

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO - PPGA
CURSO DE DOUTORADO**

SAMUEL FRANCISCO FERRIGO

**INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL INTEGRANDO INTERNET DAS COISAS À
LOGÍSTICA 5.0: ARMAZÉNS INTELIGENTES COMO INFRAESTRUTURAS DE
SERVIÇO DE APOIO À SOCIEDADE**

**CAXIAS DO SUL
2025**

SAMUEL FRANCISCO FERRIGO

**INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL INTEGRANDO INTERNET DAS COISAS À
LOGÍSTICA 5.0: ARMAZÉNS INTELIGENTES COMO INFRAESTRUTURAS DE
SERVIÇO DE APOIO À SOCIEDADE**

Tese de Doutorado submetido à Banca de Defesa designada pelo Colegiado do curso de Doutorado em Administração da Universidade de Caxias do Sul como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Doutor em Administração.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Cristina Fachinelli Bertolini

Coorientador:
Prof. Dr. Mateus Panizzon

**CAXIAS DO SUL
2025**

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

F391i Ferrigo, Samuel Francisco
Inovação sustentável integrando internet das coisas à logística 5.0
[recurso eletrônico] : armazéns inteligentes como infraestruturas de serviço
de apoio à sociedade / Samuel Francisco Ferrigo. – 2025.
Dados eletrônicos.

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

Orientação: Ana Cristina Fachinelli Bertolini.

Coorientação: Mateus Panizzon.

Modo de acesso: World Wide Web

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

1. Internet das coisas. 2. Inovação. 3. Logística. I. Bertolini, Ana Cristina
Fachinelli, orient. II. Panizzon, Mateus, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 004.78:004.457

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

SAMUEL FRANCISCO FERRIGO

**INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL INTEGRANDO INTERNET DAS COISAS À
LOGÍSTICA 5.0: ARMAZÉNS INTELIGENTES COMO INFRAESTRUTURAS DE
SERVIÇO DE APOIO À SOCIEDADE**

Tese de Doutorado submetido à Banca de Defesa designada pelo Colegiado do curso de Doutorado em Administração da Universidade de Caxias do Sul como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Doutor em Administração.

Orientadora:

Prof. Dra. Ana Cristina Fachinelli Bertolini

Coorientador:

Prof. Dr. Mateus Panizzon

Aprovado em 26/11/2025

Banca Examinadora

Prof. Dra. Ana Cristina Fachinelli Bertolini (Orientadora)
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Mateus Panizzon (Coorientador)
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Fábio Verruck
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Guilherme Bergmann Borges Vieira
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Jorge Luís Victória Barbosa
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Leonel Pablo Carvalho Tedesco
Universidade de Santa Cruz do Sul

AGRADECIMENTOS

A tese é considerada uma construção individual, mas, na prática, ela é feita a muitas mãos. Entendo que, por isso, existe este espaço dedicado aos agradecimentos.

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade concedida de poder avançar nos limites do conhecimento. Sendo a causa primária de todas as coisas, sem Seu consentimento eu não teria tido a chance de escrever esta tese.

Não posso deixar de agradecer à minha família - meus irmãos, meu pai, Paulo, e minha mãe, Maria Elisa - por sempre me apoiarem, desde a infância, nos estudos. À minha esposa - e futura mamãe - Juliana, por sua paciência e compreensão nas inúmeras vezes em que não pude estar presente devido às atividades da tese e do PPGA. Enfrentamos e superamos muitos desafios juntos nesse período.

Também agradeço ao meu filho Artur, por me apoiar no início da jornada, e ao Bruno - filho que está por vir - por servirem de motivação na vida. Que este trabalho sirva de inspiração para eles e para as futuras gerações.

Registro aqui minha profunda gratidão à minha orientadora, Dra. Ana Cristina Fachinelli Bertolini, e ao meu coorientador, Dr. Mateus Panizzon. Ela, desde o início da jornada, além de toda a dedicação e conhecimento oferecidos em relação à tese, sempre demonstrou compreensão diante das dificuldades pessoais que enfrentei e intermediou situações que permitiram o desenvolvimento deste trabalho. Ele, pelos valiosos *insights* e pelos valores transmitidos em conversas sobre a tese e em sala de aula.

Não tenho como não agradecer o papel dos professores Fábio Verruck e Guilherme Bergmann Borges Vieira que contribuíram na qualificação com diferentes sugestões de reflexões e aprimoramento durante a caminhada. Em nome deles, agradeço também os demais membros da banca, Jorge Luís Victoria Barbosa e Leonel Pablo Carvalho Tedesco, pelas contribuições neste trabalho. Nesta linha, agradeço também aos professores Dr. Daniel Luis Notari e Cíntia Paese Giacomello pelos conselhos e sugestões ofertados ao longo desta caminhada.

Em nome do colega Dr. Mayron Dalla Santa de Carvalho - que propiciou minha entrada no programa de doutorado e com quem trabalhei em diversos projetos -, estendo meus agradecimentos à equipe do CityLivingLab, aos colegas, professores e funcionários do PPGA UCS e demais pessoas que contribuíram com ideias à tese e, muitas vezes, com escuta às minhas lamentações e desabafos.

Sou igualmente grato às diversas pessoas e empresas que colaboraram na concepção dos artefatos, cederam seus ambientes de trabalho ou disponibilizaram equipamentos e/ou equipes para a realização dos testes. Por questões de confidencialidade, não citarei os nomes das empresas, mas registro aqui o nome de algumas pessoas-chave nesse processo: Cláudio Neto, Richard Gabriel, Vinícius de Tomasi e Vinícius Vanzin Pinto.

Em nome do Éder Dalla Costa, agradeço à equipe da Cruz Vermelha por disponibilizar seu tempo para a entrevista realizada durante o desenvolvimento da tese. Em nome do Tenente-Coronel Batista, agradeço também à equipe do Corpo de Bombeiros, pela valiosa colaboração por meio das entrevistas, da cessão de espaço, materiais e pessoal para os testes realizados.

Em nome do colega Rodrigo Bertin Machado, agradeço à equipe da Câmara de Vereadores pela compreensão e apoio durante os períodos em que precisei me ausentar para a realização das atividades do doutorado.

Por fim, agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro à pesquisa e, em nome do colega Ronaldo de Oliveira, agradeço profundamente à empresa que subsidiou recursos financeiros e humanos fundamentais ao desenvolvimento desta tese.

RESUMO

O desenvolvimento da logística tem acompanhado historicamente as transformações da indústria, especialmente a partir da Terceira Revolução Industrial, quando os avanços em computação e comunicação de dados passaram a ser incorporados aos processos produtivos e logísticos. A evolução dessas tecnologias culminou no surgimento da Internet das Coisas (*IoT*), marcando a transição para a chamada Indústria 4.0 e, conseqüentemente, para a Logística 4.0. Mais recentemente, novas preocupações com a sustentabilidade ambiental e o bem-estar humano impulsionaram a formulação do conceito de Sociedade 5.0, o que levou à definição da Indústria 5.0 e, por extensão, à Logística 5.0. Essa nova fase é caracterizada pela integração entre a automação e a digitalização promovida pela Logística 4.0, os princípios da logística verde e a centricidade no ser humano proposta pela Sociedade 5.0 e pela própria Indústria 5.0, de forma que as empresas possam ir além da eficiência operacional, oferecendo benefícios à sociedade no seu entorno. Nesse novo cenário, os armazéns inteligentes passam a ocupar uma posição central, funcionando como *hubs* estratégicos onde a Internet das Coisas pode ser aplicada para otimizar operações logísticas em consonância com os princípios da Logística 5.0. Com base nesse contexto, a presente tese tem como objetivo propor uma arquitetura tecnológica para armazéns inteligentes, baseada nos princípios da Logística 5.0, que integre sensoriamento via Internet das Coisas para promover resiliência, sustentabilidade e centricidade no ser humano, ao mesmo tempo em que forneça dados precisos para apoio à gestão empresarial e às ações de organizações de defesa civil. Para a condução da pesquisa, adotou-se o método *Design Science Research*, cuja abordagem é orientada ao desenvolvimento de soluções práticas por meio da construção e avaliação de artefatos voltados à resolução de problemas reais. Durante a execução da pesquisa, construiu-se um conjunto de três artefatos composto por: (i) um modelo de arquitetura voltado à aplicação da *IoT* em armazéns inteligentes; (ii) um dispositivo *IoT* no estágio de produto mínimo viável; e (iii) um protótipo de processamento, visualização e tomada de decisões. Os artefatos desenvolvidos foram avaliados em cenários simulados e reais, permitindo validar sua funcionalidade e relevância em aplicações práticas relacionadas ao contexto da Logística 5.0. Como resultado, verificou-se a aplicabilidade da arquitetura proposta por meio da recombinação de dados sensoriais para uso em contextos alinhados à Logística 5.0, como previsão do tempo e detecção de incêndios mais precisos e antecipativos. Adicionalmente, a tese propõe um *framework* como quarto artefato, que incorpora a sociedade como um dos componentes constituintes de um armazém inteligente dentro da perspectiva da Logística 5.0. Nesse contexto, o papel dos armazéns como *hubs* logísticos os posiciona como protagonistas no contexto da Logística 5.0, ampliando a visão tradicional do setor logístico e fortalecendo seu papel como agente integrado à comunidade que vive em seu entorno.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Logística 5.0. Armazéns Inteligentes. Inovação Sustentável. Sociedade.

ABSTRACT

The development of logistics has historically kept pace with transformations in industry, especially since the Third Industrial Revolution, when advances in computing and data communication began to be incorporated into production and logistics processes. The evolution of these technologies culminated in the emergence of the Internet of Things (IoT), marking the transition to the so-called Industry 4.0 and, consequently, to Logistics 4.0. More recently, new concerns about environmental sustainability and human well-being have driven the formulation of the concept of Society 5.0, which has led to the definition of Industry 5.0 and, by extension, Logistics 5.0. This new phase is characterized by the integration between the automation and digitalization promoted by Logistics 4.0, the principles of green logistics, and the centrality of the human being proposed by Society 5.0 and by Industry 5.0 itself, so that companies can go beyond operational efficiency and offer benefits to the society around them. In this new scenario, smart warehouses come to occupy a central position, functioning as strategic *hubs* where the Internet of Things can be applied to optimize logistics operations in line with the principles of Logistics 5.0. Based on this context, this thesis aims to propose a technological architecture for smart warehouses, based on the principles of Logistics 5.0, that integrates sensing via the Internet of Things to promote resilience, sustainability, and human centrality, while at the same time providing accurate data to support business management and the actions of civil defense organizations. For the conduct of the research, the *Design Science Research* method was adopted, whose approach is oriented toward the development of practical solutions through the construction and evaluation of artifacts aimed at solving real-world problems. During the execution of the research, a set of three artifacts was built, consisting of: (i) an architectural model focused on the application of *IoT* in smart warehouses; (ii) an *IoT* device at the minimum viable product stage; and (iii) a prototype for processing, visualization, and decision-making. The artifacts developed were evaluated in simulated and real scenarios, allowing their functionality and relevance to be validated in practical applications related to the context of Logistics 5.0. As a result, the applicability of the proposed architecture was verified through the recombination of sensor data for use in contexts aligned with Logistics 5.0, such as more accurate and anticipatory weather forecasting and fire detection. Additionally, the thesis proposes a *framework* as a fourth artifact, which incorporates society as one of the constituent components of a smart warehouse from the perspective of Logistics 5.0. In this context, the role of warehouses as logistics *hubs* positions them as key players in the context of Logistics 5.0, broadening the traditional view of the logistics sector and strengthening its role as an agent integrated with the community that lives in its surroundings.

Keywords: Internet of Things. Logistics 5.0. Smart Warehouses. Sustainable Innovation. Society.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases da logística.	15
Figura 2 – Visualização do processo escolha dos artigos utilizados na revisão sistemática da literatura.	22
Figura 3 – Produção anual de estudos relacionados à Logística 5.0.	23
Figura 4 – Produção científica por autores esperada pela Lei de Lotka (linha tracejada) e a encontrada (linha contínua).	26
Figura 5 – As principais fontes de publicações, segundo a Lei de Bradford.	27
Figura 6 – Visualização dos trabalhos mais citados.	27
Figura 7 – Lei de Zipf apresentada no modelo de nuvem de palavras, contendo as palavras mais associadas à Logística 5.0.	28
Figura 8 – Produção científica por país.	29
Figura 9 – Quadrante de utilização versus investimentos na logística.	31
Figura 10 – O ENIAC, primeiro computador digital.	37
Figura 11 – O computador <i>TRADIC</i>	38
Figura 12 – O computador IBM/360, que marca o início da terceira geração de computadores.	39
Figura 13 – O computador pessoal Altair 8800.	40
Figura 14 – A ideia de ubiquidade sendo testada no centro de pesquisa da Xerox, em Palo Alto.	41
Figura 15 – O Arduíno Uno.	42
Figura 16 – O histórico da computação.	43
Figura 17 – A <i>ARPANET</i> quando da sua criação (esquerda), em 1969, e em sua máxima extensão (direita), em 1983.	44
Figura 18 – O primeiro experimento que utilizou uma rede de sensores mostrando o conjunto de sensores acústicos (esquerda), a central de recepção dos dados (centro) e o <i>hardware</i> do dispositivo (direita).	45
Figura 19 – O princípio de funcionamento da Web proposto por Tim Berners-Lee.	46
Figura 20 – O histórico das redes de comunicação de dados, combinado com o histórico da computação.	48
Figura 21 – Topologia de uma rede LoraWAN.	54
Figura 22 – Topologia de uma rede <i>Sigfox</i>	55
Figura 23 – O funcionamento básico do processo logístico.	58
Figura 24 – O funcionamento básico do <i>SCM</i> , formado por uma composição de processos logísticos.	60
Figura 25 – Os principais tipos de logística.	61
Figura 26 – O histórico das fases da logística impactadas pelo desenvolvimento tecnológico da computação e das redes de comunicação de dados.	63
Figura 27 – Os elementos que formam a Logística 5.0.	65
Figura 28 – Docas de um armazém logístico.	67
Figura 29 – Processo de consolidação de bens em um porta palete.	67

Figura 30 – Estrutura <i>drive-in</i> de armazenagem.	68
Figura 31 – Uma empilhadeira utilizada para deslocamento de bens dentro de um armazém logístico.	69
Figura 32 – Os componentes que formam um armazém inteligente.	69
Figura 33 – Aplicação da <i>IoT</i> em um armazém inteligente.	71
Figura 34 – Os ciclos de desenvolvimento de uma <i>DSR</i>	76
Figura 35 – Visão geral do protocolo de pesquisa proposto, baseado nos ciclos de desenvolvimento de Hevner (2007).	78
Figura 36 – Modelo conceitual da arquitetura <i>IoT</i> proposta.	81
Figura 37 – O dispositivo <i>IoT</i> construído.	85
Figura 38 – <i>Dashboards</i> do artefato de processamento e tomada de ações.	87
Figura 39 – Exemplo de alertas enviados via Telegram pelo <i>bot</i> vinculado ao artefato.	88
Figura 40 – Função dos artefatos dentro da arquitetura <i>IoT</i> proposta, outro dos artefatos produzidos na tese.	89
Figura 41 – Localização dos dispositivos de sensoriamento <i>IoT</i> usados nos cenários de teste em ambiente real.	90
Figura 42 – Local onde registrou-se uma habitação em risco de deslizamento, próximo ao local onde o sensor foi instalado.	91
Figura 43 – Protótipo desenvolvido para medição dos dados em Caxias do Sul.	91
Figura 44 – Dispositivos instalados, respectivamente, no lado oeste (esquerda) e leste (direita) no armazém de Flores da Cunha.	93
Figura 45 – Locais onde instalaram-se os dispositivos no armazém de Bento Gonçalves.	94
Figura 46 – Local onde foi realizado o teste de detecção de incêndio contendo o dispositivo <i>IoT</i> (esquerda) e o detector de fumaça utilizado como referência (direita).	96
Figura 47 – Processo de simulação do incêndio.	97
Figura 48 – Princípio de funcionamento do modelo <i>CHRUDA</i>	98
Figura 49 – Relação entre umidade e temperatura durante um incêndio.	99
Figura 50 – Resultados da aplicação do método <i>CHRUDA</i> em Caxias do Sul.	103
Figura 51 – Alteração dos valores de temperatura, umidade e luminosidade verificados no dia 24/06/2025.	104
Figura 52 – Resultados da aplicação do método <i>CHRUDA</i> em Bento Gonçalves.	105
Figura 53 – Resultado da simulação de incêndio em Bento Gonçalves.	108
Figura 54 – <i>Dashboard</i> demonstrando a parada sistêmica de comunicação dos sensores.	110
Figura 55 – Aviso de parada da rede de sensores via Telegram.	110
Figura 56 – Registro de um dos picos de <i>etVOC</i> e <i>eCO₂</i> identificados no cenário de teste em Flores da Cunha, no final de semana do dia 14 e 15/06/2025.	111
Figura 57 – O <i>framework</i> da Logística 5.0 voltado para armazéns logísticos (à direita), e sua comparação com o modelo <i>TCP/IP</i> (à esquerda), usado para comunicação na Internet.	114
Figura 58 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.	121
Figura 59 – Os estágios da disrupção numa organização.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro-resumo do trabalhos identificados na revisão sistemática da literatura.	24
Tabela 2 – Uso de sensores <i>IoT</i> sob as perspectivas da operação logística, saúde humana, resiliência e sustentabilidade ambiental.	32
Tabela 3 – Comparativo das principais tecnologias de comunicação <i>IoT</i>	51
Tabela 4 – Histórico das especificações <i>Wi-Fi</i>	52
Tabela 5 – Histórico do <i>Bluetooth</i>	53
Tabela 6 – Sensores aplicados em diferentes áreas de um armazém inteligente. Entre parênteses, identificação do círculo correspondente na Figura 33.	72
Tabela 7 – Sugestões de novos dispositivos de sensoriamento <i>IoT</i> apresentados e suas possíveis aplicações.	86
Tabela 8 – Especificações técnicas do microcontrolador <i>Heltec v2</i>	92
Tabela 9 – Resumo dos cenários de teste em ambiente real.	95
Tabela 10 – Estatísticas descritivas do dispositivo <i>IoT</i> instalado em Caxias do Sul.	100
Tabela 11 – Estatísticas descritivas do dispositivo <i>IoT</i> instalado em Bento Gonçalves.	100
Tabela 12 – Estatísticas descritivas dos dispositivos <i>IoT</i> instalados em Flores da Cunha.	101
Tabela 13 – Estatísticas descritivas dos dados coletados no ambiente de simulação de incêndio.	102
Tabela 14 – Períodos de precipitação e acumulado de chuva em Caxias do Sul.	102
Tabela 15 – Contribuição desta tese em relação aos demais trabalhos analisados na revisão sistemática da literatura.	119

LISTA DE SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
5G	<i>Fifth Generation</i>
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
ABOL	Associação Brasileira de Operadores Logísticos
ARPA	<i>Advanced Research Projects Agency</i>
B2B	<i>Business-to-business</i>
BI	<i>Business Intelligence</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CERN	<i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i>
CRHUDA	<i>CRossing HUmidity, Dewpoint and Atmospheric Pressure</i>
CI	Circuito Integrado
CSCMP	<i>Council of Supply Chain Management Professionals</i>
DSN	<i>Distributed Sensor Network</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
eCO ₂	<i>Equivalent Carbon Dioxide</i>
ENANPAD	Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Administração
ENIAC	<i>Electronic Numerical Integrator And Computer</i>
ERP	<i>Entreprise Resource Planning</i>
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
etVOC	<i>Equivalent Total Volatile Organic Compounds</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HTI	<i>Human-technology Interaction</i>
IA	Inteligência Artificial
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT	<i>Internet of Things</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MVP	<i>Minimum Viable Product</i>

NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PPGA/UCS	Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade de Caxias do Sul
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
ROI	<i>Return of Investment</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SIMECS	Sindicato das Indústrias Metalúrgicas de Caxias do Sul
SoC	<i>System-on-Chip</i>
TCP/IP	<i>Transport Control Protocol/Internet Protocol</i>
TMS	<i>Transport Management System</i>
TRADIC	<i>TRAnsistor DIgital Computer</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WMS	<i>Warehouse Management System</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO	17
1.2 OBJETIVO GERAL	20
1.2.1 Objetivos Específicos	20
1.3 JUSTIFICATIVA	21
1.3.1 Justificativa Teórica	21
1.3.2 Justificativa Empírica	32
1.4 DELIMITAÇÃO E ADERÊNCIA DO ESTUDO À LINHA DE PESQUISA	33
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1 INTERNET DAS COISAS	35
2.1.1 Um Breve Histórico da Computação	36
2.1.2 Um Breve Histórico das Redes de Comunicação de Dados	42
2.1.3 Aplicações da <i>IoT</i>	48
2.1.4 Tecnologias de Comunicação <i>IoT</i>	50
2.2 LOGÍSTICA	57
2.2.1 O Processo Logístico	58
2.2.2 Gestão da Cadeia de Suprimentos	59
2.2.3 Tipos de Logística	60
2.2.4 O Percurso até a Logística 5.0	61
2.2.5 Armazéns Inteligentes	66
2.2.6 Aplicação da <i>IoT</i> em Armazéns Inteligentes	70
3 METODOLOGIA	73
3.1 POSICIONAMENTO EPISTEMOLÓGICO	73
3.2 CAMPO DE ESTUDOS	74
3.3 O MÉTODO DESIGN SCIENCE RESEARCH	75
3.4 PROTOCOLO DE PESQUISA	77
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	80
4.1 ARTEFATOS DESENVOLVIDOS	80
4.1.1 A Arquitetura <i>IoT</i> para Armazéns Inteligentes	80
4.1.2 O Dispositivo <i>IoT</i> de Sensoriamento para Armazéns	84
4.1.3 O Protótipo de Processamento, Visualização e Tomada de Ações	86
4.1.4 Combinação dos Artefatos	88
4.2 CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO	88
4.2.1 Cenários em Ambiente Real	88
4.2.2 Cenário de Simulação em Ambiente Controlado	95
4.2.3 Algoritmos Utilizados	96
4.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS	100
4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EM CONTEXTOS RELACIONADOS À LOGÍSTICA 5.0	101
4.4.1 Previsão de Chuvas e Tempestades	101
4.4.2 Detecção de Incêndio	107
4.4.3 Outros Resultados: Parada Sistêmica de Comunicação e Detecção de Níveis Elevados de CO₂ e etVOC	109

5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA TESE	112
5.1	O FRAMEWORK DA LOGÍSTICA 5.0 VOLTADO A ARMAZÉNS INTELIGENTES	112
5.2	VALIDADE DOS ARTEFATOS PRODUZIDOS E CARÁTER INOVADOR DA TESE	117
5.3	A LOGÍSTICA 5.0 COMO HABILITADORA DO USO DE <i>IoT</i> EM ARMAZÉNS INTELIGENTES	120
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
6.1	CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS	126
6.2	CONTRIBUIÇÕES GERENCIAIS	127
6.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	128
6.4	TRABALHOS FUTUROS	129
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A–PREMIAÇÕES E ARTIGOS PUBLICADOS	146
	ANEXO A –ROTEIRO SEMI-ESTRUTURADO UTILIZADO NO CORPO DE BOMBEIROS	147
	ANEXO B –ROTEIRO SEMI-ESTRUTURADO UTILIZADO NA CRUZ VERMELHA	148
	ANEXO C –PROTOCOLO DE PESQUISA APLICADO PARA GRUPO FOCAL	149
	ANEXO D –TERMO DE CONSENTIMENTO	150

1 INTRODUÇÃO

Na última década, a sociedade tem enfrentado diversos desafios que colocaram à prova sua capacidade de resiliência. Em 2019, a pandemia da COVID-19 alterou de forma abrupta os padrões de comportamento e organização social. Superada essa fase, passaram a emergir com ainda mais intensidade os desastres climáticos, cada vez mais frequentes e de maior magnitude. Somente na serra gaúcha, por exemplo, houve localidades que enfrentaram três enchentes em menos de um ano, entre setembro de 2023 e maio de 2024.

Em todos esses contextos, reforçou-se a percepção sobre a relevância da logística. Durante a pandemia ela foi um elo fundamental para garantir o fornecimento de suprimentos a serviços essenciais, como a saúde (Wang et al., 2020; IPSOS, 2021), enquanto nos desastres climáticos de 2023-2024 desempenhou papel decisivo nas operações de resgate e assistência (Kopanakis, 2024). Todavia, para compreender como a logística pode se transformar e responder a esses novos cenários, é necessário antes revisitar a trajetória que possibilitou a sua configuração atual.

A revolução da agricultura trouxe grandes mudanças na história humana. Além de permitir que o homem tivesse um assentamento fixo, emergindo os primeiros vilarejos, a possibilidade da produção do seu próprio alimento permitiu que moradores de diferentes lugares pudessem realizar trocas de seus excedentes, surgindo assim o comércio de produtos (Bamyaci, 2021). Para a realização dessa troca entre os pequenos grupos era necessário que os produtos fossem transportados por caminhos primitivos: surgiu, então, o embrião do processo logístico.

Com o passar do tempo, essas comunidades aumentaram, ampliaram as relações comerciais e criaram edificações complexas em assentamentos maiores: surgiram as cidades. No Egito, por exemplo, foram construídas as famosas pirâmides, consideradas até hoje como os mais antigos projetos logísticos (Bamyaci, 2021). Parte do material necessário para a construção dessas obras era transportado pelo rio Nilo, incorporando-se aos modais de transporte.

Na Grécia Antiga, a invenção dos navios a remo permitiu que as pessoas transportassem produtos a partir dos mares (Bamyaci, 2021). Essa nova tecnologia também possibilitou um melhor abastecimento de suprimentos para tropas durante guerras. Porém, para um melhor aproveitamento dessa nova capacidade de transporte, era necessário calcular (em grego: "*logistikos*") as movimentações de tropas, suprimentos e recursos durante as operações militares. (Ennagad, 2023).

Em termos etimológicos, a palavra logística deriva das palavras em Latim "*logi*" e "*static*", que significam, respectivamente, "lógica" e "estatística". Dessa maneira, a logística era obtida pela combinação dos conceitos de acomodação, lógica e cálculo (Bamyaci, 2021) e poderia ser aplicada em contextos militares ou econômicos.

A logística como disciplina moderna começou a se desenvolver durante o século XX, especialmente durante a Segunda Guerra Mundial (Ballou, 2006; Ennagad, 2023), quando surgiu a necessidade de gerenciar o transporte, o suprimento e a distribuição de recursos em grande

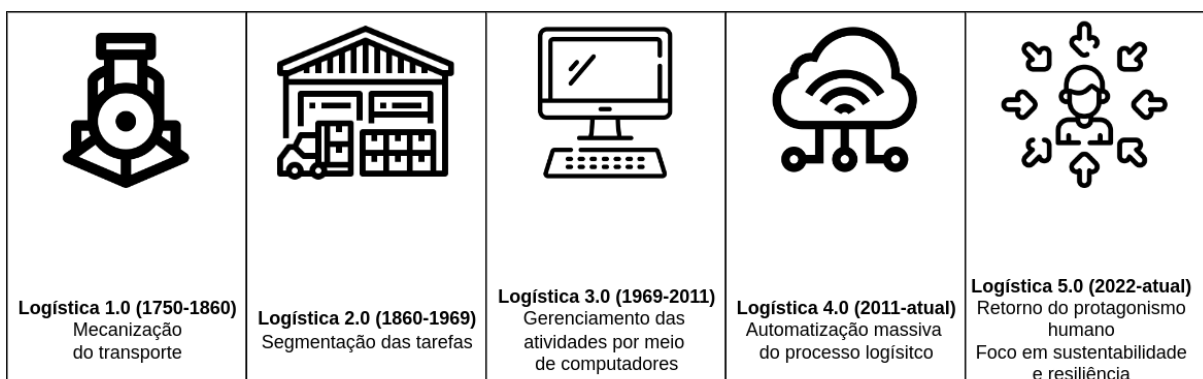
escala. Após a guerra, o campo da logística passou a ser aplicado a outros contextos, como na cadeia de suprimentos, transporte e outras operações relacionadas ao escoamento da produção industrial.

Desde o surgimento da indústria, mesmo sem usar o termo, as fábricas sempre consideraram a logística um aspecto importante dos negócios em geral (Amr, Ezzat e Kassem, 2019), sendo uma das atividades que compõem a cadeia de produção. Por esse motivo, a evolução do processo logístico, visualizado na Figura 1, repetidamente acompanhou as evoluções e transformações da indústria. Na primeira revolução industrial, ocorrida no final do século 18, a produção fabril era essencialmente mecânica e movida a vapor (Leng et al., 2022). Como consequência, o escoamento da produção precisou ser aprimorado, tornando-se também mecanizado: bois e outros animais de carga passaram a ser substituídos por trens (Paksoy, Kochan e Ali, 2020).

Cerca de cem anos depois, a segunda revolução industrial caracterizou-se pela especialização do trabalho, que, juntamente com a substituição do vapor pela energia elétrica, permitiu um melhor controle sobre o processo de fabricação. Essa mesma mudança acompanhou a cadeia de transportes, com a substituição dos veículos a vapor por veículos elétricos e de combustão interna (Amr, Ezzat e Kassem, 2019). Como consequência, as tarefas de logística também passaram a ser segmentadas, surgindo os primeiros locais dedicados exclusivamente para armazenagem de cargas: os armazéns logísticos (Paksoy, Kochan e Ali, 2020).

Inicialmente, essas cargas eram armazenadas exclusivamente ao nível do solo. No entanto, a partir dos anos 1950, com a introdução dos paletes como dispositivos de carga, surgiram então as empilhadeiras e as estruturas de armazenagem. Tudo isso otimizou o processo de armazenagem da logística, porém tornou-o mais complexo. Houve a necessidade de criar um processo de movimentação de cargas interno, dando origem à intra-logística (Kartnig, Grösel e Zrnić, 2012).

Figura 1 – Fases da logística.



Fonte: Adaptado de Paksoy, Kochan e Ali (2020); Trstenjak et al. (2022).

Mais um século avança e, em 1969, uma nova transformação ocorreu na indústria: com o surgimento da eletrônica digital e a popularização dos computadores, um primeiro nível

de automatização da cadeia produtiva surgiu (Leng et al., 2022), onde parte do processo de produção é totalmente controlado por circuitos eletrônicos. Como consequência, mais uma vez, a logística acompanha essa transformação, e parte do processo de armazenagem passa a ser controlado por computadores que gerenciam o armazenamento dos armazéns logísticos (Paksoy, Kochan e Ali, 2020).

Aproximadamente quarenta anos se passaram e, em 2011, cunhou-se o termo Indústria 4.0, que caracterizaria a quarta revolução industrial: ocorre um processo de desumanização da produção industrial (Saniuk, Grabowska e Straka, 2022a), onde o foco da produção concentra-se no controle, digitalização e automatização massiva do processo fabril (Ali e Phan, 2022), a partir da combinação de diversas tecnologias da computação, como Internet das Coisas (*IoT*), *big data* e inteligência artificial (IA) (Jafari, Azarian e Yu, 2022). Como fenômeno ocorrido nas revoluções anteriores, o processo logístico também precisou se transformar, juntando a esse novo contexto de produção a popularização do comércio eletrônico (*e-commerce*), que tornou muito mais crítica a atividade logística: surgiu então a Logística 4.0.

Essa criticidade deveu-se a diversos fatores, como a possibilidade de compras em qualquer local do planeta, a personalização da compra por parte do consumidor final (Martins et al., 2019), e às transações entre empresas - conhecida como *Business-to-business (B2B)*. Esse contexto conduziu a logística como um todo a um processo de automatização, e o seu controle tornou-se ainda mais especializado (Paksoy, Kochan e Ali, 2020). Surgiram soluções para cada etapa do processo - cada vez mais complexo - de escoamento da produção, desde sua concepção na fábrica até sua entrega ao cliente final. No caso dos armazéns logísticos, essas tecnologias revolucionaram de tal forma o processo de armazenagem que esses locais receberam o nome de armazéns inteligentes (Ali e Phan, 2022).

Paralelamente a esse contexto de transformação da cadeia de produção em geral - focada no protagonismo da máquina otimizado pela adoção de diversas tecnologias - inicia um processo de mudança no comportamento das pessoas. Denominada Sociedade 5.0 (Keidaren, 2018), essa transformação caracteriza-se pela maior preocupação das pessoas em relação à sustentabilidade (International, 2022) e centra-se no ser humano (Huang et al., 2022). O protagonismo econômico baseado na tecnologia permanece, porém ela é também dividida por esses novos valores.

Essa mudança de costumes da sociedade está atualmente ligada, entre outros fatores, às incertezas climáticas e à pandemia ocasionada pelo Coronavírus. Em relação ao clima, o aquecimento global cada vez mais intenso (Hansen et al., 2025) - e acompanhado das mudanças climáticas recentes - é um fator levantado em diversos cenários de previsões (Vervoort e Gupta, 2018; Register, 2022), que os dados mais recentes confirmam (CNN, 2023; Globo, 2023; Pioneiro, 2024a; G1, 2024; ClimaMeter, 2024; FAPESP, 2025). Nesse sentido, preocupações com um melhor uso dos recursos disponíveis tem então ainda mais influência no comportamento do consumidor: os serviços de logística em geral passaram a acumular outros valores agregados, como o rastreamento do produto ou material consumível, sua proveniência (Oracle, 2016) e o

retorno destes à sua origem - processo este chamado de logística reversa (SCA, 2021).

Acompanhando esse novo movimento, a indústria inicia então sua quinta revolução: surge o termo Indústria 5.0. Nessa nova etapa, o ser humano volta a ter papel fundamental no processo de produção fabril. Se na Indústria 4.0 o protagonismo era total das máquinas, apartando o fator humano do processo (Zizic et al., 2022), na versão 5.0 é voltada à integração homem-máquina (Xu et al., 2021), onde ambos trabalham em sinergia (Longo, Padovano e Umbrello, 2020). Três pilares a compõem: centralidade (ou centralidade) no ser humano, resiliência e sustentabilidade (Leng et al., 2022).

Como um dos ramos da indústria, a logística também acompanha essa transformação (Jafari, Azarian e Yu, 2022) e, cunha-se, então, o termo Logística 5.0 (Trstenjak et al., 2022). Essa nova fase da logística é caracterizada pela unificação de três componentes (Trstenjak et al., 2022): (a) a digitalização promovida pela Logística 4.0 (Amr, Ezzat e Kassem, 2019), (b) a sustentabilidade fornecida pela logística verde (Tran-Dang et al., 2022), e (c) o fator humano - combinado com a resiliência - inserido pela Sociedade 5.0 e pela Indústria 5.0 (Huang et al., 2022).

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Pairam dúvidas, todavia, em relação ao ingresso do campo logístico na era da Logística 5.0 ou se a logística atravessa apenas um processo de amadurecimento de sua versão 4.0, à semelhança do que ocorre na Indústria (Xu et al., 2021). Essa indefinição deve-se, primeiramente, ao pouco tempo decorrido entre a concepção das fases: passaram-se pouco mais de dez anos, e, por mais que as mudanças ocorram em intervalos cada vez menores, ainda assim trata-se de um tempo exíguo para sua adoção. O aprimoramento da sustentabilidade na Logística 4.0, por exemplo, é discutida amplamente pela literatura, seja tratando-a como uma oportunidade, um desafio ou uma característica desta fase (Manavalan e Jayakrishna, 2019; Kalsoom et al., 2021; Tran-Dang et al., 2022). Ali e Phan (2022), por exemplo, aborda o uso de tecnologias da Indústria 4.0 nas perspectivas econômica, ambiental e social de sustentabilidade.

Outros trabalhos, ainda, abordam a sustentabilidade como uma questão não relacionada ao estágio da logística, mas sim como um ramo chamado de logística verde (Tran-Dang et al., 2022), onde esta é trabalhada de forma a minimizar o seu impacto no aspecto ambiental e social (Liu e Ma, 2022). Inclusive, diversos trabalhos abordam esse tema sob diferentes aspectos, como o aumento da eficiência energética (PWC, 2009; Banister e Hickman, 2013), a redução de acidentes (Insights, 2023) e o bem-estar laboral (Bavaresco et al., 2021). Além disso, Saniuk, Grabowska e Straka (2022b) propõe um modelo híbrido que incorpora os modelos 4.0 e 5.0 da indústria, e que poderia ser adaptado também à logística. A proposta incorpora as fortalezas de cada um desses modelos, podendo, inclusive, tornar-se um embrião do sexto estágio da industrialização.

Por outro lado, a adoção da Internet das Coisas em armazéns logísticos, quando guiada

por uma arquitetura fundamentada nos princípios da Logística 5.0 - centralidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência - reconfigura a própria lógica de concepção dos requisitos de sensoriamento e processamento de dados. Em vez de limitar-se à otimização de fluxos internos e à automação da movimentação de cargas, essa abordagem amplia o escopo funcional dos armazéns inteligentes, transformando-os em infraestruturas de interesse público. Isso significa que sensores e sistemas de monitoramento, tradicionalmente utilizados apenas para rastreamento de produtos ou prevenção de falhas operacionais, podem também apoiar ações emergenciais de Defesa Civil e Corpo de Bombeiros, gerando dados em tempo real para prevenção de desastres, segurança ocupacional e proteção ambiental.

A implicação é que esses armazéns deixam de ser exclusivamente centros de eficiência operacional caracterizados como *hubs* do processo logístico (Barreto, Amaral e Pereira, 2017) e tornam-se nós estratégicos em redes territoriais inteligentes, capazes de articular competitividade empresarial e bem-estar social a custos reduzidos. Como existem mais de mil armazéns espalhados pelo país (ABOL, 2022)¹, isso permite sua escalabilidade em rede e consequentemente, o modelo pode potencializar a cobertura de sensoriamento urbano, fornecendo informações críticas para cidades e regiões inteiras. Contudo, permanece a questão central desta tese: tais resultados só são viáveis quando a *IoT* é concebida sob as diretrizes da Logística 5.0; caso contrário, se orientada apenas pelos parâmetros da Logística 4.0, a arquitetura tenderia a permanecer restrita à lógica da eficiência interna, sem gerar externalidades positivas para a sociedade. Esse dilema reforça a necessidade de problematizar se está de fato avançando-se para um novo paradigma da logística ou apenas vivenciando um estágio de maturação da lógica anterior.

Fica claro, todavia, que o fator humano é o componente novo da Logística 5.0 e, nesse sentido, os demais fatores que a compõem também podem ser trabalhados sob essa perspectiva, abrindo um novo campo de pesquisa nessa área. A automatização trazida pela Logística 4.0 pode ser combinada com o fator humano (Venkatapathy et al., 2017), buscando integração também com sistemas sociais (Li et al., 2023), e assim trazendo novas possibilidades de uso das tecnologias existentes.

A sustentabilidade, por sua vez, também pode ser trabalhada sob essa perspectiva humana, sendo definida por Trstenjak et al. (2022) como consciência ambiental, como na redução de acidentes de trabalho nas movimentações de carga em armazéns logísticos ou fornecendo algum tipo de compensação ao entorno de onde a atividade logística é realizada. Nessa mesma perspectiva, Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025) afirma que, no contexto da Logística 5.0, a sustentabilidade deve ser compreendida de forma mais abrangente, englobando não apenas os aspectos ambientais, mas também os aspectos sociais. Esse fator - aliado ao elemento humano - indica que a atividade logística pode gerar formas de compensação ou retorno positivo para a comunidade localizada no entorno de suas operações, como no que diz respeito ao fortalecimento da resiliência.

Ou seja, a Logística 5.0 nada mais é que um rearranjo de soluções já existentes voltadas

¹Atualmente são mais de mil empresas associadas à ABOL, e 92% delas trabalham com armazenagem.

para o viés humano e suas correlações - a sustentabilidade e a resiliência. Essas definições a partir de novos arranjos já ocorreram em outros momentos: o termo *Internet of Things*, por exemplo, surgiu a partir da aplicação de uma tecnologia já existente - no caso, o *RFID* - em contextos não imaginados anteriormente (Falade et al., 2023).

Nesse contexto, reduzir o impacto ambiental das operações logísticas traria benefícios à própria logística como um todo, afinal ela é uma das áreas mais afetadas quando ocorre desastres climáticos, como os eventos recentes no Rio Grande do Sul confirmam (Povo, 2024; Metsul, 2024). Outra questão que também fica clara nesse contexto diz respeito à resiliência (Andres et al., 2024), ao bem-estar humano e à sustentabilidade, que na Indústria 4.0 são consequências resultantes da automatização do processo industrial (Xu et al., 2021), enquanto na Indústria 5.0 ocorre o processo contrário: o ponto de partida são esses três pilares, sempre considerando os limites do planeta, sendo a automatização uma consequência desse processo.

Portanto, considerando esse atual estágio da logística, os armazéns precisam também se preparar para essa nova realidade, atendendo às crescentes demandas de maneira sustentável, orientada ao serviço de armazenagem e com capacidade para armazenar produtos cada vez mais customizados pelo consumidor. Isso significa que a abordagem do armazém logístico permanece inteligente como já ocorre na Logística 4.0, porém deve maximizar sua eficiência e efetividade de suas operações de maneira a alcançar os objetivos econômicos da organização, moldado às necessidades do consumidor final, mas também apresentando impactos positivos no ambiente e na sociedade (Ali e Phan, 2022).

Nesse cenário introduzido pela Logística 5.0, a Internet das Coisas permanece sendo um dos seus pilares de sustentação (Jafari, Azarian e Yu, 2022; Zhen e Li, 2022; Li et al., 2023; Andres et al., 2024), pois fornece um certo tipo de inteligência - no sentido de processamento computacional e conectividade - a qualquer objeto (Ding, 2013). Isso possibilita a comunicação e cooperação entre esses objetos para atingir um objetivo único (Atzori, Iera e Morabito, 2010). Num armazém logístico, isso pode ser caracterizado por sensores e atuadores espalhados pelas estruturas de armazenagem, por empilhadeiras e pelos próprios bens ali armazenados (Geest, Tekinerdogan e Catal, 2022), todos eles fornecendo informações em tempo real sobre a sua condição de armazenagem.

Os dados fornecidos pelo uso da *IoT*, ainda, otimizam o uso do armazém logístico, oferecendo uma gestão do armazenamento de tal forma que surjam benefícios em cadeia: quanto mais fácil for a localização do produto, menor será a necessidade de movimentação de carga que, por sua vez, acarretará em redução ou eliminação dos acidentes - no último caso, quando possível a completa automatização da movimentação de carga (Ding, 2013). Todo esse ciclo também resulta numa maior eficiência operacional que contribui para uma maior sustentabilidade ambiental, seja pela redução do consumo energético ocasionado pelo menor uso das empilhadeiras, seja pela redução de acidentes na movimentação de cargas que poderiam acarretar em lesões aos trabalhadores que operam essas estruturas.

Porém, toda a situação trazida por essa nova etapa da logística traz um novo desafio

na incorporação das tecnologias de Internet das Coisas em armazéns logísticos. Se por um lado a *IoT* permite um melhor gerenciamento desses locais de armazenamento, onde sensores fornecem dados em tempo real sobre condições de operação, de saúde ocupacional (Perotti et al., 2025) e de sustentabilidade ambiental, por outro lado, há uma série de desafios tecnológicos e de utilização característicos dos processos de inovação. Entre os desafios tecnológicos destacam-se a convergência de tecnologias, problemas de cibersegurança (Deloitte, 2022; Katoch, 2022), e a maturidade tecnológica (Chauhan e Singh, 2020; Dixit e Verma, 2022; Kumar et al., 2022a). Em relação aos desafios de utilização, a implantação da Logística 5.0 nesses ambientes impõe a combinação das diferentes ferramentas *IoT* com as capacidades do ser humano, de forma a otimizar ainda mais a eficiência das operações logísticas em geral e, conseqüentemente, adaptar-se às particularidades cada vez maiores exigidas pelo consumidor final, combinada com o aumento da sustentabilidade, tanto das operações, quanto das pessoas que nela trabalham e, paralelamente, do entorno da sociedade que a compõe.

Diante dessas discussões, coloca-se a seguinte questão central: *como a Internet das Coisas pode ser incorporada aos armazéns logísticos de modo a orientar sua arquitetura pelos princípios da Logística 5.0 - centralidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência -, ampliando sua função para além da eficiência interna e possibilitando que esses espaços atuem também como infraestruturas de interesse público, capazes de apoiar tanto a competitividade empresarial quanto o bem-estar social?*

1.2 OBJETIVO GERAL

Propor uma arquitetura tecnológica para armazéns inteligentes que, orientada pelos princípios da Logística 5.0 - centralidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência -, integre sensoriamento via Internet das Coisas de modo a ampliar sua finalidade para além da eficiência operacional, fornecendo dados tanto para a gestão empresarial quanto para ações de interesse coletivo

1.2.1 Objetivos Específicos

- Elaborar os artefatos tecnológicos necessários à avaliação do uso de *IoT* em armazéns inteligentes sob a perspectiva da Logística 5.0, utilizando o método *Design Science Research* como abordagem de desenvolvimento.
- Definir e aplicar cenários de avaliação - reais e simulados - fundamentados na literatura existente, combinados com entrevistas com especialistas, para testar a arquitetura proposta e seus artefatos associados.
- Examinar a contribuição da arquitetura desenvolvida para além da eficiência interna, verificando seu potencial em apoiar tanto a gestão empresarial quanto ações de interesse

coletivo, como segurança ocupacional e entidades de proteção e defesa civil.

