemplo:

- Tecnologia e Automação (questões relacionadas à adoção de IA, IoT, robótica, etc.)
- Sustentabilidade e Práticas Verdes (questões relacionadas à logística verde, uso de energias renováveis, etc.)
- Integração e Colaboração (questões sobre colaboração com fornecedores, integração de sistemas, etc.)
- Aspecto Humano (questões sobre bem-estar, segurança no trabalho, colaboração humano-máquina)

Cálculo da Pontuação Total e do Índice:

5. Somatório por Dimensão:
- Alguns dos pontos atribuídos a cada pergunta dentro de uma dimensão.
6. Índice Geral de Maturidade:
- Converta a pontuação total de cada dimensão em um percentual (0 a 100%).
 - Fórmula: $(\text{Pontuação Obtida} / \text{Pontuação Máxima}) \times 100\%$
7. Classificação de Maturidade:
- Baixa Adequação: 0-40%
 - Adequação Moderada: 41-70%

- Alta Adequação: 71-90%
- Excelente Adequação: 91-100%

8. Classificação da Adequação:

Com base nos percentuais, as empresas podem ser classificadas em níveis de maturidade:

- Baixa Adequação: 0-40%
- Moderada Adequação: 41-70%
- Alta Adequação: 71-90%
- Excelente Adequação: 91-100%

9. Peso para Dimensões (Opcional):

Se alguns aspectos forem mais críticos (como a sustentabilidade ou a colaboração humano-máquina), pode-se atribuir um peso maior a determinadas dimensões ao calcular o índice final.

Exemplo de Cálculo Simplificado:

Vamos supor que uma empresa tenha respondido as seguintes perguntas em três dimensões, e o resultado foi:

- Tecnologia e Automação: 15/30 pontos (50%)
- Sustentabilidade e Práticas Verdes: 18/20 pontos (90%)
- Aspecto Humano: 25/30 pontos (83.3%)

O índice geral seria uma média ponderada ou simples dos percentuais:

- Sem pesos: $(50\% + 90\% + 83.3\%) / 3 = 74.43\%$, que indicaria Alta Adequação.

Se a sustentabilidade for mais relevante e atribuirmos um peso maior, por exemplo, 50% de peso para sustentabilidade:

- Com pesos: $(50\% * 25\% + 90\% * 50\% + 83.3\% * 25\%) = 78.33\%$, ainda Alta Adequação.

APÊNDICE D – Questionário para avaliação DEMATEL: Logística 5.0

Instruções: Avalie cada uma das afirmações a seguir atribuindo uma nota de 1 (Discordo totalmente) a 4 (Concordo totalmente).

Critério de Resposta:

- 1: Discordo totalmente
- 2: Discordo parcialmente
- 3: Concordo parcialmente
- 4: Concordo totalmente

Dimensão 1 (IT): Infraestrutura e Tecnologias da Logística 5.0

1. A empresa utiliza tecnologias de automação para melhorar a eficiência dos processos logísticos.
2. O nível de adoção de soluções de Inteligência Artificial (IA) é alto em operações logísticas.
3. Sensores IoT (Internet das Coisas) são amplamente usados para monitoramento em tempo real.
4. Sistemas de Big Data e análise preditiva estão integrados aos processos logísticos.
5. A cibersegurança é uma prioridade nos sistemas de dados logísticos.
6. A empresa utiliza computação em nuvem para otimizar a gestão logística.
7. Sistemas autônomos (robótica) são implementados para transporte e movimentação.
8. O desempenho dos sistemas de automação é monitorado regularmente.
9. A empresa investe em infraestrutura para integração de tecnologias emergentes.
10. Tecnologias digitais são usadas para rastreamento em tempo real de produtos.

Dimensão 2 (SV): Sustentabilidade e Iniciativas Verdes na Logística

1. Práticas logísticas sustentáveis são implementadas para reduzir o impacto ambiental.
2. Políticas de gestão de resíduos estão alinhadas às operações logísticas.
3. A empresa utiliza energias renováveis em seus processos logísticos.