- Discutir criticamente os resultados obtidos, analisando em que medida os artefatos e a arquitetura oriundos desta tese atendem às premissas da Logística 5.0 e contribuem para o avanço da pesquisa em armazéns inteligentes.

1.3 JUSTIFICATIVA

1.3.1 Justificativa Teórica

A Logística 5.0 é um campo recente na literatura (Li et al., 2023), com pouco mais de três anos desde a publicação do primeiro trabalho, de Trstenjak et al. (2022). Desde então, pouco mais de duas dezenas de estudos têm explorado o termo "Logistics 5.0" - um número extremamente reduzido se considerado o contexto apontado por alguns autores, como Winkelhaus e Grosse (2020), que já destacavam a escassez de literatura até mesmo sobre a quarta fase da logística.

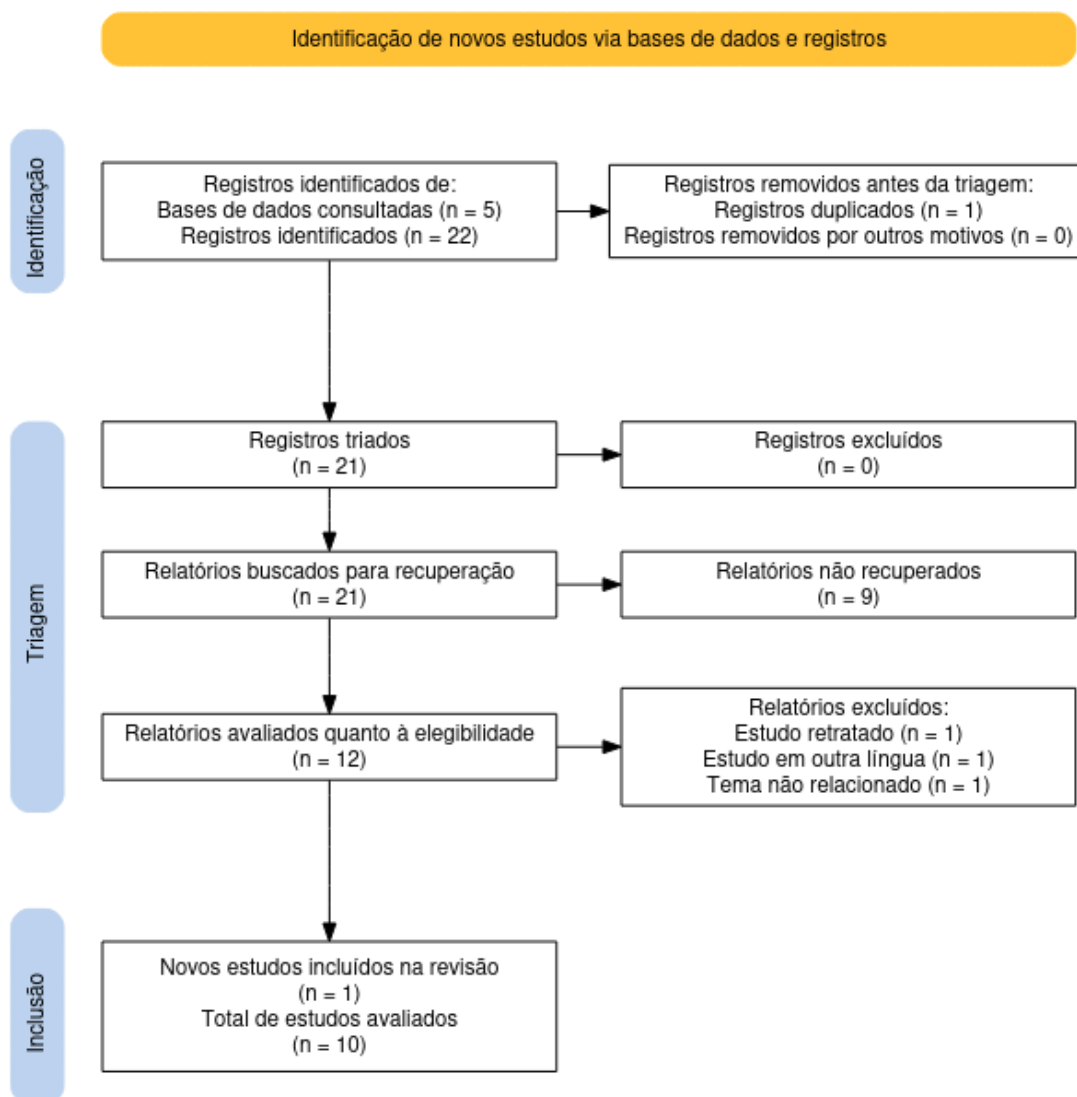
Para evidência dessa afirmação, realizou-se uma revisão sistemática da literatura onde adotou-se o método PRISMA 2020 (Haddaway et al., 2022) para a identificação e seleção dos artigos a serem avaliados, conforme ilustrado na Figura 2. Como termo de pesquisa, utilizou-se a expressão "logistics 5.0", com a busca realizada nos campos de título, resumo e palavras-chave, até 20 de junho de 2025, sem limitação de data. As bases de dados consultadas foram *Scopus*, *Web of Science*, *Springer*, *IEEE* e *ACM*. Como resultado, a pesquisa obteve o retorno de 22 trabalhos. Antes de iniciar a triagem, verificou-se que um dos resultados retornados estava duplicado.

Na fase de triagem do método, não foi possível recuperar nove dos 21 registros analisados, todos relacionados a capítulos de livros ou anais de eventos. Dos 12 resultados restantes, excluiu-se três da revisão sistemática: um por se tratar de um estudo retratado, outro por estar redigido em alemão, e o último por não abordar diretamente tema relacionado à logística, mas sim um estudo sobre sono em caminhoneiros. Por fim, incluiu-se o trabalho de Dissorn e Suwanbamrung (2023), por apresentar um estudo que elenca os elementos que compõem a Logística 5.0. Realizou-se a revisão sistemática, portanto, sobre dez trabalhos, que também passaram por uma análise bibliométrica.

O baixo número de trabalhos retornados deve-se ao uso recente do termo, empregado pela primeira vez em 2022 no trabalho de Trstenjak et al. (2022), após a definição do conceito de Indústria 5.0 pela União Europeia no ano anterior (Huang et al., 2022). Em 2023, o estudo identificou mais um trabalho produzido. Já em 2024, observou-se um salto para quatro trabalhos publicados - número que se repetiu em 2025, mesmo considerando a realização da pesquisa na metade do ano. A Figura 3 apresenta a distribuição da quantidade de trabalhos publicados ao longo dos anos.

As contribuições e a metodologia utilizadas nos trabalhos resultantes da revisão siste-

Figura 2 – Visualização do processo escolha dos artigos utilizados na revisão sistemática da literatura.



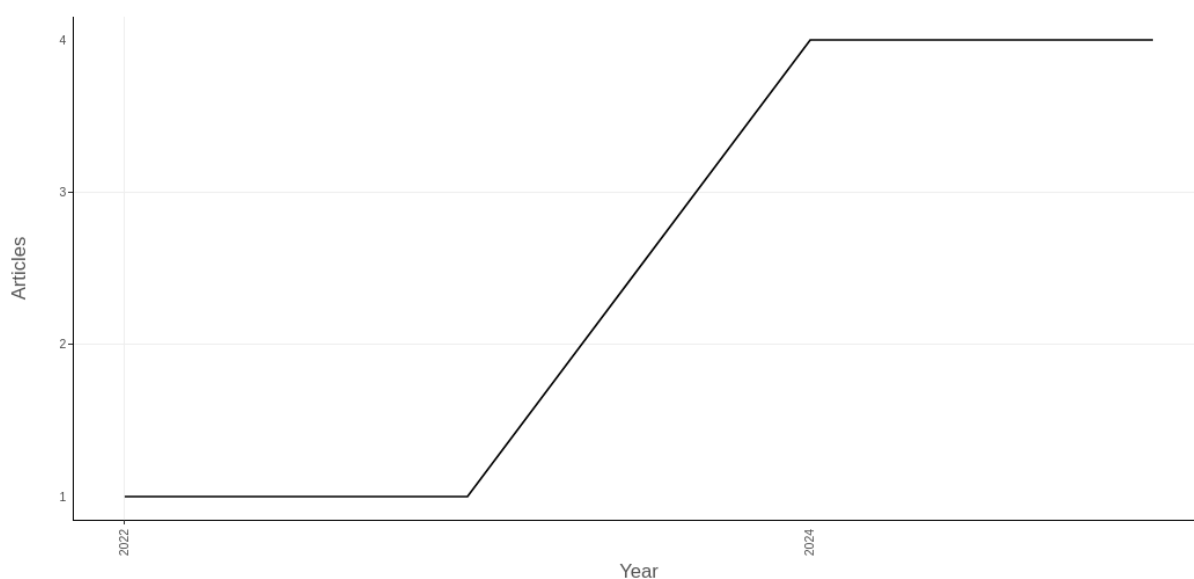
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

mática estão apresentadas na Tabela 1. Na sequência, discute-se individualmente cada um dos trabalhos identificados.

O trabalho de Trstenjak et al. (2022) fornece um modelo de implementação da Logística 5.0 baseado em sistemas de apoio à decisão. O modelo organiza o processo de implantação em cinco estágios - armazém, transporte, empacotamento, infraestrutura e recursos humanos - e três metas principais - investimento inicial, tempo de retorno sobre o investimento (*Return of Investment - ROI*) e complexidade de implementação e operação. Para elaboração do modelo, o trabalho utilizou o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*² com formulários aplicados a 60 especialistas. Os resultados indicaram que a implantação deve priorizar ações de menor

²O método *AHP* define a montagem de uma árvore de decisão que define a prioridade dos requisitos a serem incorporados a uma organização (Trstenjak et al., 2022).

Figura 3 – Produção anual de estudos relacionados à Logística 5.0.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

complexidade e com retorno mais rápido, como a redução da impressão de documentos e o uso de lâmpadas mais eficientes, por apresentarem maior probabilidade de sucesso.

Dissorn e Suwanbamrung (2023) identificam, por meio da técnica *Delphi* e do método *AHP*, cinco agrupamentos que compõem a Logística 5.0: infraestrutura, organização e recursos humanos, transporte verde, armazenagem verde e empacotamento verde. Esses elementos - semelhantes ao trabalho de Trstenjak et al. (2022) - formam a base de uma estratégia de transformação inteligente, que busca integrar digitalização, sustentabilidade e capital humano na gestão logística. O estudo demonstra que a priorização desses componentes deve considerar três metas de inteligência frente à disrupção - tempo de retorno sobre o investimento, investimento inicial e complexidade de implementação -, demonstrando que a Logística 5.0 pode atuar como uma abordagem estratégica especialmente relevante para pequenas e médias empresas, ao promover resiliência, eficiência operacional e práticas sustentáveis nas cadeias de suprimentos.

O estudo de Szeredi, Trenka e Pogatsnik (2024) realiza uma revisão sistemática da literatura buscando termos relacionados à indústria, logística e cadeia de suprimentos 5.0, com o objetivo de identificar semelhanças e diferenças entre as fases 4.0 e 5.0 da logística. Além disso, analisa como essa nova fase pode responder às mudanças climáticas e à sustentabilidade por meio da adoção sistemática de ferramentas que promovam a sustentabilidade econômica, social e ambiental, combinando logística verde, logística reversa e economia circular.

Por sua vez, Tudisco, Perotti e Tappia (2024) destacam o fator humano na Logística 5.0, especialmente em contextos de armazéns inteligentes. Os autores afirmam que essa nova fase da logística possui metas voltadas à sociedade, diferenciando-se da Logística 4.0, cujo foco reside na digitalização e na eficiência. Reforçam ainda o papel do humano nessa etapa, com repercussões não apenas tecnológicas e econômicas, mas também ambientais e sociais,

introduzindo o conceito de interação humano-tecnológica (*Human Technology Interaction - HTI*). O estudo também utiliza o método PRISMA e, como resultado, propõe um *framework* de armazém centrado no ser humano que atua no armazém, no qual as tecnologias exercem funções de apoio ou de substituição. Como exemplo de apoio, os autores citam o uso de comandos de voz para a execução de tarefas no armazém. Já como exemplo de substituição, mencionam a utilização de robôs autônomos.

Tabela 1 – Quadro-resumo do trabalhos identificados na revisão sistemática da literatura.

Autores	Metodologia	Contribuições
Trstenjak et al. (2022)	Aplicação de questionário	Apresenta o conceito de Logística 5.0. Oferece modelo prático de transição para Logística 5.0.
Dissorn e Suwanbamburung (2023)	Entrevistas via técnica <i>Delphi</i>	Apresenta os elementos que compõem a Logística 5.0, organizados em cinco grupos.
Szeredi, Trenka e Pogatsnik (2024)	Revisão sistemática da literatura	Diferencia Logística 4.0 e 5.0, destacando o papel da sustentabilidade nesta nova fase.
Tudisco, Perotti e Tappia (2024)	Revisão sistemática da literatura	Enfatiza a centralidade humana na Logística 5.0 em armazéns inteligentes.
Andres et al. (2024)	Revisão sistemática da literatura	Organiza as tecnologias habilitadoras da Logística 5.0 em <i>framework</i> teórico com foco em maturidade e integração.
Nicoletti e Appolloni (2024)	Revisão sistemática da literatura	Integra logística verde à Logística 5.0 com foco em eficiência e sustentabilidade ambiental.
Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025)	Análise bibliométrica	Alerta para o desafio de transição teórica e prática para a Logística 5.0.
Perotti et al. (2025)	Estudo de caso experimental em laboratório	Demonstra aplicação prática da Logística 5.0 com foco em ergonomia e saúde ocupacional.
Machado e Rodriguez (2025a)	Revisão integrativa da literatura	Estrutura uma ferramenta de diagnóstico da maturidade em Logística 5.0.
Machado e Rodriguez (2025b)	Aplicação de questionário	Retrata o estágio atual da Logística 5.0 no Brasil, com diagnóstico de práticas e desafios.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por meio de uma análise bibliométrica, Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025) analisam as implicações das indústrias 4.0 e 5.0 no setor logístico, apresentando uma tendência crescente de publicações ao longo dos anos. No entanto, os autores observam que muitos estudos em Logística 5.0 ainda se baseiam em conceitos e premissas da Indústria 4.0, centrados na eficiência, indicando que a aplicação de tecnologias com foco na sustentabilidade e na centralidade humana ainda é tratada como um desafio futuro.

O trabalho de Andres et al. (2024) apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre

tecnologias habilitadoras da logística e cadeia de suprimentos em sua quinta fase. No estudo, os autores afirmam que a Internet das Coisas (*IoT*) constitui a base do desenvolvimento da Logística 5.0, apontando diversos exemplos de implementações práticas descritas na literatura. Essas implementações incorporam tecnologias em estágios distintos de maturidade, como veículos autônomos, inteligência artificial (*IA*) e *business intelligence* (*BI*). O estudo propõe ainda um *framework* teórico que relaciona a Indústria 5.0 à Logística 5.0, classificando as tecnologias em uma taxonomia composta por quatro categorias: infraestrutura formada basicamente pela *IoT*, tecnologia de engenharia, tecnologia de dados e tecnologia de comunicação. No campo das tecnologias de engenharia, destacam-se aplicações de realidade virtual e aumentada, gêmeos digitais e robôs colaborativos. Já no âmbito das tecnologias de dados, o estudo ressalta o papel do *BI* e da *IA*. Por fim, entre as tecnologias de comunicação, reforça-se o uso do *blockchain*, a computação em nuvem e o *RFID*.

Já Perotti et al. (2025) apresentam um estudo de caso prático em laboratório sobre a aplicação de exoesqueletos na tarefa de separação de materiais em um armazém logístico alinhado aos princípios da Logística 5.0. O trabalho compara essa atividade em três cenários: sem exoesqueleto, com exoesqueleto passivo³, e com exoesqueleto ativo⁴. Os resultados indicam uma redução de aproximadamente 30% da atividade muscular na região lombar ao utilizar o exoesqueleto ativo, contribuindo para a prevenção de lesões na coluna vertebral.

O estudo de Machado e Rodriguez (2025a) apresenta um modelo teórico de maturidade da Logística 5.0 baseado numa revisão integrativa da literatura e estruturado em cinco níveis. O nível inicial caracteriza a logística como mero centro de custos. O nível repetível reconhece a importância da padronização e da documentação de processos. O nível definido marca o início do uso de tecnologias como *RFID* e análise de dados, ainda sem integração com a cadeia de suprimentos. O nível gerenciado apresenta alto uso de tecnologias emergentes, como *IoT* e *big data*, promovendo a interligação das operações logísticas em toda a cadeia. Por fim, o nível otimizado refere-se ao uso massivo de *IA*, com capacidade de prever mudanças de mercado e ajustar as operações logísticas de forma autônoma, demonstrando alto grau de resiliência e adaptabilidade frente a mudanças disruptivas.

Também com base em uma revisão sistemática, Nicoletti e Appolloni (2024) propõem um modelo de implantação da logística verde no contexto da Logística 5.0, sustentado pelo uso da *IA* para otimizar atividades logísticas em busca de maior eficiência. No contexto de armazéns, os autores sugerem que a *IA* pode simular diferentes fluxos de tráfego interno, auxiliando na definição da melhor disposição dos bens armazenados, com o objetivo de reduzir o trânsito, o consumo energético e, conseqüentemente, aumentar a sustentabilidade ambiental.

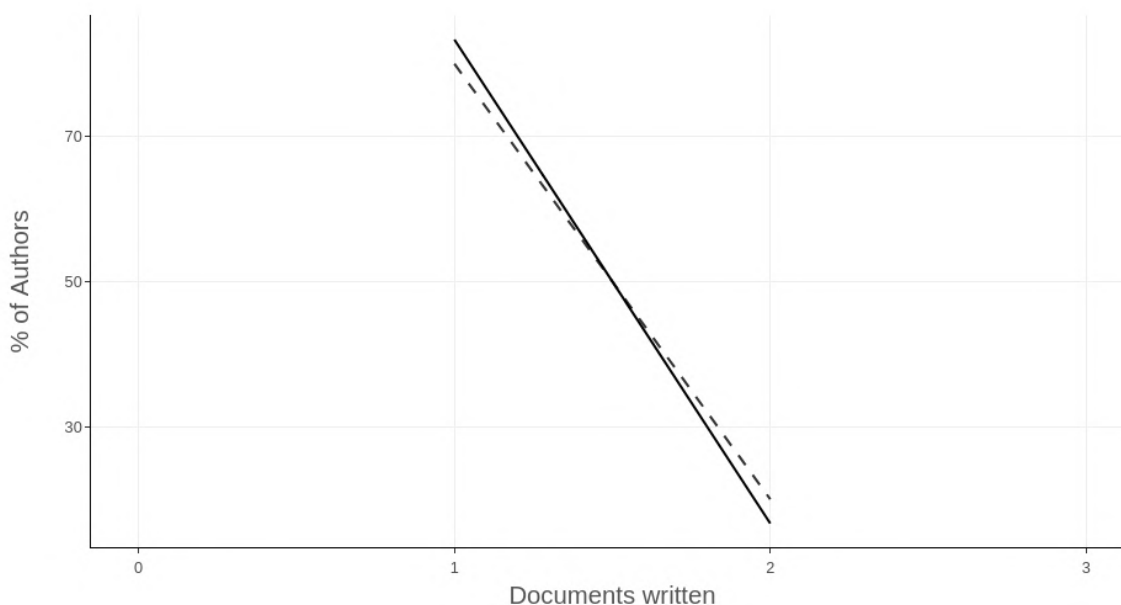
Por fim, o estudo de Machado e Rodriguez (2025b) avalia o nível de maturidade da implantação da Logística 5.0 no Brasil a partir de um questionário aplicado a 28 empresas

³Sistema de exoesqueleto que utiliza elásticos e mecanismos mecânicos, sem sistemas de controle ou energia (Perotti et al., 2025).

⁴Sistema de exoesqueleto que utiliza tecnologias que aumentam automaticamente a força humana por meio de atuadores controlados por sistemas (Perotti et al., 2025).

brasileiras com experiência prévia em tecnologias da Logística 4.0. O estudo constatou que metade das empresas analisadas se encontra em um nível básico de maturidade, caracterizado por automação limitada, baixo uso de IA e pouca integração homem-máquina. Além disso, apenas 15% das empresas avaliadas demonstram um nível avançado de maturidade, com uso extensivo de IA, alta integração entre humanos e tecnologia e práticas sustentáveis consolidadas.

Figura 4 – Produção científica por autores esperada pela Lei de Lotka (linha tracejada) e a encontrada (linha contínua).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

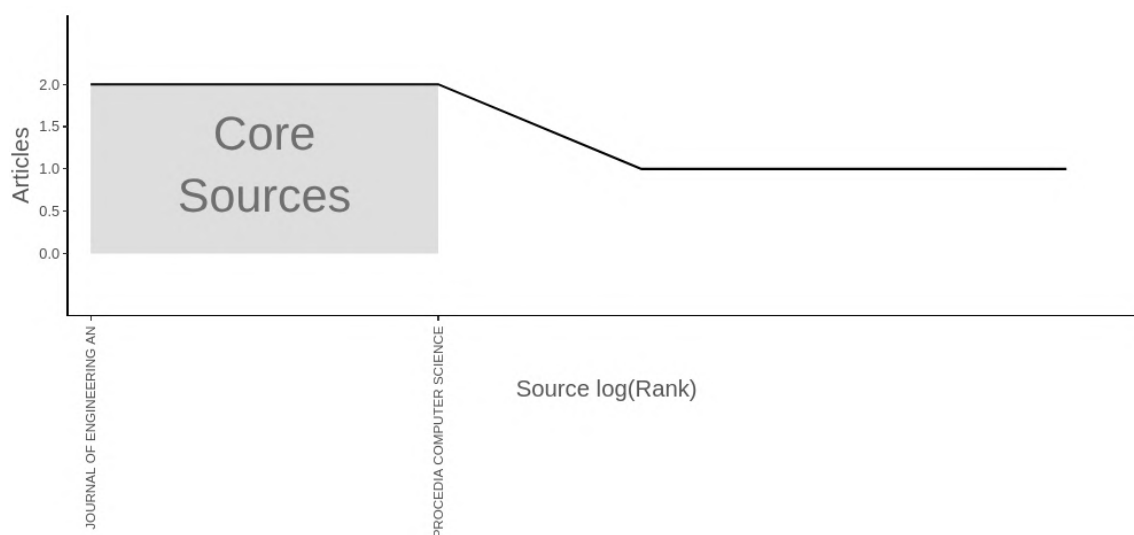
Como complemento à revisão sistemática da literatura, fez-se uma análise bibliométrica dos trabalhos analisados para a melhor avaliação e entendimento dos resultados encontrados. Conduziu-se essa análise através da ferramenta Bibliometrix (Aria e Cuccurullo, 2017).

De maneira geral, três são as Leis que orientam esse tipo de análise: a Lei de Lotka, a Lei de Bradford e a Lei de Zipf (Maia e Bezerra, 2023). A Lei de Lotka descreve a produtividade dos autores em um determinado campo científico, afirmando que existe uma proporção menor de autores que publicam um número maior de artigos, e a maioria dos autores publica apenas um ou poucos artigos. Também chamada de Lei de Dispersão, a Lei de Bradford descreve como artigos sobre um assunto específico se dispersam em diferentes periódicos. Essa lei afirma que um pequeno número de periódicos (os *core sources*) publica a maioria dos artigos sobre um tópico, enquanto um número maior de periódicos publica um número menor de artigos sobre o mesmo tópico. Finalmente, a Lei de Zipf descreve a relação entre a frequência de ocorrência de itens em uma lista ordenada e a sua posição nessa lista. Essa frequência muitas vezes é apresentada de maneira visual por meio de uma nuvem de palavras. Nessa análise, ainda, podem ser incorporadas estatísticas adicionais (Ninkov, Frank e Maggio, 2022), como a quantidade de trabalhos produzidos ao longo dos anos - já apresentada no início desta Seção - e

sua distribuição geográfica.

Os resultados da Lei de Lotka, apresentados na Figura 4, mostram que 83% dos autores publicaram apenas um artigo sobre Logística 5.0. Mesmo entre os autores mais produtivos, o número máximo de publicações identificadas até o momento da pesquisa é de dois artigos. Ademais, a distribuição observada aproxima-se da linha teórica prevista pela referida Lei.

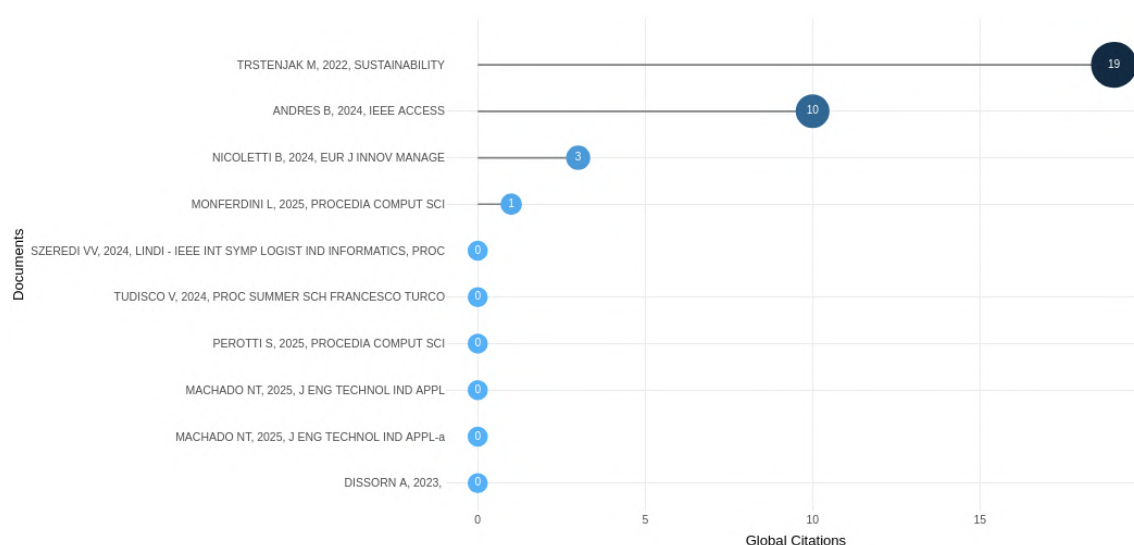
Figura 5 – As principais fontes de publicações, segundo a Lei de Bradford.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com relação à Lei de Bradford, o estudo identificou que os periódicos *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications* e *Procedia Computer Science* concentram o maior número de publicações sobre o tema, conforme ilustrado na Figura 5. Esse resultado sugere que as pesquisas relacionadas à Logística 5.0 têm sido majoritariamente divulgadas em periódicos com enfoque técnico e tecnológico.

Figura 6 – Visualização dos trabalhos mais citados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por sua vez, os resultados da Lei de Zipf, apresentados na Figura 7, demonstram que, em torno do termo "logistics 5.0", concentram-se tópicos frequentes como Indústria 4.0 e 5.0, sustentabilidade, armazéns logísticos e logística verde, todos apresentados em inglês.

A análise dos trabalhos mais citados, demonstrado na Figura 6, reforça a relevância do estudo de Trstenjak et al. (2022), que concentra dois terços de todas as citações identificadas nesta revisão. O trabalho de Andres et al. (2024) também se destaca, acumulando dez citações em apenas um ano desde sua publicação, o que demonstra seu impacto inicial e a relevância crescente do tema na literatura recente.

Figura 7 – Lei de Zipf apresentada no modelo de nuvem de palavras, contendo as palavras mais associadas à Logística 5.0.



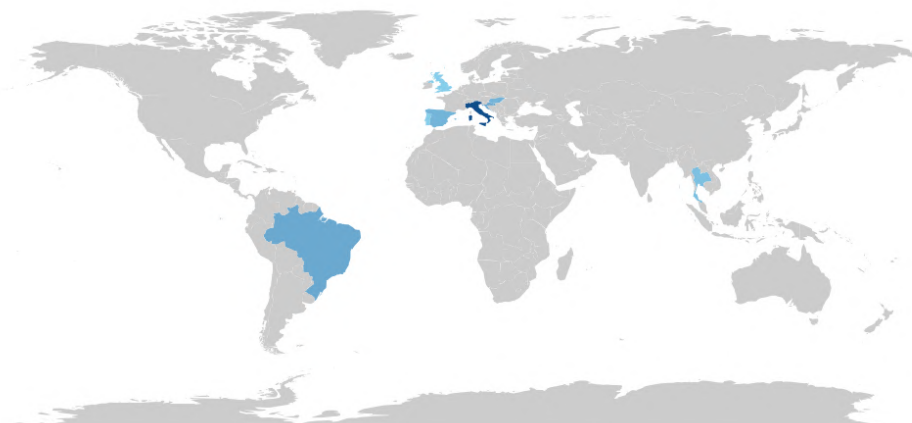
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A avaliação da produção científica por país, mostrada na Figura 8, revela que quase todas as afiliações dos pesquisadores localizam-se na Europa, com destaque para a Itália, que concentra mais da metade das publicações analisadas. Fora do contexto europeu, identificam-se afiliações na Tailândia e no Brasil - no último, todas afiliações são vinculadas à Universidade Federal de Santa Catarina, que responde atualmente por toda a produção nacional sobre o tema.

Esses resultados demonstram que as pesquisas relacionadas à Logística 5.0 se encontram em estágio inicial. Esse cenário é confirmado pelos resultados das Leis de Lotka e de Bradford, que indicam, respectivamente, que os autores mais produtivos publicaram, no máximo, dois artigos sobre o tema, e que apenas duas fontes de publicação concentram mais de um trabalho relacionado. Esses achados, combinados com a reduzida quantidade de trabalhos retornados, revelam que a Logística 5.0 representa uma ampla lacuna de pesquisa ainda pouco explorada pela comunidade acadêmica.

Ademais, o caráter emergente do tema também contribui para que muitas abordagens ainda definam a Logística 5.0 sob a ótica da Logística 4.0, como reforçado por Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025). Ainda, como apontado por Trstenjak et al. (2022) e Szeredi, Trenka

Figura 8 – Produção científica por país.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

e Pogatsnik (2024), embora a Logística 5.0 se aproprie das ferramentas tecnológicas desenvolvidas no contexto da Logística 4.0, seu uso ocorre a partir de novas premissas, centradas na sustentabilidade, na resiliência e na centralidade do ser humano. Nesse sentido, os estudos de Tudisco, Perotti e Tappia (2024) e Nicoletti e Appolloni (2024) oferecem contribuições ao proporem transformações na lógica do processo logístico, orientadas por uma abordagem mais sustentável e centrada no ser humano. Ainda dentro das premissas da Logística 5.0, a sustentabilidade tem se consolidado como foco predominante das pesquisas produzidas até o momento. A nuvem de palavras apresentada na Figura 7 reforça essa percepção, com destaque para os termos *green logistics* e *sustainability*.

Além disso, os estudos que atualmente abordam a Logística 5.0 se concentram majoritariamente em revisões sistemáticas e análises bibliométricas, conforme verificado na Tabela 1. Apenas o trabalho de Perotti et al. (2025) apresenta um estudo prático, avaliando o uso de um exoesqueleto, embora realizado em ambiente controlado de laboratório. Essa limitação, todavia, compromete a aplicabilidade dos resultados em contextos reais, devido a fatores como o tempo reduzido de avaliação do equipamento, a necessidade de treinamento dos operadores e a diversidade de condições operacionais, especialmente em cenários com alta demanda ou em locais de armazenagem específicos. O estudo de Machado e Rodriguez (2025b), por sua vez, ainda que apresente uma escala de maturidade para o uso da Logística 5.0 e aplique-a em empresas brasileiras, baseia-se exclusivamente em premissas tecnológicas. Esse estudo, portanto, reforça a sobreposição conceitual entre as fases 4.0 e 5.0 da Logística destacada por Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025).

No que se refere aos armazéns logísticos, há apenas um estudo diretamente voltado a esse segmento no contexto da Logística 5.0, efetuado por Tudisco, Perotti e Tappia (2024). Considerando que o armazém representa um *hub* estratégico dentro da cadeia logística, a literatura revela uma escassez significativa de pesquisas sobre a aplicação prática da Logística 5.0 nesses ambientes.

Além das lacunas na identificadas na literatura, existem ainda outros dados que demonstram a relevância desta pesquisa. Uma delas diz respeito à magnitude do setor logístico para a economia brasileira. Segundo relatório da Associação Brasileira de Operadores Logísticos (ABOL), a operação logística movimentada cerca de 2% do Produto Interno Bruto do Brasil (PIB) (ABOL, 2022) e emprega cerca de 2 milhões de pessoas. Mais de 90% das empresas do ramo logístico trabalham com serviços de armazenamento, destacando a importância dos armazéns logísticos no Brasil.

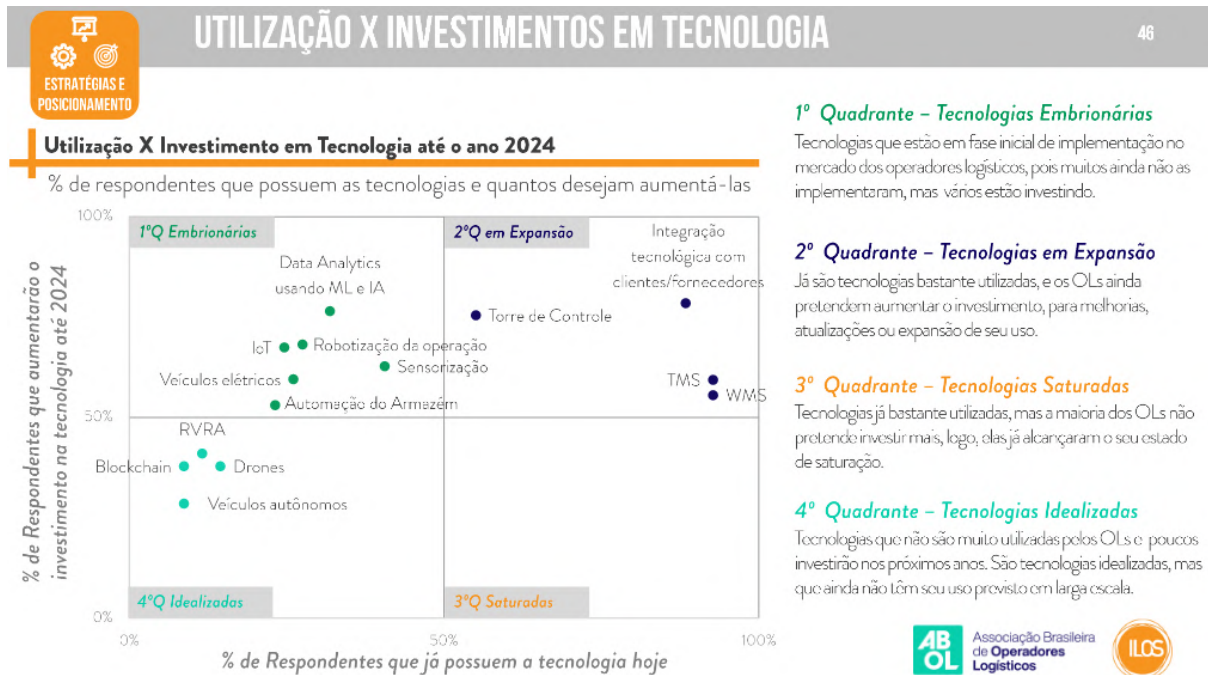
Quanto ao uso de tecnologias *IoT* no ambiente de operação logística em geral, percebe-se que há uma grande possibilidade de expansão da adoção dessas tecnologias. Conforme a pesquisa realizada pela ABOL (2022), 80% das empresas logísticas afirmam realizar investimentos em *softwares* e tecnologias para aprimoramento da eficiência logística, porém apenas 23% trabalham com a automação do armazém e 25% possuem algum tipo de tecnologia *IoT*. Todavia, segundo dados do mesmo relatório, 67% das empresas avaliavam implementar a tecnologia até o ano de 2024, buscando uma maior automação para aumento da produtividade, flexibilidade e customização de suas operações.

Nesse sentido, considerando sua relevância no processo de inovação em ambientes logísticos em geral (Tran-Dang et al., 2022), percebe-se que a *IoT* é uma tecnologia ainda pouco explorada nesses locais, considerando o seu potencial de otimização dos processos das organizações logísticas em geral, incluindo a área de armazéns. A sua adoção permite que componentes do processo logístico colem dados que ofereçam uma maior visibilidade e transparência da operação logística e baseiem tomadas de decisão mais assertivas e que possibilitem uma maior eficiência do processo logístico como um todo (Tran-Dang et al., 2022), tornando essas empresas mais competitivas diante do cenário de concorrência regional, nacional e mundial. Nesse contexto de eficiência, percebe-se também a existência de um grande potencial de melhoria, pois boa parte da energia produzida é dedicada aos transportes em geral. Somente no estado do Rio Grande do Sul, 40% da energia produzida é utilizada para transportes em geral (Rio Grande Do Sul, 2022).

Essa percepção é reforçada pelo quadrante que relaciona a utilização e os investimentos em tecnologia, mostrado na Figura 9. O primeiro quadrante, identificado como tecnologias embrionárias e onde a *IoT* está classificada, identifica as tecnologias que estão em implantação inicial pelos operadores logísticos, onde poucos as utilizam, mas muitos estão investindo. O segundo quadrante identifica as tecnologias em expansão, ou seja, que já são bastante difundidas, porém ainda recebem grandes investimentos. Sistemas de gerenciamento de armazéns (*Warehouse Management Systems - WMS*) classificam-se nessa categoria. O terceiro quadrante identifica as tecnologias que estariam saturadas - nesta pesquisa, nenhuma foi identificada - e o quarto e último quadrante identifica as tecnologias idealizadoras, que são pouco utilizadas e que poucos investirão nos próximos anos, onde estão tecnologias como veículos autônomos e drones.

Um dos motivos que leva a essa classificação e a esse salto na adoção do uso de *IoT*

Figura 9 – Quadrante de utilização versus investimentos na logística.



Fonte: Retirado de ABOL (2022).

na operação logística está relacionado ao aumento da eficiência logística para manter sua competitividade perante ao mercado, mostrando a aderência deste trabalho à linha de pesquisa de Inovação e Competitividade do PPGA/UCS, e também ligado a uma crescente preocupação dessas empresas à adoção de práticas ambientais, sociais e de governança (*Environmental, Social and Governance - ESG*). Segundo a ABOL (2022), 76% das empresas realizam ações para melhoria da segurança do trabalho, 72% para ações de redução, reuso e reciclagem, 55% para bem-estar social, e 52% para redução do gasto energético.

Além disso, essa preocupação se estende além das organizações, alcançando o poder público em geral. No Brasil, por exemplo, a preocupação com as práticas *ESG* são encontradas na Política Nacional de Resíduos Sólidos, que institui o Plano de Logística Reversa (Brasil, 2010) e na Nova Lei de Licitações e Contratos, que prevê o desenvolvimento nacional sustentável e reforça que as contratações públicas devem analisar possíveis impactos ambientais e prever medidas para mitigá-las (Brasil, 2021). As *ESG*, por sua vez, estão alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Assunção, Almeida e Porto, 2024), permitindo que os armazéns logísticos também exerçam um nível de função social à sociedade, especialmente no que diz respeito à comunidade no seu entorno.

1.3.2 Justificativa Empírica

Além das questões teóricas, a parceria da bolsa de Doutorado Acadêmico para a Inovação (DAI) com a empresa Alpha⁵ permite um amplo uso de *IoT* em armazéns logísticos. Como a empresa fabrica e vende estruturas de armazenagem, abre-se uma vasta possibilidade de utilização de *IoT* sobre essas estruturas para fins de estudo sobre o gerenciamento de armazéns logísticos sob a perspectiva da Logística 5.0. Como exemplos, pode-se utilizar essa tecnologia para o monitoramento da ocupação dos espaços vagos e ocupados (Ding et al., 2021), para a otimização do consumo energético por meio do controle da luminosidade e da redução da movimentação de cargas (Trstenjak et al., 2022), e para a avaliação de danos nas próprias estruturas de armazenagem, emitindo alertas em caso de impactos - neste último caso, uma oportunidade de inovação apontada pela própria empresa parceira.

Tabela 2 – Uso de sensores *IoT* sob as perspectivas da operação logística, saúde humana, resiliência e sustentabilidade ambiental.

Perspectiva	Indicador	Tipo de sensor
Operação Logística	Eficiência na movimentação de cargas (Zhang, Gilbert e Rasmussen, 2012), eficiência energética (Trstenjak et al., 2022), acidentes de trabalho (Ding et al., 2021)	Acelerômetro, medidor de energia, movimentação, aproximação
Saúde humana	Acidentes de trabalho, ruído, aceleração (Sucerquia, López e Vargas-Bonilla, 2018), sinais vitais (Leu et al., 2017)	Acelerômetro, pressão arterial, temperatura corporal, oxigenação, frequência cardíaca
Resiliência	Epidemias (Min, 2023), medições climáticas (Gutierrez-Lopez, Cruz-Paz e Muñoz Mandujano, 2019), tornados, abalos sísmicos (Allen e Stogaitis, 2022; Castiglioni, Drei e Kanyilmaz, 2020; Voosen, 2021), volume de chuva, níveis de rios (Milner et al., 2018), incêndio (Gottuk e Dinaburg, 2012; Díaz-Ramírez et al., 2012; Choi e Jung, 2024)	acelerômetro, pluviômetro, temperatura, umidade, pressão atmosférica, luminosidade, partículas de carbono (CO ₂), partículas orgânicas suspensas (<i>etVOC</i>)
Sustentabilidade ambiental	Poluição da água, consumo energético, emissão de carbono (Lee et al., 2017)	CO ₂ , <i>etVOC</i> , medidor de energia, luminosidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, a aplicação de sensores nas estruturas de armazenagem pode permitir a coleta de dados que possam ser aproveitados pela sociedade em geral nesta época marcada pela emergência climática, em diferentes perspectivas conforme mostrado na Tabela 2. Os mesmos

⁵Nome fictício.

acelerômetros usados para identificar impactos resultantes da movimentação de cargas poderiam ser usados em contextos de identificação de acidentes de trabalho - afinal essas estruturas poderiam colapsar -, de quedas de pessoas (Sucerquia, López e Vargas-Bonilla, 2018), ou mesmo de reconhecimento de abalos sísmicos (Castiglioni e Milano, 2015; Castiglioni, Drei e Kanyilmaz, 2020), como o que ocorreu recentemente em Caxias do Sul (Pioneiro, 2024b). Outros sensores, como luminosidade, temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica usados para monitoramento de um ambiente de armazenamento controlado poderiam também ser utilizados para antever condições climáticas severas (Gutierrez-Lopez, Cruz-Paz e Muñoz Mandujano, 2019; Salam, 2020) ou na detecção de incêndios (Díaz-Ramírez et al., 2012; Choi e Jung, 2024).

1.4 DELIMITAÇÃO E ADERÊNCIA DO ESTUDO À LINHA DE PESQUISA

De acordo com Edwards-Schachter (2018), mesmo nos dias atuais o conceito de inovação herdado de Schumpeter permanece centrado na tecnologia. Apesar de ser considerada uma definição vaga (Nagy, Schuessler e Dubinsky, 2016), uma inovação que inicia um novo modelo de negócio, descartando o modelo atual é chamada de disruptiva (Paksoy, Kochan e Ali, 2020). As inovações disruptivas muitas vezes utilizam-se de novas tecnologias também consideradas disruptivas (Nagy, Schuessler e Dubinsky, 2016; Edwards-Schachter, 2018), como a *IoT*. Na perspectiva empresarial, as tecnologias disruptivas possuem a habilidade de aprimorar a performance do negócio, atingindo níveis de desempenho superior que as tecnologias que estão sendo descartadas. Portanto, ignorar tecnologias emergentes em seus estágios iniciais pode resultar em graves consequências para as organizações (Paksoy, Kochan e Ali, 2020).

A literatura atual possui alguns exemplos onde as atividades da cadeia logística foram alteradas com base na adoção de tecnologias relacionadas à *IoT*. Os achados de Mahroof (2019) no seu estudo sobre a aplicação de IA em um armazém logístico de uma grande rede varejista reforçam que a IA depende do uso da *IoT* para que suas decisões tenham maior assertividade e rapidez. O trabalho de Zhang e Yang (2022) aborda o uso de robôs para entrega de medicamentos nos hospitais da China durante a pandemia de COVID-19, de forma a reduzir o contato entre os trabalhadores logísticos e da saúde. Rejeb et al. (2021), na sua revisão, identifica o uso da *IoT*, por meio da tecnologia *RFID*, para rastreamento de produtos perecíveis ao longo da cadeia logística da agricultura (*agri-food*), para reduzir perdas e desperdício.

No contexto de armazéns inteligentes, a bibliografia sugere que os benefícios que podem ser obtidos com inovações que utilizam *IoT* possam ser grandes. Segundo Ballou (2006), o armazenamento de bens durante o processo logístico representa dois terços dos custos de toda a operação logística, o que demonstra que há uma margem maior de ganho caso melhorias sejam implementadas no processo de armazenagem. Ademais, a nova perspectiva introduzida pela Logística 5.0 permite que as empresas alcancem maior aderência às práticas de *ESG*, alinhando eficiência operacional com responsabilidade social e ambiental.

Nesse sentido, o cenário descrito demonstra um alinhamento do tema deste projeto à linha de pesquisa de Inovação e Competitividade do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade de Caxias do Sul (PPGA/UCS), visto que a *IoT* pode ser utilizada como um fator inovador e disruptivo que pode aumentar a competitividade das organizações logísticas, especialmente na área de armazéns, situação já destacada na justificativa empírica deste trabalho.

Portanto, o presente projeto terá como escopo a utilização de *IoT* em armazéns que formam a intra-logística, dentro do contexto surgido a partir da Logística 5.0. Não fará parte do escopo do trabalho demais componentes que formam o processo logístico, como o deslocamento de bens entre o produtor e o consumidor, controle de frotas e outros aspectos que não fazem parte da operação de um armazém logístico. Também não serão avaliados o impacto do uso de outras tecnologias disruptivas nesses ambientes, como os sistemas ciber-físicos, inteligência artificial e *big data*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo apresenta os dois pilares teóricos que fundamentam o desenvolvimento desta tese: a Internet das Coisas e a Logística.

2.1 INTERNET DAS COISAS

O termo *Internet of Things (IoT)*, em português Internet das Coisas, foi empregado pela primeira vez em 1999 por Kevin Ashton, no contexto da empresa P&G, para descrever a ideia de identificação eletrônica de produtos por meio da tecnologia *RFID*. A proposta consistia em realizar essa marcação de forma *on-line* e sem fio, de modo a otimizar a logística da cadeia de produção (FINEP, 2015; Falade et al., 2023). Embora tenha surgido como um recurso retórico para convencer executivos sobre o potencial da inovação, a expressão acabou por consolidar-se como um novo campo da computação e da comunicação de dados, marcado pela ubiquidade (Weiser, 1991) e capaz de sustentar aplicações em contextos até então inimagináveis.

Desde então, usou-se várias definições para o termo. Gershenfeld, Krikorian e Cohen (2004) definiu a *IoT* como uma incorporação da Internet a estruturas físicas. Essa descrição, surgida a partir da observação de exemplos apresentados em casas e museus localizados nos Estados Unidos e Espanha, era bastante simples, focada na comunicação via Internet, porém já apresentava a característica de ubiquidade definida por Weiser (1991).

Atzori, Iera e Morabito (2010), por sua vez, definiu a *IoT* como uma variedade de objetos ou coisas que, através de uma identificação única, podiam comunicar-se entre si e cooperar uns com os outros para atingir um objetivo único. Tratava-se de uma definição mais pormenorizada, apresentando destaque ao atendimento de uma finalidade em comum da rede do que propriamente no tipo de comunicação utilizado. Devido a isso, os autores afirmaram tratar-se de um novo paradigma na comunicação de dados. Essa percepção, inclusive, é reforçada por Madakam, Ramaswamy e Tripathi (2015), descrevendo que esses objetos possuíam inteligência que permitiam reagir diante de situações e mudanças no ambiente.

Singh e Kapoor (2017) apresentaram uma definição muito parecida à apresentada por Gershenfeld, Krikorian e Cohen (2004), porém reduzindo a *IoT* a um ramo dentro da computação. Segundo os autores, a *IoT* é um conceito da computação no qual objetos são conectados a uma rede, ou seja, são objetos que simplesmente estão online.

Elijah et al. (2018) complementou a definição de Atzori, Iera e Morabito (2010), apresentando a *IoT* como um sistema de objetos inter-relacionados que podem receber uma única identificação e que podem transferir dados entre eles sem intervenção humana, visando atingir um objetivo comum. Alamillo-Montes, Martínez-Cruz e Uribe (2022) estende ainda mais essa definição, afirmando que na *IoT* os dispositivos que a compõem estão continuamente disponíveis para comunicar-se. Dessa forma, a condição de disponibilidade dos dispositivos passariam a ser um dos requisitos para a existência de uma rede *IoT*.

Sobin (2020) apresentou uma mescla das definições propostas por Gershenfeld, Krikorian e Cohen (2004) e Atzori, Iera e Morabito (2010), descrevendo a *IoT* como uma tecnologia que permite a conexão à Internet de qualquer dispositivo que possua conectividade e poder computacional suficiente para a execução de tal tarefa. Sharma, Shamkuwar e Singh (2019), por sua vez, restringiu a definição apenas a dispositivos físicos. Nesse sentido, a grande contribuição desses dois trabalhos para a definição do que seria a *IoT* diz respeito aos requisitos necessários dos objetos para sua integração à tecnologia: ser um dispositivo físico, possuir alguma tecnologia de comunicação, e possuir poder computacional para poder coletar, armazenar e transmitir os dados.

Assim sendo, a partir dessa contextualização, pode-se afirmar que a *IoT* é um conjunto de tecnologias de computação e comunicação de dados que permite que objetos físicos possam se comunicar uns com os outros através da Internet. Esse conjunto de tecnologias refere-se tanto aos requisitos relacionados ao dispositivo - como o processamento e a capacidade de comunicação - quanto aos requisitos relacionados à rede de comunicação - capacidade de comunicar-se à Internet e possibilidade de identificação dos objetos nela conectados.

O surgimento da *IoT* está intrinsecamente associado à evolução da computação digital e das redes de comunicação de dados ao longo dos últimos 80 anos. Uma série de invenções e transformações tecnológicas ocorridas na computação e na comunicação de dados possibilitou essa criação. Assim sendo, faz-se necessário contextualizar historicamente a evolução da computação e da comunicação de dados para um melhor entendimento de como foi possível o surgimento da *IoT*.

2.1.1 Um Breve Histórico da Computação

Apesar de não existir uma unanimidade a respeito da questão (Stern e Freeman, 1988), a maior parte dos pesquisadores considera que a era da computação digital inaugurou-se em novembro de 1945, com o lançamento do computador *Electronic Numerical Integrator And Computer (ENIAC)*. Esse equipamento ocupava uma área de cerca de 180 metros quadrados, pesava cerca de 30 toneladas e consumia cerca de 174 mil watts¹ (Brainerd e Sharpless, 1948; Martin, 1995; Haigh, Priestley e Rope, 2016). O objetivo dessa máquina era realizar complexos cálculos balísticos durante a Segunda Guerra Mundial, visto que até essa época eram necessários cerca de 100 pessoas muito bem treinadas para realizar os mesmos cálculos. Todavia, três meses antes de seu lançamento, a guerra terminou. O computador, então, foi reprogramado para realizar os cálculos necessários para a construção da bomba de hidrogênio (Martin, 1995), uma bomba que trabalhava por fissão nuclear e era muito mais potente que as bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki.

O enorme tamanho do *ENIAC* era resultado do uso de válvulas como componente eletrônico base para realizar as operações lógicas e aritméticas necessárias para realização dos

¹A título de comparação, um chuveiro elétrico consome cerca de 6 mil watts.

Figura 10 – O ENIAC, primeiro computador digital.



Fonte: Retirado de Goldstine e Goldstine (1982).

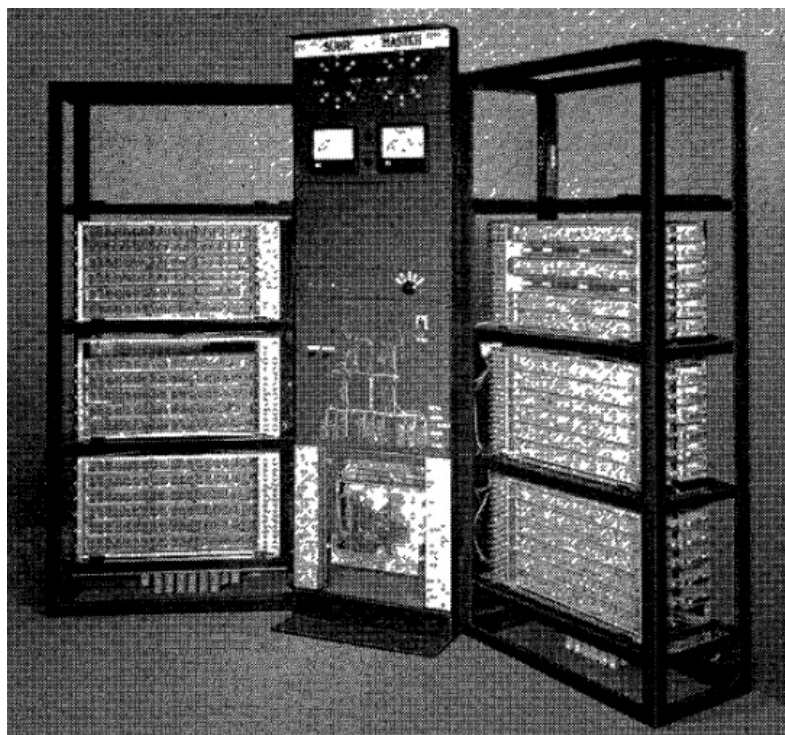
cálculos. Essa máquina contava com cerca de 18 mil válvulas (Brainerd e Sharpless, 1948; Goldstine e Goldstine, 1982). Devido ao seu tamanho, conforme mostrado na Figura 10, sua operação era extremamente complexa. Os computadores que o sucederam continuaram usando válvulas como base eletrônica. Isso, portanto, inviabilizava o aumento da capacidade de processamento, pois um espaço ainda maior era necessário para a instalação de mais válvulas e outros componentes eletrônicos, como resistores e capacitores, e, conseqüentemente, prejudicava ainda mais a sua operação. O consumo energético, por sua vez, também aumentaria.

Isso persistiu até o lançamento do *TRAnsistor Digital Computer (TRADIC)*, em 1954 (Felker, 1954). Ao invés de válvulas, esse computador utilizava como componente eletrônico base o transistor (Githens, 1956), inventado em 1948 (Riordan, Hoddeson e Herring, 1999), inaugurando assim a segunda geração dos computadores digitais. Ao contrário das válvulas, que possuíam o tamanho de uma lâmpada de tungstênio², um transistor possuía um tamanho um pouco maior que uma unha. Comparado ao *ENIAC*, o *TRADIC* possuía uma menor capacidade computacional, pois utilizava aproximadamente 700 transistores - pouca capacidade se comparada às 18 mil válvulas do *ENIAC*. Porém, a redução do espaço e, principalmente, do consumo energético era significativa: ocupava o espaço de aproximadamente um armário, conforme demonstrado na Figura 11, e consumia menos de 100 watts (Felker, 1954) - ou seja,

²A lâmpada de tungstênio é também conhecida como lâmpada incandescente, devido ao calor produzido. Essa lâmpada é considerada energeticamente muito ineficiente, pois boa parte da energia consumida é transformada em calor.

0,05% da energia necessária para funcionamento do *ENIAC*. Além disso, a confiabilidade desse equipamento era significativamente maior que a dos computadores à válvula, em função do uso do transistor. As válvulas utilizadas nos computadores de primeira geração queimavam com frequência, o que acarretava em muitos e longos períodos de indisponibilidade desses equipamentos para manutenção.

Figura 11 – O computador *TRADIC*.



Fonte: Retirado de Felker (1954).

Os anos 1960 marcaram o auge da Guerra Fria e da corrida espacial, apresentando diversos saltos tecnológicos. No ramo da computação não foi diferente: em 1964 foi lançado o IBM/360, o primeiro computador comercial com circuito integrado (CI). O CI reunia numa única pastilha de silício diversos transistores, aumentando significativamente a capacidade de processamento com redução de espaço (Pugh, 2013). Chegou-se então à terceira geração da computação, e esse computador, visualizado na Figura 12, representava essa nova etapa.

Essa nova geração de computadores é tão marcante em termos de aumento de poder computacional que leva o físico Gordon Moore a cunhar, em 1965, a famosa Lei de Moore. Analisando a evolução da quantidade de componentes eletrônicos contidos num circuito integrado desde a sua criação, em 1959, ele observou que havia uma tendência de duplicação dessa quantidade a cada 12 meses (Mack, 2011). Portanto, conforme essa lei, o poder computacional era dobrado a cada ano.

Outra característica marcante dessa geração foi o surgimento dos sistemas operacionais. A adoção dos CIs aumentou a complexidade do *hardware*, e sua programação tornou-se cada vez mais complexa. Havia a necessidade de facilitar o trabalho de programação, pois além

Figura 12 – O computador IBM/360, que marca o início da terceira geração de computadores.



Fonte: Retirado de Pugh (2013).

do programa a ser escrito para necessidade final, como o cálculo de uma folha de pagamento, necessitava-se da programação das instruções para manipulação dos diversos dispositivos que formavam o *hardware* do computador - dispositivos de entrada e saída, memória e processador. Criou-se então um programa que dedicado exclusivamente a manipular o *hardware* do computador, denominado sistema operacional.

Seguindo o avanço observado por Moore, em 1971 lançou-se o microprocessador Intel 4004, símbolo do início da quarta geração da computação. O nível de miniaturização chega a tal ponto que diversos CIs são combinados numa única pastilha de silício, que agora recebe o nome de chip. Essa revolução, que foi denominada pela própria Intel como "uma nova era da eletrônica integrada", permitiu o lançamento, em 1975, do Altair 8800, o primeiro computador pessoal³ (Conway, 1982; Abbate, 1999), mostrado na Figura 13. Este microprocessador contava com 2,3 mil transistores e tinha o mesmo poder computacional do *ENIAC*, porém tinha o tamanho de uma unha (Intel, s.d).

Um ano antes do lançamento do Altair, a introdução do chip permitiu que John Manley, em 1974, afirmasse que computadores seriam integrados a sistemas automatizados de produção, aviação, mísseis balísticos, sistemas de trânsito, entre outros (Manley, 1974). Ou seja, os computadores passariam a ser embarcados em sistemas maiores cujo objetivo primário não era o

³O termo computador pessoal surgiu em 1957, com o IBM 610, pelo fato de poder ser operado por apenas uma pessoa (Mohajan, 2021), todavia ele possuía dimensões de uma mesa de escritório, não possuindo as características - especialmente de tamanho - que definem um computador pessoal moderno.

Figura 13 – O computador pessoal Altair 8800.



Fonte: Retirado de Hardware.com.br (2011).

processamento de dados, mas sim o controle de atividades diversas: surgia o termo computação embarcada (Manley, 1974; Sharma, Shamkuwar e Singh, 2019), onde o dispositivo de computação, feito de uma única peça, está embarcado a um sistema maior, como uma espaçonave, uma máquina, um foguete ou um avião. Manley, portanto, descreveu as bases de *hardware* que estão presentes nos dispositivos *IoT* atuais.

Em 1981 criou-se o primeiro computador portátil comercializável, o Osborne 1 (Press, 1992). Apesar de ainda não possuir bateria, esse primeiro *laptop* oferecia mobilidade ao usuário, permitindo que este desenvolvesse suas atividades a partir de qualquer lugar que possuísse acesso à energia elétrica. Ou seja, pela primeira vez, a computação passou a apresentar características de mobilidade.

Essa capacidade de movimentação de um computador - possibilitada pela redução do tamanho desses equipamentos - levou Mark Weiser, em 1991, a propor que a computação se tornaria ubíqua no século XXI, ou seja, deixaria de ser percebida pelas pessoas, pois ela estaria distribuída por toda a parte (Weiser, 1991). Nesse mesmo ano, inclusive, já se testava a ideia de ubiquidade da computação na Xerox, conforme mostra a Figura 14.

Em 1994, as empresas IBM e BellSouth lançaram o primeiro *smartphone* comercial (Krajci e Cummings, 2013; Sarmiento Guede, Esteban Curiel e Antonovica, 2017). Chamado de *Simon Personal Communicator*, esse dispositivo unia a funcionalidade de comunicação existente nos aparelhos celulares com recursos existentes nos assistentes digitais pessoais (*Personal Digital Assistant - PDA*). O Simon possuía diversas aplicações, como calendário, bloco de notas e calculadora, tudo acessível a partir de uma tela *touchscreen*. Todavia, por ser caro e pesado, além de não possuir acesso à Internet, seu uso não se popularizou (Berger, 2015). Apesar do insucesso comercial, esse equipamento fornecia funcionalidades de mobilidade não vistas até então, e forneceu as bases para que, em 2007, surgisse o primeiro *smartphone* de amplo sucesso comercial: o Apple iPhone (Berger, 2015).

Figura 14 – A ideia de ubiquidade sendo testada no centro de pesquisa da Xerox, em Palo Alto.



Fonte: Retirado de Weiser (1991).

Dois anos antes do iPhone, em 2005, utilizando as bases de *hardware* definidas por Manley nos anos 1970, Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis desenvolveram o Arduíno, mostrado na Figura 15. Tratava-se de um dispositivo programável aberto, barato e simples de conectar a várias coisas - como sensores e atuadores (Pan e Zhu, 2018; Kondaveeti et al., 2021). A partir dessa plataforma, iniciava-se a popularização do uso da *IoT*. Por se tratar de um microcontrolador⁴, seu consumo energético é significativamente menor que os microprocessadores utilizados em computadores em geral. Sua versão mais simples, chamada de Arduíno Uno, consumia menos de 5 watts, sendo milhares de vezes mais econômico que o *ENIAC*, que - relembrando - consumia cerca de 180 mil watts.

O Arduíno representou um grande passo na disseminação da *IoT*, pois era o primeiro *hardware* de baixo custo que permitia o desenvolvimento dispositivos de automação e sensoriamento em geral. Dessa maneira, ideias podiam ser validadas para então depois tornarem-se produtos de mercado. Além disso, sua plataforma de desenvolvimento era relativamente fácil de manusear, permitindo que qualquer pessoa com conhecimento de programação pudesse produzir sua própria aplicação de *IoT*.

⁴Um microcontrolador é um dispositivo de processamento voltado para uma aplicação específica, enquanto os microprocessadores são dispositivos de processamento voltados para aplicações em geral (Kondaveeti et al., 2021).

Figura 15 – O Arduíno Uno.



Fonte: Retirado de Kondaveeti et al. (2021).

Como último marco dessa revisão histórica, em 2012, a fundação Raspberry PI, do Reino Unido, lançou um computador *System-on-Chip (SoC)*⁵ que possuía diversas interfaces para conexões de sensores, atuadores e dispositivos *IoT* em geral, oferecendo capacidade para desenvolvimento de projetos avançados na área de robótica e observação climática (Kondaveeti et al., 2021). O objetivo desse computador era ensinar computação básica a estudantes do ensino médio e superior que viviam em países em desenvolvimento. O Raspberry PI possuía tamanho semelhante ao Arduíno Uno, porém oferecendo capacidade de processamento centenas de vezes maior a um consumo de aproximadamente 15 watts. Devido ao seu grande poder de processamento e as suas interfaces *HDMI* e *USB*, o Raspberry PI pode, inclusive, ser usado como um computador pessoal.

Para fins de consolidação do processo histórico de desenvolvimento da computação, a Figura 16 apresenta uma linha temporal com os marcos destacados nessa Seção, que serão posteriormente complementados com os marcos que delimitam o processo histórico das redes de comunicação de dados.

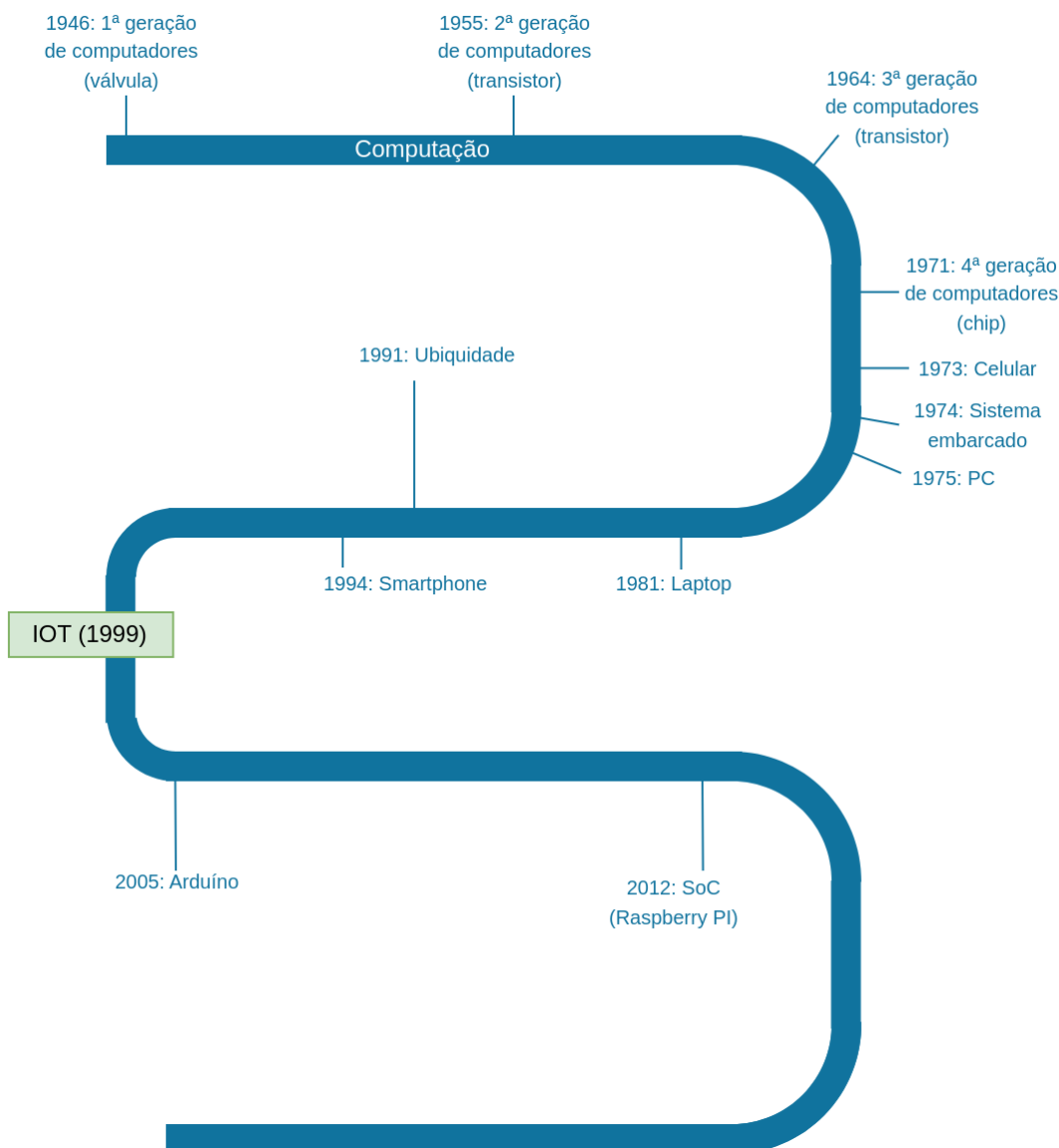
2.1.2 Um Breve Histórico das Redes de Comunicação de Dados

O desenvolvimento das redes de comunicação de dados está intimamente ligado ao desenvolvimento dos computadores. Conforme novos dispositivos surgiam, novas necessidades de comunicação de dados também apareciam, e assim criavam-se novas tecnologias de comunicação. O marco inicial da comunicação de dados surgiu no final dos anos 1960 que, como já apontado na Seção 2.1.1, década que propiciou muitas evoluções na área da computação.

A crescente miniaturização dos computadores tornou-os financeiramente mais acessíveis. O surgimento dos sistemas operacionais também facilitou sua programação e, consequen-

⁵Um dispositivo *System-on-Chip* é aquele onde todos os componentes que o formam estão localizados em uma única peça (Saleh et al., 2006).

Figura 16 – O histórico da computação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

temente sua adoção. Os computadores proliferaram pelo mundo. Era cada vez mais latente a necessidade de realizar trocas de dados entre as diferentes máquinas.

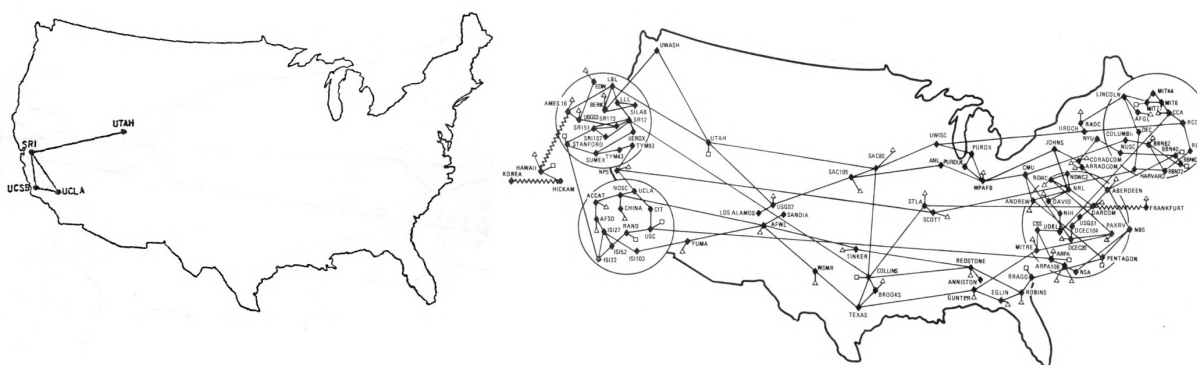
O cenário da Guerra Fria também demandava uma evolução nas comunicações em geral, amplamente baseadas no sistema de telefonia. Esses sistemas eram amplamente centralizados, criando assim um ponto de falha. Caso fosse atingido um dos centros de comunicação telefônica, toda a rede de comunicação era comprometida.

Nesse contexto geopolítico, no início dos anos 1960, a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada (Advanced Research Projects Agency - ARPA) passou a trabalhar em uma rede de comunicação que pudesse resolver esses problemas e também permitir a comunicação de dados entre diferentes computadores. Inaugurada em 1969, essa rede - chamada de *ARPA-NET* - interligava inicialmente quatro universidades: Stanford Research Institute, University

of California/Santa Barbara, University of California/Los Angeles e University of Utah (Carr, Crocker e Cerf, 1970). Cada uma das unidades continha um modelo diferente de computador, e cada computador continha um sistema operacional diferente. Logo em sua configuração inicial, demonstrou-se a existência de diversas características que definem a Internet atual: era uma estrutura distribuída e independente de *hardware* e sistema operacional (Carr, Crocker e Cerf, 1970), o que comprovava o seu conceito multiplataforma e descentralizado.

Essa rede se expandiu durante a década de 1970 por todo o território estado-unidense, e atingiu seu auge em 1983, formando uma estrutura com aproximadamente 400 computadores espalhados pelo mundo (Roberts, 1988). Nesse mesmo ano, a *ARPANET* fundiu-se com outras redes menores, passando a utilizar todas elas o padrão *TCP/IP*⁶ de comunicação, inaugurando a era da Internet. Nesse primeiro momento não existiam navegadores, como o Internet Explorer, Chrome, Firefox, Safari, entre outros. Podia-se apenas enviar mensagens e *e-mails*, e realizar pequenas transferências de arquivos.

Figura 17 – A *ARPANET* quando da sua criação (esquerda), em 1969, e em sua máxima extensão (direita), em 1983.



Fonte: Retirado de Chiappa (2022).

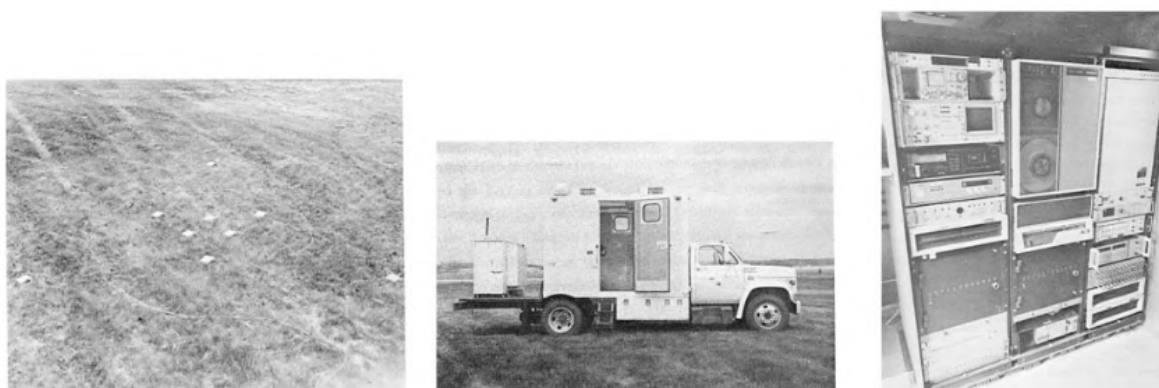
Anos antes dessa fusão, em 1976, Metcalfe e Boggs (1976) apresentaram o padrão de comunicação *Ethernet*, utilizado em redes locais para a comunicação de dados. Esse novo tipo de comunicação permitiu a conexão de computadores pessoais localizados num mesmo ambiente, seja ele uma empresa, uma casa ou um escritório. A evolução das redes, mais uma vez, resultava-se da evolução da computação. Novos modelos de computadores exigiam novos tipos de comunicações de redes.

Em 1982 testava-se o primeiro experimento envolvendo a comunicação entre diferentes sensores acústicos, formando uma rede de sensores distribuída (*Distributed Sensor Network* - *DSN*). Nesse teste, mostrado na Figura 18, um dispositivo lia dados de um conjunto de sensores, todos eles interligados por uma rede *Ethernet*, combinado também com o uso de rádio

⁶O padrão *TCP/IP* consiste no uso de dois protocolos em conjunto: o *Transport Control Protocol (TCP)* e o *Internet Protocol (IP)*. O primeiro protocolo fornece confiabilidade na transmissão de dados entre os diferentes dispositivos, enquanto o segundo fornece o endereçamento necessário para identificar o dispositivo na rede (Rajaraman, 2022).

micro-ondas (Chong e Kumar, 2003). O dispositivo utilizado para teste era montado sobre uma caçamba de um caminhão e continha um computador que recebia os dados dos sensores e o retransmitia para um avião que voava em baixa altitude. As redes *DSN* forneceram as bases para a criação das redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Network - WSN*), que são a base da arquitetura de comunicação padrão das redes *IoT* em geral.

Figura 18 – O primeiro experimento que utilizou uma rede de sensores mostrando o conjunto de sensores acústicos (esquerda), a central de recepção dos dados (centro) e o *hardware* do dispositivo (direita).



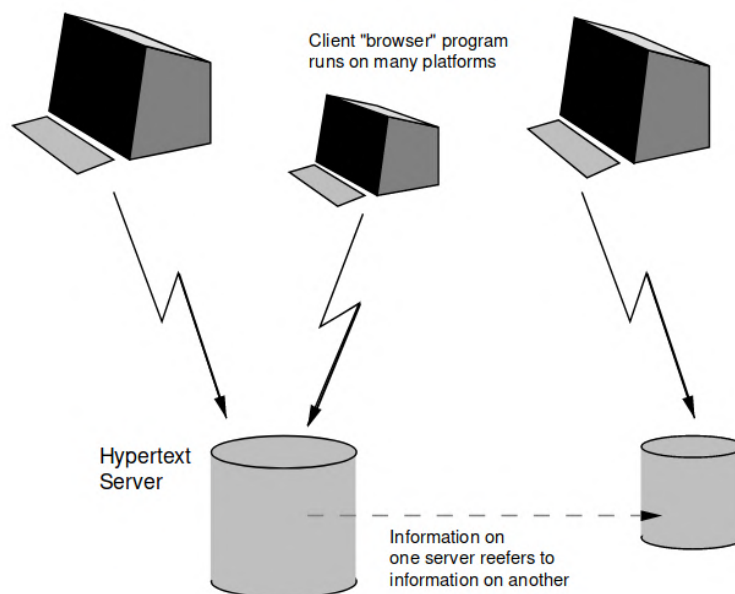
Fonte: Retirado de Chong e Kumar (2003).

A *Web* como conhecemos hoje foi criada por Tim Berners-Lee em 1989. Por meio de *hiperlinks*, era possível criar e publicar conteúdos na Internet, além de "navegar" entre conteúdos disponibilizados por outros usuários por meio de referências vinculadas a textos chamados de *hiperlinks* (Berners-Lee, 1989), conforme mostra a Figura 19. Nela, pode-se notar que o autor aborda seu funcionamento multiplataforma e a ideia de uma base distribuída, onde a informação constante num servidor é referenciada por outro servidor, através de um *hyperlink*. Esses conteúdos ficavam armazenados em computadores distribuídos pela Internet, independentemente de sua localização geográfica.

Quando apresentou a ideia, Berners-Lee (1989) queria desenvolver uma solução *online* que pudesse gerenciar a informação produzida pela organização europeia de pesquisa nuclear (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire - CERN*). Essa proposta, porém, rapidamente espalhou-se por outras organizações, surgindo a *World Wide Web (WWW)*. A *Web* também propiciava acesso a conteúdos multimídia, chamados de hiperfídmias, permitindo a visualização de fotos e vídeos, e a escuta de áudios. Uma série de novos elementos eram oferecidos pela rede e pavimentaram o caminho da Internet como atualmente a conhecemos e usamos.

Em 1997 surgia a primeira versão da tecnologia *Wireless Fidelity (Wi-Fi)*. Ela representou uma revolução na comunicação de dados, pois permitia a comunicação sem fio entre diferentes computadores, algo até então impensável. A mobilidade da computação trazida pelo *laptop* Osborne 1, até então limitada à comunicação através de cabos presos à parede, podia então ser combinada com a mobilidade de comunicação trazida pela tecnologia *Wi-Fi*. Assim, a

Figura 19 – O princípio de funcionamento da Web proposto por Tim Berners-Lee.



Fonte: Retirado de Berners-Lee (1989)

ideia de ubiquidade proposta por Weiser em 1991 ficava cada vez mais próxima. Além disso, a tecnologia representava um grande avanço na comunicação sem fio em relação ao teste da rede *DSN* efetuado em 1982, permitindo o tráfego de um maior volume de dados.

Ao final do século XX, em 1999, durante uma apresentação a gestores da P&G, Kevin Ashton cunhou o termo *IoT*, onde explicava a ideia de marcação eletrônica dos produtos da empresa, através da tecnologia de *RFID*, para facilitar a logística da cadeia de produção (FINEP, 2015; Falade et al., 2023). Essa fala acabaria por conceituar esse novo ramo da computação e da comunicação, caracterizada pela ubiquidade definida por Weiser (1991) que permitiu o seu uso em aplicações até então não imaginadas.

O *RFID*, tecnologia que cunhou o termo *IoT*, por sua vez, havia sido criado muitos anos antes, em 1973. Todavia, para o contexto da *IoT*, essa tecnologia possuía uma aplicação limitada, devido ao seu alcance muito curto e pelo fato de sua comunicação, de maneira geral, permitir apenas a identificação de um objeto. Por sua vez, as redes *Wi-Fi* não apresentavam os problemas encontrados no *RFID*, porém consumiam muita energia. Para os dispositivos embarcados, que muitas vezes eram alimentados por bateria, seu uso tornava-se inviável. Era necessária a criação de uma rede sem fio que oferecesse uma melhor eficiência energética e que pudesse ter uma comunicação bidirecional. A resposta para esse problema veio em 2003, com a criação da rede *ZigBee*. Essa tecnologia foi a primeira comercialmente aplicada em foi em comunicações *IoT*, devido ao seu baixo consumo energético e de sua aplicabilidade em comunicações em geral.

Dois anos antes do *Zigbee*, em 2001, era apresentado no Japão a terceira geração das redes celulares, chamadas de redes 3G (Sharma, Shamkuwar e Singh, 2019). Comparadas às

comunicações de segunda geração⁷, essas redes representam um aumento significativo na capacidade de transferência de dados, permitindo pela primeira vez que *smartphones* acessassem conteúdos multimídia - como áudios e vídeos - pela rede celular.

Retrocedendo um pouco mais no tempo, em 1998 lançou-se o *Bluetooth*. Destinado à comunicação de diversos objetos, a tecnologia tinha como objetivo permitir a conectividade sem fio de dispositivos pessoais, sem preocupação em relação ao consumo energético. Devido a esse motivo, a tecnologia não era destinada a comunicação de sensores em geral, alimentados por pequenas baterias e, portanto, com muita restrição energética. Somente em 2010, após sua quarta versão, o *Bluetooth* passou por uma remodelação de seu funcionamento, direcionado ao uso em dispositivos *IoT*, apresentando diversos aprimoramentos em busca de uma maior eficiência energética.

Também em 2010 foi criada a tecnologia *SigFox*, inaugurando a era de redes de longa distância de baixa potência (*Low Power Wide Area Network - LPWAN*). Até então, as redes de comunicação *IoT* destinavam-se a curtas distâncias, raramente passando da casa de dezenas de metros. O *SigFox*, por sua vez, permitia que dispositivos enviassem dados para uma antena localizada a dezenas quilômetros de distância, consumindo pouca energia. Inaugurava-se uma nova era na comunicação *IoT*.

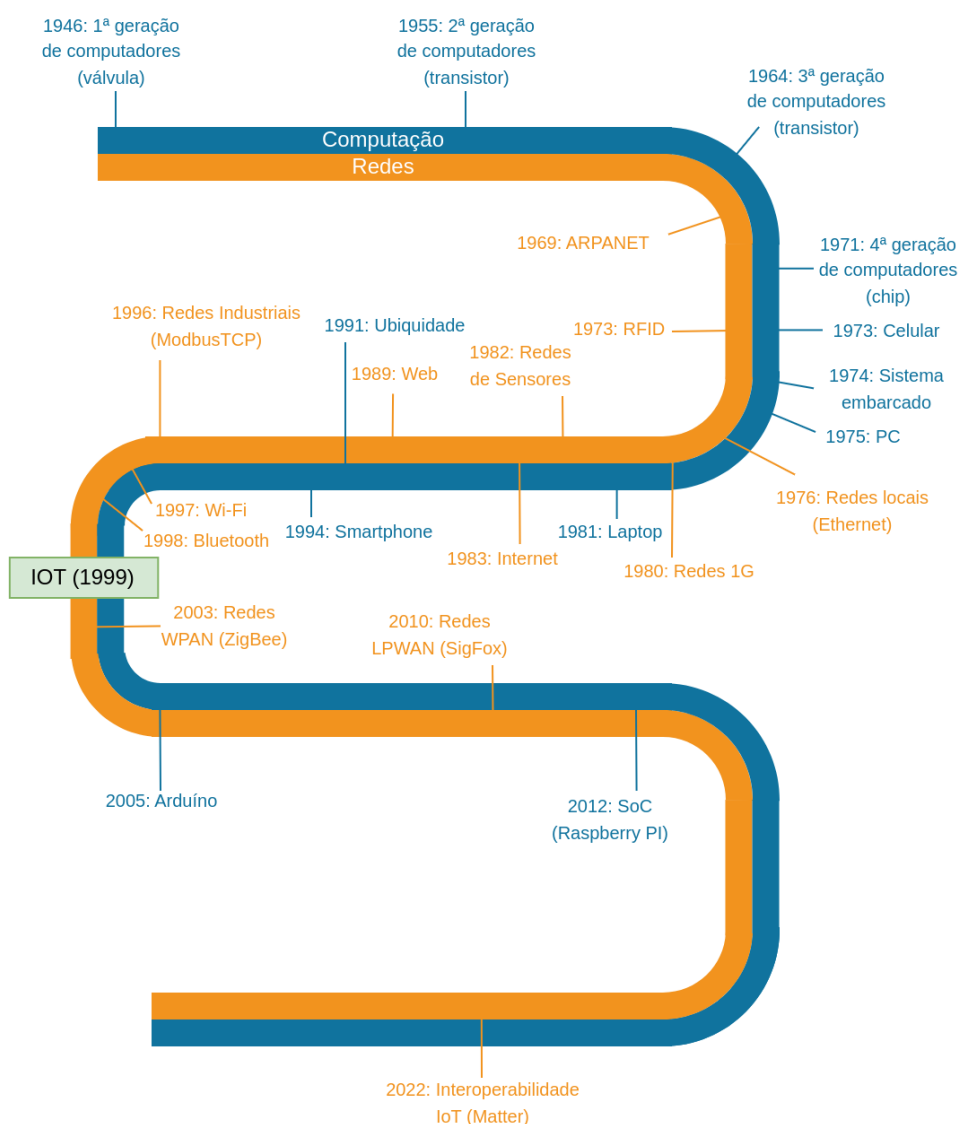
Durante toda a década de 2010 lançaram-se diversas outras tecnologias de comunicação *IoT*, como *LoraWAN*, 4G, *NB-IoT*, entre outras, que serão explicadas em maiores detalhes na Seção 2.1.4. Todas elas possuem algum tipo de aprimoramento - especialmente relacionado à eficiência energética - sobre as tecnologias de comunicação anteriores e muitas delas concorrem umas com as outras - *LoraWAN* e *SigFox*, por exemplo, são redes *LPWAN*.

Por outro lado, todas as redes *IoT* também apresentam a mesma fraqueza: não possuem compatibilidade nativa com outras tecnologias, algo que vai contra a ideia da própria Internet - oferecer ampla interoperabilidade de comunicação entre diferentes tipos de dispositivos. Visando resolver essa lacuna, a *Connectivity Standards Alliance* lançou, em 2022, o padrão *Matter* (Akestoridis, Sekar e Tague, 2022). Esse padrão tem por objetivo integrar diversos padrões de comunicação *IoT*, como *Bluetooth*, *Zigbee* e *Wi-Fi*, permitindo a comunicação direta entre dispositivos que possuem tecnologias de comunicação distintas, e delimitando assim o último marco dessa revisão histórica. Com todas estas tecnologias de comunicação sem fio disponíveis atualmente, a ideia de ubiquidade tornou-se, então, plenamente viável.

Para fins de consolidação do histórico de desenvolvimento das redes de comunicação de dados, a Figura 20 apresenta uma linha temporal com os marcos destacados nesta Seção, combinados com os marcos do histórico da computação, afim de traçar um paralelo entre essas duas áreas que formam a *IoT*.

⁷As redes de telefonia celular de segunda geração, conhecidas como *Global System for Mobile Communications (GSM)*, foram lançadas em 1991 e foram as primeiras redes digitais de telefonia móvel. Já a primeira geração das redes celulares, analógicas, datam do ano de 1984 (Sharma, Shamkuwar e Singh, 2019). O histórico das redes celulares será apresentado com mais detalhes a seguir.

Figura 20 – O histórico das redes de comunicação de dados, combinado com o histórico da computação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.1.3 Aplicações da *IoT*

Com a proliferação dos dispositivos embarcados e a criação de diversas tecnologias de comunicação voltadas à *IoT*, começou-se a experimentar seu uso em diferentes ambientes e contextos. Desde o início, percebeu-se que essa nova área da computação tinha potencial para ser aplicada em uma ampla variedade de aplicações. Uma das primeiras exploradas foi a área da saúde. Por meio de dispositivos vestíveis (*wearables*)⁸, a condição de saúde passou a ser monitorada em tempo real (Bekkai, Bendjenna e Kitouni, 2021), seja por profissionais médicos ou até mesmo um familiar. Dados de *smartphones* passaram a ser usados para informar a fa-

⁸Dispositivos que podem ser vestidos por uma pessoa, como relógios, braceletes, pulseiras e roupas que contém sensores de monitoramento de indicadores de saúde humana, especialmente os sinais vitais (Park e Jayaraman, 2021).

miliares quedas de idosos. Dispositivos de ajuste, como marca-passos, poderiam ser ajustados remotamente. Com a pandemia da Covid-19, houve uma proliferação de soluções *IoT* aplicadas à área, seja em número de soluções criadas, seja em estudos publicados (Sadeghi-Niaraki, 2023).

Outra aplicação onde a *IoT* vem sendo amplamente utilizada é na área de geração e distribuição de energia elétrica, conhecida pelo termo *smart grids*. A distribuição de energia elétrica é extremamente complexa, pois a energia produzida, de maneira geral, não é facilmente armazenada, e a *IoT* facilita esse processo fornecendo monitoramento contínuo e intervenção através de sensores e atuadores localizados ao longo da cadeia de distribuição - seja nas linhas ou nas estações de transmissão. Além disso, há uma tendência mundial de geração distribuída de energia, por meio do uso de painéis solares pelo público em geral. Isso diminui o desperdício de energia, pois o caminho entre produção e consumo de energia é reduzido, mas torna a rede de distribuição elétrica ainda mais complexa, reforçando o uso de sensores para o seu monitoramento e tomada de ação mais efetiva. Combinada a tudo isso, a leitura de consumo energético é uma tarefa extremamente onerosa e manual (Bekkai, Bendjenna e Kitouni, 2021). Nesse sentido a *IoT* vem automatizando esse processo, fornecendo leituras periódicas e automáticas, sem necessidade de leituristas.

Na indústria, aplica-se a *IoT* por meio de sensores instalados por toda a linha de produção para seu constante monitoramento, a fim de aumentar sua performance e produtividade (Bekkai, Bendjenna e Kitouni, 2021). Como exemplo, combinando a *IoT* com outras tecnologias como IA, pode-se prever possíveis problemas em máquinas da linha de produção, tornando uma possível manutenção corretiva não programada em uma manutenção preventiva previamente agendada. O uso da *IoT* na indústria é tão amplo que há uma definição exclusiva para ela: *Industrial Internet of Things (IIoT)* (Malik et al., 2021).

A agricultura é outro campo onde se utiliza a *IoT* para otimizar o processo de produção de alimentos, através de monitoramento contínuo, automação e precisão do processo (Elijah et al., 2018), envolvendo controle de temperatura, umidade, irrigação, fertilização e doenças (Farooq et al., 2020). Como os recursos de produção são escassos, a *IoT* fornece ferramentas para que os produtores possam melhorar sua produtividade e qualidade, além de aumentar seus lucros - tudo devido aos dados fornecidos pelos dispositivos.

A *IoT* também auxilia o controle remoto de ambientes domésticos, conhecidos como casas inteligentes (*smart homes*). Através de seu uso é possível controlar o funcionamento de equipamentos domésticos, como dispositivos de ar-condicionado, geladeiras, TVs, fogões, entre outros (Bekkai, Bendjenna e Kitouni, 2021).