4. O monitoramento das emissões de gases de efeito estufa é realizado regularmente.
 5. Embalagens sustentáveis são priorizadas nas operações logísticas.
 6. Projetos de redução do consumo de água e energia são incentivados.
 7. A gestão logística prioriza a conservação ambiental.
 8. Fornecedores são avaliados com base em práticas sustentáveis.
 9. Tecnologias verdes são integradas à estratégia de negócios da empresa.
 10. A logística verde é um fator competitivo relevante na empresa.
-

Dimensão 3 (IC): Integração e Colaboração na Cadeia Logística 5.0

1. Operações logísticas são integradas por meio de plataformas digitais.
2. Existe colaboração efetiva com parceiros logísticos na troca de informações.
3. Ferramentas colaborativas são usadas para o planejamento conjunto de demandas.
4. Redes digitais promovem a integração logística e produtiva.
5. A integração permite rastrear insumos e produtos em tempo real.
6. Dados logísticos são compartilhados para otimizar a cadeia de suprimentos.
7. Existe uma política clara de integração com fornecedores.
8. Soluções tecnológicas promovem a colaboração na cadeia de valor.
9. A integração é fundamental para reduzir os custos logísticos.
10. A empresa avalia regularmente a qualidade das parcerias logísticas.

Dimensão 4 (RM): Resiliência Logística 5.0 e Mudanças Climáticas

1. Planos de contingência são adotados para enfrentar mudanças climáticas.
2. A logística é adaptável a eventos climáticos extremos.
3. Tecnologias são usadas para prever riscos climáticos.
4. Dados climáticos são integrados ao planejamento logístico.
5. Treinamentos regulares preparam a equipe para emergências climáticas.
6. A resiliência é integrada à estratégia de negócios da empresa.
7. Riscos logísticos são monitorados continuamente.
8. A empresa prioriza a gestão de cadeias logísticas resilientes.

9. Investimentos são feitos para mitigar interrupções logísticas.
 10. A importância da resiliência é amplamente reconhecida na organização.
-

Dimensão 5 (HU): Aspecto Humano na Logística 5.0

1. A empresa adota uma abordagem centrada no humano nas operações logísticas.
2. Colaboração entre humanos e robôs é incentivada.
3. Treinamentos regulares são oferecidos para o uso de tecnologias avançadas.
4. A carga de trabalho físico foi reduzida com o uso de novas tecnologias.
5. Tecnologias colaborativas melhoraram a segurança dos colaboradores.
6. Programas de bem-estar e suporte psicológico estão disponíveis.
7. A satisfação dos colaboradores é priorizada na adoção de tecnologias.
8. Iniciativas de inclusão digital preparam os colaboradores para a Logística 5.0.
9. Os colaboradores percebem segurança ao trabalhar ao lado de sistemas robóticos.
10. A produtividade melhorou com a colaboração humano-máquina.