Nos transportes, a *IoT* auxilia veículos a dirigirem autonomamente, a controlar as condições ambientais de bens que são transportados e fornece dados que tornam o transporte mais eficiente. Isso inclui a oferta de rotas otimizadas e continuamente atualizadas (Bekkai, Bendjenna e Kitouni, 2021), visando reduzir o impacto na natureza e otimizar a operação de transporte.

Nas cidades a *IoT* apresenta uma característica peculiar, combinando aplicações voltadas à indústria, transporte, saúde, agricultura e outros para tornar as cidades inteligentes (Sánchez-Corcuera et al., 2019; Bekkai, Bendjenna e Kitouni, 2021). Nesse sentido, a *IoT* fornece soluções para problemas de deslocamento urbano, manufatura, gestão de resíduos, distribuição de água, gestão de espaços públicos, construções, segurança pública, poluição, fornecimento de serviços públicos, respostas a emergências, entre outros aspectos que envolvem espaços urbanos (Malik et al., 2021; Hassebo e Tealab, 2023).

De maneira similar, a logística também é uma das áreas onde se utiliza a *IoT*. Ela combina características das aplicações voltadas a transporte e manufatura, seja cuidando do rastreamento de cargas, da otimização de rotas em estradas ou em centros de armazenagem, avisos em tempo real da atividade a ser efetuada, entre outras situações que serão detalhadas na Seção 2.2.

2.1.4 Tecnologias de Comunicação *IoT*

Como descrito anteriormente na Seção 2.1.2, para atender à necessidade de mobilidade surgida pela evolução dos computadores em geral, criaram-se, a partir do final dos anos 1990, diversas tecnologias de comunicação sem fio. Algumas dessas tecnologias, como o *Wi-Fi*, evoluíram com o passar do tempo de forma a manter o desempenho, sem maiores preocupações com o consumo energético exigido pela maior parte dos dispositivos *IoT*. Outras, como o *Bluetooth*, passaram por modificações ao longo dos anos para oferecerem uma otimização energética que pudessem ser usadas pela *IoT* em geral. Além disso, surgiram tecnologias voltadas exclusivamente à comunicação *IoT* - caso do *Zigbee* e *LoRa*.

Um resumo das principais características das tecnologias de comunicação *IoT* mostra-se na Tabela 3. Ao observá-la, percebe-se que essas tecnologias de comunicação *IoT* podem dividir-se em dois grandes grupos: as tecnologias de comunicação de curto alcance, chamadas de redes pessoais sem fio (*Wireless Personal Area Network* - *WPAN*), onde se incluem tecnologias como *Wi-Fi*, *Bluetooth* e *RFID*, que limitam-se a algumas dezenas de metros; e as tecnologias de longo alcance, chamadas de *LPWAN*, cujo alcance se mede na escala de dezenas de quilômetros.

Como visto neste Capítulo, a tecnologia *Wireless Fidelity* (*Wi-Fi*) originou-se da necessidade de permitir a mobilidade na comunicação de dados surgida a partir da proliferação dos *notebooks*. Resultado de um esforço de 10 anos, em 1997, concluiu-se sua primeira especificação, chamada de IEEE 802.11 (Pahlavan e Krishnamurthy, 2021), sem grande adesão da indústria. Dois anos depois, lançaram-se duas novas especificações: IEEE 802.11a, que atingia velocidade de 54 Mbps, e IEEE 802.11b, com velocidade de 11 Mbps. Apesar de sua menor velocidade, o último popularizou-se, devido a seu menor custo. A tecnologia, dependendo da sua versão, pode utilizar os espectros não-licenciados de 2,4 ou 5GHz⁹.

⁹O espectro de frequências eletromagnéticas, de maneira geral, pertence ao Estado. As frequências de operação

Tabela 3 – Comparativo das principais tecnologias de comunicação *IoT*.

Tecnologia	Espectro	Distância	Taxa de transferência	Consumo Energético
<i>Wi-Fi</i>	Não-licenciado	100 m	300-7000 Mbps	Alto
<i>Bluetooth</i>	Não-licenciado	10 m	2-26 Mbps	Muito Baixo
<i>Zigbee</i>	Não-licenciado	20 m	0,25 Mbps	Baixo
<i>RFID</i>	Não-licenciado	100 m	4 Mbps	Ultra baixo
<i>NFC</i>	Não-licenciado	0,2 m	0,42 Mbps	Muito baixo
<i>LoraWAN</i>	Não-licenciado	20000 m	0,05 Mbps	Muito baixo
<i>Sigfox</i>	Licenciado	50000 m	0,0006 Mbps	Ultra baixo
<i>NB-IoT</i>	Licenciado	35000 m	0,25 Mbps	Muito baixo
5G	Licenciado	10000 m	0,78 Mbps	Muito baixo

Fonte: Adaptado de Virtanen et al. (2010); Al-Sarawi et al. (2017); Quy et al. (2022); Ogbodo, Abu-Mahfouz e Kurien (2022).

Ao longo dos anos, a tecnologia passou por outros aprimoramentos, melhorando a sua eficiência energética e, principalmente, apresentando melhor desempenho. Isso permitiu um maior número de conexões simultâneas com acréscimo na velocidade de transmissão. Um resumo desses aprimoramentos apresenta-se na Tabela 4. Excetua-se dessa regra o padrão IEEE 802.11ah, criado em 2016, que teve sua abordagem voltada à eficiência energética, e não ao incremento da taxa de transferência, sendo o primeiro padrão *Wi-Fi* voltado para o uso *IoT* (Tian et al., 2021). Esses fatores, combinados, permitiram que seu uso fosse ampliado para outros equipamentos além de computadores, como *smartphones*, *tablets*, *smart TVs*, câmeras de vídeo, impressoras, lâmpadas e outros dispositivos que necessitam transmitir grandes volumes de dados (Pahlavan e Krishnamurthy, 2021).

Paralelamente ao surgimento do *Wi-Fi*, outro padrão de comunicação sem fio criado foi o *Bluetooth*. Surgido em 1998, essa tecnologia desenvolveu-se a partir da necessidade de conectar dispositivos de computação e comunicação em geral, porém em menores distâncias. Para realizar a transmissão de dados, utiliza rádio sem fio de curto alcance, limitado a poucas dezenas de metros. O *Bluetooth* utiliza o espectro de frequência não-licenciado de 2,4GHz. Atualmente a tecnologia encontra-se na sua sexta versão (SIG, 2025), recebendo aprimoramentos ao longo do tempo, conforme pode ser visualizado na Tabela 5.

Uma grande mudança ocorreu na versão 4.0 do Bluetooth, devido a reescrita da especificação para atender às novas necessidades dos dispositivos IoT, especialmente na questão do consumo de energia. Devido a esse fato, a partir dessa versão, o *Bluetooth* também é conhecido pelos termos *Bluetooth Smart* e *Bluetooth Low Energy (BLE)*.

Outro padrão *IoT* para curtas distâncias cada vez mais utilizado é o *Zigbee*, que possui como base de comunicação a especificação IEEE 802.15.4. Criado em 2003, essa tecnologia tem como objetivo principal fornecer um padrão de conexão para *WPANs* de baixo custo e com

de estações de TV, rádio e comunicação em geral, como as tecnologias 3G, 4G e 5G, são concessões estatais para uso por empresas de telecomunicações em geral. Todavia, algumas dessas faixas, como a 915MHz, 2,4GHz e 5GHz são faixas liberadas para o uso em geral, sem necessitar de outorga, autorização ou licenciamento pela autoridade pública.

Tabela 4 – Histórico das especificações *Wi-Fi*.

Versão	Ano	Velocidade	Características
IEEE 802.11	1997	2 Mbps	Versão inicial da tecnologia. Utilização da faixa de frequência aberta de 2,4 GHz.
IEEE 802.11a	1999	54 Mbps	Utilização da faixa de frequência de 5GHz, permitindo uma maior velocidade, porém com menor alcance.
IEEE 802.11b	1999	11 Mbps	Aumento da velocidade de transmissão, utilizando a mesma faixa de frequência da especificação inicial.
IEEE 802.11g	2002	54 Mbps	Aumento da velocidade de transmissão, utilizando a faixa de 2,4 GHz.
IEEE 802.11n	2009	300 Mbps	Aumento da velocidade de transmissão, com uso das faixas de 2,4 e 5 GHz. Possibilidade de até quatro transmissões simultâneas, permitindo um maior número de conexões.
IEEE 802.11ac	2015	6900 Mbps	Aumento da velocidade de transmissão. Uso da faixa de 5 Ghz. Possibilidade de até oito transmissões simultâneas.
IEEE 802.11ah	2016	78 Mbps	Padrão <i>Wi-Fi</i> desenvolvido para aplicações <i>IoT</i> . Permite transmissões a distâncias de até 1 Km, com foco em eficiência energética, em troca da redução da velocidade de transmissão.
IEEE 802.11ax	2020	9600 Mbps	Aumento da velocidade de transmissão. Uso das faixas de 2,4 e 5 Ghz. Melhorias no compartilhamento dos canais, permitindo um número ainda maior de conexões simultâneas.

Fonte: Adaptado de Rochim et al. (2020); Pahlavan e Krishnamurthy (2021); Tian et al. (2021).

baixo consumo de energia, de maneira semelhante ao padrão *BLE* (Siekkinen et al., 2012). O padrão opera nas faixas ISM não licenciadas de 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz. A taxa bruta de transferência do padrão é de 250 KB/s, considerada muito baixa se comparada às outras tecnologias de transmissão sem fio, porém suficiente para a grande maioria dos dispositivos *IoT*. Devido a suas semelhanças, o *Zigbee* é uma tecnologia que compete com o *BLE*.

Outra tecnologia *IoT* de curta distância bastante popular, especialmente em ambientes logísticos, é o *RFID*. Conforme já mencionado na no início da Seção 2.1, essa foi a tecnologia de telecomunicação que originou o termo *IoT*. Seu nome deriva do termo *Radio Frequency Identification*, criado em 1973 (Alamillo-Montes, Martínez-Cruz e Uribe, 2022). Possui um funcionamento análogo à leitura de código de barras, com a diferença que o sinal emitido pela antena - ou pela leitora, no caso do código de barras – pode alcançar dezenas de metros e é omnidirecional¹⁰. O *RFID* é formado por três componentes:

- Um controlador que processa e armazena os dados lidos das etiquetas *RFID*;
- Um leitor que gera e transmite esses sinais;

¹⁰Um sinal omnidirecional é aquele que se espalha por todas as direções.

Tabela 5 – Histórico do *Bluetooth*.

Versão	Ano	Principais características
1	1999	Versão inicial do <i>Bluetooth</i> . Possui taxa de transmissão de 1Mbps e alcance de cerca de 10 metros.
2	2005	Aumento da taxa de transmissão para 3 Mbps e alcance de até 30 metros.
3	2009	Aumento da taxa de transmissão para 24Mbps, porém apresentava alto consumo de energia. É a última versão <i>Bluetooth</i> "clássica", chamada de <i>Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR)</i> .
4	2010	A arquitetura da tecnologia sofre uma profunda mudança para resolver o problema de consumo energético, visando atender a dispositivos <i>IoT</i> , recebendo também a denominação de <i>Bluetooth Low Energy (BLE)</i> . Há uma redução na taxa de transmissão para 1Mbps, porém com ampliação do alcance para até 50 metros.
5	2016	A arquitetura <i>BLE</i> recebe aprimoramentos, aumentando a taxa de transmissão para 2Mbps e permite a transmissão de dados a distâncias superiores a 200 metros.
6	2024	A nova versão traz aprimoramentos significativos em redução de latência e implementa técnicas para determinar a distância entre os dispositivos da rede. Atualmente encontra-se na versão 6.1.

Fonte: Adaptado de SIG (2024, 2025).

- Uma etiqueta (*tag*) *RFID* composta por um chip que armazena esses dados. Essa etiqueta pode ser do tipo somente leitura ou leitura e escrita. No primeiro caso, as informações são gravadas durante a confecção da etiqueta e não podem ser modificadas, enquanto no segundo caso os dados nela gravados podem ser alterados.

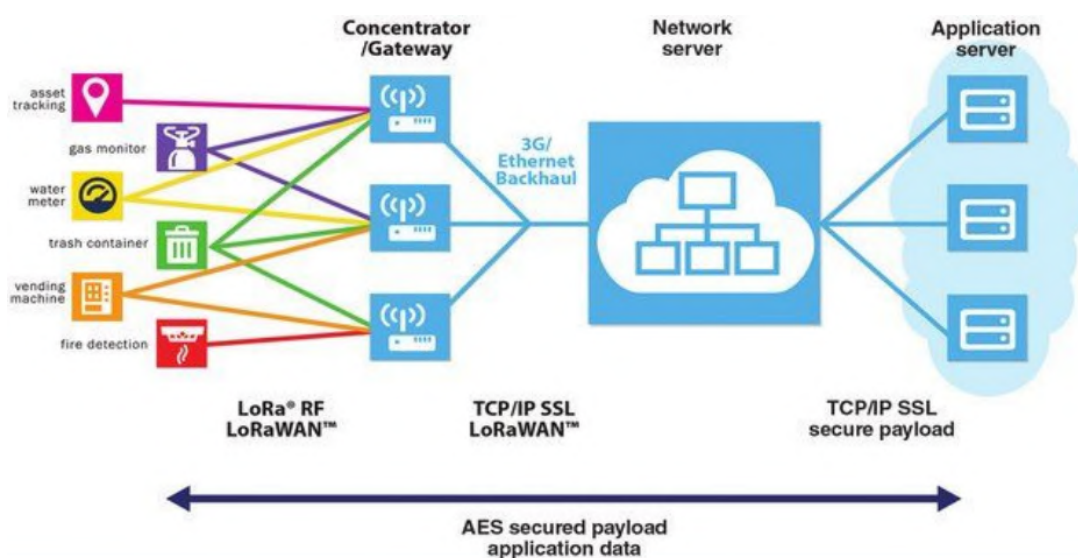
As etiquetas também podem ser do tipo ativa ou passiva. As etiquetas ativas são aquelas onde a energia necessária para a comunicação são obtidas através do leitor, por meio da indução eletromagnética. Já as etiquetas passivas são aquelas que possuem uma bateria própria para a transmissão de seus dados. Existem ainda as etiquetas semi-passivas, onde a bateria existente auxilia na recepção dos dados emitidos pelo leitor *RFID*.

Baseado no mesmo princípio de funcionamento do *RFID*, o *Near Field Communication (NFC)* é outro protocolo de comunicação *IoT* para curtas distâncias, de apenas poucos centímetros. A tecnologia tem por objetivo a troca de informações entre dispositivos móveis por meio de aproximação, sem necessidade de intervenção do usuário, pois a simples aproximação entre eles é suficiente para a realização de uma determinada ação. Utiliza-se com frequência o *NFC* na realização de operações bancárias por meio de *smartphones* e cartões de crédito que possuem a tecnologia de pagamento por aproximação. Da mesma maneira que no *RFID*, o *NFC* também trabalha com uma etiqueta que contém um pequeno conjunto de dados. Essa etiqueta pode ter seus dados lidos ou escritos através de aproximação, sem necessidade de contato físico (Al-Sarawi et al., 2017).

No sentido contrário às tecnologias de comunicação anteriores, a *Long Range WAN* (*LoraWAN*) tem por objetivo realizar a comunicação de dispositivos *IoT* a grandes distâncias. Lançado em 2012, o *LoraWAN* é uma especificação - ou seja, uma descrição de tecnologias - de rede *LPWAN* projetado para conectar coisas sem fio operadas por bateria à Internet em redes regionais, nacionais ou globais. Visa atender os principais requisitos da *IoT*, como comunicação bi-direcional, segurança ponta-a-ponta, mobilidade e serviços de localização (TTN, 2022). Essa especificação, mostrada na Figura 21, forma uma topologia composta por:

- Uma “nuvem” que envia e recebe dados de dispositivos através da Internet;
- Dispositivos *IoT* - como sensores e atuadores - que enviam e recebem dados da “nuvem” através da tecnologia *LoRa*;
- *Gateways* que fazem a integração entre os dispositivos *IoT/LoRa* e a “nuvem”.

Figura 21 – Topologia de uma rede *LoraWAN*.



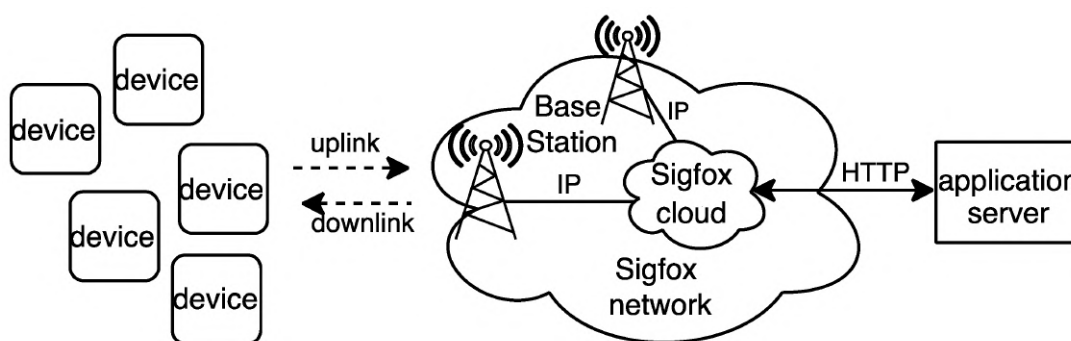
Fonte: Retirado de TTN (2022).

Dessa maneira, a transmissão de dados ocorre através de uma topologia chamada estrela-das-estrelas, os dispositivos *IoT* comunicam-se via tecnologia *LoRa* com um ou mais *gateways*, utilizando-se da pilha de protocolos *LoraWAN*, formando uma rede estrela entre eles. Os *gateways*, por sua vez, convertem os dados para o padrão TCP/IP - linguagem utilizada para comunicação pela Internet - e enviam os dados recebidos para a “nuvem” *LoraWAN*, chegando ao servidor de rede (*network server*), formando outra topologia estrela maior. Esse servidor, entre outras tarefas mais, envia os dados para os servidores de aplicação (*application server*) cadastrados nele (Chinchilla-Romero et al., 2021).

Outra tecnologia *LPWAN* bastante utilizada é conhecida pelo nome de *Sigfox*. Seu funcionamento, de maneira geral, é muito semelhante à tecnologia *LoraWAN*: os dispositivos transmitem seus dados via tecnologia *Sigfox* até uma ou mais estações-base (*base station*), sendo,

portanto, equivalentes aos *gateways LoraWAN*. Estas estações convertem os dados recebidos para o padrão TCP/IP e os encaminham para a nuvem *Sigfox* (*Sigfox cloud*), sendo equivalente à nuvem *LoraWAN*. A nuvem, por sua vez, encaminha os dados para um ou mais servidores de aplicação (*application server*) (Aguilar et al., 2022), cujo processo de comunicação é visualizado na Figura 22. Portanto, a rede *Sigfox* também utiliza a topologia estrela-das-estrelas.

Figura 22 – Topologia de uma rede *Sigfox*.



Fonte: Retirado de Aguilar et al. (2022).

Todavia, apesar das semelhanças, essa tecnologia possui diversas particularidades se comparada à tecnologia *LoraWAN*, entre as quais destacam-se o fato de ser uma tecnologia proprietária, ou seja, que não permite customizações; a menor taxa de transmissão de dados, de 600 bits por segundo; e o menor consumo energético.

Por sua vez, a tecnologia *NarrowBand-IoT (NB-IoT)* usa as bandas de frequência *Long Term Evolution (LTE)* utilizadas pelas operadoras de telefonia móvel nas comunicações de voz e dados para fornecer um serviço *LPWAN* (Ogbodo, Abu-Mahfouz e Kurien, 2022). Dessa forma, ao contrário das tecnologias *SigFox* e *LoraWAN*, não possui os problemas de interferência existentes nas faixas não-licenciadas. Portanto, a principal vantagem da tecnologia *NB-IoT* em relação às demais é utilizar toda a estrutura da operadora de telefonia, eliminando a necessidade de equipamentos adicionais, como os *gateways LoraWAN* ou as estações-base *Sigfox*, para integrar-se a uma rede TCP/IP.

Para poupar energia dos dispositivos, o *NB-IoT* possui aprimoramentos que permitem que os dispositivos entrem em um estado de sono profundo, praticamente não consumindo energia, além de permitir janelas de recepção de dados mais longas. Enquanto na telefonia móvel tradicional o tempo máximo dessa janela é de 2,75 segundos, no *NB-IoT* essa janela pode se estender até 175 minutos (Tsoukaneri e Marina, 2018), consumindo assim muito menos energia e prolongando a vida útil de uma bateria instalada num equipamento que conta com essa tecnologia.

Como última das tecnologias difundidas para comunicação *IoT*, as redes 5G correspondem à quinta geração da comunicação sem fio móvel. A primeira geração, surgida no final dos anos 1970, destacava-se pelo uso da tecnologia analógica e permitia apenas a comunicação por voz. A segunda geração, surgida em 1991, passou a ser digital e permitiu o envio de dados via

mensagens de texto e mensagens multimídia. A terceira geração, surgida em 2001, incrementou a velocidade da conexão, permitindo a navegação *Web*, *downloads* diversos e o uso de *streaming* com baixa qualidade. A quarta geração, criada em 2010, foi o primeiro padrão realmente destinado a *smartphones*, oferecendo velocidades de conexão compatíveis com comunicação de voz e vídeo em tempo real (Falade et al., 2023). A quinta geração, que teve sua implantação iniciada no ano de 2022 no Brasil (Brasil, 2022), visa ser um pilar da transformação digital, tendo assim os seguintes objetivos (ANATEL, 2021):

- Fornecer uma comunicação extremamente confiável e com baixa latência;
- Permitir a comunicação massiva entre máquinas (*machine-to-machine – M2M*);
- Atender a diferentes finalidades, como sistemas de tempo real e comunicação *IoT* em geral.

Para atender a esses objetivos, no Brasil, a Anatel definiu três faixas de espectro para uso das redes 5G:

- Faixa sub-GHz: chamada de faixa de cobertura, destina-se ao atendimento de dispositivos *IoT* e à extensão da cobertura da banda larga móvel para locais atualmente não atendidos, como áreas rurais. Essa faixa, portanto, compete com as demais redes *LPWAN*. Compreende os intervalos de frequência de 708 a 718 MHz e 763 a 773 MHz. Alguns autores, como Ogbodo, Abu-Mahfouz e Kurien (2022), denominam essa faixa como a segunda geração da tecnologia *NB-IoT*;
- Faixa de 1 a 6 GHz: denominada faixa de capacidade, destina-se para uso geral de 5G, oferecendo um equilíbrio entre desempenho e cobertura. Compreende os intervalos de 2.300 a 2.390 MHz e 3.300 a 3.700 MHz;
- Faixas acima de 6GHz: chamada faixa de desempenho, destina-se para comunicação de alto desempenho, com alta taxa de transmissão e recepção de dados e baixa latência, portanto voltadas para uso urbano, pois possui uma cobertura bastante reduzida em função das altas frequências utilizadas. Assim sendo, essa faixa necessita de antenas próximas para haver cobertura de sinal. Compreende o intervalo de 24,3 a 27,5 GHz.

Cabe destacar que, para utilizar a faixa de desempenho, os municípios devem adaptar sua legislação para permitir a instalação de antenas 5G em locais públicos diversos, como parques, paradas de ônibus e postes. Isso é necessário para garantir que haja antenas em quantidade suficiente para oferecer uma cobertura adequada do sinal. Por consequência, cada município pode adotar diferentes requisitos para sua implantação, o que pode dificultar a expansão da tecnologia (Pinheiro, 2024).

2.2 LOGÍSTICA

Como já abordado no Capítulo introdutório deste trabalho, a logística como disciplina começou a se desenvolver durante o século XX (Ballou, 2006; Ennagad, 2023), alcançando grande evolução durante a Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade crítica de gerenciar o transporte, o suprimento e a distribuição de recursos em grande escala. Após a guerra, devido aos benefícios observados, o campo da logística passou a ser aplicado a outros contextos, como na cadeia de suprimentos, transporte e outras operações relacionadas ao escoamento da produção industrial.

James Heskett foi um dos primeiros pesquisadores a tratar a logística como uma área pertencente ao processo de produção (Heskett e Ballou, 1966; Ballou, 2006; Amr, Ezzat e Kassem, 2019) - e não somente ao campo militar, como ocorria anteriormente. Para deixar clara essa visão, denominava o processo de distribuição e suprimento físico como logística de negócio (Ballou, 2006). Anos mais tarde, Daskin (1985) descreveu a logística como o desenho e a operação de sistemas físicos, gerenciais e informacionais necessários para que os bens possam prevalecer sobre o tempo e o espaço. Nesse sentido, sua definição já acompanhava as características da terceira fase da logística, onde sistemas de informação eram usados incorporados ao processo logístico para gerenciar o deslocamento de bens e serviços. A sua definição utilizava as premissas de tempo e espaço que Timms e Pollen haviam abordado em 1970, afirmando que a produção de um bem deveria também prover utilidades de espaço e tempo (Ballou, 2006), ou seja, onde e por quanto tempo um bem deve ser armazenado.

Alvarenga e Novaes (2000), por sua vez, ofereceram uma definição mais prática, afirmando que a logística é um sistema integrado que lida com problemas concretos das organizações, como gestão de estoque, frota e prazos para entrega de produtos. Islam et al. (2013), por sua vez, combina e condensa as definições dos autores anteriores numa fórmula matemática composta pela soma de três parcelas: (1) o resultado do suprimento de materiais brutos; (2) o gerenciamento de materiais de uma fábrica; e (3) a distribuição aos consumidores.

Por sua vez, o Conselho de Profissionais do Gerenciamento da Cadeia Logística (*Council of Supply Chain Management Professionals - CSCMP*) descreveu a logística como um conjunto sistemático e coordenado de atividades necessárias para fornecer o movimento físico e o armazenamento de bens - como materiais brutos e produtos acabados de um fornecedor para um consumidor de maneira eficiente, de forma a contribuir com os objetivos de uma empresa (CSCMP, 2013).

Essa definição mais estratégica definida pela CSCMP (2013) é acompanhada por outros trabalhos recentes. Christopher (2022) define logística como uma estrutura de planejamento que visa criar um fluxo único de produtos e informações dentro de uma empresa. Tran-Dang et al. (2022), a partir de uma visão voltada à tecnologia da informação, define logística como um serviço onde os produtos corretos são entregues para os consumidores corretos no tempo certo e na hora certa, reforçando que isso só é possível com a informação correta, que cada vez

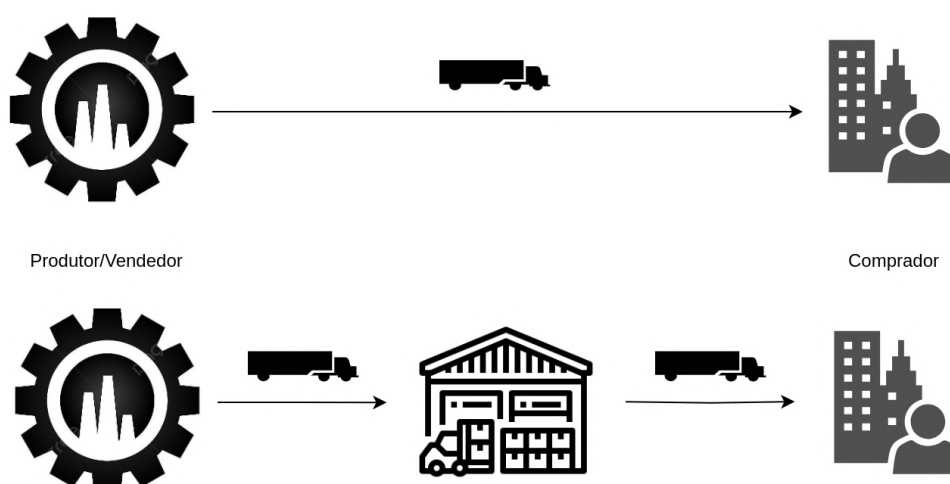
é maior e mais complexa. Jafari, Azarian e Yu (2022) afirma que a logística é um dos pilares de qualquer companhia. Liu e Ma (2022) vai além, afirmando que a logística não seria apenas um pilar, mas uma indústria do serviço de produção, oferecendo atividades que integram a movimentação de bens, como armazenamento, carga e descarga, empacotamento e transporte. Dessa maneira, enquanto as definições mais antigas apresentam a logística como um papel mais operacional, as definições atuais trazem uma visão mais estratégica do papel da logística dentro de uma organização.

2.2.1 O Processo Logístico

O processo logístico compõe-se das atividades que determinam o funcionamento da logística, sendo responsável por efetuar e controlar o deslocamento de um bem entre um vendedor/produtor e um comprador/consumidor (Daskin, 1985). Dessa forma, esse processo agrega ao bem negociado uma nova funcionalidade, chamada utilidade de local (Islam et al., 2013). Essa função permite que o processo de negociação inclua também condições de preço e prazo de entrega.

Conforme os termos negociados durante a venda, o bem pode ser transportado diretamente entre a origem e o destino ou pode precisar ficar armazenado em algum lugar durante seu deslocamento (Islam et al., 2013). No primeiro caso, mostrado na parte superior da Figura 23, o processo logístico preocupa-se apenas com as questões necessárias para o seu devido deslocamento, tais como modal de transporte e tipo de veículo a ser utilizado, além de questões não diretamente relacionadas, como manutenção da frota. No segundo caso, apresentado na parte inferior da Figura 23, o processo logístico envolve também o armazenamento temporário dos bens em locais chamados de armazéns. Nesse caso, surgem novos requisitos a serem tratados, como questões de espaço para armazenamento, controle do espaço utilizado, manipulação da carga no armazém, entre outros aspectos.

Figura 23 – O funcionamento básico do processo logístico.



A partir disso, pode-se estabelecer que o processo logístico forma-se por cinco áreas-chave: transporte, armazenagem, inventário, empacotamento e informação (Islam et al., 2013; Tran-Dang et al., 2022). A área de transporte é responsável por avaliar aspectos que envolvem o modal utilizado - rodovia, trilhos, aéreo, marítimo - condições geográficas, tipo de entrega, agendamento e rota. É nela que se determina a eficiência do tempo e do custo do processo logístico, e a escolha do modal é influenciada por fatores como velocidade de entrega necessária, custo e a natureza dos produtos transportados (Christopher, 2022).

A armazenagem cuida de aspectos de manejo da carga, condições de armazenagem - como controle de temperatura e produtos sensíveis a impactos - tamanho e local de armazenagem. Essa área é responsável por manter a integridade dos produtos durante o período de estocagem e para eficiência na distribuição (Rouwenhorst et al., 2000).

Já o inventário trabalha com decisões sobre o que armazenar, quanto armazenar, onde armazenar e por quanto tempo armazenar. Islam et al. (2013) afirma que muitas vezes as áreas de inventário e armazenagem são confundidas entre si, destacando que o primeiro lida com a quantidade de material a ser armazenado, enquanto o segundo lida com os aspectos do local onde o material será armazenado.

A área de empacotamento lida com o empacotamento do material a ser entregue ou armazenado. Essa função garante a proteção dos produtos, facilita o manuseio, otimiza o uso do espaço em veículos de transporte e armazenamento, e reduz riscos de danos. Além disso, a embalagem pode servir como uma ferramenta de marketing importante, fornecendo informações essenciais e melhorando a experiência do usuário (Alvarenga e Novaes, 2000). A armazenagem, o inventário e o empacotamento são realizados dentro de locais chamados armazéns logísticos, que serão tratados em maiores detalhes na Seção 2.2.5.

Finalmente, a área de informação trata de gerenciar a informação necessária para que as demais áreas-chave da logística funcionem corretamente. É nela que se coordenam as atividades logísticas, permitindo o rastreamento de produtos, a gestão de inventários, o planejamento de entregas e a comunicação eficiente entre todas as partes envolvidas no processo logístico.

2.2.2 Gestão da Cadeia de Suprimentos

A complexidade crescente dos processos produtivos nos anos 2000, oriunda da globalização e da ascensão do comércio eletrônico, culminou na criação e na popularização de um termo que reflete a expansão e a integração dessas novas realidades: o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management - SCM*) (Ballou, 2006). Essa evolução marcou uma distinção clara entre as responsabilidades e abrangências da logística e do *SCM*. Nesse novo cenário, entende-se a logística como um componente crítico dentro do *SCM*, que agora abrange também áreas como planejamento estratégico, serviços de informação, marketing e finanças (Christopher, 2022). Nesse sentido, Ballou (2006) e Christopher (2022) afirmam que o *SCM* trata do gerenciamento do fluxo do produto entre múltiplas empresas, cuidando da integração

e coordenação entre elas, enquanto a logística foca no gerenciamento do fluxo do produto dentro dos limites de uma única organização. Complementarmente a essa ideia, Liu e Ma (2022) argumentam que o *SCM* busca integrar sistemas logísticos heterogêneos formados por diversas entidades empresariais, garantindo assim uma gestão mais eficiente e coesa. Dessa forma, o *SCM* pode ser considerado como o encadeamento de vários processos logísticos, conforme representado na Figura 24.

Figura 24 – O funcionamento básico do *SCM*, formado por uma composição de processos logísticos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nesse panorama, embora a logística agora seja percebida principalmente como uma parte do *SCM*, sua importância nas organizações não diminuiu. Ao contrário do que se imagina, a eficácia do *SCM* depende de uma logística bem gerenciada. Portanto, mais do que um mero componente, a logística é considerada um pilar do *SCM*, fundamental para o sucesso das operações organizacionais e a realização dos objetivos estratégicos em um ambiente globalizado e competitivo, visão corroborada pelas definições atuais de logística abordadas neste Capítulo.

Em resumo, o *SCM* é tratado como a gestão e coordenação de todos os processos ao longo de toda a cadeia de produção, envolvendo várias empresas e setores, enquanto a logística gerencia as conexões ponto a ponto dentro dessa cadeia, assegurando que cada segmento opere eficientemente dentro do contexto mais amplo do *SCM*.

2.2.3 Tipos de Logística

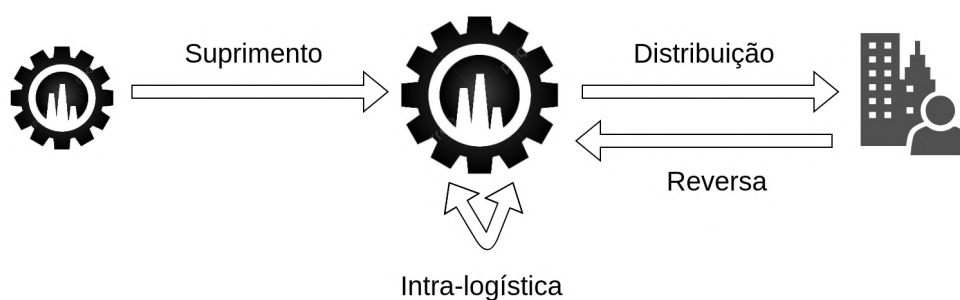
Desde a definição de Heskett e Ballou (1966), a logística evoluiu ao passar dos anos, surgindo características e especificidades que a permitiram classificá-la em diferentes tipos, dependendo de sua situação, conforme apresentado na Figura 25. O tipo mais tradicional é a logística de distribuição física, que funciona de dentro para fora da manufatura. Ela envolve as transferências de produtos entre a fábrica e armazéns, estoques ou subsistemas de entrega urbana e interurbana de mercadorias. Outro tipo bastante comum, especialmente no sistema industrial, é a logística de suprimento, também chamada de logística de materiais ou logística de abastecimento. Ela funciona de maneira oposta à logística de distribuição, trabalhando de fora para dentro da manufatura, incluindo a transferência de matérias-primas e outros insumos, peças, componentes e outros produtos acabados. Numa cadeia de suprimento, portanto uma logística de distribuição de uma empresa pode ser tratada como logística de suprimento de outra.

A intra-logística, também chamada de logística interna, cuida da movimentação e ar-

mazenamento de bens e materiais dentro da fábrica (Sheffi e Klaus, 1997; Kartnig, Grösel e Zrnić, 2012). Entre as suas particularidades, a intra-logística trata do armazenamento do produto acabado e oscilações no prazo de entrega em função de seu estoque e capacidade de armazenamento. É nela, portanto, que se localizam os armazéns logísticos.

Por fim, a literatura define também um tipo de logística que envolve a devolução de bens do consumidor final para a fábrica (Winkelhaus e Grosse, 2020), ou seja, o processo inverso do que ocorre nos sistemas logísticos tradicionais. Esse tipo de logística, chamada de logística reversa, é muito presente no comércio eletrônico (Wei, Ma e Liu, 2021) para devolução de bens que não agradaram ao consumidor.

Figura 25 – Os principais tipos de logística.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.2.4 O Percurso até a Logística 5.0

Como já abordado no início deste Capítulo, o termo logística passou a ser usado fora do contexto militar a partir dos anos 1960, época onde atualmente demarca-se a transição da segunda para a terceira fase da logística. Se o marco inicial das duas primeiras fases são definidas respectivamente pela mecanização do transporte e segmentação das tarefas (Leng et al., 2022; Paksoy, Kochan e Ali, 2020), a partir da terceira fase o que marca as transformações da logística são consequência da evolução da computação e da redes de comunicação de dados, tratados nas Seções 2.1.1 e 2.1.2.

Seguindo esse raciocínio, o marco que denota o início da Logística 3.0 é o uso do computador para a gestão das atividades logísticas, especialmente para o controle do inventário da produção (Paksoy, Kochan e Ali, 2020). Nessa época, o computador já estava na sua terceira geração, possuindo maior confiabilidade, com uso relativamente massificado e abrangendo uma ampla área de aplicações, entre as quais a logística (Paksoy, Kochan e Ali, 2020).

No início dessa fase, ainda, o uso do computador era restrito e centralizado em uma única máquina, visto que as redes de comunicação de dados viriam a ser criadas somente ao final da década. Ao longo da Logística 3.0, conforme foram avançando as tecnologias de computação e comunicação de dados, houve um aprimoramento desse controle do processo logístico, com a utilização de múltiplos microcomputadores interligados por diversas redes de comunicação

de dados. Cada um dos computadores era responsável por fornecer dados de parte do processo logístico, sejam eles informação de rota, posição de armazenamento ou qualquer outro dado relevante para o processo. Esses dados eram normalmente inseridos de forma manual por operadores humanos e armazenados em sistemas cada vez mais complexos, como os sistemas de gerenciamento do transporte (*Transport Management System - TMS*) e sistemas de gestão do armazém (*Warehouse Management System - WMS*).

Dentre os avanços da computação que marcaram essa fase da logística, destacam-se o surgimento da quarta geração dos computadores (1971) e o lançamento do PC (1975), do aparelho celular (1973), dos sistemas embarcados (1974), do *laptop* (1981) e do *smartphone* (1994). Quanto aos avanços das redes de comunicação de dados, pode-se ressaltar o surgimento da *Arpanet* (1969), embrião do que viria a se tornar a Internet (1983), a criação das redes locais (1976), o surgimento das redes de sensores (1982), a criação da *Web* (1989) e o surgimento das redes de comunicação sem fio, como *Wi-Fi* (1997), *Bluetooth* (1998), *Zigbee* (2003) e *LP-WAN* (2010). Além disso, é durante essa fase da logística que se cunha o termo *IoT*. Essa linha temporal dos avanços da computação e da comunicação de dados pode ser acompanhada na Figura 26.

Ao final dessa época, ainda, populariza-se o uso do *e-commerce*, que torna muito mais complexa a realização das operações logísticas. A popularização da Internet permitiu a comercialização de produtos diretamente entre o produtor e o cliente final. Pela perspectiva do cliente, era possível comprar a qualquer momento, não necessitando estar presente na loja (Islam et al., 2013). Além disso, por não precisar se deslocar, o cliente possuía mais tempo para escolha de preço e características mais agradáveis, tornando o produto mais personalizável (Islam et al., 2013).

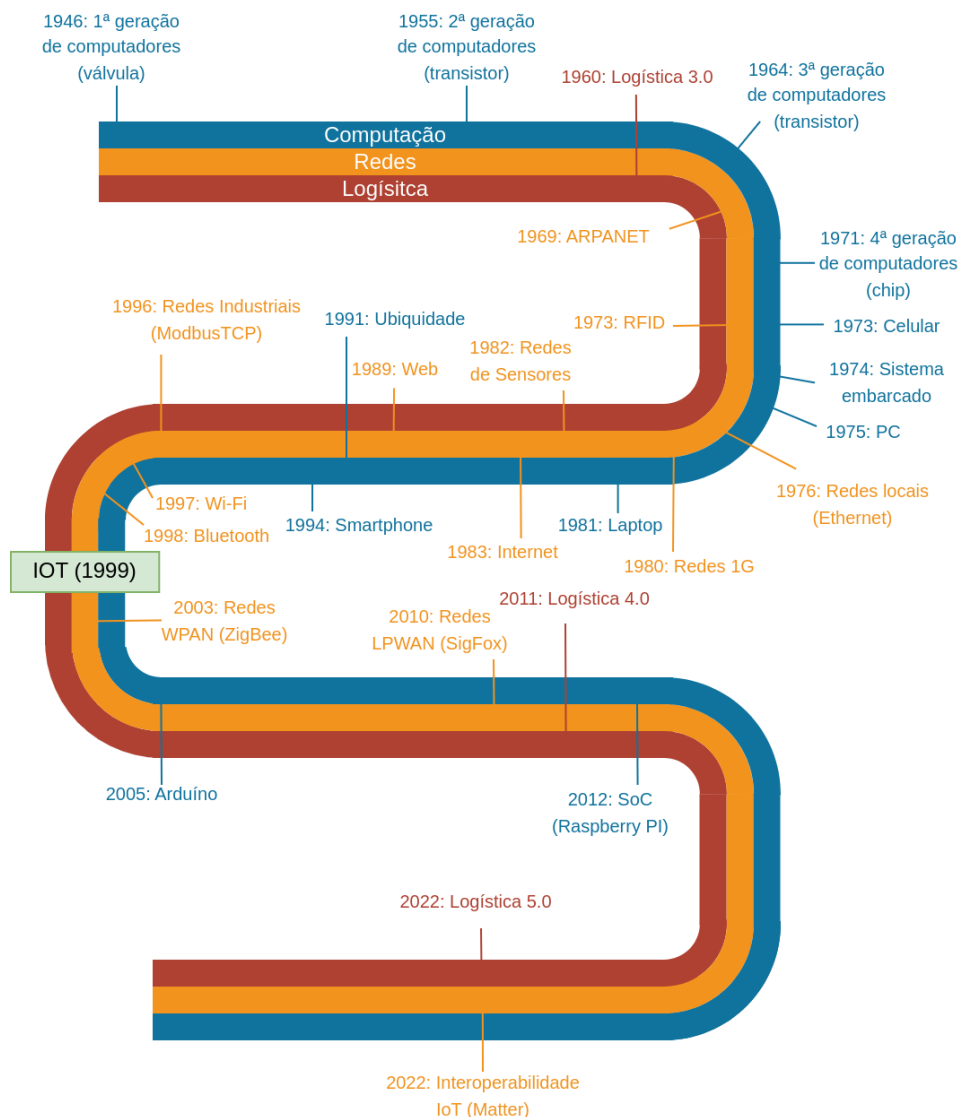
Do ponto de vista do vendedor, era possível atingir um maior número de clientes, podendo inclusive efetuar uma análise do comportamento dos potenciais clientes em tempo real. Esse novo ambiente ampliou a gama de fornecedores para o cliente. Por outro lado, para o fornecedor, o *e-commerce* possibilitou a ampliação da quantidade de possíveis clientes. No entanto, para a logística como um todo, esse novo ambiente de comercialização trouxe novos desafios pois, para atender essa nova demanda, necessitava-se criar novas rotas e deter um maior controle sobre o armazenamento dos bens.

Esse novo contexto logístico, combinado com o surgimento da Indústria 4.0, levou à definição, em 2011, da quarta fase da logística. Nessa nova fase, chamada de Logística 4.0, a *IoT* torna-se protagonista do processo logístico (Winkelhaus e Grosse, 2020). A entrada de dados passa a ser praticamente toda automatizada por meio de sensores que utilizam as tecnologias de comunicação sem fio e computação surgidas durante a terceira fase. Através do uso da *IoT*, pode-se controlar a frota em tempo real. Deslocamentos para entregas podem ser reconfigurados instantaneamente conforme o tráfego. Localiza-se facilmente o as cargas dentro de um armazém. Monitora-se em tempo real as condições de um armazém logístico, permitindo a intervenção humana antes que problemas ocorressem. Utilizam-se robôs para

movimentação de cargas dentro do armazém. Todos esses dados alimentam sistemas como o *WMS* e o *TMS*. Esses, por sua vez, interligam-se a sistemas de gestão empresarial (*Enterprise Resource Planning - ERP*) e a integração homem-máquina passa a ser mais intensa, através dos sistemas ciber-físicos (Paksoy, Kochan e Ali, 2020).

Nesse período da logística também destacam-se a criação ou reforço de ações de sustentabilidade na operação (Martins et al., 2019), surgindo novos ramos da logística como a logística verde, cujo objetivo é manter a competitividade da operação com o menor impacto ao meio ambiente (Liu e Ma, 2022), ou fortalecendo ramos já existentes, como a logística reversa - inclusive com legislação incentivando-a¹¹.

Figura 26 – O histórico das fases da logística impactadas pelo desenvolvimento tecnológico da computação e das redes de comunicação de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

¹¹O Brasil possui uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, descrita na Lei 12.305, que incentiva o uso da logística reversa.

Esse nível de automatização e controle propiciado pela Logística 4.0 somente foi possível devido à evolução da computação e das redes de comunicação de dados. Os dispositivos *IoT* utilizados nessa fase da logística usam a estrutura básica de computação derivada dos sistemas embarcados (1973) e comunicam-se utilizando tecnologias de transmissão de dados sem fio como *RFID* (1973), *Wi-Fi* (1997) e *ZigBee* (2003), todas com uso já consolidado. Durante essa fase da logística, também visualizada na Figura 26, a computação e as redes de comunicação de dados seguiram evoluindo, com o surgimento dos sistemas em um único chip (*SoC*), a proliferação de tecnologias *LPWAN* - como o *LoraWAN* - e a concepção do primeiro protocolo de interoperabilidade de tecnologias *IoT*: o *Matter* (2022).

Além dos aspectos tecnológicos, houve nesse período uma mudança de mentalidade por parte da população em relação ao propósito de uma sociedade, surgindo o conceito de Sociedade 5.0 (Keidaren, 2018). Se antes preocupavam-se com a informação (Huang et al., 2022), a partir da Sociedade 5.0 o foco de atenção das pessoas voltou-se ao próprio ser humano (Keidaren, 2018; Huang et al., 2022). Nesse sentido, pensando no seu próprio bem-estar e na sua sobrevivência, esse novo tipo de sociedade atenta-se às ações de sustentabilidade para otimizar o uso dos recursos (International, 2022) e às ações de resiliência afim de suportar eventuais situações que não podem ser resolvidas, como desastres naturais e tragédias humanitárias.

Com base nesse contexto tecnológico e social, inicia-se em 2022 a atual fase da logística, denominada Logística 5.0. Nesse novo momento - ao menos agora no seu início - a *IoT* continua como protagonista, combinando elementos de inteligência artificial para a tomada de decisões. Todavia, trazendo os elementos da Sociedade 5.0 e, combinados com os elementos trazidos pela Indústria 5.0¹², as operações logísticas contam também com o elemento de sustentabilidade dentre as suas principais preocupações (Jafari, Azarian e Yu, 2022; Nicoletti e Appolloni, 2024). Combinada com as questões sustentáveis, a resiliência também entra no papel dessa nova etapa, reforçada por diversos eventos recentes que destacam a importância da logística preparar-se para fatores que podem desestabilizar a humanidade. Exemplos desses fatores de desestabilização são os eventos catastróficos e desastres humanitários ocorridos durante pandemia de Covid-19 (Dissorn e Suwanbamrung, 2023), a guerra entre Rússia e Ucrânia (Jafari, Azarian e Yu, 2022) ou mesmo a catástrofe climática ocorrida no Rio Grande do Sul no mês de maio de 2024 (Povo, 2024; Metsul, 2024).

Nesse contexto, a literatura atual (Trstenjak et al., 2022; Dissorn e Suwanbamrung, 2023) define a Logística 5.0 a partir de cinco elementos, mostrados na Figura 27: Transporte Verde, Armazém Verde, Empacotamento Verde, Infraestrutura, e Organização e Recursos Humanos. Nessa definição, os três primeiros elementos são derivados da logística verde (Liu e Ma, 2022; Trstenjak et al., 2022), enquanto os dois últimos formam a sustentação dos demais elementos.

O transporte verde é caracterizado o deslocamento do bem entre o produtor e o con-

¹²O termo Indústria 5.0 foi proposto pela Comissão Europeia de Indústria para delimitar os novos papéis da indústria europeia perante a sociedade, a partir dos pressupostos trazidos pela Sociedade 5.0 (Huang et al., 2022)

Figura 27 – Os elementos que formam a Logística 5.0.



Fonte: Adaptado de Trstenjak et al. (2022); Dissorn e Suwanbamrung (2023).

sumidor, mas da maneira mais ecologicamente eficiente. Questões como reuso de contêineres e equipamentos de transporte, melhor aproveitamento do espaço de armazenamento de cargas, uso de combustíveis alternativos e otimização de rotas são requisitos que permeiam esse elemento. Keil, Hagemann e Glock (2025) complementam essa definição afirmando que a logística *crowd* - ou *crowd-shipping*¹³ - também permite um melhor aproveitamento dos recursos necessários para o deslocamento de um bem.

O armazém verde é caracterizado pela utilização mais sustentável do ambiente de armazenamento, utilizando muitas das premissas existentes nos armazéns inteligentes (Jafari, Azarian e Yu, 2022). Temas como o aumento da eficiência energética dos armazéns (Mustapić et al., 2023), utilização de novas tecnologias de armazenamento e construções mais sustentáveis - incluindo o uso de paredes e tetos com melhores características de isolamento climático - são requisitos que formam esse elemento.

Por sua vez, o empacotamento verde presa pela otimização dos processos de empacotamento, visando um melhor aproveitamento dos materiais utilizados nesse processo. Elementos como a utilização de materiais recicláveis e biodegradáveis para realizar o empacotamento são requisitos que compõem este elemento da Logística 5.0.

A infraestrutura - amplamente ancorada nas tecnologias de computação e transmissão de dados - responsabiliza-se por gerenciar os processos logísticos, fornecendo a base de dados necessária para que os elementos anteriores da Logística 5.0 possam ser controlados e atendidos. É nesse elemento que a *IoT* e a *IA* fornecem informações sobre os procedimentos logísticos que podem ser aprimorados para melhorar a sustentabilidade ambiental da operação logística. Coleta de dados em tempo real, uso de métodos de análise preditiva e uso de computação em nuvem são tratados como requisitos deste elemento.

Por fim, o elemento de organização e recursos humanos mantém um ambiente organizacional favorável a mudanças para que os processos internos possam ser alterados de forma que a organização consiga atingir uma maior sustentabilidade nos seus processos logísticos. O foco está nos trabalhadores, criando um ambiente apto à inovação e que os incentive a estarem

¹³O *crowd-shipping* é um conceito em que pessoas comuns também assumem o papel de transportador, atuando especialmente na parte final do transporte, chamada entrega de última milha (Frehe, Mehmman e Teuteberg, 2017).

abertos a mudanças.

Esses elementos já estavam presentes nas fases anteriores da logística, especialmente na Logística 4.0. Nesse estágio anterior, a ênfase recaiu sobre a incorporação de tecnologias digitais que possibilitaram ganhos de eficiência operacional e otimização de processos. A dimensão verde, nesse contexto, foi tratada prioritariamente como um instrumento de racionalização de recursos, isto é, uma via para reduzir custos energéticos, minimizar desperdícios e atender, em parte, a pressões regulatórias e mercadológicas.

No entanto, a transição para a Logística 5.0 reconfigura o lugar desses elementos no sistema logístico. O que antes era entendido como um complemento ou vantagem competitiva adicional na Logística 4.0 passa a constituir-se em princípio estruturante da nova fase. A sustentabilidade deixa de ser vista apenas como um resultado desejável das inovações tecnológicas e passa a compor, de forma integrada, os pilares que sustentam o paradigma 5.0: centralidade no ser humano, resiliência e sustentabilidade. Assim, o armazém verde não se limita a reduzir custos energéticos, mas incorpora também preocupações ergonômicas, de segurança ocupacional (Perotti et al., 2025) e de integração entre trabalhadores e sistemas inteligentes (Andres et al., 2024). Da mesma forma, o transporte verde e o empacotamento verde transcendem a lógica da eficiência para alinhar-se a compromissos de descarbonização e responsabilidade social em escala regional e global.

É nesse sentido que se pode afirmar que a Logística 5.0 não inaugura práticas verdes no ambiente logístico, mas antes as ressignifica e eleva ao status de base fundacional de um sistema mais amplo, no qual tecnologia, sustentabilidade, resiliência e centralidade humana se articulam de forma indissociável. Os elementos já presentes na Logística 4.0, portanto, funcionam como precursores e condicionantes do avanço para a Logística 5.0. Eles pavimentaram o terreno para que a integração plena entre digitalização, sustentabilidade e resiliência se tornasse viável, permitindo que a nova fase se apresentasse não apenas como uma continuação tecnológica, mas como uma mudança nos objetivos e valores que orientam a logística contemporânea.

2.2.5 Armazéns Inteligentes

Conforme abordado na Seção 2.2.1, a armazenagem é um elemento essencial no processo logístico que engloba o recebimento, a guarda, a movimentação e a distribuição de bens e serviços dentro de instalações específicas, conhecidas como armazéns logísticos. A função primordial da armazenagem é proporcionar um ambiente seguro e adequado para proteger os produtos contra danos, deterioração e perdas durante o período de estocagem. Além disso, os armazéns servem como pontos de consolidação e desconsolidação de cargas, facilitando a movimentação de mercadorias entre diferentes estágios da cadeia logística.

Nesse contexto, portanto, o armazém é considerado um *hub* vital no fluxo de bens (Barreto, Amaral e Pereira, 2017). Nele são realizadas múltiplas atividades, dependendo da sua função e da sua posição dentro do sistema logístico de uma empresa ou cadeia de produção

(Saderova et al., 2021), formando, portanto, a base da intra-logística. O funcionamento de um armazém logístico obedece a um ciclo formado pelas operações de recebimento do bem na doca, armazenamento, preparação e expedição (Rouwenhorst et al., 2000; Alvarenga e Novaes, 2000; Nicoletti e Appolloni, 2024).

No início desse ciclo, o bem ou produto chega à doca, mostrada na Figura 28, onde pode ser consolidado junto a outros produtos para fins de armazenamento. Antes de ocorrer a consolidação, o produto pode ser guardado numa área temporária chamada de área de encaminamento (Rouwenhorst et al., 2000), cujo objetivo é facilitar o acesso do operador às atividades de consolidação, como, por exemplo, agrupar os bens em estruturas como porta paletes (Figura 29). Os bens que ficam nessa área são agrupados em menores quantidades, justamente para facilitar sua manipulação pelo operador.

Figura 28 – Docas de um armazém logístico.



Fonte: Retirado de Mecalux (s.d.).

Figura 29 – Processo de consolidação de bens em um porta palete.



Fonte: Retirado de DRTLOG (s.d.).

Em seguida, o produto é armazenado em estruturas de armazenamento pelo período de tempo acordado, da maneira mais barata (Rouwenhorst et al., 2000). O armazenamento é feito em diferentes tipos de estruturas, como porta paletes, sistemas cantiléver, estruturas autoportantes e *drive-in*, este último destacado na Figura 30.

Figura 30 – Estrutura *drive-in* de armazenagem.



Fonte: Retirado de Logística (s.d.).

Quando precisa ser entregue, então, o produto é retirado do seu armazenamento e preparado. A preparação consiste em separar o bem a ser entregue dos demais e seu correto embalagem. Esse processo de retirada e preparação na intra-logística é chamado de *picking*, e conta com esteiras para movimentação das cargas. Após o *picking*, o produto é enviado para a expedição onde são agrupados com outros para formar cargas completas de envio, destinadas ao mesmo cliente.

Durante o processo de *picking* e expedição, o bem pode novamente ser armazenado na área de encaminhamento. A movimentação dos bens entre as etapas de armazenamento também compõe uma tarefa de um armazém (Alvarenga e Novaes, 2000). Essa movimentação é feita normalmente com o auxílio de veículos, como empilhadeiras (Figura 31), ou conta com dispositivos de movimentação como esteiras.

Todo esse processo pode ser controlado e operado de maneira manualizada ou de maneira automatizada - parcial ou totalmente. Neste segundo caso, os armazéns logísticos passam a ser denominados como armazéns inteligentes (Zhen e Li, 2022).

O conceito de armazéns inteligentes é contemporâneo ao surgimento da Logística 4.0. A primeira menção na literatura de armazéns inteligentes, realizada por Ding (2013)¹⁴, define esse conceito como um armazém que utiliza os recursos de *IoT* para aprimorar a eficiência da operação logística. Atualmente esse conceito foi expandido, não se limitando mais a inteligência de um armazém ao uso de *IoT*. Zhen e Li (2022) define armazém inteligente como aquele que utiliza diversas tecnologias inteligentes para operar de uma maneira inteligente.

As características de um armazém inteligente obedecem um *framework* composto por

¹⁴Há na literatura menções anteriores ao termo, porém nenhum deles define o que seria o conceito.

Figura 31 – Uma empilhadeira utilizada para deslocamento de bens dentro de um armazém logístico.

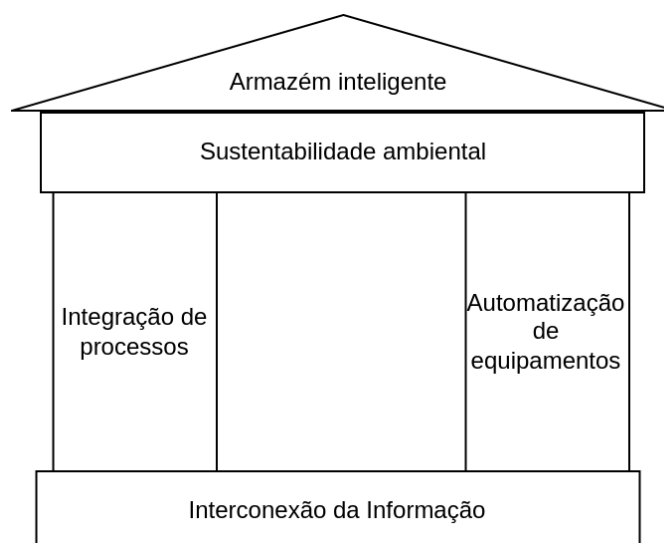


Fonte: Retirado de FuturoMaq (2023).

quatro componentes (Zhen e Li, 2022): interconexão da informação, automação de equipamentos, integração de processos e sustentabilidade ambiental. Mostra-se esse *framework* na Figura 32.

A interconexão da informação forma a base do conceito de armazéns inteligentes. Essa base ancora-se em *IoT* e outras tecnologias emergentes, onde o fluxo da informação pode ser processado e compartilhado entre diferentes nós logísticos. Em resumo, nesta camada é onde ocorre a gestão operacional de um armazém.

Figura 32 – Os componentes que formam um armazém inteligente.



Fonte: Adaptado de Zhen e Li (2022).

A automação de equipamentos permite que um armazém inteligente atinja elevados níveis de automatização das atividades, aumentando a produtividade do armazém e reduzindo

os trabalhos manuais. Com a redução dos trabalhos manuais, pode-se evitar acidentes, como no caso de operações de empilhadeiras (Zhang, Gilbert e Rasmussen, 2012). Esse componente é suportado pela interconexão da informação e forma um dos pilares do armazém inteligente. De maneira geral, portanto, a automação fornece o suporte técnico para a operação de um armazém inteligente.

A integração de processos, aliada à automação de equipamentos, é suportada pela interconexão da informação e realiza um planejamento geral entre os diferentes processos de um armazém. Esse planejamento visa a otimização desses processos, além de tratar eventuais problemas que possam surgir na operação de um armazém inteligente. Dessa maneira, o objetivo desse componente é obter a coordenação entre os processos.

Por fim, o topo desse *framework* é formado pela sustentabilidade ambiental. Suportado pelos componentes de integração de processos e automatização de equipamentos, esse componente preocupa-se com os problemas relevantes ao meio-ambiente, tais como consumo energético e emissão de carbono, todos eles alinhados ao conceito de logística verde (Liu e Ma, 2022).

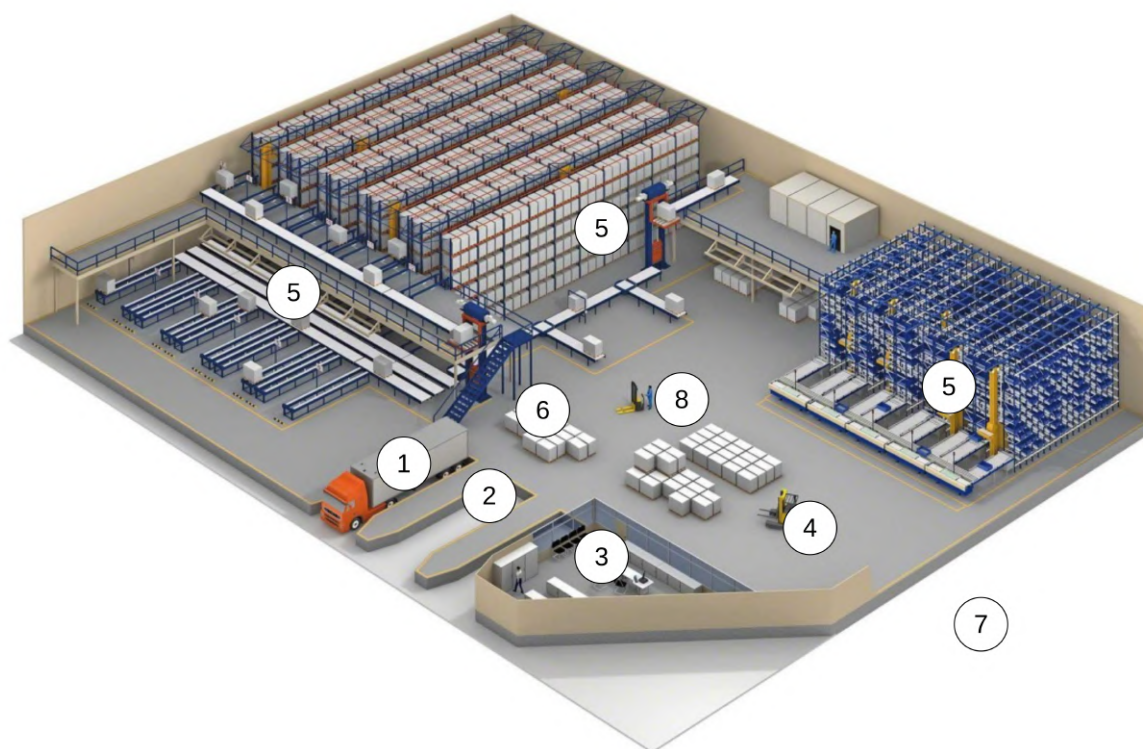
2.2.6 Aplicação da *IoT* em Armazéns Inteligentes

No contexto de um armazém logístico, a *IoT* permite o uso de diversos sensores que podem ser aplicados em diferentes áreas (Mostafa, Hamdy e Alawady, 2019; Song et al., 2021), conforme resumido na Figura 6 e ilustrados pelos círculos numéricos em branco na Figura 33. No transporte da carga (círculo 1), o armazém recebe dados coletados ao longo do trajeto pelo veículo (Song et al., 2021) - como temperatura, umidade, pressão atmosférica e informações de rota - permitindo antecipar as condições de recebimento. Pode-se obter esses dados diretamente por sensores embarcados ou indiretamente via aplicativos de terceiros, como o *Waze*, integrados a um *TMS*.

Na doca (círculo 2), interface entre o armazém e o ambiente externo, podem instalar-se sensores para monitorar temperatura ambiente, umidade do ar, pressão, luminosidade, acúmulo de precipitação e umidade do solo. Esse mesmo conjunto de sensores pode ser disposto ao redor do perímetro externo do galpão (círculo 7).

No escritório (círculo 3), a *IoT* monitora as condições de trabalho por meio de sensores de temperatura, umidade, luminosidade, detecção de fumaça, ruído e CO_2 . Nesse ambiente, ainda, o consumo energético pode ser reduzido através de sensores de luminosidade.

Nos equipamentos de movimentação de carga (círculo 4), leitores *RFID* podem ser utilizados para a identificação de cargas (Lee et al., 2018), bem como acelerômetros e sensores de luminosidade permitem tanto detectar possíveis acidentes quanto avaliar a iluminação interna. Como esses dispositivos possuem maior demanda energética devido ao seu uso contínuo, sua frequência de transmissão de dados pode ser configurada para ser superior à dos demais pontos de sensoriamento.

Figura 33 – Aplicação da *IoT* em um armazém inteligente.

Fonte: Adaptado de Calafate (2020).

Nas estruturas de separação de produtos e armazenagem (círculos 5), podem ser instalados sensores capazes de identificar acidentes durante a identificação de produtos, a movimentação de cargas - como acelerômetros - e monitorar as condições ambientais do armazém (Mostafa, Hamdy e Alawady, 2019), por meio de sensores de temperatura, umidade, luminosidade, ruído, detecção de movimento e presença de fumaça. Além disso, a própria carga (círculo 6) pode conter dados que permitam a sua identificação e rastreabilidade por meio da tecnologia *RFID* (Lee et al., 2018).

Por fim, os próprios trabalhadores que atuam no armazém (círculo 8) podem fornecer dados relacionados à sua condição de saúde e ergonomia por meio de dispositivos vestíveis (*wearables*), permitindo o monitoramento contínuo de aspectos como postura, esforço físico e sinais vitais (Longo, Padovano e Umbrello, 2020; Bavaresco et al., 2021). Os *smartwatches* atuais, por exemplo, são capazes de coletar dados de batimentos cardíacos, pressão arterial e saturação.

Tabela 6 – Sensores aplicados em diferentes áreas de um armazém inteligente. Entre parênteses, identificação do círculo correspondente na Figura 33.

Tipo de sensor	Local de aplicação
Temperatura	Transporte da carga (1), doca (2), escritório (3), estruturas de armazenagem (5), entorno externo (7)
Umidade	Transporte da carga (1), doca (2), escritório (3), estruturas de armazenagem (5), entorno externo (7)
Pressão atmosférica	Transporte da carga (1), doca (2), entorno externo (7)
Sensoriamento a partir de aplicações de terceiros (<i>TMS, Waze, etc</i>)	Transporte da carga (1)
Luminosidade	Doca (2), escritório (3), equipamentos de movimentação (4), estruturas de armazenagem (5), entorno externo (7)
Pluviômetro	Doca (2), entorno externo (7)
Umidade do solo	Doca (2), entorno externo (7)
Fumaça	Escritório (3), estruturas de armazenagem (5)
CO ₂	Escritório (3)
Acelerômetro	Equipamentos de movimentação (4), estruturas de armazenagem (5)
Ruído	Escritório (3), estruturas de armazenagem (5)
Movimento	Escritório (3), estruturas de armazenagem (5)
<i>RFID</i>	Carga (6)
Sinais vitais por <i>wearables</i>	Trabalhadores (8)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3 METODOLOGIA

Este Capítulo apresenta as diretrizes metodológicas adotadas na tese. Inicialmente, expõe-se o posicionamento epistemológico que fundamenta o trabalho, seguido por uma breve explanação do método *Design Science Research*. Por fim, descreve-se o protocolo de pesquisa empregado neste trabalho.

3.1 POSICIONAMENTO EPISTEMOLÓGICO

O presente trabalho parte da questão de pesquisa: *Como a Internet das Coisas pode ser incorporada aos armazéns logísticos de modo a orientar sua arquitetura pelos princípios da Logística 5.0 - centricidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência -, ampliando sua função para além da eficiência interna e possibilitando que esses espaços atuem também como infraestruturas de interesse público, capazes de apoiar tanto a competitividade empresarial quanto o bem-estar social?* Essa indagação insere-se em um campo em que a realidade não é apenas observada, mas também construída e transformada por meio da intervenção humana. Em *The Sciences of the Artificial*, Simon (1996) argumenta que vive-se em um mundo predominantemente artificial, moldado por sistemas, organizações e artefatos criados pelo homem. Nesse sentido, o conhecimento científico não pode restringir-se à explicação de fenômenos naturais, mas deve também contemplar a produção intencional de soluções que modifiquem contextos sociotécnicos. Essa visão sustenta o paradigma da *Design Science Research (DSR)*, adotado nesta tese, o qual se orienta pela concepção, implementação e avaliação de artefatos capazes de simultaneamente resolver problemas práticos e gerar contribuições teóricas.

Do ponto de vista epistemológico, a *DSR* aproxima-se de uma perspectiva pragmática, pois assume que o valor do conhecimento está em sua utilidade e aplicabilidade para enfrentar desafios concretos. Ao mesmo tempo, vincula-se a uma abordagem construtivista, pois reconhece que a realidade logística - composta por armazéns, fluxos de suprimentos, dispositivos *IoT* e práticas de gestão - é continuamente construída e reconstruída mediante a ação humana e o desenho de novos artefatos. Assim, a produção científica ocorre pelo fazer (Pimentel, Filippo e Santos, 2020), em um processo iterativo de criação e avaliação, no qual a fronteira entre prática e teoria se dissolve.

Ontologicamente, assume-se que os armazéns logísticos são sistemas artificiais que podem ser projetados como infraestruturas sociotécnicas, integrando não apenas eficiência operacional, mas também sustentabilidade, resiliência e centricidade no ser humano - pilares da Logística 5.0. Dessa forma, os artefatos desenvolvidos nesta pesquisa - arquitetura, dispositivo, protótipo e *framework* - são entendidos não apenas como instâncias tecnológicas, mas como mediações que ampliam a compreensão da realidade e, ao mesmo tempo, contribuem para transformá-la. Esse posicionamento implica adotar ciclos iterativos de rigor, relevância e *design* (Hevner, 2007; Lacerda et al., 2013), que permitem alinhar a pesquisa às demandas soci-

ais e empresariais, assegurando tanto a validade científica quanto o impacto prático. Portanto, a epistemologia que fundamenta esta tese reconhece que a inovação tecnológica não é neutra, mas carrega escolhas e valores que, ao serem explicitados e operacionalizados, tornam-se elementos centrais para a produção de conhecimento significativo e transformador no campo da Logística 5.0.

3.2 CAMPO DE ESTUDOS

O campo de estudos desta pesquisa insere-se no universo dos sistemas de armazenagem, setor estratégico dentro da logística contemporânea e particularmente relevante no contexto da Logística 5.0. Os armazéns representam não apenas espaços de suporte operacional às cadeias produtivas, mas também potenciais infraestruturas sociotécnicas capazes de incorporar inovação, sustentabilidade e resiliência. Nesse sentido, a escolha de uma empresa parceira atuante nesse segmento é fundamental para viabilizar a análise empírica da tese. A Alpha Sistemas de Armazenagem¹ constitui o cenário ideal para essa investigação, uma vez que sua trajetória é marcada pela diversificação de negócios, pela adoção de soluções inovadoras e pelo protagonismo no mercado nacional de armazenagem. A empresa, localizada em Bento Gonçalves/RS, pertence ao grupo Alpha, que atua no mercado desde 1969 (Alpha, 2024; Pioneiro, 2024c) e conta atualmente com mais de 1100 colaboradores (Sul, 2024).

Conhecido inicialmente pela fabricação de esquadrias metálicas, o grupo expandiu suas operações e diversificou seus negócios ao longo das décadas, a partir da cultura empreendedora e inovadora oriunda dos descendentes italianos (Pioneiro, 2024c). Em 1977 surgiu a divisão de fabricação de móveis da empresa, com foco na produção de móveis de madeira e aço, com enfoque popular (Sul, 2024). Em 1984 a empresa redefiniu seu modelo de negócios, substituindo a fabricação de esquadrias de aço pela fabricação de sistemas de armazenagem, hoje seu principal negócio. Em 1994 a fábrica de móveis do grupo foi a primeira no Brasil a produzir móveis em MDF (Pioneiro, 2024c), destacando seu caráter inovador.

Nos anos 2000 o grupo expandiu ainda mais seus negócios: em 2002 surgiu a marca de móveis planejados, em 2010 fundou-se a empresa de logística e transportes e em 2013 inaugurou-se a fábrica de tubos e chapas de aço (Sul, 2024), com sede em Colatina/ES. Esta última permitiu a verticalização dos negócios do grupo, trazendo para dentro das dependências do grupo o armazenamento e beneficiamento das bobinas de aço utilizado nas cozinhas de aço e sistemas de armazenagem (Pioneiro, 2024c).

O negócio de sistemas de armazenagem, além de ser o carro chefe do grupo (Pioneiro, 2024c), realiza a fabricação de estruturas de armazenamento como *drive-in*, porta paletes, mezaninos, estantes cantiléver e sistemas autoportantes, esta última sendo uma estrutura onde o próprio sistema de armazenagem faz parte da construção do armazém, suportando tanto as cargas armazenadas quanto o telhado e as paredes que compõem o ambiente.

¹Nome fictício

Além da relevância econômica, a Alpha Sistemas de Armazenagem destaca-se também pelas suas iniciativas voltadas à sustentabilidade, incorporando práticas de reaproveitamento de materiais, eficiência energética e redução de resíduos em seus processos produtivos. Essas preocupações refletem não apenas uma tendência global de responsabilidade socioambiental, mas também um alinhamento com os princípios da Logística 5.0, que busca integrar inovação tecnológica e centralidade humana ao desenvolvimento sustentável.

Outro aspecto importante é a capilaridade das operações do grupo, que, além da matriz no Rio Grande do Sul, mantém unidades produtivas e comerciais em outros estados brasileiros, como Espírito Santo e São Paulo, e presença internacional em mercados da América Latina. Essa estrutura multiunidades reforça o potencial de expansão e escalabilidade da solução proposta nesta tese, permitindo avaliar sua aplicabilidade em diferentes contextos operacionais e culturais.

Assim, a Alpha não apenas configura-se como um caso representativo do setor de armazenagem no Brasil, mas também como uma plataforma estratégica para explorar a viabilidade de soluções inovadoras com alcance nacional e internacional, em consonância com os desafios contemporâneos da logística e da gestão de cadeias de suprimentos.

3.3 O MÉTODO DESIGN SCIENCE RESEARCH

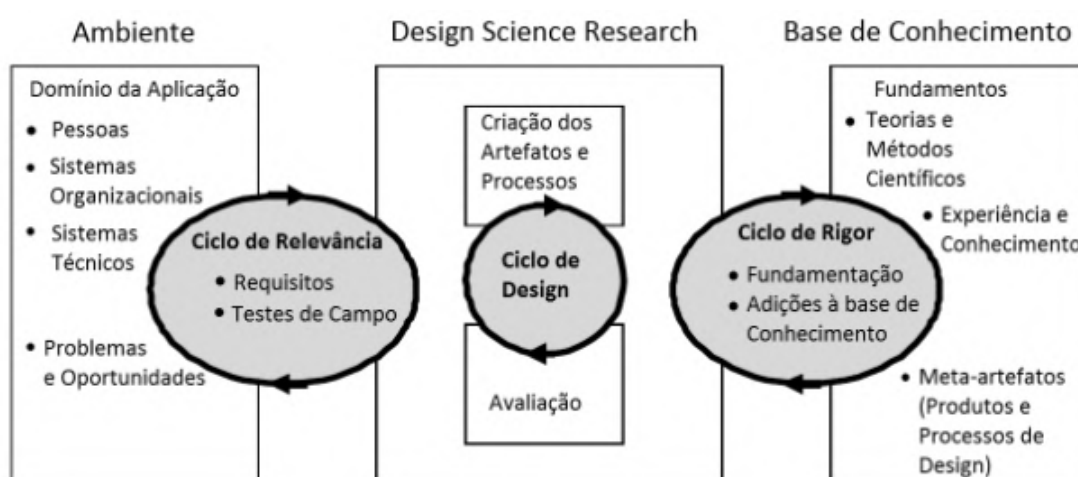
O método *Design Science Research* objetiva a produção de pesquisa direcionada ao projeto de artefatos que forneçam as melhores soluções para os problemas reais existentes (Lacerda et al., 2013; Santos, Koerich e Alperstedt, 2018). Criada nos anos 1990 para resolver problemas no campo de Sistemas da Informação (Weigand, Johannesson e Andersson, 2021), a *DSR* se enquadra nas ciências de desenho (*design science*), oferecendo uma abordagem em que, além de produzir ciência sobre a realidade, objetiva projetar uma realidade diferente, modificada por artefatos projetados para resolver problemas em determinados contextos (Pimentel, Filippo e Santos, 2020), como o logístico, caso deste trabalho. Ou seja, na *DSR* o pesquisador compromete-se com dois objetivos: resolver um problema prático num contexto específico por meio de um artefato e gerar novo conhecimento científico (Pimentel, Filippo e Santos, 2020).

Os artefatos, segundo a classificação proposta por March e Smith (1995) e adotada por Lacerda et al. (2013), podem ser organizados em quatro tipos: constructos, modelos, métodos e instanciações. Os artefatos do tipo constructo compõem o vocabulário de um domínio, funcionando como estruturas conceituais utilizadas tanto para descrever os problemas quanto para especificar as possíveis soluções dentro desse domínio. Já os artefatos do tipo modelo consistem em conjuntos de declarações ou proposições que expressam as relações entre constructos, sendo empregados para representar situações de problema e solução no processo de design. Embora geralmente apresentem um nível de abstração elevado e imprecisões quanto a detalhes operacionais, os modelos devem capturar a estrutura essencial da realidade a fim de se constituírem como representações úteis. Os artefatos do tipo método descrevem conjuntos de

passos sistemáticos necessários à execução de uma determinada tarefa, podendo ser comparados a algoritmos. Esses métodos frequentemente se articulam com os modelos, uma vez que suas etapas podem utilizar partes do modelo como entrada ou referência para sua aplicação. Por fim, os artefatos do tipo instanciação correspondem à materialização concreta dos artefatos em um ambiente específico. Em outras palavras, tratam-se de implementações práticas que demonstram a viabilidade e a eficácia dos modelos e métodos aos quais estão vinculadas.

No que se refere à execução do método, Pimentel, Filippo e Santos (2020) recomendam que a *DSR* seja conduzida com base nos três ciclos propostos por Hevner (2007): o Ciclo de Conhecimento, o Ciclo de Design e o Ciclo de Relevância, conforme ilustrado na Figura 34. A interação entre esses ciclos envolve o ambiente de aplicação, o método de pesquisa e a base de conhecimento relacionados ao tema em estudo.

Figura 34 – Os ciclos de desenvolvimento de uma *DSR*.



Fonte: Retirado de Hevner (2007); Pimentel, Filippo e Santos (2020).

O Ciclo de Conhecimento, também conhecido por Ciclo do Rigor ou Ciclo Empírico, utiliza as teorias e métodos científicos para garantir que a condução da pesquisa seja feita de acordo com os padrões de rigor teórico e metodológico de uma investigação científica (Lacerda et al., 2013). Este ciclo também permite o uso da experiência e conhecimento de especialistas para a condução da pesquisa, podendo gerar documentação referente ao processo de design da pesquisa, conhecidos como meta-artefatos. Como resultado, esse ciclo entrega uma atualização da base de conhecimento referente ao tema estudado.

O Ciclo de *Design* constitui o núcleo central da *DSR*, sendo responsável pelo projeto, desenvolvimento e avaliação dos artefatos propostos como solução para o problema identificado (Hevner, 2007). A avaliação dos artefatos permite identificar oportunidades de melhoria, promovendo o refinamento contínuo tanto do artefato quanto do próprio projeto de pesquisa, o que pode culminar na criação de novos artefatos. Segundo Hevner (2007), é neste ciclo que se concentra a maior parte do esforço de pesquisa quando se adota a abordagem *DSR*. Além de possibilitar o aprimoramento do artefato original, o Ciclo de *Design* pode também dar origem

a novos artefatos ao longo do processo iterativo. Como resultado desse ciclo, são entregues um ou mais artefatos que representam as contribuições efetivas da pesquisa.

Finalmente, o Ciclo de Relevância tem por objetivo investigar se o artefato resolve o problema dentro do contexto definido, ou seja, dentro de um ambiente formado por pessoas, sistemas organizacionais e sistemas técnicos, onde oportunidades podem surgir a partir de problemas identificados. Esse ciclo deve ser o primeiro a ser iniciado, pois nele são identificados os critérios para aceitação dos resultados alcançados com o artefato (Hevner, 2007). Esses critérios servem para identificar se há necessidade de mais uma iteração para evolução do artefato, enquanto os testes em campo verificam se os critérios de aceitação foram atendidos ou não. Nessa linha, da mesma forma que ocorre no Ciclo de *Design*, novos artefatos podem surgir nas interações deste ciclo. Este ciclo está ligado à premissa de Rigor da Pesquisa proposta por Lacerda et al. (2013). Como resultado desse ciclo, verifica-se se o artefato resolveu ou não o problema no contexto definido.

Por fim, considerando a questão de pesquisa desta tese, constata-se que os artefatos² desenvolvidos configuram inovações orientadas à sustentabilidade, conforme definido por Nicoletti e Appolloni (2024). Tratam-se de inovações cujo foco transcende os limites organizacionais, estendendo-se às pessoas e ao contexto socioambiental em que estão inseridas, impactando positivamente o entorno e contribuindo para o bem-estar coletivo.

3.4 PROTOCOLO DE PESQUISA

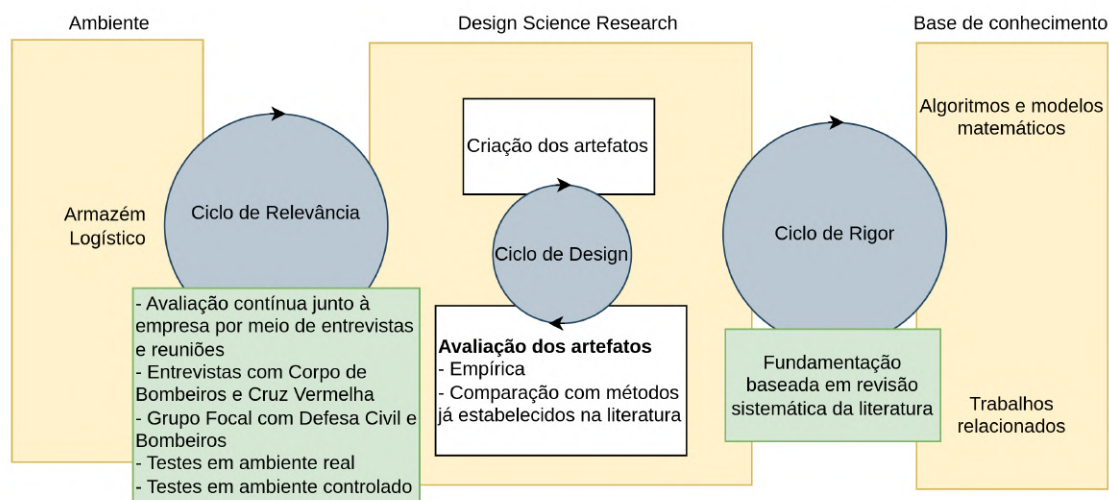
O protocolo de pesquisa adotado nesta tese baseia-se no modelo dos três ciclos proposto por Hevner (2007), conforme apresentado na Seção anterior, adaptando-se o formato com base na aplicação desenvolvida por Pimentel, Filippo e Santos (2020) em projetos com enfoque tecnológico. Nesse sentido, a Figura 3.4 ilustra os instrumentos utilizados ao longo do protocolo e sua correspondência com os ciclos da *DSR*, apresentando a integração entre teoria, prática e avaliação dos artefatos.

O ambiente estudado nesta tese - e que teve sua realidade impactada pelos artefatos gerados a partir da aplicação do método *DSR* - é o armazém logístico. Os artefatos desenvolvidos durante o Ciclo de Design foram analisados e aprimorados por meio de uma avaliação empírica fundamentada em modelos matemáticos existentes na literatura, conforme descrito nos cenários de teste a serem apresentados na Seção 4.2. Compararam-se os resultados empíricos obtidos por essas avaliações com os obtidos por métodos similares relatados na literatura, permitindo uma análise crítica do desempenho dos artefatos propostos.

Além disso, conduziu-se a avaliação dos artefatos durante o Ciclo de Relevância, por meio de um acompanhamento contínuo junto à empresa Alpha. Ao longo do desenvolvimento da tese, realizaram-se 32 reuniões, presenciais ou remotas, voltadas ao planejamento, à ava-

²Durante o desenvolvimento desta tese, optou-se pela descrição de quatro artefatos independentes, pois, embora neste trabalho funcionem como componentes de um sistema único - ou seja, de um artefato maior -, em outros contextos podem operar de forma independente.

Figura 35 – Visão geral do protocolo de pesquisa proposto, baseado nos ciclos de desenvolvimento de Hevner (2007).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

liação e ao monitoramento dos artefatos implementados. Esse processo permitiu não apenas o acompanhamento técnico das soluções desenvolvidas, mas também uma compreensão aprofundada a respeito do funcionamento das operações de armazenagem da empresa. Durante as visitas realizadas, tanto à empresa Alpha quanto a seus clientes, foi possível observar diferentes métodos e práticas de armazenagem utilizados na indústria, contribuindo significativamente para a apropriação do conhecimento sobre o contexto dos armazéns logísticos e para a adequação dos artefatos às necessidades reais do ambiente.

Complementando esse acompanhamento junto à empresa, realizaram-se entrevistas com duas organizações voltadas à proteção da sociedade: o Corpo de Bombeiros e a Cruz Vermelha. A entrevista com o Corpo de Bombeiros ocorreu em 19/12/2024, conduzida com o comandante responsável pela região de Caxias do Sul à época, que abrangia mais de 60 municípios. A entrevista foi guiada por um roteiro semiestruturado, cujas perguntas encontram-se no Anexo A.

Já a entrevista com a Cruz Vermelha foi realizada em 14/01/2025, envolvendo o então coordenador regional de Caxias do Sul e o diretor logístico da mesma regional. Assim como na entrevista anterior, utilizou-se um roteiro semiestruturado, com pequenas adaptações nas perguntas. O roteiro correspondente encontra-se no Anexo B.

Após a execução dos testes nos cenários a serem descritos no Capítulo 4, os resultados obtidos foram apresentados e avaliados por seis integrantes do Corpo de Bombeiros, da Defesa Civil Municipal e da Defesa Civil Estadual, por meio de um grupo focal realizado em 13/08/2025. Essa etapa permitiu realizar uma validação adicional sobre os achados desta tese. Participaram também do grupo o Secretário de Segurança Pública do município de Caxias do Sul e dois moradores do bairro Galópolis, a localidade mais afetada pelas chuvas de maio de

2024. O protocolo utilizado para a condução do grupo focal encontra-se no Anexo C.

Todas as entrevistas e relatos obtidos foram previamente consentidos pelos participantes, mediante assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido constante no Anexo D. Gravaram-se as entrevistas e relatos, que foram posteriormente transcritos e analisados qualitativamente.

Por sua vez, o Ciclo de Rigor forneceu o embasamento teórico necessário à construção dos artefatos, a partir de uma revisão da literatura apresentada no Capítulo 1 que permitiu identificar lacunas relevantes na base de conhecimento atual. Essa base não apenas sustentou a revisão sistemática realizada, como também serviu de fonte para os algoritmos e modelos matemáticos empregados na avaliação dos artefatos desenvolvidos, também a serem explanados na Seção 4.2.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este Capítulo inicia-se com a descrição dos artefatos desenvolvidos durante a aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 3. Na sequência, são detalhados os cenários utilizados para a avaliação desses artefatos. Por fim, procede-se à análise e discussão dos resultados obtidos a partir da aplicação dos artefatos nesses cenários. Para tanto, utilizaram-se os dados armazenados na plataforma, exportados em formato *JavaScript Object Notation (JSON)*¹, e posteriormente analisados através de *scripts* escritos em linguagem Python desenvolvidos especificamente para essa finalidade².

4.1 ARTEFATOS DESENVOLVIDOS

Esta Seção apresenta os artefatos desenvolvidos no âmbito desta tese. O primeiro artefato consiste na proposição de uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT) voltada à aplicação em armazéns inteligentes no contexto da Logística 5.0. O segundo artefato corresponde ao dispositivo IoT desenvolvido especificamente para o contexto de execução dessa arquitetura. Por fim, o terceiro artefato refere-se a um protótipo destinado ao processamento dos dados coletados, à sua visualização e à execução de ações automatizadas com base nas informações coletadas pelos dispositivos de sensoriamento que compõem essa arquitetura.

4.1.1 A Arquitetura *IoT* para Armazéns Inteligentes

A arquitetura³ *IoT* para armazéns inteligentes proposta representa um artefato no formato de um modelo e baseia-se no referencial teórico identificado durante a revisão sistemática da literatura elaborada no Capítulo 1. Conforme pode ser visualizado na Figura 36, a arquitetura compõe-se de três camadas distintas: a camada de execução, que constitui a base do modelo proposto, a camada de processamento, que ocupa o topo, e a camada de comunicação, que serve como elo entre ambas. Cada uma dessas camadas desempenha funções específicas: a camada de execução recebe dados brutos dos sensores, a camada de processamento realiza o processamento desses dados, e a camada de comunicação realiza a transferência de dados entre a execução e o processamento, dependendo da fase operacional.