APÊNDICE E – Respostas dos Especialistas – Influência das Dimensões

Perguntas por dimensão	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24	R25	R26	R27	R28	MÉDIA
1. Impactos de IT (Infraestrutura e Tecnologias) nas Outras Dimensões:																													
1.1 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão IT sobre SV (Sustentabilidade e Iniciativas Verdes)?	3	3	3	2	2	3	2	2	4	3	2	3	4	4	2	3	2	2	3	2	2	4	3	2	3	4	4	2	2,80
1.2 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão IT sobre IC (Integração e Colaboração)?	1	2	3	2	2	4	4	2	4	2	3	4	4	3	2	3	2	2	4	3	2	3	2	3	4	4	3	2	2,80
1.3 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão IT sobre RM (Resiliência Logística)?	1	1	4	2	2	4	4	4	4	2	4	3	2	4	2	4	2	2	4	4	3	4	2	3	2	2	3	2	2,87
1.4 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão IT sobre HU (Aspecto Humano) ?	2	3	3	3	2	4	2	4	3	2	2	4	2	3	3	3	3	2	4	2	4	3	2	2	3	2	3	3	2,80
2. Impacto de SV (Sustentabilidade e Iniciativas Verdes) nas Outras Dimensões:																													
2.1 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão SV sobre IT (Infraestrutura e Tecnologias) ?	1	2	2	1	1	3	2	2	3	2	2	3	3	3	2	2	1	1	3	2	2	3	2	2	2	3	3	2	2,13
2.2 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão SV sobre IC (Integração e Colaboração)?	1	2	2	1	1	3	3	3	3	2	2	3	3	4	2	2	1	1	3	3	3	3	2	1	2	3	4	2	2,33
2.3 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão SV sobre RM (Resiliência Logística) ?	2	2	2	1	1	3	3	3	4	2	1	3	3	3	3	2	1	1	3	3	3	4	2	1	3	3	3	3	2,40
2.4 Qual a influência para adoção das práticas da dimensão SV sobre HU (Aspecto Humano) ?	1	2	2	2	2	3	2	2	4	2	3	3	3	3	3	2	2	2	3	2	2	4	2	3	3	3	3	3	2,44
3. Impacto de IC (Integração e Colaboração) nas Outras Dimensões:																													
3.1 Qual a influência para adoção das práticas da IC sobre IT (Infraestrutura e Tecnologias) ?	0	2	4	3	2	3	4	4	3	4	3	3	3	4	3	4	3	2	3	2	4	3	4	3	3	3	4	3	3,06
3.2 Qual a influência para adoção das práticas da IC sobre SV (Sustentabilidade e Iniciativas Verdes) ?	1	3	2	4	2	4	2	4	3	2	1	2	3	3	3	2	4	2	3	2	4	3	2	1	2	3	3	3	2,60
3.3 Qual a influência para adoção das práticas da IC sobre RM (Resiliência Logística) ?	1	2	4	2	2	4	4	4	3	2	3	2	3	3	3	4	2	2	4	3	4	3	2	1	2	3	3	3	2,80
3.4 Qual a influência para adoção das práticas da IC sobre HU (Aspecto Humano)?	1	3	3	4	2	4	2	4	3	2	3	3	3	4	2	3	4	2	4	2	4	3	2	2	2	3	4	2	2,87
4. Impacto de RM (Resiliência Logística) nas Outras Dimensões																													
4.1 Qual a influência para adoção das práticas da RM sobre IT (Infraestrutura e Tecnologias)?	0	3	4	2	2	3	4	2	2	3	3	4	3	4	2	4	2	2	3	4	2	2	3	3	4	3	4	2	2,73
4.2 Qual a influência para adoção das práticas da RM sobre SV (Sustentabilidade e Iniciativas Verdes) ?	1	2	3	4	2	4	2	2	2	3	1	2	3	4	2	3	4	2	4	2	2	2	3	1	2	3	4	2	2,47
4.3 Qual a influência para adoção das práticas da RM sobre IC (Integração e Colaboração)?	0	2	4	3	3	4	4	2	2	3	3	2	3	4	2	4	3	2	4	4	2	2	3	2	2	2	4	2	2,73
4.4 Qual a influência para adoção das práticas da RM sobre HU (Aspecto Humano)?	1	3	3	3	3	4	2	2	3	3	2	3	3	4	3	3	3	3	4	2	2	3	3	2	2	2	4	3	2,80
5. Impacto de HU (Aspecto Humano) nas Outras Dimensões:																													
5.1 Qual a influência para adoção das práticas da HU sobre IT (Infraestrutura e Tecnologias)?	2	3	3	4	2	4	4	3	3	3	1	3	3	4	2	3	4	2	4	4	3	3	3	1	3	2	4	2	2,93
5.2 Qual a influência para adoção das práticas da HU sobre SV (Sustentabilidade e Iniciativas Verdes)?	3	3	3	4	2	4	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	4	2	4	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2,93
5.3 Qual a influência para adoção das práticas da HU sobre IC (Integração e Colaboração)?	3	3	3	4	2	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	2	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3	3,20
5.4 Qual a influência para adoção das práticas da HU sobre RM (Resiliência Logística)?	1	3	3	3	2	4	4	3	3	3	1	2	3	3	2	3	3	2	4	4	3	3	3	1	2	2	3	2	2,67