O funcionamento da arquitetura começa com dispositivos de sensoriamento instalados em um armazém inteligente, especialmente nas estruturas de armazenagem, que coletam dados

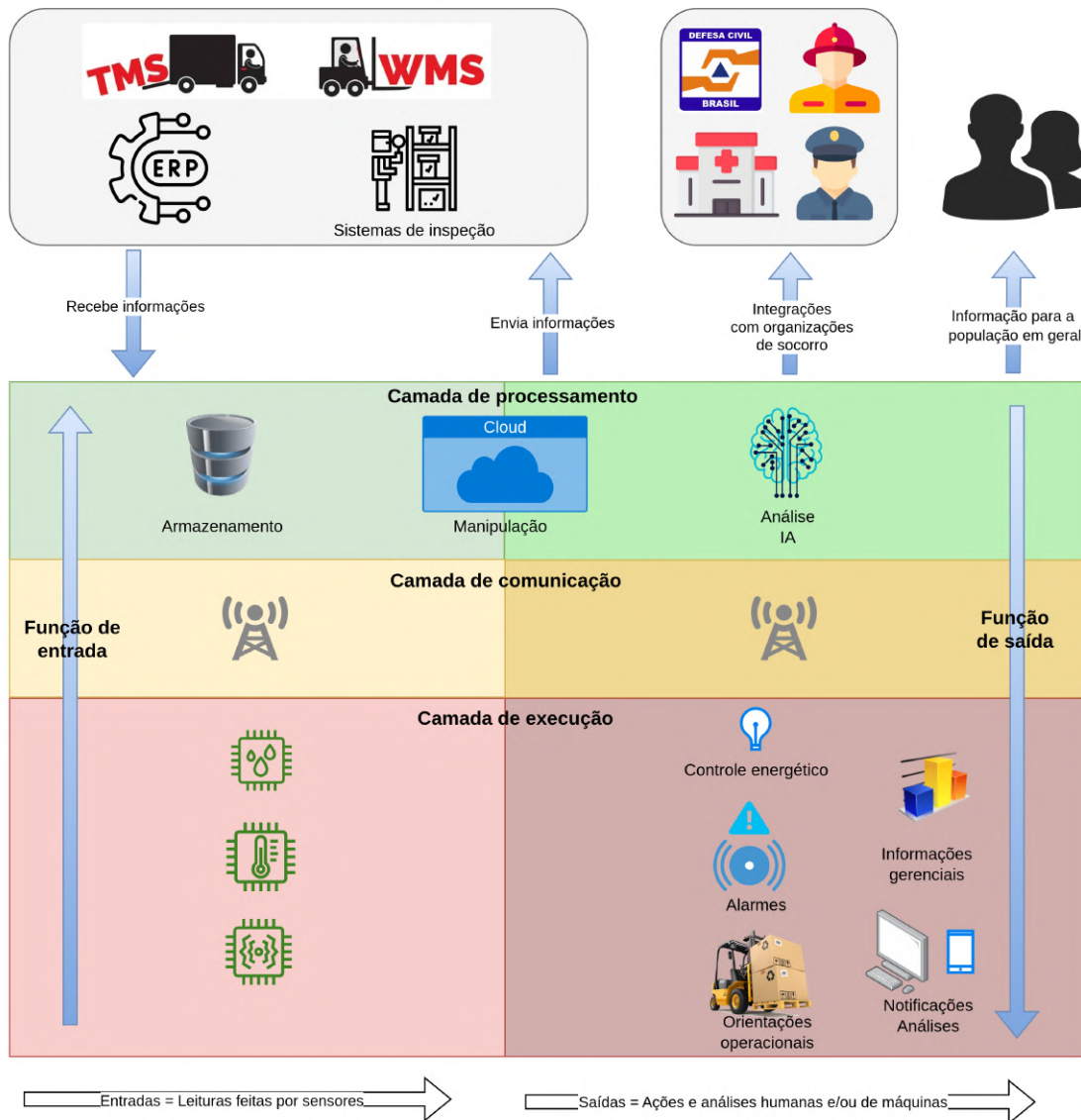
¹O *JSON* é um formato independente de linguagem para troca de dados, utilizado para representar informações estruturadas de forma legível por humanos e máquinas, sendo amplamente adotado na realização de análises estatísticas e na troca de dados entre aplicações.

²Os dados e os *scripts* utilizados para a realização da análise estão disponíveis em <https://github.com/sferrigo/thesis_results>.

³Utilizou-se o termo arquitetura para definir esse artefato, por se tratar de uma representação visual de um modelo físico de tecnologias a serem implantadas em conjunto que compõem uma solução única, em sentido semelhante ao empregado pela Ciência da Computação.

em tempo real sobre as condições de armazenamento, como aceleração, temperatura, umidade, movimentação, proximidade e luminosidade. Esses dispositivos constituem a função de entrada da camada de execução.

Figura 36 – Modelo conceitual da arquitetura *IoT* proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os dados coletados pelos dispositivos de sensoriamento são transmitidos para a nuvem através de redes de comunicação *IoT*. Essas redes, que desempenham a função de entrada nesse contexto, retransmitem os dados brutos dos diferentes dispositivos de sensoriamento para a nuvem, onde são armazenados e processados. No ambiente de um armazém logístico, recomenda-se o uso das redes *LP-WAN*, como *LoraWAN*, *Sigfox* e *NB-IoT*, devido à presença abundante de metais como ferro e aço, que podem interferir na cobertura de redes sem fio convencionais, como *Bluetooth* e *Zigbee*.

A nuvem, por sua vez, constitui a camada de processamento da arquitetura. Os dados

recebidos nessa camada finalizam a função de entrada - quando os dados brutos são armazenados - e iniciam a função de saída da arquitetura - quando o resultado do processamento efetuado por essa camada gera informação para a tomada de ação humana ou da máquina. Esse processamento envolve o uso de técnicas avançadas de inteligência artificial, como aprendizado de máquina e *big data*, com o objetivo de fornecer informações que possam ser analisadas e interpretadas por humanos. Essas informações permitem a tomada de ações automáticas ou supervisionadas por humanos.

Após o processamento na camada de aplicação, as informações são direcionadas aos dispositivos da camada de execução através da camada de comunicação, agora atuando na função de saída. Nesse contexto, as redes *LP-WAN* utilizadas na entrada podem ser combinadas com redes *Wi-Fi* e outras dedicadas à comunicação computacional geral. Enquanto as redes *LP-WAN* transmitem dados para atuadores *IoT*, as outras redes podem enviar informações para computadores, *smartphones* e outros dispositivos computacionais utilizados por gestores e operadores de armazéns logísticos.

As informações encaminhadas pela camada de comunicação são recebidas pelos dispositivos que operam na camada de execução. Aqui, esses dispositivos podem executar operações automáticas através de atuadores *IoT* ou fornecer informações para orientar ações humanas operacionais ou gerenciais. Por exemplo, dados captados por um acelerômetro indicando um forte impacto na estrutura de armazenagem podem acionar alarmes sonoros ou visuais na área afetada. Além disso, podem enviar alertas para *smartphones* ou computadores, sugerindo medidas como isolamento da área ou remoção dos materiais afetados, visando prevenir acidentes.

Essa característica faz com que a arquitetura se alinhe com a premissa de centralidade no ser humano da Logística 5.0, destacando a predominância do ser humano sobre a máquina nas decisões operacionais. Ao contrário dos armazéns totalmente automatizados, onde as ações são realizadas de forma automática e sem supervisão humana, neste modelo específico, as ações podem ser configuradas pelo operador logístico para execução automática ou manual, proporcionando flexibilidade e controle adaptável às necessidades operacionais.

A arquitetura proposta também permite a integração dos dados coletados e processados com aplicações externas através da camada de processamento. Essa integração permite o intercâmbio de informações com outros sistemas utilizados em operações logísticas, como sistemas de gestão empresarial (*ERP*), sistemas de gerenciamento de inspeção, sistemas de gerenciamento de transporte (*TMS*) e sistemas de gerenciamento de armazém (*WMS*). Essa interconexão melhora a eficiência das operações logísticas e otimiza as atividades de suporte à estrutura de armazenagem. Por exemplo, inspetores de segurança podem direcionar avaliações da estrutura de armazenagem em áreas onde ocorreram alertas de impacto ou movimentação brusca de cargas. Os resultados dessas inspeções são então incorporados à base de dados da camada de processamento, aprimorando a precisão das análises subsequentes. Além disso, sistemas como *WMS* e *TMS* podem fornecer informações detalhadas sobre os produtos a serem armazenados, permitindo que o ambiente de armazenamento seja adequadamente preparado para receber os

materiais específicos.

A longo prazo, os dados coletados por diversos sensores, combinados com as informações fornecidas pelos outros sistemas de informação logísticos, podem resultar no aprimoramento da própria estrutura do armazém. Por exemplo, podem surgir informações estatísticas que orientem melhorias no sistema de armazenagem, com a criação de novas estruturas de proteção ou rearranjo das estruturas atuais.

Além das aplicações logísticas convencionais, as informações geradas pela camada de processamento também podem ser compartilhadas com sistemas externos, servindo como guia para organizações de proteção civil, como defesa civil, bombeiros e polícia, ou até mesmo o fornecimento desses dados a projetos públicos de colaboração de dados, como o *Data Collaboratives*⁴. Por exemplo, dados de acelerômetros instalados em armazéns podem não apenas identificar impactos na estrutura, mas também alertar sobre possíveis abalos sísmicos ou enxurradas, orientando as ações desses órgãos. Acidentes de trabalho detectados pelos sensores, combinados com dispositivos de monitoramento corporal, podem rapidamente informar equipes de socorro sobre as condições do trabalhador afetado. Além disso, leituras de temperatura, umidade, luminosidade e partículas orgânicas suspensas podem ajudar equipes de bombeiros a detectar potenciais incêndios tanto dentro do armazém quanto em seu entorno. Informações não críticas, como previsão do tempo, também podem ser enviadas diretamente para a população em geral - por exemplo, uma postagem numa rede social como o *Instagram* pode informar as condições de tempo previstas para o local, com base no sensoriamento do armazém. Esse novo tipo de aplicação reflete as premissas da Logística 5.0 de forma coletiva, promovendo benefícios que ultrapassam os limites organizacionais e se estendem à sociedade em seu entorno.

Adicionalmente, a arquitetura proposta também atende à premissa de sustentabilidade da Logística 5.0 no contexto interno do armazém, ao monitorar continuamente o ambiente de armazenamento, aumentando a eficiência operacional. Por exemplo, o uso eficiente de energia inclui o desligamento automático de dispositivos como luminárias e climatizadores conforme as condições ambientais. A iluminação pode ser configurada para acender apenas onde e quando necessário, como em áreas de movimentação de carga. Os climatizadores são acionados somente quando há necessidade de controle de temperatura e umidade para as cargas armazenadas.

Dessa forma, a arquitetura proposta atende às premissas da Logística 5.0, que incluem centralidade no ser humano, resiliência e sustentabilidade, tanto no contexto interno do armazém, quanto no seu entorno. Retoma-se a centralidade no ser humano no modelo, pois ele é o protagonista na tomada de decisões baseadas nos dados coletados pelos dispositivos *IoT*, bem como é o receptor de parte dessas informações, seja indiretamente através de organizações de socorro, ou diretamente via redes sociais. Promove-se a resiliência tanto internamente, na prevenção e tratamento de acidentes, quanto externamente, fornecendo informações essenci-

⁴As colaborações de dados são uma nova forma de colaboração, além do modelo de parceria público-privada, na qual participantes de diferentes setores - em particular empresas - trocam seus dados para criar valor público (Lab, 2025). Maiores informações sobre o projeto podem ser obtidas em <<https://datacollaboratives.org/>>.

ais para organizações de socorro. Finalmente, alcança-se a sustentabilidade, tanto ambiental quanto da operação logística, por meio do aumento da eficiência operacional obtida por meio dos sensores.

No contexto desta tese, parte da arquitetura proposta foi desenvolvida por meio de artefatos construídos em parceria com a empresa *Alpha* e validados tanto em seu ambiente quanto em outros armazéns logísticos. O detalhamento desses artefatos apresenta-se nas Seções 4.1.2 e 4.1.3; discute-se sua aplicação no escopo da arquitetura na Seção 4.1.4; detalha-se os cenários dos testes na Seção 4.2; e apresenta-se os resultados obtidos no Capítulo 4.

4.1.2 O Dispositivo *IoT* de Sensoriamento para Armazéns

O dispositivo *IoT* desenvolvido nesta tese, apresentado na Figura 37, constitui um artefato do tipo instanciação e é uma evolução de outro artefato de instanciação originalmente concebido pela empresa *Alpha*, parceira institucional vinculada à bolsa DAI. Ambos artefatos chegaram ao status de produto mínimo viável (*Minimum Viable Product - MVP*).

O artefato inicialmente desenvolvido tinha como objetivo o monitoramento de impactos em estruturas de armazenagem em armazéns logísticos, utilizando um sensor de acelerômetro como base tecnológica. Por si só, a concepção desse artefato já apresentava uma série de desafios tecnológicos e financeiros a serem superados, como a identificação do tipo de impacto ocorrido; o consumo energético reduzido, de modo a permitir sua operação por, no mínimo, dois anos com apenas três pilhas AA; a operação confiável em uma faixa de temperatura entre 0°C e 50°C e em condições de umidade relativa entre 20% e 80%; e a manutenção de um custo reduzido, dado que o projeto demanda a instalação do dispositivo a cada duas colunas da estrutura de armazenagem. Considerando a premissa de eficiência energética, a empresa optou pelo uso da tecnologia *LoraWAN* para comunicação de dados e da tecnologia *Bluetooth/BLE* para a configuração do dispositivo.

Conforme previsto no protocolo de pesquisa (Seção 3.4), foram realizadas entrevistas e houve participação ativa em reuniões com a equipe de P&D da empresa *Alpha* que, combinadas com pesquisas bibliográficas e uma visita a um armazém logístico de um dos clientes da empresa, percebeu-se que o artefato original já possuía ligação com os pressupostos de sustentabilidade e centricidade no ser humano previstos pela Logística 5.0. Isso deve-se ao fato de que o artefato inicial pode reduzir a quantidade de acidentes na movimentação de cargas, acionando medidas em caso de impactos graves - entre elas o isolamento do local, a retirada de materiais da estrutura impactada ou a solicitação de realização de inspeção do local. Nesse sentido, acidentes de trabalho com lesões podem ser evitados, e a perda de bens armazenados pode ser reduzida.

Todavia, após a realização de entrevistas com representantes do Corpo de Bombeiros e da Cruz Vermelha descritos no protocolo de pesquisa (Seção 3.4), identificou-se uma oportunidade de aprimoramento do dispositivo, considerando as premissas da Logística 5.0. Os relatos

Figura 37 – O dispositivo *IoT* construído.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

obtidos durante as entrevistas permitiram identificar os seguintes pontos:

- O Corpo de Bombeiros e a Cruz Vermelha apontaram o uso de pluviômetros e outros sensores em geral em armazéns logísticos como uma prática que aumenta a precisão dos diagnósticos, devido à maior densidade de sensores, e proporciona maior redundância na coleta dos dados. Pode, portanto, ser uma informação complementar à rede de monitoramento já existente;
- A Cruz Vermelha indicou o sensor de partículas suspensas como uma possível evidência de incêndio;
- O Corpo de Bombeiros destacou o sensor de fumaça como elemento para a prevenção e o combate a incêndios, inclusive com potencial de integração a sistemas de alerta em hospitais. Ressaltou-se que essa tecnologia pode reduzir significativamente o tempo de resposta, uma vez que a percepção inicial dos sinistros costuma ser externa nos ambientes que não possuem sistemas de detecção de incêndio;
- A Cruz Vermelha também apontou a interrupção no envio de dados como um sinal potencial de ocorrência de sinistros, podendo representar, por exemplo, falha de energia, incêndio ou colapso estrutural.

A partir desses achados, combinados com uma pesquisa na literatura existentes, foram apresentadas à empresa Alpha três sugestões de evolução do dispositivo, com o objetivo de

ampliar suas possibilidades de aplicação. Em reunião com a empresa chegou-se a uma quarta proposta que originou a nova versão do dispositivo, apresentado na Figura 37. As sugestões apresentadas e discutidas, juntamente com suas respectivas possibilidades de aplicação, estão descritas na Tabela 7.

Entre os fatores que levaram à escolha da quarta sugestão, destacou-se a possibilidade de utilizar um único componente eletrônico⁵ capaz de realizar as leituras necessárias, além de exigir alterações mínimas no *hardware* e no *software* do artefato original. A empresa também reconheceu uma nova oportunidade de negócio, uma vez que esse modelo complementar poderia ser instalado em menor quantidade - a cada uma ou duas dezenas de colunas - substituindo um dos dispositivos já previstos na estrutura de sensoriamento original.

Tabela 7 – Sugestões de novos dispositivos de sensoriamento *IoT* apresentados e suas possíveis aplicações.

Sugestão	Sensores envolvidos	Possibilidades de aplicação
1	Acelerômetro, temperatura e umidade	Pode oferecer controle da climatização em ambientes internos, fornecer controle térmico para os funcionários (Região, 2025) e inferir possíveis incêndios internos e externos (Díaz-Ramírez et al., 2012).
2	Acelerômetro e luminosidade	Pode inferir possíveis incêndios pelo aumento da luminosidade (Choi e Jung, 2024), além de oferecer controle energético do armazém controlando a luminosidade do local.
3	Acelerômetro e sensor de gases	Pode inferir possíveis incêndios, indicar problemas de saúde e possíveis transmissões pela quantidade de CO ₂ no ambiente (Malki-Epshtein et al., 2022).
4	Acelerômetro, temperatura, umidade e pressão atmosférica	Além das possibilidades indicadas na sugestão 1, pode ser útil para a previsão de chuvas (Gutierrez-Lopez, Cruz-Paz e Muñoz Mandujano, 2019).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.1.3 O Protótipo de Processamento, Visualização e Tomada de Ações

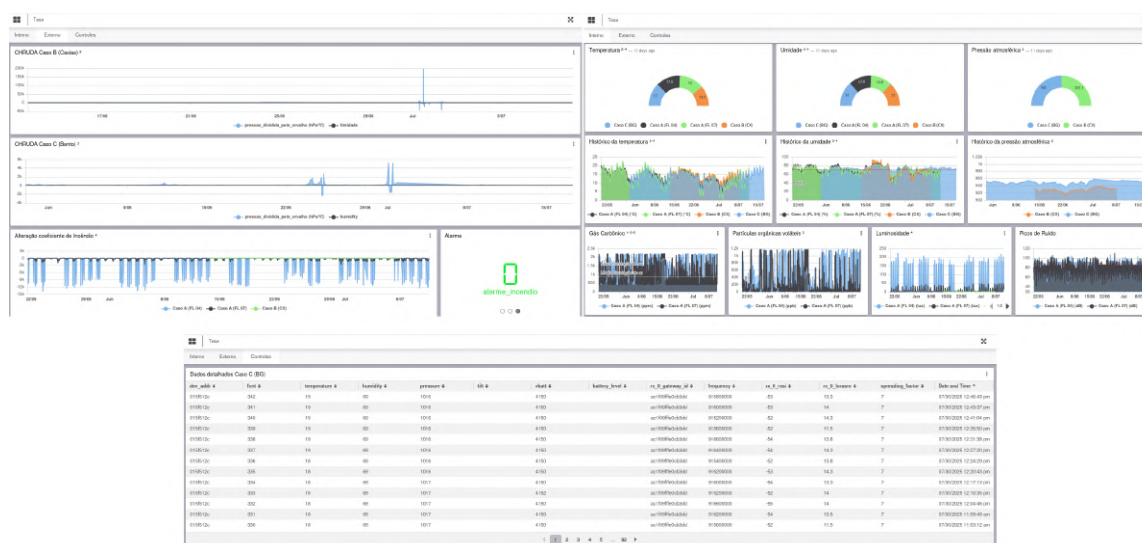
O protótipo⁶ de processamento, visualização e tomada de ações é outro artefato de instância desenvolvido com o objetivo de armazenar os dados recebidos dos sensores e executar determinadas ações de notificação durante os testes descritos no Capítulo 4.2. Elaborou-se o artefato por meio da plataforma TagoIO⁷, contratada com recursos da bolsa CNPQ/DAI, que

⁵O componente eletrônico é o BMP280, um sensor fabricado pela empresa Bosch que permite a leitura simultânea de temperatura, umidade e pressão atmosférica. Maiores informações estão disponíveis na especificação técnica do fabricante, disponível em <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bmp280-fl000.pdf>.

⁶Define-se este artefato como um protótipo por possuir apenas os recursos estritamente necessários para a validação do artefato do tipo modelo referente à arquitetura *IoT* para armazéns inteligentes descrito na Seção 4.1.1.

⁷O TagoIO é uma plataforma de *IoT* que permite a coleta, o armazenamento e a análise de dados provenientes de dispositivos nele conectados. Maiores informações estão disponíveis em <<https://tago.io/>>

Figura 38 – *Dashboards* do artefato de processamento e tomada de ações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

compõe-se de três *dashboards*, mostrados na Figura 38, destinados à visualização dos dados⁸, além de um módulo de análise responsável por processar as informações recebidas e executar ações automáticas, como o envio de alertas via Telegram.

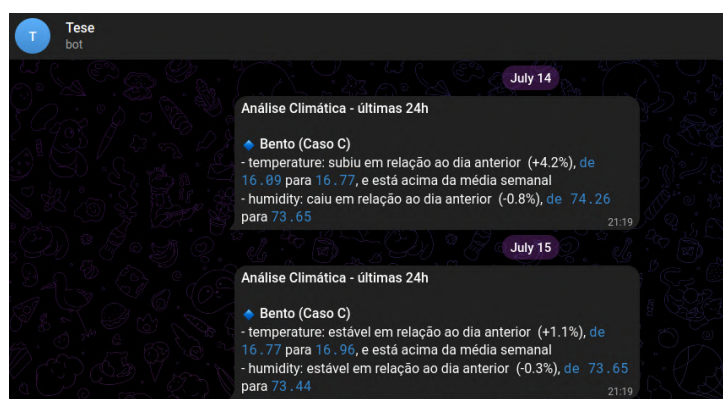
O primeiro *dashboard*, situado na parte superior esquerda da Figura 38, mostra a visualização de dados externos após realizar o tratamento das informações captadas para oferecer previsões climáticas e identificar indícios de incêndios. O segundo *dashboard*, localizado à direita na mesma Figura, apresenta a visualização de dados internos do ambiente monitorado, exibindo gráficos referentes à temperatura, umidade, pressão atmosférica, picos de ruído, compostos orgânicos voláteis (*eTVOC - Equivalent Total Volatile Organic Compounds*), gás carbônico equivalente (*eCO₂ - Equivalent Carbon Dioxide*) e luminosidade. O terceiro e último *dashboard*, apresentado na parte inferior da Figura 38, concentra os dados de controle do próprio artefato descrito na Seção 4.1.2, possibilitando o monitoramento de seu funcionamento e a validação de sua operação em tempo real.

Além dos *dashboards*, o artefato conta com um módulo de processamento e emissão de alertas via Telegram, com o objetivo de informar sobre o funcionamento do ambiente de testes e fornecer atualizações climáticas, conforme mostrado na Figura 39. O envio dessas notificações é realizado por meio de um *bot* integrado ao TagoIO⁹.

⁸Os *dashboards* podem ser acessados em <<https://660e7d87eacf83000a7bdf6d.tago.run/dashboards/info/67e6ead8104761000a5f1f5a?anonymousToken=00000000-660e-7d87-eacf-83000a7bdf6d>>

⁹Um *bot* é um programa executado inteiramente dentro do Telegram que permite automatizar tarefas específicas (Telegram, 2025).

Figura 39 – Exemplo de alertas enviados via Telegram pelo *bot* vinculado ao artefato.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.1.4 Combinação dos Artefatos

Considerando a arquitetura apresentada na Seção 4.1.1, os artefatos desenvolvidos nas Seções 4.1.2 e 4.1.3 são parte dos componentes que a compõem, conforme ilustrado na Figura 40. Na referida figura, representa-se a arquitetura pelo item (1); o dispositivo *IoT* desenvolvido como um componente de entrada da camada de execução realiza a coleta e transmissão dos dados (2); e o protótipo de processamento, visualização e tomada de ações corresponde às funções de armazenamento, processamento e visualização dos dados atribuídas à camada de processamento (3), além de realizar a recombinação dos dados coletados de forma a trazer informações úteis para as organizações de proteção civil. Essa combinação, portanto, constitui uma demonstração empírica da validade da arquitetura proposta na Seção 4.1.1. Apenas para a camada de comunicação não se criaram artefatos para sua validação, visto que podem ser utilizadas diversas tecnologias de comunicação *IoT*, já descritas na Seção 2.1.4 desta tese.

4.2 CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO

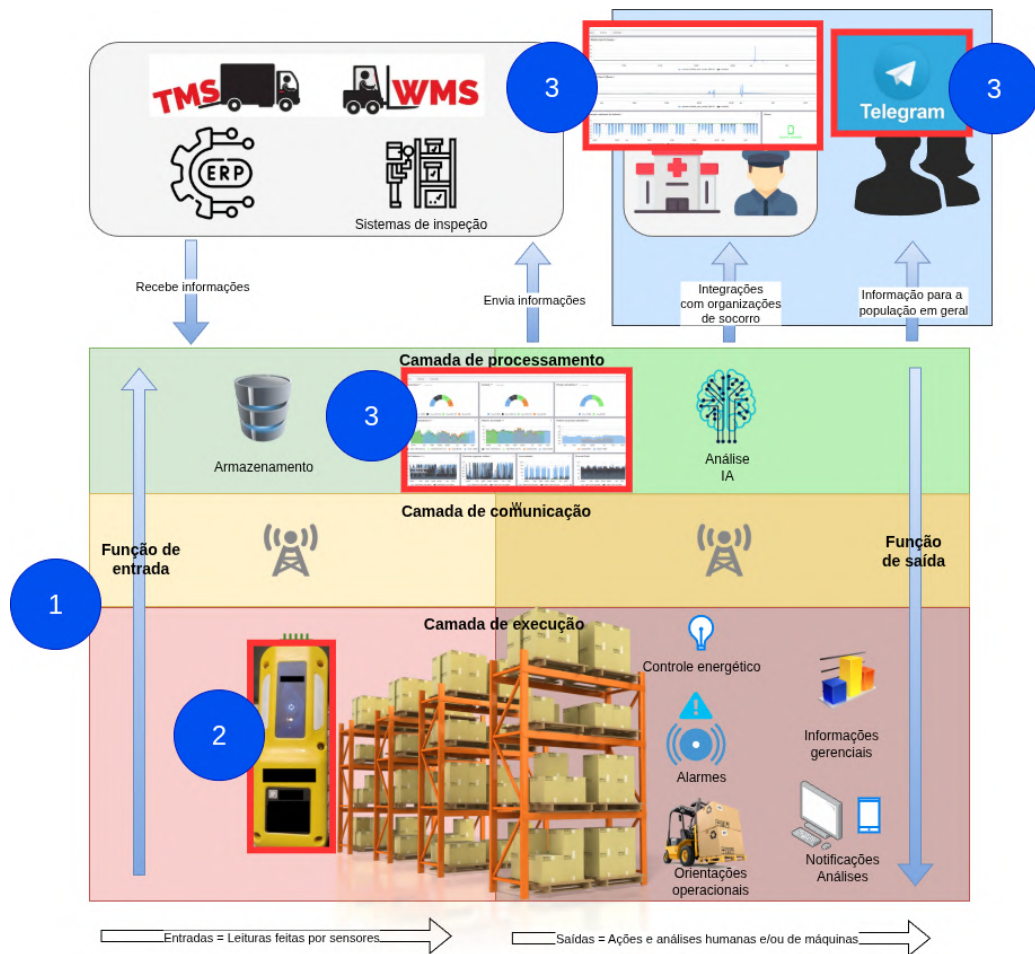
Concebeu-se dois cenários distintos para a avaliação dos artefatos desenvolvidos: um cenário de teste em ambiente real e outro em ambiente controlado, voltado à simulação de alertas de incêndio, cuja avaliação em condições reais não se mostrou viável. Ambos os cenários são descritos nas Seções a seguir.

4.2.1 Cenários em Ambiente Real

Para avaliação dos artefatos desenvolvidos na tese, instalaram-se dispositivos de sensoriamento nas cidades de Caxias do Sul, Flores da Cunha e Bento Gonçalves, todas localizadas na serra gaúcha, no Estado do Rio Grande do Sul, conforme destacado na Figura 41.

Os critérios para a escolha dos locais consideraram a disponibilidade das empresas em ceder espaço para a instalação dos dispositivos de sensoriamento, aspectos técnicos relaciona-

Figura 40 – Função dos artefatos dentro da arquitetura *IoT* proposta, outro dos artefatos produzidos na tese.



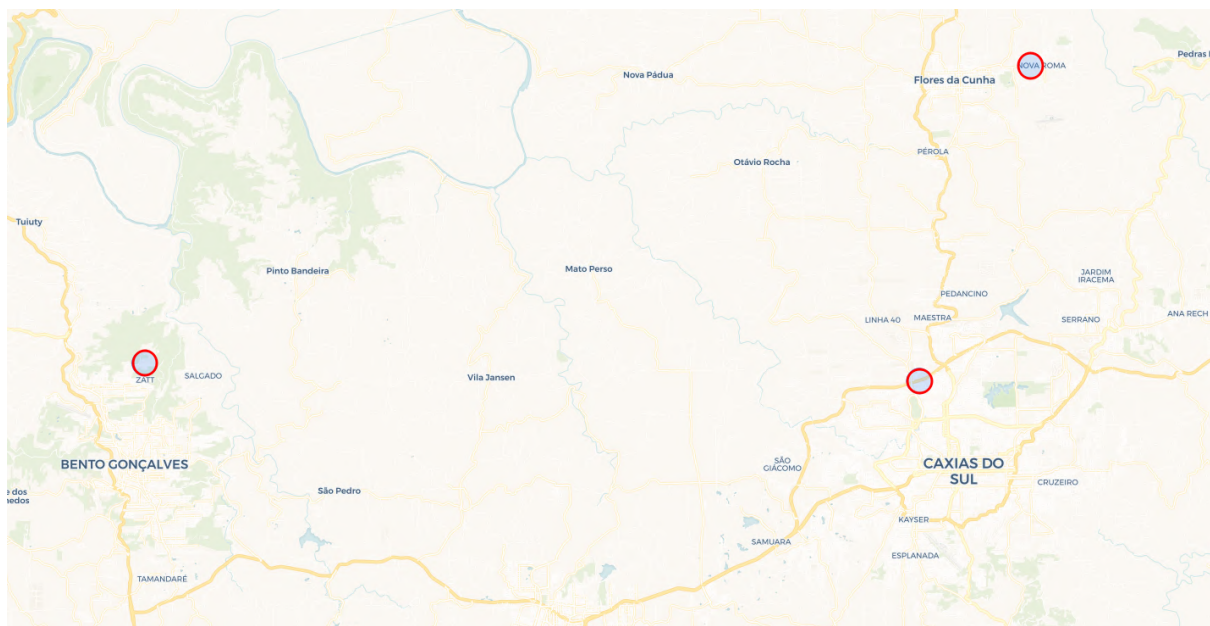
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

dos à conectividade, bem como a avaliação da localização quanto ao potencial de aplicação dos dados coletados no entorno dos armazéns. Registrou-se o consentimento das empresas para a realização dos testes das empresas em termo cujo modelo encontra-se no Anexo D.

Com mais de 460 mil habitantes (IBGE, 2022), Caxias do Sul é o principal município da serra gaúcha. Conhecida por sua forte herança italiana, é referência nacional no ramo metalúrgico. Com paisagens que mesclam áreas urbanas e rurais, o município também se destaca pelo empreendedorismo e pela força do setor industrial. Nele, o local selecionado foi uma transportadora que possui um armazém destinado à guarda dos produtos transportados. A empresa está localizada na região norte da cidade, no Bairro Pioneiro, às margens da RS-453, também conhecida como Rota do Sol. Nas proximidades desse local registrou-se uma ocorrência de edificação em risco de colapso, identificada pela Defesa Civil Municipal durante as chuvas de maio de 2024, conforme informações disponibilizadas pelo sistema GeoCaxias¹⁰ ilustrado na

¹⁰O GeoCaxias é um sistema de informações geográficas gerenciado pelo município de Caxias do Sul. Os registros de ocorrências mapeados Defesa Civil Municipal durante as chuvas de maio de 2024 estão disponíveis em <https://gis.caxias.rs.gov.br/server/rest/services/Danos_causados_pelas_chuvas_Maio_2024/MapServer/1>.

Figura 41 – Localização dos dispositivos de sensoriamento *IoT* usados nos cenários de teste em ambiente real.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 42.

O dispositivo inicialmente instalado no local foi o modelo SMC30¹¹, da fabricante Senzemo, capaz de coletar dados de temperatura, umidade e pressão atmosférica. No entanto, após dois dias de funcionamento, o dispositivo apresentou problemas de conectividade e foi substituído por um protótipo desenvolvido em *protoboard*¹², utilizado exclusivamente para fins de medição. O período de operação deste protótipo estendeu-se de 13/06/2025 a 08/07/2025¹³, com intervalo de envio de dados a cada 10 minutos. O protótipo, ilustrado à esquerda na Figura 43, utilizava um microcontrolador *Heltec ESP WiFi LoRa v2*¹⁴. Suas principais especificações técnicas são apresentadas na Tabela 8.

Uma dificuldade adicional identificada após a substituição foi a necessidade de instalação de um *gateway LoraWAN* próximo ao protótipo, uma vez que a cobertura das redes públicas *LoraWAN* disponibilizadas pelo Polo de Informática de Caxias do Sul (Trinopolo)¹⁵ e pelo projeto de Sensoriamento *IoT* do InovaRS¹⁶ não era suficiente para garantir a transmissão estável dos dados pelo dispositivo *Heltec*.

¹¹Informações sobre o modelo estão disponíveis em <<https://senzemo.com/products/indoor-microclimate-sensor/>>.

¹²O código-fonte desenvolvido está disponível em <https://github.com/sferrigo/tese_bme280>

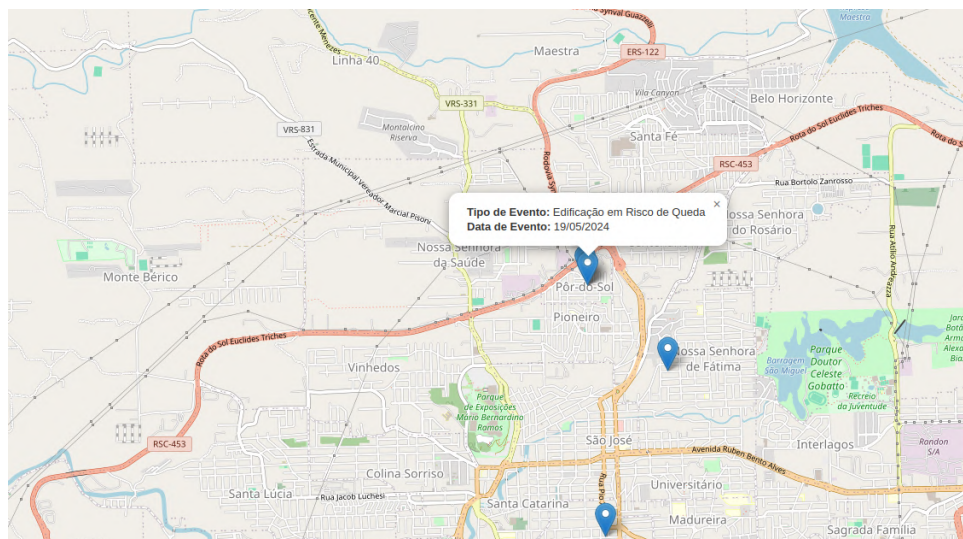
¹³Entre os dias 17 e 18/06/2025 e entre os dias 24 e 27/06/2025 não houve transmissão de dados devido à interrupção no fornecimento de energia elétrica ao *gateway*. Além disso, entre os dias 03 e 04/07/2025 não foram registrados dados pelo dispositivo em função da realização de teste de perda de conectividade.

¹⁴Mais informações sobre o dispositivo disponíveis em <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32v2/#Specifications>>

¹⁵Maiores informações sobre essa rede pública estão disponíveis em <<https://www.thethingsnetwork.org/community/caxias-do-sul/>>.

¹⁶Maiores informações sobre o projeto *IoT* desenvolvido pelo grupo de pesquisa *City Living Lab* com recursos do programa InovaRS podem ser obtidos em <<https://www.citylivinglab.com>>.

Figura 42 – Local onde registrou-se uma habitação em risco de deslizamento, próximo ao local onde o sensor foi instalado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O protótipo compunha-se por um sensor DHT11¹⁷ para medição de temperatura e umidade, um sensor LDR¹⁸ para medição de luminosidade, e um sensor Bosch BME280 - uma variação do sensor utilizado no artefato *IoT* descrito na Seção 4.1.2, sem leitura de umidade - para obtenção da pressão atmosférica. A escolha dos sensores de temperatura, umidade, pressão atmosférica e luminosidade justifica-se pela possibilidade de se prever a ocorrência de chuvas ou tempestades, bem como de verificação de indícios de incêndio, conforme algoritmos que serão descritos na Seção 4.2.3.

Figura 43 – Protótipo desenvolvido para medição dos dados em Caxias do Sul.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como à época não havia *gateways LoraWAN* disponíveis com cobertura adequada, a alternativa encontrada foi a construção de um *gateway* utilizando outro dispositivo *Heltec*

¹⁷Mais informações disponíveis em <https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/DHT11_Aosong.pdf>.

¹⁸Sensor cuja resistividade varia de acordo com a intensidade da luz incidente.

*LoRa*¹⁹. Programou-se então este dispositivo para converter os dados recebidos via *LoRa* para o protocolo TCP/IP, encaminhando-os posteriormente à nuvem *LoraWAN* por meio de conexão *Wi-Fi*. O *gateway* desenvolvido apresenta-se à esquerda da Figura 43. Instalaram-se ambos os dispositivos - o protótipo e o *gateway* - na sala de segurança do trabalho da empresa, localizada no interior do armazém logístico.

Tabela 8 – Especificações técnicas do microcontrolador *Heltec v2*.

Parâmetro	Descrição
Chip Principal	ESP32 (240MHz Tensilica LX6 dual-core)
Chip <i>LoRa</i>	SX1276/SX1278
Frequência	470 a 510MHz, 863 a 923MHz
Potência Máxima de Transmissão	19±1dBm
Sensibilidade de Recepção	-135dBm
<i>Wi-Fi</i>	802.11 b/g/n, até 150Mbps
<i>Bluetooth</i>	<i>Bluetooth</i> V4.2 BR/EDR e BLE
Memória	520KB SRAM interna; 8MB Flash SPI
Temperatura de Operação	-20 a 70 °C
Dimensões	51 x 25,5 x 10,6 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O segundo local escolhido localiza-se em Flores da Cunha. Vizinha de Caxias do Sul, o município possui pouco mais de 30 mil habitantes (IBGE, 2022). Reconhecida como um dos maiores municípios produtores de vinhos do país, sua proximidade com Caxias favorece a integração econômica e turística entre os municípios. Lá, selecionou-se uma empresa do setor de iluminação decorativa que possui um pavilhão de armazenagem localizado no bairro Nova Roma, na zona nordeste do município. Essa área foi oficialmente incorporada à zona urbana da cidade apenas em 2017, com a definição da atual nomenclatura dos bairros, conforme estabelecido na legislação municipal (Cunha, 2017).

O bairro Nova Roma apresenta características híbridas, mesclando elementos urbanos e rurais, com loteamentos recentes, baixa densidade de ocupação e presença de algumas indústrias, como a empresa em questão. Tais características justificaram a escolha do local, dado o potencial de geração de informações relevantes para a comunidade. Além disso, o pavilhão situa-se a aproximadamente 300 metros da igreja da comunidade, considerada o núcleo original de ocupação que deu origem ao bairro.

Para o sensoriamento do local utilizaram-se dois dispositivos desenvolvidos no âmbito do projeto de sensoriamento *IoT* do InovaRS. Esses dispositivos eram equipados com sensores de temperatura, umidade, luminosidade, *etVOC*, *eCO₂*, picos de ruído e localização via GPS. Além disso, permitiam parametrização por meio de redes *Wi-Fi* e o envio de dados por redes *LoraWAN* e 2G.

A escolha desses equipamentos motivou-se tanto pela diversidade de variáveis monito-

¹⁹Construiu-se o *gateway* com base no código-fonte disponível em <<https://github.com/things4u/ESP-1ch-Gateway>>.

radas quanto pela disponibilidade dos dispositivos, em razão do encerramento oficial do projeto em agosto de 2024. A utilização desses sensores permitiria maior chance de êxito na detecção de incêndios, por meio da combinação das leituras de temperatura, umidade, *etVOC* e *eCO₂*, conforme ressaltado pela equipe da Cruz Vermelha durante a entrevista realizada no início de 2025.

Instalaram-se os dispositivos em lados opostos do pavilhão, com o objetivo de verificar possíveis variações internas nas condições ambientais de armazenagem, conforme ilustrado na Figura 44. A frequência de envio dos dados era de 20 minutos, e o período de avaliação compreendeu os dias entre 19/05/2025 e 11/07/2025²⁰.

Figura 44 – Dispositivos instalados, respectivamente, no lado oeste (esquerda) e leste (direita) no armazém de Flores da Cunha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O terceiro e último local de testes selecionado foram as dependências da empresa Alpha, situada no bairro Pradel, em Bento Gonçalves. A escolha justifica-se pelo fato de o dispositivo avaliado ser o próprio artefato *IoT* desenvolvido em parceria com a empresa no âmbito desta tese, conforme descrito na Seção 4.1.2.

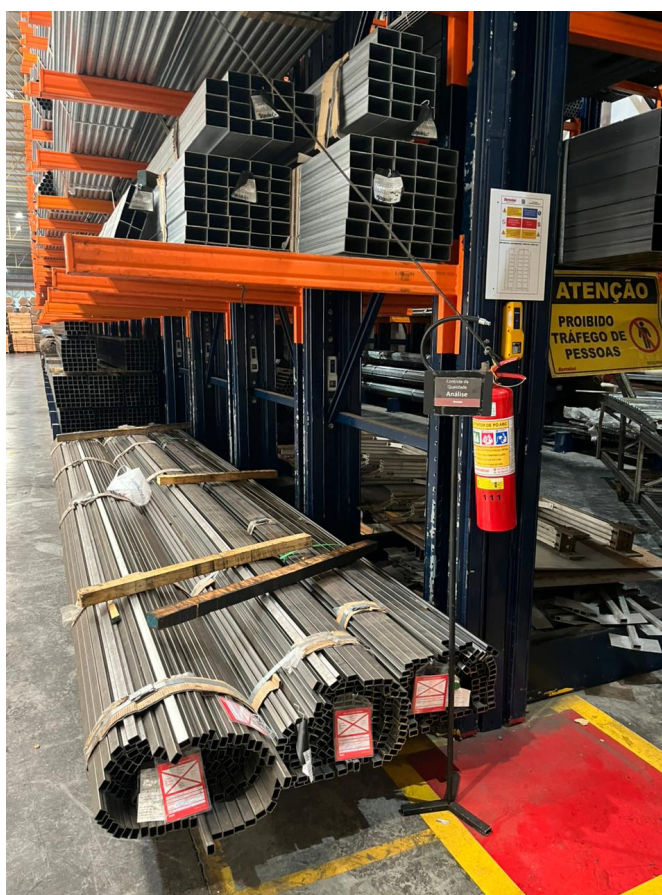
Com mais de 120 mil habitantes (IBGE, 2022), Bento Gonçalves é o segundo principal município da Serra Gaúcha, marcado pela forte influência da colonização italiana e amplamente reconhecido como a capital brasileira do vinho. Além do turismo e da vitivinicultura, o municí-

²⁰Entre os dias 03 e 04/07/2025, os dispositivos não registraram dados devido à realização de testes de perda de conectividade.

pio também possui um setor industrial sólido, especialmente nas áreas de móveis e metalurgia. O bairro Pradel, instituído pela Lei Municipal nº 12.902 (Bento Gonçalves, 2012), localiza-se na região norte da cidade e concentra um número significativo de estabelecimentos industriais, tornando-o um ambiente distinto aos demais cenários, o que reforça sua relevância para o presente estudo.

No local, o dispositivo foi instalado no sistema de armazenagem da empresa, juntamente com os demais equipamentos originalmente concebidos pela equipe técnica da organização, conforme ilustrado na Figura 45, que apresenta em primeiro plano o dispositivo concebido a partir desta tese e, ao fundo, os dispositivos de sensoriamento originalmente desenvolvidos. A frequência de envio dos dados era de 30 minutos, e o período de avaliação compreendeu os dias entre 29/05/2025 e 17/07/2025²¹.

Figura 45 – Locais onde instalaram-se os dispositivos no armazém de Bento Gonçalves.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Diferentemente dos demais dispositivos utilizados nos outros cenários, a nuvem *LoRaWAN* empregada neste caso foi a *ChirpStack*²², já utilizada pela empresa. Adicionalmente, o

²¹Nos *dashboards* construídos constam registros adicionais entre os dias 28 e 29/07/2025, referentes a testes realizados após o término oficial do período de avaliação, em virtude de uma manutenção corretiva. Durante o período de coleta, o dispositivo também ficou inoperante entre os dias 01 e 08/07/2025, em razão de instabilidades na nuvem *LoRaWAN* disponibilizada pela empresa.

²²Mais informações sobre o funcionamento dessa rede *LoRaWAN* podem ser obtidas em <<https://www.chirpstack.io/>>.

dispositivo apresentava resolução de leitura de temperatura com variação de 1°C, ao contrário dos demais equipamentos utilizados nesta pesquisa, cuja variação era de 0,1°C.

Para fins de síntese dos cenários de teste em ambiente real, a Tabela 9 apresenta um resumo consolidado das suas principais características.

Tabela 9 – Resumo dos cenários de teste em ambiente real.

Cidade	Tipo dispositivo	Qtd.	Tipo de comunicação IoT	Sensores utilizados	Período
Caxias do Sul	Protótipo em <i>proto board</i>	1	<i>LoraWAN</i>	Temperatura, umidade, pressão atmosférica e luminosidade	13/06/2025 a 08/07/2025
Flores da Cunha	Projeto <i>IoT</i> InovaRS	2	<i>LoraWAN</i> , 2G, WI-Fi	Temperatura, umidade, luminosidade, ruído, etVOC, eCO ₂ , GPS	19/05/2025 a 11/07/2025
Bento Gonçalves	Artefato da tese	1	<i>LoraWAN</i> , <i>BLE</i>	Temperatura, umidade, pressão atmosférica e acelerômetro	29/05/2025 a 17/07/2025

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.2 Cenário de Simulação em Ambiente Controlado

Concebeu-se o cenário de simulação em ambiente controlado com o objetivo de avaliar se o sensoriamento *IoT* seria capaz de detectar incêndios por meio de sensores que não foram especificamente projetados para essa finalidade. Nos ambientes reais avaliados não ocorreram incidentes que possibilitassem a validação dessa funcionalidade. Diante disso, adotou-se o algoritmo descrito na Seção 4.2.3 para verificar essa possibilidade em ambiente simulado.

O teste em ambiente controlado realizou-se na sede do Corpo de Bombeiros de Bento Gonçalves, local que é referência da corporação no estado no que se refere ao treinamento em combate a incêndios. A simulação ocorreu no dia 29/07/2025, no período da tarde.

O dispositivo utilizado no experimento foi um dos desenvolvidos no projeto InovaRS. Essa escolha deveu-se ao fato de o artefato desenvolvido no âmbito desta tese estar em manutenção na ocasião, e o protótipo construído não dispor de bateria para operar de forma autônoma em um ambiente sem acesso à rede elétrica.

Para a execução do teste, configurou-se o dispositivo para a realização envios de dados a cada 30 segundos, em função da necessidade de se obter coletas suficientes para que o algoritmo utilizado fosse capaz de identificar o incêndio. Como referência de comparação, utilizou-se um detector de fumaça cedido por uma empresa de Caxias do Sul, que também disponibilizou técnicos para acompanhar e auxiliar na realização do experimento.

Conforme ilustrado na Figura 46, instalaram-se os equipamentos num ambiente que simula uma residência ou escritório, em local elevado, semelhante ao posicionamento usual em

Figura 46 – Local onde foi realizado o teste de detecção de incêndio contendo o dispositivo *IoT* (esquerda) e o detector de fumaça utilizado como referência (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

espaços como escritórios de armazéns. Como se pode observar na imagem, as paredes internas do local apresentam escurecimento provocado pela fuligem de testes anteriores, indicando sua recorrente utilização para simulações de incêndio.

O processo de simulação apresenta-se na Figura 47. O procedimento inicia com a ignição do fogo em um tambor metálico (esquerda), utilizando materiais comumente encontrados em ambientes logísticos, como papel de escritório e madeira proveniente de paletes. Após a estabilização das chamas, inseriu-se o tambor no ambiente de teste (centro). Decorridos alguns minutos, a fumaça passou a sair pelas frestas da porta (direita), caracterizando um cenário realista de propagação.

4.2.3 Algoritmos Utilizados

Para a previsão de chuvas e tempestades, extraiu-se o algoritmo utilizado no trabalho de Gutierrez-Lopez, Cruz-Paz e Muñoz Mandujano (2019), o qual apresenta o desenvolvimento e a aplicação do modelo *CRHUDA* (*CRossing HUmidity, Dewpoint and Atmospheric Pressure*). O modelo concebeu-se com o objetivo de prever eventos de precipitação intensa com antecedência suficiente para subsidiar sistemas de alerta precoce, especialmente em áreas urbanas

Figura 47 – Processo de simulação do incêndio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

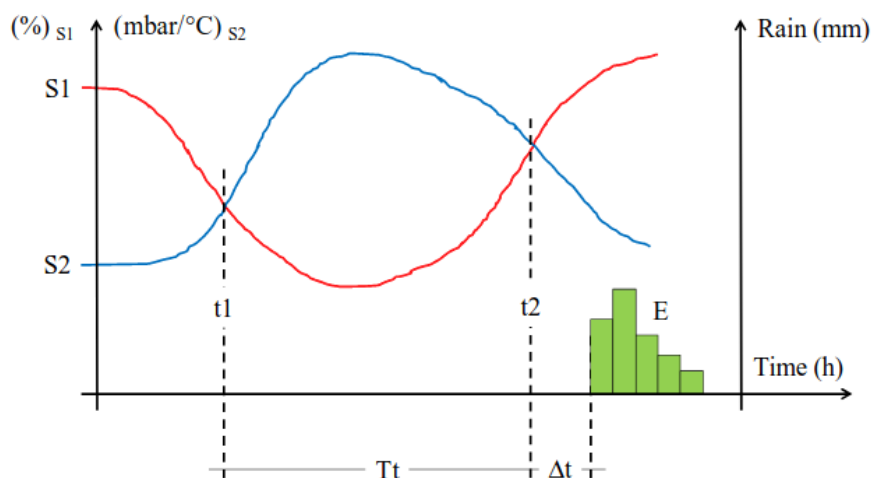
vulneráveis. A motivação para o desenvolvimento do *CRHUDA* relaciona-se à crescente demanda por mecanismos mais eficazes de monitoramento e resposta a desastres hidrológicos na América Latina e no Caribe, regiões frequentemente marcadas por escassez de dados climáticos em tempo real e elevada exposição a eventos extremos, como enchentes.

Criado para ser simples, funcional e de baixo custo, a lógica do modelo baseia-se na análise cruzada de três variáveis meteorológicas: umidade relativa do ar, ponto de orvalho e pressão atmosférica - todas amplamente disponíveis em estações meteorológicas convencionais. Esta característica possibilita sua aplicação em cenários reais, como os de Caxias do Sul e Bento Gonçalves, onde monitoraram-se essas variáveis.

O fundamento teórico do *CRHUDA* está ancorado na relação de Clausius-Clapeyron, que descreve o comportamento do vapor de água na atmosfera em função da temperatura e da pressão. Essa relação estabelece que a capacidade de retenção de umidade do ar aumenta com a elevação da temperatura, sendo, portanto, essencial para a antecipação de eventos de saturação atmosférica e precipitação.

Conforme ilustrado na Figura 48, a operacionalização do modelo ocorre a partir da construção de duas séries temporais: a primeira composta pelos dados de umidade relativa do ar (S_1), e a segunda representando a razão entre a pressão atmosférica e o ponto de orvalho (S_2). O modelo identifica como ponto de alerta (t_1) o instante em que essas duas séries se cruzam pela primeira vez. Interpreta-se o cruzamento como um indicativo de instabilidade atmosférica, a partir do qual, em média, observa-se o início da precipitação aproximadamente entre 9 e 10 horas depois (t_2).

Quando o modelo prevê com precisão o instante de início da chuva, o intervalo $\Delta t = t_2 - t_1$ tende a zero. Mesmo em situações em que Δt assume valores negativos - ou seja, quando a precipitação tem início antes do ponto de cruzamento - o modelo ainda é capaz de oferecer um tempo de resposta útil para ações preventivas.

Figura 48 – Princípio de funcionamento do modelo *CHRUDA*.

Fonte: Retirado de Gutierrez-Lopez, Cruz-Paz e Muñoz Mandujano (2019).

Para a validação do modelo *CRHUDA*, tanto em Caxias do Sul quanto em Bento Gonçalves, utilizaram-se os dados de precipitação atmosférica disponibilizados pelas estações pluviométricas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)²³. A escolha pela utilização dessa base justifica-se pelo fato de o CEMADEN fornecer dados oficiais e atualizados de monitoramento meteorológico, voltados à prevenção de desastres naturais.

Os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) não foram utilizados por razões distintas. Em Caxias do Sul, a estação convencional disponibiliza apenas o acumulado diário de precipitação, o que inviabiliza a análise temporal necessária para o modelo. Já em Bento Gonçalves, os valores de precipitação referentes ao período avaliado não estavam disponíveis na base de dados do INMET.

Por sua vez, para a predição de incêndios, adotou-se inicialmente o algoritmo adaptativo descrito por Choi e Jung (2024). Esse algoritmo tem como base um detector fotoelétrico de fumaça aprimorado com sensores de temperatura e umidade, permitindo uma resposta mais rápida diante da ocorrência de incêndios, especialmente em ambientes de alto risco como tendas e trailers.

Com base nesse modelo, os autores projetaram um detector de fumaça inteligente capaz de ajustar dinamicamente seu valor de detecção conforme os valores de temperatura e umidade registrados em tempo real. A arquitetura do dispositivo combina um sensor óptico (fotocélula) e um sensor DHT11 - o mesmo utilizado no protótipo do cenário de Caxias do Sul, descrito na Seção 4.2.1 -, conectados a um computador *Raspberry Pi 4*, formando um sistema de baixo custo e implementação relativamente simples.

O diferencial da proposta reside no fato de que, em vez de operar com um limite fixo de

²³Os dados de precipitação utilizados podem ser acessados por meio do Mapa Interativo do CEMADEN, disponível em <<https://mapainterativo.cemaden.gov.br>>.

luminosidade para identificar a presença de fumaça, o alarme calcula um valor adaptativo com base em uma equação de regressão. Essa abordagem torna o sistema mais sensível às condições ambientais, sem aumentar significativamente a taxa de falsos positivos.

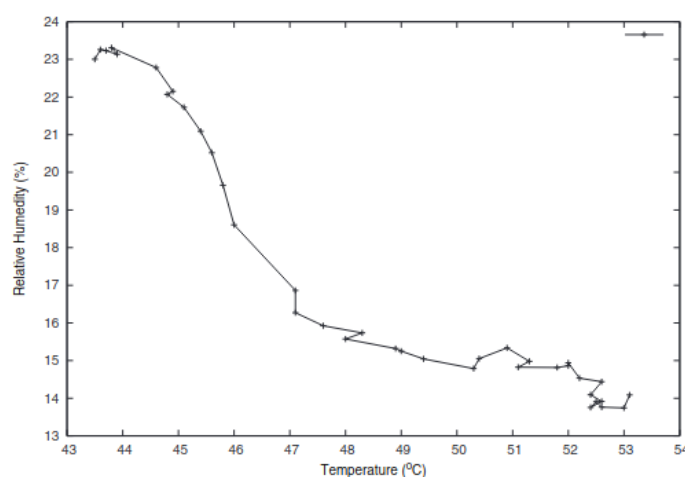
Embora os testes originais tenham sido realizados em ambiente de acampamento, os autores afirmam que o modelo também pode ser aplicado em espaços fechados de pequeno porte, como salas ou subsolos - o que apresenta similaridade com o ambiente em que foi conduzido o teste desta pesquisa.

Todavia, a aplicação desse modelo ao cenário simulado não apresentou resultados satisfatórios. Assim, para a análise dos dados obtidos na simulação, optou-se pela adoção de outro algoritmo, sendo selecionada uma das propostas desenvolvidas por Díaz-Ramírez et al. (2012), que opera exclusivamente com dados de temperatura e umidade.

O primeiro algoritmo apresentado pelos autores emprega os mesmos sensores utilizados neste trabalho, conforme o modelo original. Já o segundo algoritmo, baseado na Teoria da Evidência de Dempster-Shafer, utiliza apenas os dados de temperatura e umidade do ar, operando por meio de uma abordagem probabilística.

Esse segundo algoritmo define dois estados possíveis: fogo e sem fogo. Para inferir o estado atual, aplicam-se funções que modelam o comportamento esperado da relação entre temperatura e umidade ao longo de um evento de incêndio. A cada novo par de valores registrados, calcula-se a razão entre a medição atual e a média de uma janela de tempo anterior. Caso essa razão seja maior que 1 na variação da temperatura e, ao mesmo tempo, a razão da variação da umidade seja menor que 1, um incêndio é identificado.

Figura 49 – Relação entre umidade e temperatura durante um incêndio.



Fonte: Retirado de Díaz-Ramírez et al. (2012).

De forma resumida, o funcionamento do algoritmo pode ser descrito em três etapas. Inicialmente, ocorre um aumento na umidade relativa do ar, em razão da liberação de vapor e partículas provenientes da combustão dos materiais. Em seguida, a temperatura começa a subir de forma contínua, marcando o início efetivo da combustão. Por fim, a umidade passa

a diminuir, consolidando a confirmação do incêndio. Os dois últimos estágios desse processo estão ilustrados na Figura 49.

4.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DADOS

A estatística descritiva dos dados de sensoriamento coletados pelos dispositivos instalados nos cenários de teste em ambiente real, localizados nas cidades de Caxias do Sul, Bento Gonçalves e Flores da Cunha, apresentam-se, respectivamente, nas Tabelas 10, 11 e 12. Por sua vez, os dados descritivos referentes ao teste de simulação em ambiente controlado - no qual realizaram-se os experimentos de detecção de incêndio - encontram-se na Tabela 13.

Tabela 10 – Estatísticas descritivas do dispositivo *IoT* instalado em Caxias do Sul.

Campo	Valor
Período	13/06/2025 15:37:50 a 08/07/2025 05:27:17
Total de registros	53947
Contagem por sensor	
umidade	2569
pressão	2569
temperatura	2569
luminosidade	2569

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 11 – Estatísticas descritivas do dispositivo *IoT* instalado em Bento Gonçalves.

Campo	Valor
Período	29/05/2025 23:48:26 a 18/07/2025 13:14:50
Total de registros	62393
Contagem por sensor	
umidade	1819
pressão	1819
temperatura	1819
carga da bateria	39

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Omitiram-se da estatística descritiva os parâmetros relacionados à transmissão via *Lo-raWAN*, bem como os dados de validação interna transmitidos pelos dispositivos. Essa decisão justifica as divergências verificadas entre a soma dos registros por variável e o total de registros processados por cada dispositivo.

Adicionalmente, a menor quantidade de registros observada nos sensores instalados em Bento Gonçalves deve-se à frequência de envio adotada nesse local, que foi de 30 minutos. Em contraste, os dispositivos utilizados em Flores da Cunha estavam configurados para transmitir

Tabela 12 – Estatísticas descritivas dos dispositivos *IoT* instalados em Flores da Cunha.

Campo	Dispositivo 1	Dispositivo 2
Período	19/05/2025 20:22:26 a 11/07/2025 17:14:50	19/05/2025 20:34:02 a 11/07/2025 16:59:58
Total de registros	104400	103645
Contagem por sensor		
eCO ₂	3754	3711
etVOC	3753	3712
umidade	3754	3711
temperatura	3754	3711
luminosidade	3754	3711
ruído	3754	3711
latitude	3755	3712
longitude	3755	3712

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

dados a cada 20 minutos, enquanto o dispositivo instalado em Caxias do Sul realizava envios a cada 10 minutos. No cenário de simulação de incêndio, por sua vez, a frequência de envio foi ajustada para 30 segundos, o que explica a quantidade elevada de registros observados no pequeno intervalo de tempo utilizado para o teste.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EM CONTEXTOS RELACIONADOS À LOGÍSTICA 5.0

As Seções a seguir discutem os resultados verificados durante a execução dos cenários de teste apresentados na Seção 4.2, dividido nos contextos de previsão de chuvas e tempestades e de detecção de incêndios.

4.4.1 Previsão de Chuvas e Tempestades

Avaliou-se a previsão de chuvas e tempestades por meio do método *CHRUDA*, previamente descrito na Seção 4.2.3. Como o modelo requer a utilização de sensores de temperatura, umidade e pressão atmosférica, aplicou-se o método nos cenários de teste em ambiente real nas cidades de Caxias do Sul e Bento Gonçalves. No entanto, no cenário de Flores da Cunha, sua aplicação não foi possível, uma vez que os dispositivos instalados naquele local não dispunham de sensores de pressão atmosférica.

Em Caxias do Sul, durante o período analisado (13/06 a 08/07/2025), os registros de precipitação estiveram concentrados entre os dias 14 e 23/06/2025. A Figura 50 demonstra a aplicação do modelo nesse intervalo, em conjunto com os dados pluviométricos obtidos a partir da estação do CEMADEN localizada no Bairro Santa Fé, situada a aproximadamente 2,1 km

Tabela 13 – Estatísticas descritivas dos dados coletados no ambiente de simulação de incêndio.

Campo	Valor
Período	29/07/2025 13:44:42 a 29/07/2025 14:40:42
Total de registros	2672
Contagem por sensor	
eCO ₂	95
etVOC	96
umidade	95
temperatura	95
luminosidade	95
ruído	95
latitude	96
longitude	96

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

do armazém²⁴.

A interpretação do gráfico gerado permite identificar três períodos principais de ocorrência de precipitação, os quais estão organizados na Tabela 14.

Tabela 14 – Períodos de precipitação e acumulado de chuva em Caxias do Sul.

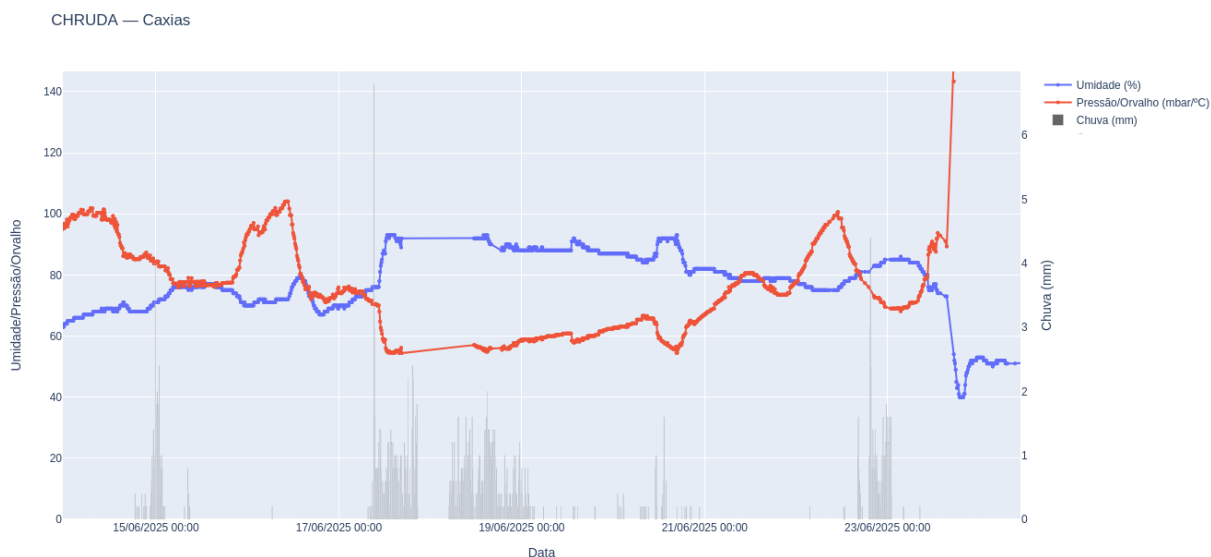
Período	Intervalo	Acumulado (mm)
1°	14/06/2025 18h30 - 15/06/2025 08h50	30,8
2°	17/06/2025 7h40 - 20/06/2025 22h40	169
3°	22/06/2025 12h30 - 23/06/2025 08h30	47,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No primeiro período de chuvas, não foi possível observar o primeiro cruzamento entre as linhas de umidade (em tendência descendente) e de pressão atmosférica (em tendência ascendente), pois as medições dos sensores foram iniciadas apenas no final do dia 13/06/2025. De acordo com o modelo *CHRUDA*, esse cruzamento inicial seria o indicativo de que a precipitação ocorreria num intervalo médio de 9 a 10 horas após o ponto de interseção.

O segundo cruzamento, no entanto, com as séries temporais movendo-se em direções opostas, observou-se no dia 15/06/2025, às 4h da manhã - ou seja, nove horas e meia após o horário registrado para o início da precipitação, conforme os dados do pluviômetro do CEMADEN. Neste caso, o valor de $\Delta t = -9,5$, indicando que a chuva se iniciou antes do cruzamento detectado pelo modelo. Ainda assim, o gráfico apresentado na Figura 50 já apontava uma tendência clara de aproximação entre as séries, reforçando a indicação de instabilidade atmosférica iminente.

²⁴Para ajuste do gráfico, necessitou-se realizar o ajuste dos horários das medições obtidas na base do CEMADEN, armazenadas no fuso GMT0, enquanto os dados coletados pelo dispositivos estão no fuso horário local (GMT-3).

Figura 50 – Resultados da aplicação do método *CHRUDA* em Caxias do Sul.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O segundo período de chuvas teve duração aproximada de 3,5 dias, com um volume acumulado de 169 mm. Durante esse intervalo, o primeiro cruzamento registrou-se às 16h do dia 16/06/2025. Com base no modelo, o primeiro cruzamento indicou a previsão de início da chuva por volta das 2h da manhã do dia 17/06/2025, enquanto o segundo apontou para as 6h30, assumindo $\Delta t = 0$. Segundo os dados da estação do CEMADEN, a precipitação efetivamente teve início às 7h40, aproximadamente 4,5 horas após o momento projetado pelo primeiro cruzamento e cerca de uma hora após o segundo, ou seja, $\Delta t = 1$.

É importante destacar que, no início da precipitação, registrou-se um pico expressivo de chuva, com 6,8 mm acumulados entre 9h00 e 9h10, e 12,8 mm entre 9h00 e 10h00 do dia 17/06/2025. A assertividade do modelo, nesse caso, foi mais elevada, o que confirma a adequação do método *CHRUDA* para previsão de eventos com altos volumes de precipitação, conforme também apontado por seus autores (Gutierrez-Lopez, Cruz-Paz e Muñoz Mandujano, 2019).

O terceiro período de chuvas, com duração de 20 horas e acumulado de 47,8 mm, iniciou-se no dia 22/06/2025 às 12h30. Neste intervalo, o modelo indicou o primeiro cruzamento às 0h do mesmo dia. Considerando $\Delta t = 0$, o segundo cruzamento projetou o início da precipitação para 16h50, enquanto o primeiro indicou ocorrência por volta das 10h. Segundo os dados da estação do CEMADEN, a chuva teve início às 12h30, ou seja, duas horas após o horário previsto pelo primeiro cruzamento e cerca de quatro horas antes do indicado pelo segundo, ou seja, $\Delta t = -4$.

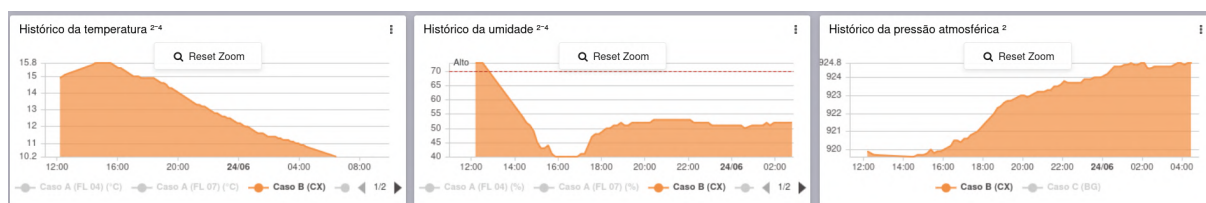
Embora a assertividade no terceiro caso tenha sido inferior à observada no segundo período, as tendências indicadas pelas séries temporais geradas pelo modelo *CHRUDA* ainda permitiram estimar a aproximação da precipitação com antecedência razoável, mesmo nos casos em que o valor de Δt foi negativo. Nessas situações, o primeiro cruzamento entre as séries já

funciona como um alerta preliminar da possibilidade de chuva iminente, ainda que o evento ocorra antes do intervalo previsto pelo modelo.

Por sua vez, a redução na precisão nos casos analisados pode ser atribuída à localização interna do dispositivo de sensoriamento - o que retarda as variações de temperatura, umidade e pressão atmosférica - e à distribuição mais homogênea da precipitação ao longo do período analisado, o que caracteriza um padrão de chuvas contínuas e moderadas, em vez de tempestades intensas, cenário para o qual o modelo demonstra desempenho mais consistente.

Como última análise desse cenário, cabe explicar que a rápida alteração nas tendências das séries observadas no dia 24/06/2025 deve-se à mudança repentina nos valores de temperatura, umidade e pressão atmosférica registrados a partir das 12h, conforme ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Alteração dos valores de temperatura, umidade e luminosidade verificados no dia 24/06/2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

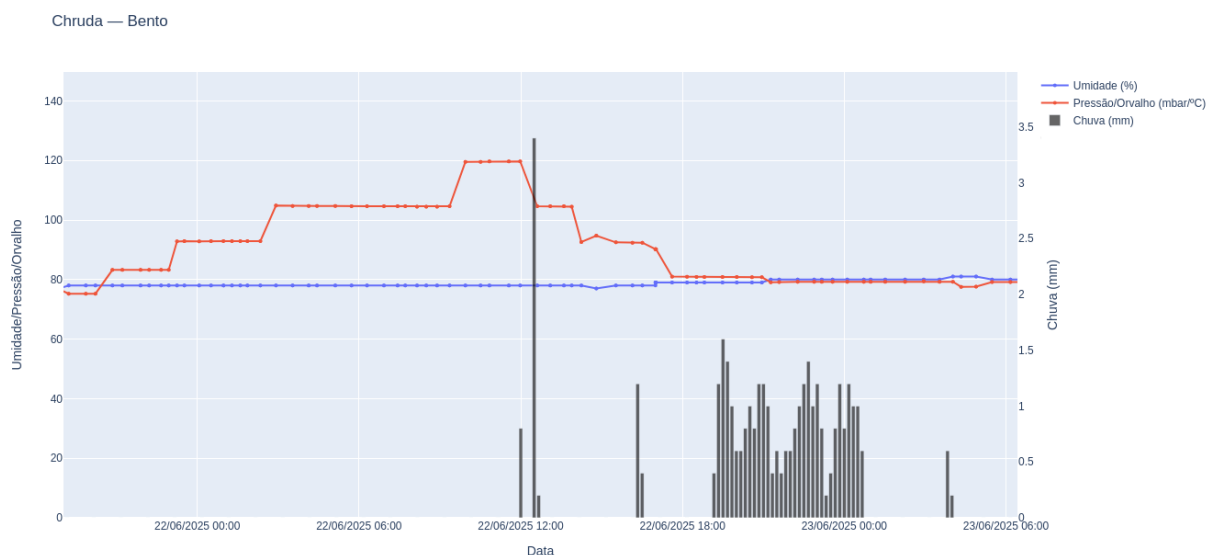
Em relação ao caso de Bento Gonçalves, o período analisado restringiu-se aos dias 22 e 23/06/2025, em virtude da indisponibilidade de dados anteriores nas bases tanto do INMET quanto do CEMADEN. A Figura 52 apresenta o gráfico resultante da aplicação do método *CHRUDA*, combinando os dados de sensoriamento com os registros pluviométricos da estação do CEMADEN localizada no Vale dos Vinhedos, a aproximadamente 7 km do ponto de instalação dos sensores²⁵.

Nesse período em que o volume acumulado de precipitação foi de 36,8 mm, o modelo *CHRUDA* indicou o primeiro cruzamento às 20h do dia 21/06/2025, e o segundo cruzamento às 21h do dia seguinte, totalizando um intervalo de 25 horas entre os eventos. Assim, o primeiro cruzamento sugeria o início da chuva por volta das 6h do dia 22/06/2025, enquanto o segundo cruzamento, assumindo $\Delta t = 0$, indicava o início às 21h do mesmo dia. De acordo com os dados do CEMADEN, a chuva teve início às 12h de 22/06/2025 - aproximadamente 6 horas depois da previsão do primeiro cruzamento e 9 horas antes a estimativa do segundo, ou seja, $\Delta t = -9$.

Nesse cenário, a assertividade foi inferior à verificada nos testes realizados em Caxias do Sul. No entanto, ao observar-se o volume de precipitação, nota-se que os maiores acumulados ocorreram a partir das 19h do dia 22/06/2025, momento em que as séries temporais

²⁵Para a geração do gráfico com os dados coletados em Bento Gonçalves, além da correção de fuso horário dos dados do CEMADEN, necessitou-se aplicar de uma correção nos valores de temperatura, uma vez que o sensor do dispositivo apresentava uma diferença média de 2°C acima em comparação com outros sensores instalados no mesmo ambiente. Constatou-se essa diferença somente após a coleta dos dados.

Figura 52 – Resultados da aplicação do método *CHRUDA* em Bento Gonçalves.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

aproximam-se visivelmente, mantendo-se próximas desde as 17h50 do mesmo dia.

Além disso, como apresentado na Figura 52, as séries exibem padrões mais lineares, o que pode ser atribuído a duas limitações técnicas: a resolução do sensor de temperatura - que variava apenas de grau em grau, ao contrário dos demais dispositivos que operavam com variações de décimos de grau - e a menor frequência de envio dos dados, de 30 minutos, superior à registrada em Caxias do Sul (10 minutos) e Flores da Cunha (20 minutos).

Outro fator relevante diz respeito à distância entre o dispositivo de sensoriamento e a estação pluviométrica do CEMADEN. Em Caxias do Sul, essa distância é de pouco mais de 2 km, mais de três vezes menor que a distância verificada em Bento Gonçalves. Apesar dessas limitações, o modelo *CHRUDA* demonstrou, ainda assim, um padrão de comportamento coerente nas séries temporais, permitindo a identificação de tendência de ocorrência de precipitação. Cabe ressaltar também que, em todos os cenários analisados, os sensores estavam instalados em ambientes internos, os quais tendem a reagir mais lentamente às variações climáticas externas, o que pode influenciar negativamente a sensibilidade do modelo.

Considerando este conjunto de fatores, conclui-se que, apesar das limitações observadas nos testes em ambiente real, o modelo *CHRUDA* mostra-se promissor como ferramenta complementar para a detecção antecipada de chuvas e, principalmente, tempestades, especialmente em regiões que não contam com infraestrutura meteorológica. Colheu-se esta mesma avaliação em entrevista realizada com o comandante do Corpo de Bombeiros:

”Uma vez, eu lembro que a gente tinha, na época da brigada lá em 2005, 2006... Cada quartel tinha o seu pluviômetro, aquele copinho que enchia na chuva, a gente largava no sistema que nós tínhamos na época. Todo dia, o quanto de chuva tinha, as precipitações de chuvas, enfim, e aí depois com o tempo acabou

se mudando e se perdeu essa informação. Eu vejo que ter essas informações além... Eu vejo que além das informações que a gente já tem dos satélites e do pessoal que cuida do clima mesmo, que tem esse acompanhamento, se tivesse dentro do nosso sistema, uma forma de nós termos uma redundância, eu vejo que uma redundância é importante de ter esse acompanhamento seria importante.

Por exemplo, dentro da área do meu batalhão são 60 municípios. Se eu tivesse em cada município um ponto, eu conseguiria ter algo mais próximo da nossa realidade aqui como complementação ao sistema geral do Estado. Então, eu acredito que essas informações poderiam nos auxiliar na tomada de decisão.”

Essa mesma percepção é também mencionada pela Defesa Civil Estadual, durante a realização do grupo focal:

”As previsões - assim, eu tenho pouco tempo [de acompanhamento] das reuniões que eu participei - dos eventos, as certas preparações para os eventos, a gente percebe que há uma responsabilidade absurda naqueles profissionais para dizer, olha, vai chover na Serra. E aí eu perguntei: Qual [parte da] região da Serra? [São] quase 39 municípios, vai que eu vou emitir um alerta para Gramado, para analisar a logística... Eu preciso confirmar que nível [de alerta] ficou, e eles não têm essa informação ainda, até porque [atualmente] precisam de instalação de mais radares que vão ser instalados. [...] Então, eu vejo [a proposta] ajudando [a melhorar as previsões]. ”

Em Caxias do Sul, por exemplo, a trajetória das séries temporais pode constituir uma informação importante para subsidiar a tomada de decisão em situações de risco, como a evacuação de áreas com potencial de deslizamento ou desabamento, a exemplo do caso registrado na Figura 42. Em todos os cenários analisados, a precipitação sempre ocorreu após o primeiro cruzamento entre as séries, confirmando a utilidade do modelo *CHRUDA* como um indicativo preliminar da ocorrência de chuva, especialmente no caso de grandes volumes que ocorrem durante tempestades. Nesse sentido, durante a realização do grupo focal onde se apresentaram os resultados dos testes realizados, a equipe da Defesa Civil Estadual destacou a utilidade dessa recombinação específica de dados de sensoriamento propiciada por esse algoritmo:

”O movimento de massa está intimamente ligado a excesso de chuva, excesso de água. Aumenta o peso, a saturação da terra. [...] Então [no contexto do resultado apresentado], umidade, sensor de umidade, pressão e temperatura, de repente, em áreas de alto risco, de risco elevado, como é o caso até de Galópolis, de repente [esse tipo de modelo], já poderia ser utilizado [caso a empresa cedesse os dados].”

O modelo apresentado nesta tese representa apenas uma das possíveis abordagens que demonstram a viabilidade do uso de sensores *IoT* em contextos que extrapolam os limites em-

presariais e se estendem à sociedade do entorno, em consonância com os princípios da Logística 5.0 - a sustentabilidade, a centralidade no ser humano e a resiliência. Por consequência, há espaço para a aplicação de sensores mais sofisticados - em todos os dispositivos utilizados no cenário, os sensores eram modelos simples - e de algoritmos mais robustos que combinem a aplicação de técnicas de IA ou estatísticas - como a técnica de regressão aplicada ao modelo *CHRUDA*, apresentada por Ramelan et al. (2024). A combinação desses elementos permite aumentar assertividade das previsões e oferecer informações mais precisas a organizações de resposta a desastres e proteção civil.

Adicionalmente, os testes realizados demonstram o potencial de utilização dessas tecnologias para a disseminação de informações relevantes ao público em geral. Como exemplo, as empresas poderiam utilizar suas redes sociais para compartilhar recomendações simples e acessíveis, como uma publicação no *Instagram* ou *Facebook* sugerindo que as pessoas saiam com guarda-chuva. Outra possibilidade consiste no envio automatizado de resumos diários sobre as condições climáticas por meio de aplicativos de mensagens, como o *Telegram*, ampliando o papel social do armazém inteligente enquanto agente promotor de bem-estar e segurança para a comunidade que vive em seu entorno.

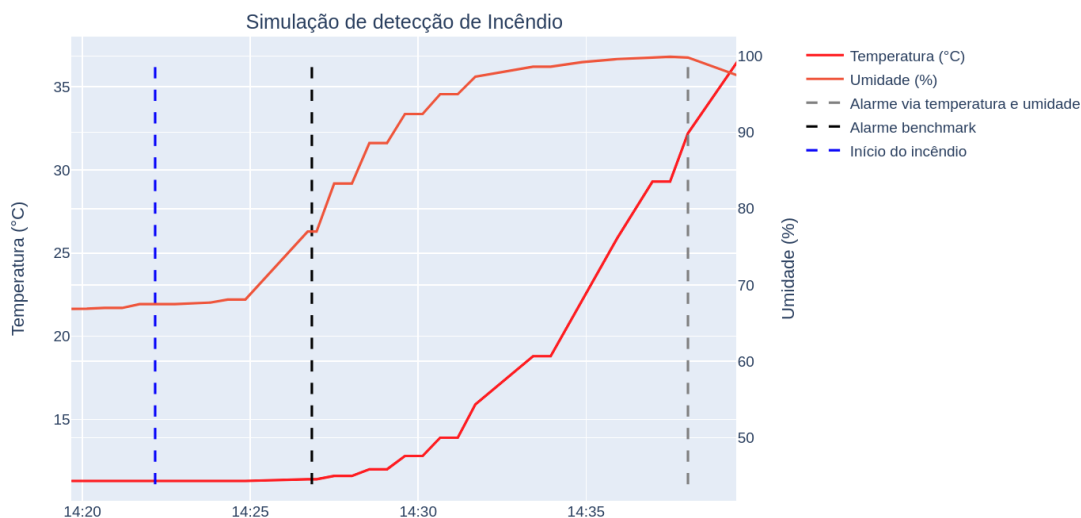
4.4.2 Detecção de Incêndio

Concebeu-se o cenário de detecção de incêndio para fins de execução em ambiente controlado, tendo em vista a inexistência - e desejável ausência - de eventos reais desse tipo nos testes realizados em ambientes operacionais. O objetivo foi identificar sinais de incêndio com base em dados de sensores não especializados, a partir do algoritmo de detecção previamente descrito na Seção 4.2.3. Após a preparação do espaço, a simulação foi iniciada às 14h22 do dia 29/07/2025, com término às 14h40 do mesmo dia.

Os resultados obtidos durante a simulação são apresentados na Figura 53. O início do incêndio deu-se com a inserção do tambor em chamas no ambiente de teste, descrito na Seção 4.2.2, às 14h22m10s. Às 14h26m50s, ou seja, 2 minutos e 40 segundos após a introdução do foco de incêndio, o sensor de detecção utilizado como referência emitiu o alarme. Já o algoritmo de detecção adotado neste estudo gerou o alerta de incêndio às 14h37m30s - 15 minutos e 10 segundos após o início da simulação e 10 minutos e 40 segundos após o acionamento do sensor de referência.

No teste realizado, observou-se que o detector de incêndio utilizado como referência apresentou um tempo de resposta mais de cinco vezes inferior ao registrado pelo algoritmo baseado na combinação dos valores de umidade e temperatura, coletados a partir do dispositivo desenvolvido no projeto InovaRS. Essa constatação está alinhada com os achados de Díaz-Ramírez et al. (2012), que apontam que algoritmos que utilizam exclusivamente sensores de temperatura e umidade tendem a apresentar maior tempo para ocorrer a detecção, além de estarem mais sujeitos a falsos positivos, principalmente quando comparados a métodos que

Figura 53 – Resultado da simulação de incêndio em Bento Gonçalves.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

incorporam também sensores de luminosidade.

Apesar da limitação em termos de tempo de resposta, os resultados do teste demonstraram que a combinação dos sensores de temperatura e umidade pode ser eficaz em ambientes que não contam com sistemas dedicados de detecção de incêndio. Isso permite que dispositivos que contêm com esses tipos de sensores possam ser usados como uma solução alternativa de baixo custo ou como sistema complementar e redundante aos sistemas convencionais.

Reforçou-se essa impressão durante as entrevistas realizadas com membros da Cruz Vermelha e com o comandante do Corpo de Bombeiros. Segundo os representantes da Cruz Vermelha, o incêndio constitui a etapa final de uma cadeia de eventos que, quando identificados precocemente, possibilitam sua contenção mais eficiente e a mitigação dos danos. Tal visão é corroborada pelo comandante dos Bombeiros, que enfatiza que, em muitos armazéns e empresas situadas em áreas remotas, o incêndio frequentemente só é percebido quando alguém externo visualiza as chamas - momento no qual, em geral, a situação já está descontrolada. Sobre esse ponto, o comandante comenta:

”[Incêndios em locais remotos é visto por] alguém que viu. Geralmente se a pessoa viu é porque [o incêndio] já está desenvolvido. Ou, no caso da grande empresa, se viu o sensor lá, alguém vai se certificar e depois vai chamar [acionar os Bombeiros]. Então, se a gente tivesse essa interface [informação remota de incêndio] desses grandes locais, com a nossa sala de atenção, isso poderia ser agilizado. Ou, tocou um alarme lá, de incêndio, em tal indústria... A gente poderia fazer, em vez de esperar que alguém ligasse, nós, recebendo essa informação, a gente poderia confirmar se alguém tinha notado isso, para já ir desbloqueando [acionando as equipes de incêndio].”

Quando comparado a sistemas convencionais de alarme, esse atraso de detecção em armazéns logísticos pode não ser tão crítico, devido ao fato de serem predominantemente construções em alvenaria. A estrutura física, ao oferecer certa contenção inicial, pode retardar a propagação externa do fogo, permitindo que soluções de monitoramento complementar - mesmo com maior tempo de resposta - ainda sejam eficazes para contenção e resposta inicial ao sinistro. Sobre esse ponto, o comandante do Corpo de Bombeiros ressalta:

”Se for um prédio de alvenaria com laje, ele vai demorar muito tempo para mostrar os sinais. Se for uma fumaça, se for de noite, talvez ninguém vai enxergar.”

Dessa forma, assim como observado no cenário de previsão de chuvas, constata-se que há contribuição do uso de sensores *IoT* - neste caso, de temperatura e umidade - para o contexto de detecção de incêndios. Tal aplicação pode beneficiar tanto a própria empresa, ao reduzir danos e prejuízos materiais, quanto a comunidade em seu entorno, ao fornecer indicadores que permitam acionar organizações de resposta, como o Corpo de Bombeiros. Isso possibilita a adoção de medidas que impeçam a propagação do sinistro para áreas adjacentes.

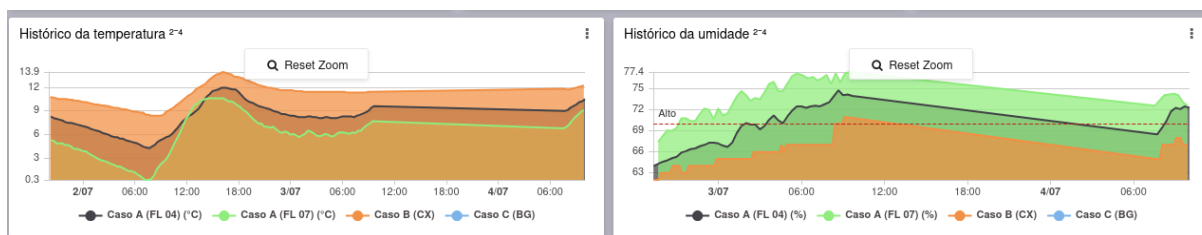
No entanto, vale destacar que o funcionamento eficaz nesse contexto de detecção depende de envios de dados em intervalos curtos, de poucos minutos. Nas condições operacionais utilizadas nos cenários reais desta pesquisa, com intervalos de 10, 20 e 30 minutos, a aplicação do método dificilmente seria viável para esse fim. Como consequência, para permitir transmissões em intervalos reduzidos, os dispositivos de sensoriamento *IoT* necessitariam de fornecimento contínuo de energia, seja por meio de rede elétrica ou com o uso de painéis solares. Do contrário, a manutenção frequente com trocas de pilhas ou baterias comprometeria a viabilidade prática da aplicação.

Adicionalmente, é importante destacar que a simulação realizada representa apenas uma das possíveis alternativas para sensoriamento voltado à detecção de incêndios. Outras combinações de sensores de uso interno e externo poderiam ser exploradas, assim como a utilização de algoritmos mais robustos, especialmente com o emprego de técnicas de IA, que permitiriam maior precisão na identificação de situações de risco.

4.4.3 Outros Resultados: Parada Sistêmica de Comunicação e Detecção de Níveis Elevados de CO₂ e etVOC

A partir de uma sugestão coletada durante a entrevista realizada com a equipe da Cruz Vermelha, simulou-se um corte generalizado de comunicação. Segundo os entrevistados, em situações de desastre, ”a primeira coisa que cai [deixa de funcionar] é a comunicação”. Com base nesta premissa conduziu-se um teste de parada sistêmica dos sensores por meio da desativação dos *gateways LoraWAN* entre os dias 03 e 04/07/2025, conforme ilustrado na Figura 54.

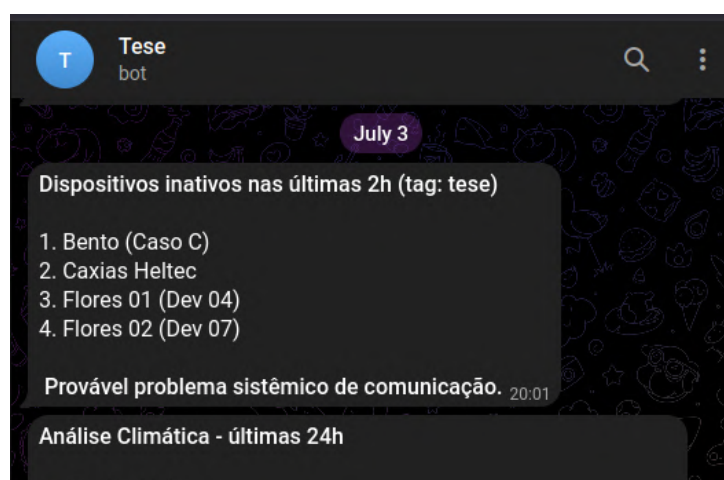
Figura 54 – *Dashboard* demonstrando a parada sistêmica de comunicação dos sensores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Decorridas duas horas sem qualquer transmissão de dados, o protótipo de processamento, visualização e tomada de ações disparou um mecanismo de alerta que enviou uma mensagem automática via *Telegram*, conforme apresentado na Figura 55.

Figura 55 – Aviso de parada da rede de sensores via Telegram.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A ausência de comunicação dos sensores pode, portanto, indicar que determinada região esteja enfrentando um cenário de desastre. Conforme relatado pela equipe da Cruz Vermelha, na região da Serra Gaúcha, por exemplo, os diversos deslizamentos de terra registrados durante as chuvas de maio de 2024 ocasionaram a queda de torres de comunicação, interrompendo os sinais em áreas afetadas. Dentro desse contexto, a perda de conectividade dos dispositivos *IoT* pode representar um indicativo indireto da ocorrência de eventos críticos, como enchentes, inundações ou desabamentos.

O intervalo de duas horas utilizado nesse teste pode ser excessivamente longo para as equipes de proteção civil e resposta a incidentes. Contudo, esse intervalo pode ser ajustado e reduzido conforme a criticidade da aplicação, de modo a fornecer uma resposta mais ágil e eficiente para as equipes responsáveis pela gestão de emergências.

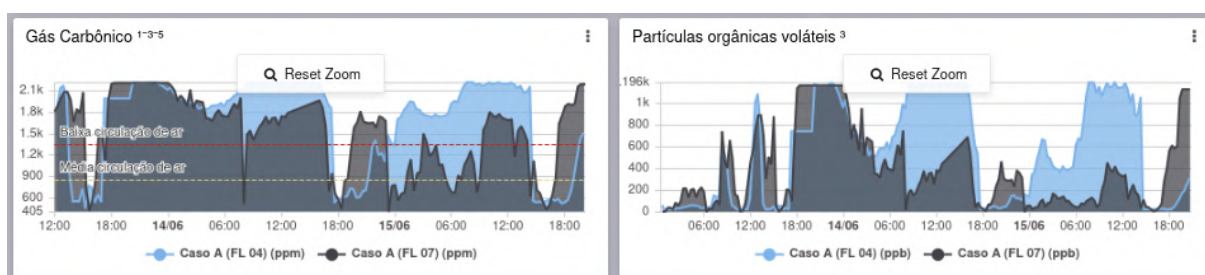
Essa perspectiva reforça o conceito de resiliência proposto pela Logística 5.0, ao demonstrar como a análise da ausência de dados esperados pode também contribuir para a detecção e a resposta a desastres. Isso, por sua vez, amplia o papel do sensoriamento ambiental para além da coleta ativa, atuando como mecanismo de alerta baseado na interrupção dos fluxos de

informação.

Outro resultado verificado durante a análise dos dados foi a ocorrência de picos nos níveis de CO_2 e *etVOC* no armazém de Flores da Cunha. Conforme mostrado na Figura 56, observaram-se esses picos especialmente durante a noite e nos finais de semana, períodos em que o armazém permanecia fechado. A concentração elevada desses compostos é, possivelmente, atribuída à proximidade do armazém com o cemitério localizado no bairro, uma vez que o dispositivo instalado na parede voltada ao cemitério registrou os maiores valores.

Esta constatação é corroborada pelo trabalho de Liu et al. (2023), que demonstra que cemitérios podem ser fontes significativas de emissão de CO_2 , especialmente devido às atividades de manutenção da vegetação, como corte de grama e limpeza. Durante o dia, observa-se redução nos níveis de concentração, atribuída à maior circulação de ar proporcionada pela abertura das portas do armazém. Em contrapartida, durante as noites e nos finais de semana, quando o armazém permanece fechado e a circulação de ar é limitada, esta situação resulta em maior acúmulo do gás. Embora não tenha sido encontrada na literatura uma relação direta entre cemitérios e emissões de *etVOC*, é plausível que a mesma origem esteja associada às concentrações elevadas desse composto, possivelmente derivadas de processos de decomposição orgânica.

Figura 56 – Registro de um dos picos de *etVOC* e eCO_2 identificados no cenário de teste em Flores da Cunha, no final de semana do dia 14 e 15/06/2025.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ressalta-se que, no caso analisado, os valores registrados não comprometem os produtos armazenados. No entanto, em cenários distintos, especialmente em armazenagens de produtos sensíveis ou perecíveis, os níveis verificados poderiam representar um risco. Ademais, em contextos alinhados às diretrizes da Logística 5.0 - notadamente no que tange à centricidade no ser humano e à resiliência - tais medições podem ser relevantes para a identificação de ambientes potencialmente prejudiciais à saúde, particularmente no que se refere à propagação de doenças respiratórias. O estudo de Malki-Epshtein et al. (2022), por exemplo, discute como a concentração de CO_2 pode servir como indicador de risco de transmissão de doenças em ambientes fechados.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA TESE

A presente tese propôs responder à seguinte questão de pesquisa: como a Internet das Coisas pode ser incorporada aos armazéns logísticos de modo a orientar sua arquitetura pelos princípios da Logística 5.0 - centricidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência -, ampliando sua função para além da eficiência interna e possibilitando que esses espaços atuem também como infraestruturas de interesse público, capazes de apoiar tanto a competitividade empresarial quanto o bem-estar social.

Nesse sentido, a resposta a esta questão é apresentada nas três Seções que compõem este Capítulo. Inicialmente, introduz-se o quarto artefato produzido neste trabalho: o *framework* da Logística 5.0 voltado para armazéns inteligentes. Na sequência, aborda-se a validade dos artefatos desenvolvidos e o consequente caráter inovador da presente pesquisa. Por fim, apresenta-se a Logística 5.0 como elemento habilitador da adoção da *IoT* em armazéns inteligentes.

5.1 O FRAMEWORK DA LOGÍSTICA 5.0 VOLTADO A ARMAZÉNS INTELIGENTES

Conforme discutido ao longo do Capítulo 4, o uso de sensoriamento por *IoT* nos cenários analisados nesta pesquisa apresentou aplicações alinhadas às premissas que fundamentam a Logística 5.0: centricidade no ser humano, resiliência e sustentabilidade. Embora alguns autores afirmem que ainda vive-se a quarta fase da logística (Tran-Dang et al., 2022; Ali e Phan, 2022), em razão da incorporação de elementos já consolidados em fases anteriores, como a logística verde e a logística reversa, essa lógica não se sustenta se considerados outros cenários, especialmente os de caráter tecnológico. Seguindo esse raciocínio, não existiria a Internet, a *IoT* e nem mesmo a Logística ou a Indústria 4.0, uma vez que todas essas inovações também reaproveitaram fundamentos preexistentes.

Conforme descrito nas Seções 2.1 e 2.2, criou-se a Internet em 1982 a partir da fusão de diversas redes de comunicação já existentes; concebeu-se a Internet das Coisas em 1999, por meio de uma nova aplicação da tecnologia *RFID*, originalmente criada em 1973; e, em 2011, formalmente definiu-se a Indústria 4.0 tendo a própria *IoT* como um de seus elementos centrais para a digitalização e aumento da produtividade industrial. Dentro desse contexto, percebe-se que tais elementos, de maneira isolada, não são suficientes para caracterizar a transição de uma fase para outra no campo logístico. A Logística 5.0 distingue-se essencialmente pela centralidade no elemento humano, acompanhada da sustentabilidade ambiental e da resiliência como fundamentos estruturantes de sua aplicação. Enquanto a Logística 4.0 tem como ponto de partida a digitalização e automação dos processos, cujos efeitos indiretos podem conduzir à sustentabilidade, na Logística 5.0 a lógica se inverte: a sustentabilidade, a centricidade no ser humano e a resiliência constituem os pontos de partida para o desenho dos processos.

Assim sendo, a Logística 5.0 não apenas retoma elementos da fase anterior, mas os recombina sob novas perspectivas, podendo incorporar também inovações tecnológicas emer-

gentes e, assim, configurar uma nova forma de compreender e operar a logística. Nesse contexto em que os armazéns configuram-se como *hubs* do processo logístico, sob a ótica da Logística 5.0, o elemento humano ultrapassa os limites dos trabalhadores diretamente envolvidos em suas operações, abrangendo também a sociedade situada em seu entorno. A partir dessa premissa, os demais pilares da Logística 5.0 - resiliência e sustentabilidade - tornam-se consequências naturais, na medida em que os desafios impostos pelas mudanças climáticas exigem uma sociedade resiliente e sustentável, isto é, preparada para lidar com eventos extremos e capaz de utilizar os recursos naturais de forma eficiente e responsável.

Seguindo a mesma linha de raciocínio teórica, a análise dos resultados obtidos empiricamente - e validados por profissionais do Corpo de Bombeiros e da Defesa Civil - ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da tese (Capítulo 4), ciclo este executado conforme os princípios de aplicação do método *DSR* descritos no Capítulo 3, possibilitou uma síntese conceitual mais ampla da aplicação da IoT em armazéns logísticos sob a ótica da Logística 5.0. Essa síntese culminou na geração de um novo artefato do tipo construto inspirado na arquitetura *TCP/IP*, utilizada no funcionamento da Internet.

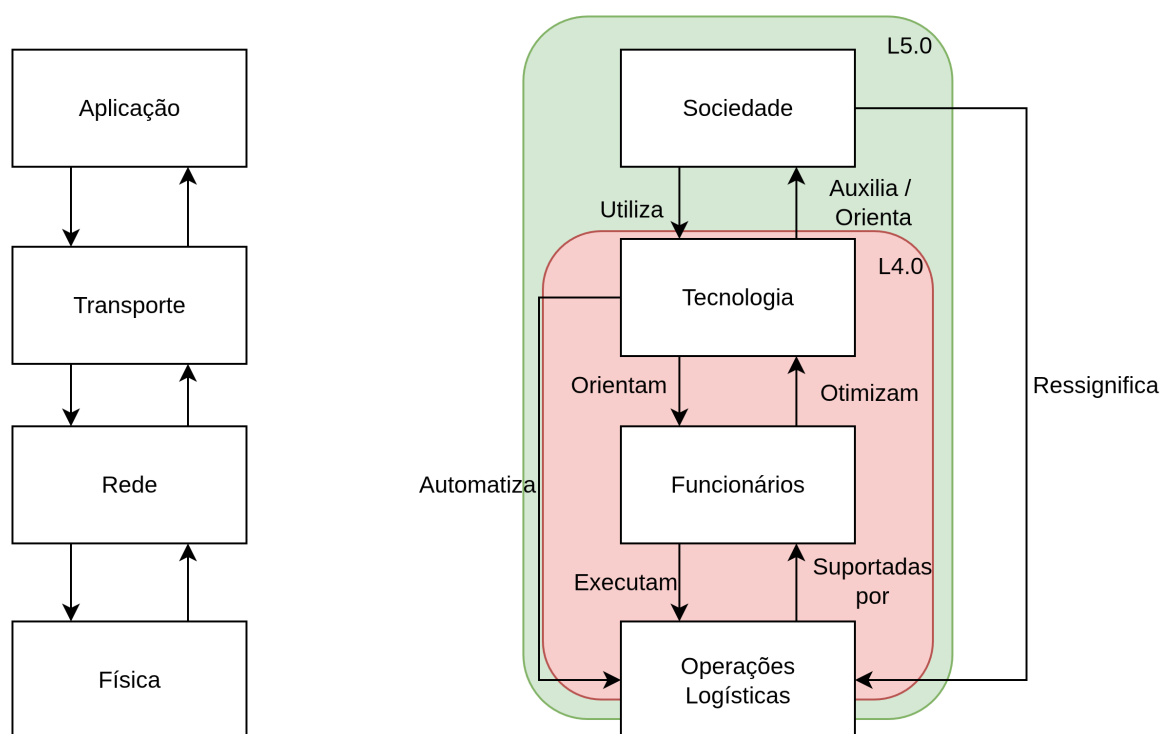
A adoção dessa referência estrutural não é casual: assim como a arquitetura *TCP/IP* organiza seus componentes em camadas funcionais interdependentes para viabilizar o fluxo de dados na rede, o artefato desenvolvido nesta tese organiza, também em camadas, os principais elementos que caracterizam um armazém logístico orientado pela Logística 5.0. Esse *framework*¹, apresentado na Figura 57, representa essas camadas teóricas e descreve como elas interagem para integrar tecnologia, processos, funcionários e sociedade no contexto dos armazéns inteligentes.

A arquitetura *TCP/IP* compõe-se, essencialmente, por uma pilha de quatro camadas (Wetherall e Tanenbaum, 2013). Nesse modelo, a camada Física responsabiliza-se pela comunicação de dados entre os dispositivos conectados à Internet. As demais camadas - Rede, Transporte e Aplicação - fornecem suporte à camada física, atuando, respectivamente, no endereçamento, na confiabilidade da entrega e na apresentação dos dados ao dispositivo de destino. Há uma interface de comunicação entre essas camadas, na qual a camada superior depende das funcionalidades providas pelas inferiores, e vice-versa.

Baseando-se nessa lógica de dependência entre as camadas que formam a pilha, o *framework* desenvolvido nesta tese propõe a adição de uma quarta camada à estrutura até então existente de armazéns logísticos. Até a Logística 4.0, a operação de um armazém formava-se por três camadas principais: Operações Logísticas, Funcionários e Tecnologia. A base dessa estrutura corresponde às Operações Logísticas, que compreendem a infraestrutura e os processos necessários à armazenagem - como racks, empilhadeiras e espaço físico - bem como as atividades de separação, movimentação e armazenamento de mercadorias. Da mesma forma que no modelo *TCP/IP*, as demais camadas do *framework* fornecem suporte à camada base do

¹Utilizou-se esse termo pois ele é normalmente empregado na definição de uma estrutura conceitual, um conjunto de princípios, diretrizes ou componentes que servem de base para orientar práticas ou decisões.

Figura 57 – O *framework* da Logística 5.0 voltado para armazéns logísticos (à direita), e sua comparação com o modelo *TCP/IP* (à esquerda), usado para comunicação na Internet.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

modelo - neste caso a camada de Operações Logísticas. Acima dela encontra-se a camada dos Funcionários, composta pelos trabalhadores que têm a responsabilidade de executar e gerenciar essas operações. Trata-se da estrutura organizacional de recursos humanos do armazém.

Conforme apresentado na Seção 2.2, a terceira camada, chamada aqui de Tecnologia, passou a integrar a estrutura dos armazéns logísticos a partir da fase 3.0 da Logística, com a introdução dos computadores no gerenciamento do armazém. Esses equipamentos fornecem informações adicionais que orientam os trabalhadores na execução de suas operações. Guiados por essas informações, os trabalhadores executam as tarefas operacionais com maior eficiência e, à medida que acumulam experiência, otimizam também o uso das próprias ferramentas tecnológicas, instaurando um ciclo de melhoria contínua.

Na fase seguinte - a Logística 4.0 - expandiu-se a camada de Tecnologia com a incorporação da *IoT*, potencializando a eficiência do armazém por meio da automação e integração de processos. A inclusão desse novo elemento permitiu a definição do armazém como um armazém inteligente, dentro da estrutura proposta por Zhen e Li (2022) explicada na Seção 2.2.5. Como consequência, parte das funções operacionais exercidas pela camada de Funcionários foi reduzida, embora as funções de supervisão e gerenciamento tenham assumido uma relevância ainda maior.

No contexto da Logística 5.0, propõe-se a inserção de uma nova camada ao modelo,

no seu topo: a Sociedade. Esta camada redefine o papel dos armazéns inteligentes, expandindo seus limites e permitindo que as tecnologias empregadas em sua gestão - como IA, veículos autônomos e, principalmente, a *IoT* - possam também beneficiar a sociedade, especialmente aqueles que vivem no entorno do armazém logístico. A proposta está em consonância com os princípios da Sociedade 5.0, nos quais o uso intensivo da tecnologia visa atender às necessidades humanas de forma inclusiva e sustentável, e acaba por ressignificar as operações logísticas como um todo.

Nessa nova perspectiva apresentada, os dados oriundos dos processos de controle e automação dos armazéns logísticos, viabilizados pela *IoT*, podem ser recombinaados e reutilizados por órgãos de proteção, resposta e socorro civil e, em alguns casos, diretamente pela população, com o intuito de orientá-las e apoiá-las frente aos desafios impostos por eventos como mudanças climáticas e pandemias, e não somente à sustentabilidade ambiental argumentada por Zhen e Li (2022).

Considerando esse novo modelo, o papel dos armazéns como *hubs* logísticos os posiciona como protagonistas no contexto da Logística 5.0, ampliando a visão tradicional do setor logístico e fortalecendo seu papel como agente integrado à comunidade que vive em seu entorno. Esses armazéns, distribuídos em diferentes localidades, estão inseridos em ambientes muito variados, como em centros urbanos densamente povoados, em regiões periféricas ou até mesmo em áreas mais afastadas.

De acordo com o relatório da ABOL (2022), existem atualmente cerca de mil operadores logísticos em atuação no Brasil. Cada um desses operadores, por sua vez, dispõe de ao menos um armazém dedicado à armazenagem de mercadorias - número que não contempla os armazéns utilizados internamente pelas indústrias em suas operações de intra-logística. Esse panorama demonstra a ampla capilaridade e abrangência da infraestrutura de armazenagem não só no país, mas também em panorama mundial. No contexto da Logística 5.0, tais armazéns podem compor uma extensa rede complementar de monitoramento, que, em articulação com as redes oficiais, tem o potencial de fornecer informações mais detalhadas e oportunas às organizações de resposta a emergências, como o Corpo de Bombeiros e a Defesa Civil. Sob essa mesma ótica, os armazéns inteligentes, isoladamente ou em conjunto com outros armazéns próximos, podem também contribuir com dados relevantes sobre o entorno em que estão inseridos, fortalecendo iniciativas locais de monitoramento ambiental e apoio à gestão urbana.

Além disso, os cenários descritos nesta tese (Seção 4.2), representam apenas uma pequena parcela dos contextos possíveis de aplicação desse *framework*, bem como da arquitetura *IoT* para armazéns inteligentes sob a ótica da Logística 5.0 apresentada na Seção 4.1.1, na Figura 36. Outros contextos que poderiam ser explorados envolvem, por exemplo, a transmissão de doenças, questões relacionadas à saúde ocupacional, e diferentes tipos de desastres climáticos, como terremotos e enchentes. Nessa mesma linha, os sensores utilizados também constituem uma amostra limitada do conjunto de possibilidades tecnológicas que podem ser incorporadas nessa nova fase da logística. Poderiam ser aplicados outros tipos de sensores, assim

como diferentes combinações entre aqueles utilizados nesta pesquisa.

Uma das possíveis recombinações identificadas refere-se ao uso de sensores acelerômetros em conjunto com os demais sensores empregados no modelo *CHRUDA* de detecção de chuvas. Essa possibilidade foi levantada durante a realização do grupo focal destinado à apresentação dos resultados obtidos nos testes. Na ocasião, um dos moradores da região de Galópolis relatou sua experiência durante as chuvas de maio de 2024, destacando a relação entre os sons e tremores provocados por trovões durante uma tempestade e sua percepção sobre a iminência de um deslizamento. Segundo o relato, tais sensações serviram como um alerta intuitivo para o risco iminente, sugerindo que essas variáveis poderiam ser úteis para antecipar eventos de movimentação de massa em encostas:

”Mas tem uma outra possibilidade, vocês lembram? Os trovões, aquelas tremedeiras de terra, é que tremia muito naquela época. Aquilo quando tem a terra encharcada, é que agrava mais ainda quando chove, o movimento de massa... O movimento de massa, sim. Vocês não lembram, mas eu lembro muito bem daquela noite. Eventualmente [poderia identificar a iminência de um deslizamento].”

Adicionalmente, os dados obtidos por meio dos sensores podem ser analisados sob perspectivas voltadas ao ambiente interno dos armazéns, sem que se percam as características essenciais da Logística 5.0. Por exemplo, além do monitoramento da temperatura e da umidade com o objetivo de conservar as mercadorias armazenadas, tais variáveis também podem ser empregadas para o acompanhamento das condições de trabalho no interior dos armazéns. Nesse sentido, cabe destacar que, neste ano, o Sindicato das Indústrias Metalúrgicas de Caxias do Sul (SIMECS) emitiu nota técnica orientando as empresas da região a respeito da importância do conforto térmico, em razão das temperaturas extremas registradas no início do ano (Região, 2025).

Considerando ainda que os armazéns logísticos estão inseridos em diferentes contextos territoriais, a aplicação da *IoT* sob a perspectiva da Logística 5.0 pode extrapolar os limites do ambiente interno, oferecendo contribuições em domínios descritos na Seção 2.1, como a agricultura e as cidades inteligentes. Em armazéns localizados em áreas rurais, por exemplo, os dispositivos de sensoriamento podem fornecer informações ambientais úteis para os produtores do entorno, em especial os pequenos agricultores, contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis. Em áreas urbanas, por sua vez, os armazéns podem atuar como mais um componente da infraestrutura das cidades inteligentes, disponibilizando dados de sensoriamento que podem ser utilizados por administrações públicas locais para ações de planejamento, prevenção e resposta a eventos adversos. Esses dados também podem ser direcionados diretamente à população, especialmente na forma de informações menos sensíveis, como orientações sobre vestuário adequadas às condições meteorológicas.

Na mesma perspectiva, os armazéns logísticos também podem desempenhar um papel

relevante em contextos mais restritos, como os distritos inteligentes (*smart districts*). Nessas novas configurações urbanas, os armazéns podem contribuir com dados operacionais e ambientais, incluindo informações de microclima, que podem ser integradas a sistemas de monitoramento urbano, apoiando iniciativas de sustentabilidade, resiliência, gestão inteligente do território, como na questão da gestão de energia (Martínez Ceseña e Mancarella, 2019).

Todas essas novas possibilidades de exploração dos dados no contexto da Logística 5.0 podem ser combinadas com técnicas de IA, permitindo a geração de novos conhecimentos que beneficiem a sociedade como um todo, por meio da atuação de organizações civis, reforçando o *framework* proposto. Nessa linha, destaca-se o relato da equipe da Cruz Vermelha:

”No momento que tu tens o dado [de sensoriamento], tu tens ainda muito o que aprender. Tu tens que criar os níveis de alerta. Tu tens que entender [as novas informações geradas]. Como aquilo [o comportamento dos sensores] responde. Tem um processo [de aprendizado]. [Existe] Um chão para percorrer.”

5.2 VALIDADE DOS ARTEFATOS PRODUZIDOS E CARÁTER INOVADOR DA TESE

No que se refere aos artefatos desenvolvidos, o artefato de sensoriamento *IoT* voltado a armazéns logísticos surgiu ao longo da pesquisa como consequência da aplicação do método *DSR* que, em seus ciclos de desenvolvimento, possibilitou identificar uma oportunidade de aprimoramento em um dispositivo de sensoriamento de estruturas de armazenagem, dispositivo que se encontrava em processo de desenvolvimento. Tal iniciativa resultou na criação de um novo produto, que também contribuiu para a validação da arquitetura proposta. Além disso, desenvolveu-se um segundo artefato - o protótipo de processamento, visualização e tomada de ações - que possibilitou a observação e a atuação em diferentes contextos relacionados à Logística 5.0, sobretudo aqueles vinculados ao entorno do armazém.

A combinação desses dois artefatos, associados ao uso de diferentes tecnologias de comunicação *IoT* empregadas nesta tese - em especial o *LoraWAN* - , constituiu uma evidência empírica da validação da arquitetura *IoT* voltada para armazéns inteligentes. Esta, por sua vez, apresenta uma visão abrangente de como esse conjunto de tecnologias pode ser aplicado a um armazém logístico, em conformidade com os princípios da Logística 5.0. Destaca-se, nesse contexto, a interface de integração com organizações de socorro e proteção civil, bem como a disponibilização de informações à população em geral.

Os cenários de teste, igualmente concebidos com base no método *DSR*, foram elaborados e executados com o propósito de validar dois contextos de aplicação em armazéns logísticos sob as premissas da Logística 5.0: previsão de chuvas e tempestades e detecção de incêndios. Para tanto, foram escolhidos três armazéns logísticos localizados em diferentes contextos urbanos capazes de fornecer informações ao seu entorno e atender aos princípios de centralidade no ser humano, resiliência e sustentabilidade.

Em Caxias do Sul, o local selecionado margeia a rodovia RS-453 e situa-se próximo a uma área anteriormente atendida pela Defesa Civil Municipal em decorrência de risco de deslizamento. Este cenário contempla, primordialmente, a premissa de resiliência da Logística 5.0. Em Flores da Cunha, o cenário escolhido corresponde a um bairro localizado na região nordeste do perímetro urbano, com características mistas entre urbano e rural, composto por loteamentos com baixa densidade habitacional. Em virtude dessas particularidades, o local atende sobretudo às premissas de resiliência e de sustentabilidade - respectivamente, pela ausência de monitoramento climático específico e pela oportunidade de conservação das características naturais ainda preservadas na área. Por fim, em Bento Gonçalves, definiu-se como local a sede da própria empresa Alpha, parceira da bolsa CNPQ/DAI, tendo em vista que o dispositivo testado encontrava-se em desenvolvimento na referida organização. O cenário é predominantemente industrial, direcionando o foco para a premissa de centralidade no ser humano, especialmente em ambientes internos de trabalho. Esta última premissa, aliás, perpassa todos os cenários testados, seja no ambiente interno dos armazéns, seja em seus respectivos entornos.

Nos cenários descritos acima, durante a execução dos testes (Capítulo 4), foi possível validar apenas o contexto de previsão de chuvas. Assim, para validar o contexto de detecção de incêndios, realizou-se um teste simulado nas dependências do Corpo de Bombeiros de Bento Gonçalves, utilizando como referência um sensor de detecção de fumaça. O objetivo foi avaliar o desempenho do artefato de sensoriamento *IoT* na identificação de incêndios.

Os resultados obtidos durante a execução dos testes - bem como a análise realizada por integrantes da Defesa Civil, Corpo de Bombeiros e Cruz Vermelha - também confirmaram a viabilidade de aplicação da arquitetura *IoT* proposta e, por consequência, dos artefatos construídos para sua validação. O modelo *CHRUDA*, utilizado para previsão de chuvas e tempestades, demonstrou precisão suficiente para ser empregado como sistema complementar aos mecanismos de monitoramento meteorológico oficiais. Por sua vez, o algoritmo de detecção de incêndio baseado em sensores de temperatura e umidade apresentou desempenho inferior em termos de tempo de resposta quando comparado ao dispositivo de detecção utilizado como referência. Apesar da limitação encontrada, no entanto, o algoritmo mostrou-se promissor como sistema suplementar de segurança em armazéns logísticos, em sua maioria formadas por construções de alvenaria.

Além desses resultados, a literatura recente discorre sobre a relevância da Internet das Coisas para os processos logísticos sob a perspectiva da Logística 5.0, mas permanece limitada em termos de aplicações práticas e validações em cenários reais, conforme apontado na revisão sistemática (Capítulo 1). Trstenjak et al. (2022), pioneiro na discussão sobre Logística 5.0, apresenta o conceito, mas sem aplicabilidade empírica. De forma semelhante, trabalhos como os de Dissorn e Suwanbamrung (2023); Szeredi, Trenka e Pogatsnik (2024); Tudisco, Perotti e Tappia (2024); Andres et al. (2024); Nicoletti e Appolloni (2024); Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025); Machado e Rodriguez (2025a,b) reconhecem o potencial da *IoT*, mas não avançam para sua materialização prática.

Todo o roteiro de desenvolvimento dos artefatos, concepção dos cenários de teste e sua respectiva execução também buscou preencher essa lacuna identificada na literatura relacionada às pesquisas em Logística 5.0. Conforme apresentado na Tabela 15, os estudos analisados não contemplam aplicações práticas executadas em ambiente real. Apenas o trabalho de Perotti et al. (2025) apresenta um caso prático, ainda que conduzido em ambiente controlado de laboratório, o que reforça a limitação empírica dos estudos existentes.

Conforme discutido por Andres et al. (2024), a literatura aponta que ainda há pouca clareza quanto à forma de aplicação da *IoT* no processo logístico, apesar de se reconhecer seu papel fundamental nesse contexto. Nessa linha, esta tese contribui ao oferecer subsídios práticos que demonstram a viabilidade de aplicação da *IoT* nos processos logísticos inseridos em armazéns inteligentes sob a ótica da Logística 5.0, a partir da recombinação de dados oriundos de sensoriamento de armazéns para uso pela sociedade em geral.

Outro aspecto que distingue esta tese dos trabalhos analisados diz respeito à forma como os armazéns inteligentes são tratados. Com exceção do estudo de Tudisco, Perotti e Tappia (2024), a literatura atual aborda a aplicação da *IoT* em processos logísticos de modo amplo e genérico. Nesta pesquisa, contudo, os armazéns assumem posição central, sendo compreendidos como infraestruturas capazes de articular eficiência, resiliência e impacto social. Além disso, o *framework* de armazém inteligente proposto na Seção 5.1 inclui explicitamente a sociedade como um de seus componentes estruturantes - elemento ausente nos estudos revisados -, reforçando o alinhamento com os princípios da Logística 5.0 e ampliando o escopo de atuação da logística para além dos limites organizacionais.

Tabela 15 – Contribuição desta tese em relação aos demais trabalhos analisados na revisão sistemática da literatura.

Trabalho	Referência à <i>IoT</i>?	Aplicação prática?	Em cenário real?
Trstenjak et al. (2022)	Sim	Não	Não
Dissorn e Suwanbamrung (2023)	Sim	Não	Não
Szeredi, Trenka e Pogatsnik (2024)	Sim	Não	Não
Tudisco, Perotti e Tappia (2024)	Sim	Não	Não
Andres et al. (2024)	Sim	Não	Não
Nicoletti e Appolloni (2024)	Sim	Não	Não
Monferdini, Tebaldi e Bottani (2025)	Sim	Não	Não
Perotti et al. (2025)	Sim	Sim	Não
Machado e Rodriguez (2025a)	Sim	Não	Não
Machado e Rodriguez (2025b)	Sim	Não	Não
Tese	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3 A LOGÍSTICA 5.0 COMO HABILITADORA DO USO DE *IoT* EM ARMAZÉNS INTELIGENTES

Todas as possibilidades de aplicação do sensoriamento *IoT* em armazéns logísticos em diferentes contextos que envolvem a sociedade podem ser exploradas sem custos significativos em armazéns que já se encontram na fase da Logística 4.0, ou seja, que apresentam elevado nível de automação e digitalização, conforme o modelo proposto por Machado e Rodriguez (2025b), abordado na revisão sistemática da literatura realizada no Capítulo 1. Já nas empresas que planejam automatizar seus processos de armazenagem, essa transformação pode ser repensada à luz das premissas da Logística 5.0, considerando seus princípios orientadores desde a concepção do projeto.

No entanto, conforme apontado por diversos trabalhos na literatura, a implementação da *IoT* no processo logístico enfrenta uma série de barreiras, que podem ser de natureza regulatória (Treiblmaier et al., 2020; Rejeb et al., 2021; Arias-Aranda, Molina e Stantchev, 2021; Tran-Dang et al., 2022; Gupta et al., 2022; Chauhan e Singh, 2020; Dixit e Verma, 2022; Rathore et al., 2022; Kumar et al., 2022b), organizacional (Arias-Aranda, Molina e Stantchev, 2021; Farajpour et al., 2022; Gupta et al., 2022; Kumar et al., 2022b; Dixit e Verma, 2022), cultural (Chauhan e Singh, 2020; Kalsoom et al., 2021; Rathore et al., 2022; Dixit e Verma, 2022; Farajpour et al., 2022; Gupta et al., 2022), econômica (Rejeb et al., 2021; Kalsoom et al., 2021; Arias-Aranda, Molina e Stantchev, 2021; Tran-Dang et al., 2022; Gupta et al., 2022; Farajpour et al., 2022; Dixit e Verma, 2022; Kumar et al., 2022b), ou mesmo tecnológica (Chauhan e Singh, 2020; Kristoffersen et al., 2020; Ahmed et al., 2021; Kalsoom et al., 2021; Rejeb et al., 2021; Tran-Dang et al., 2022; Gupta et al., 2022; Dixit e Verma, 2022; Kumar et al., 2022b).

Todavia, conforme argumentado na Introdução desta tese (Capítulo 1), há uma crescente preocupação das empresas do setor logístico em relação ao uso da *IoT* e à adoção de práticas *ESG*, conforme apresentado no último relatório da Associação Brasileira de Operadores Logísticos (ABOL, 2022). Segundo o relatório, 55% das empresas realizam ações voltadas ao bem-estar social, reforçando a preocupação com a adoção dessas práticas. Nesse contexto, a implantação da *IoT* sob a ótica da Logística 5.0 pode atuar como um habilitador estratégico, ampliando o leque de práticas possíveis de serem incorporadas aos armazéns logísticos. Essa abordagem permite que o armazém não apenas atenda às demandas operacionais da empresa, mas também contribua ativamente para as necessidades da comunidade ao seu redor.

No mesmo alinhamento, as perspectivas oferecidas pela Logística 5.0 favorecem a aderência dos armazéns logísticos aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentados na Figura 58. Conforme destacado por Assunção, Almeida e Porto (2024), ainda que o conceito de *ESG* tenha sido formalizado em 2004, por meio de publicação do Pacto Global em cooperação com o Banco Mundial, seus fundamentos apresentam plena convergência com os ODS. Esses objetivos, por sua vez, constituem a maior iniciativa global voltada à redução da pobreza e das desigualdades, promovendo melhorias nas condições sociais e econômicas,

aliadas à proteção dos direitos humanos, do meio ambiente e do clima (Menêzes e Martins, 2021). Entre os diferentes objetivos propostos, o uso dos armazéns inteligentes sob a perspectiva da Logística 5.0 demonstra forte aderência aos ODS 2 - Agricultura Sustentável, 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura, e 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis, nos quais diversas metas podem ser atendidas a partir da possibilidade de compartilhamento e recombinação de dados.

Figura 58 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



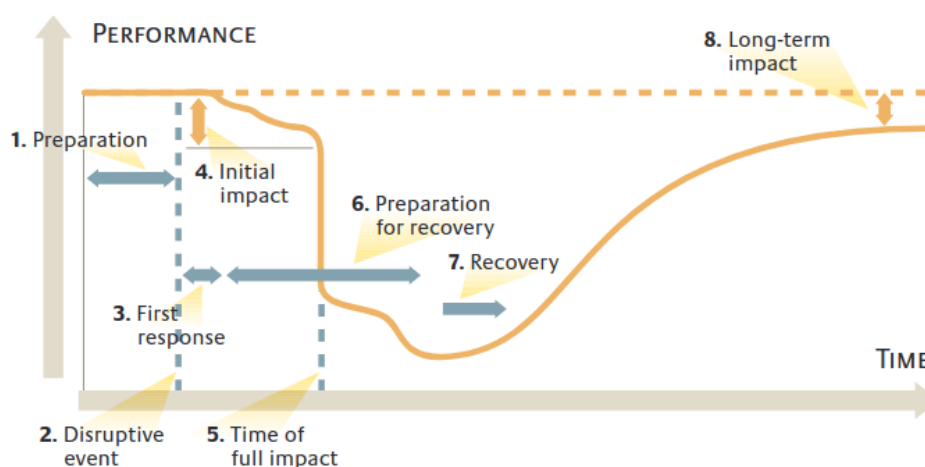
Fonte: Retirado de ONU (2025).

No âmbito do ODS 2, os armazéns orientados pela Logística 5.0 podem compartilhar os dados de sensoriamento *IoT*, de modo que, recombinações ou não, esses dados forneçam aos agricultores informações que aumentem a produtividade agrícola, auxiliem na adoção de práticas agrícolas resilientes e fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, promovendo também a melhoria progressiva da qualidade do solo e das terras cultiváveis. No ODS 9, os armazéns, ao incorporarem tecnologias como a *IoT*, promovem maior eficiência no uso dos recursos e podem fornecer dados que contribuam para a construção de infraestruturas sustentáveis e resilientes, apoiando o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, além de favorecer uma industrialização inclusiva e sustentável. Por fim, no ODS 11, o compartilhamento de dados de sensoriamento *IoT* por parte dos armazéns logísticos oferece a possibilidade de reduzir o número de mortes e de pessoas afetadas por catástrofes, bem como de diminuir substancialmente as perdas econômicas diretas decorrentes desses eventos. Ademais, tais dados podem contribuir para mitigar o impacto ambiental negativo nas cidades, ao fornecer informações que viabilizem o monitoramento contínuo das condições ambientais na região onde o armazém está inserido. Nesse sentido, a adoção da *IoT* em ambientes logísticos, a partir da aplicação dos princípios da Logística 5.0, pode permitir que os armazéns inteligentes contribuam de forma concreta para esses objetivos, especialmente aqueles relacionados ao meio ambiente e às mudanças climáticas. Tal contribuição pode ocorrer por meio do fornecimento de informações úteis à formulação

de políticas públicas, além de possibilitar o alinhamento dos ODS às realidades locais, como também sugerido por Menêzes e Martins (2021).

Além dos benefícios sociais gerados no entorno das operações logísticas do armazém, o uso dos dados de sensoriamento IoT sob a ótica da Logística 5.0 permite também que a própria organização se beneficie da recombinação dessas informações para fortalecer sua resiliência diante de eventos catastróficos ou disruptivos, antecipando ações que mitiguem seus efeitos e promovam respostas mais assertivas (Azadegan et al., 2021). Conforme discutido por Sheffi e Rice Jr (2005), as disrupções que afetam as cadeias de suprimentos seguem um padrão de impacto sobre o desempenho organizacional, independentemente do tipo de evento. Esse padrão, ilustrado na Figura 59, descreve uma trajetória em que o desempenho da empresa permanece estável durante a fase de preparação (1). Com a ocorrência do evento disruptivo (2), a organização realiza suas primeiras ações de resposta (3), o que resulta em uma queda inicial de desempenho (4). Após esse período, observa-se uma redução abrupta na performance, atingindo o ponto de impacto total (5). A partir daí, inicia-se um processo de recuperação gradual, cuja velocidade depende da eficácia das respostas e da capacidade adaptativa da organização (6 e 7). Por fim, o desempenho tende a estabilizar-se em um novo patamar, que pode ser inferior, equivalente ou superior ao anterior à crise, conforme o nível de resiliência, flexibilidade e aprendizado incorporado durante o processo (8).

Figura 59 – Os estágios da disrupção numa organização.



Fonte: Retirado de Sheffi e Rice Jr (2005).

Sob essa perspectiva, a recombinação de dados provenientes de sistemas de sensoriamento *IoT* pode também atuar como um mecanismo de mitigação da disrupção no desempenho organizacional. Tal integração contribui para achatá-la a curva de queda de performance, ao ampliar a capacidade preditiva e preparatória da empresa, possibilitando o início antecipado da recuperação em casos de eventos catastróficos. Os dois cenários analisados nesta tese - previsão de chuvas e detecção de incêndios - inserem-se nessa lógica de resiliência organizacional, tanto ao permitir que a empresa se prepare para possíveis prejuízos decorrentes de tempestades

e inundações, quanto ao possibilitar a redução de perdas materiais associadas a incêndios.

Dessa forma, ao incorporar a *IoT* e explorar o potencial da recombinação dos dados de sensoriamento como instrumento de sustentabilidade, resiliência e centralidade no ser humano, a Logística 5.0 amplia o papel tradicional do armazém, que deixa de ser um mero ponto de armazenagem para se tornar um agente ativo no ecossistema em que está inserido. Essa nova configuração possibilita não apenas ganhos operacionais e estratégicos para as organizações, mas também gera impactos positivos sobre o meio ambiente, sobre o entorno das operações e sobre a própria resiliência do armazém e do sistema logístico como um todo, reforçando a convergência entre eficiência logística, responsabilidade socioambiental e os ODS. Assim, considerando as diversas possibilidades de benefícios discutidas ao longo desta tese, a adoção da *IoT* em armazéns logísticos, orientada pelas premissas da Logística 5.0, apresenta-se como um novo habilitador do uso da própria tecnologia nesses ambientes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese de doutorado foi desenvolvida com o apoio do CNPq, por meio da bolsa DAI, cuja premissa envolve não apenas a elaboração da pesquisa acadêmica, mas também o desenvolvimento de um produto, processo ou método inovador em parceria com uma organização empresarial. Nesse contexto, a empresa Alpha colaborou ativamente, aportando recursos financeiros e humanos fundamentais para a execução do projeto.

Sob essa perspectiva, a questão de pesquisa que norteou este trabalho buscou compreender como a Internet das Coisas pode ser incorporada aos armazéns logísticos de modo a orientar sua arquitetura pelos princípios da Logística 5.0 - centralidade no ser humano, sustentabilidade e resiliência -, ampliando sua função para além da eficiência interna e possibilitando que esses espaços atuem também como infraestruturas de interesse público, capazes de apoiar tanto a competitividade empresarial quanto o bem-estar social.

A partir disso, definiram-se objetivos que orientaram simultaneamente a resposta à questão de pesquisa e o desenvolvimento desta tese, voltados não apenas à elaboração de artefatos tecnológicos alinhados ao conceito de Logística 5.0, mas também à sua aplicação em cenários reais e simulados. Esses objetivos envolveram a construção de soluções fundamentadas no método *Design Science Research*, a definição de protocolos de avaliação baseados na literatura e validados com especialistas, bem como a análise crítica do potencial dos artefatos e da arquitetura proposta em contribuir tanto para a eficiência operacional da empresa parceira quanto para demandas mais amplas de interesse coletivo, como o apoio a órgãos de proteção civil.

A pesquisa teve como ponto de partida o desenvolvimento de um dispositivo *IoT* voltado à segurança ocupacional em ambientes de armazéns logísticos, utilizando como método a *DSR*. A aplicação desse método foi fundamental para a evolução da tese, pois possibilitou não apenas a construção do artefato inicial, mas também o surgimento de novos artefatos ao longo do processo de investigação.

O primeiro deles é o dispositivo *IoT* de sensoriamento para armazéns, concebido como uma instanciação prática que materializou a proposta inicial da tese. Durante a execução do método, esse artefato evoluiu para uma segunda versão mais robusta, que incorporou sensores de temperatura, umidade e pressão atmosférica, combinados ao acelerômetro já presente no protótipo original, ampliando assim as possibilidades de monitoramento do ambiente de armazenagem, bem como sua reutilização pela sociedade no seu entorno.

Como evolução desse processo, a partir de fundamentos extraídos da literatura e de entrevistas realizadas com o Corpo de Bombeiros e a Defesa Civil, elaborou-se uma arquitetura *IoT* voltada para armazéns logísticos sob a ótica da Logística 5.0. Essa arquitetura organiza os elementos e fluxos necessários à implementação da *IoT* em cenários que extrapolam a lógica estritamente operacional. Além de apoiar a eficiência interna, ela incorpora contribuições de interesse coletivo, especialmente para as comunidades situadas no entorno dos armazéns, refor-

quando, assim, o alinhamento com a centralidade humana, a resiliência e a sustentabilidade que caracterizam a Logística 5.0.

Na sequência, para validação dessa arquitetura, desenvolveu-se um protótipo de processamento, visualização e tomada de ações. Sua função central foi validar a integração entre a coleta de dados dos dispositivos *IoT* e o apoio à tomada de decisão, permitindo não apenas a análise em tempo real das condições de armazenagem, mas também a proposição de respostas rápidas a eventos críticos.

Por fim, como resultado de todo o processo de execução da metodologia, concebeu-se um *framework* da Logística 5.0 voltado especificamente para armazéns inteligentes. Esse *framework* sintetiza os principais elementos que caracterizam um armazém orientado a essa lógica: as operações logísticas, os funcionários, a tecnologia e, de forma inédita em comparação às fases anteriores da logística, a própria sociedade como parte integrante do sistema.

Todo o processo de criação dos artefatos foi sustentado por uma base teórica sólida, composta pela literatura sobre Internet das Coisas e logística, complementada pela ainda incipiente produção acadêmica acerca da Logística 5.0. Somaram-se a esses fundamentos as contribuições práticas oriundas de entrevistas realizadas com o Corpo de Bombeiros e a Cruz Vermelha. Essa combinação entre referenciais teóricos e percepções de especialistas reforçou a validade dos artefatos desenvolvidos e ampliou o escopo de suas aplicações para além do ambiente operacional de um armazém logístico. Além disso, essa dinâmica de desenvolvimento é coerente com o que apontam Lacerda et al. (2013), ao destacarem que novos artefatos podem emergir ao longo da aplicação do método *DSR*.

Ainda no contexto de sustentabilidade, os artefatos desenvolvidos promovem inovação, pois combinam baixo consumo energético com a preocupação em otimizar os dados gerados. Essa otimização visa à recombinação de informações para produzir conhecimento útil à sociedade, especialmente às comunidades localizadas no entorno dos armazéns.

Nos exemplos de recombinação de dados *IoT* produzidos em armazéns logísticos, os resultados obtidos - validados por integrantes do Corpo de Bombeiros e da Defesa Civil, em níveis estadual e municipal - demonstraram aplicações concretas desses dados em contextos que envolvem diretamente a comunidade do entorno. Tais aplicações reforçam o potencial dos armazéns como fontes de informações relevantes para a sociedade, capazes de fornecer subsídios complementares sobre as condições ambientais locais, bem como apoiar a tomada de decisão em situações de risco de desastres.

Além disso, ressalta-se que o desenvolvimento desta tese ocorreu no âmbito de um laboratório vivo (*living lab*) da Universidade de Caxias do Sul, denominado *City Living Lab*, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Administração. Esse laboratório é formado por uma equipe multidisciplinar composta por profissionais das áreas de Arquitetura, Ciência de Dados, Engenharia, Comunicação, Marketing, entre outras, o que possibilitou diálogos e trocas de experiências sob diferentes perspectivas. Essa diversidade de olhares gerou *insights* importantes para a pesquisa, contribuindo significativamente para o refinamento teórico e prático

desta tese.

A experiência no *City Living Lab* também viabilizou duas viagens internacionais, realizadas para Londres, em 2024, e para as cidades de Turim, Berna e Munique, no final de 2025. Essas experiências permitiram reflexões aprofundadas sobre a questão de pesquisa e sobre o processo logístico em uma perspectiva global. Em Londres, por exemplo, constatou-se que o governo local considera o transporte e a logística como uma de suas prioridades estratégicas para seu desenvolvimento até 2050¹, promovendo projetos conjuntos entre a Cidade de Londres, os 32 *boroughs* que compõem sua região metropolitana e a iniciativa privada². Já em Munique, a empresa SAP apresentou soluções de monitoramento do processo logístico e da cadeia de suprimentos que permitem priorizar fornecedores com histórico comprovado de sustentabilidade e controle da pegada de carbono. Esses casos demonstram a preocupação de entes públicos e privados com o aprimoramento dos processos logísticos, incorporando dimensões ambientais e sociais à eficiência operacional.

Portanto, a experiência vivenciada nesse *living lab* possibilitou o contato com diversos atores da sociedade - nacionais e internacionais, públicos e privados - e proporcionaram uma visão multidimensional sobre o desenvolvimento da pesquisa. As interações estabelecidas permitiram obter *insights* que refinaram o escopo e a condução desta tese, fortalecendo seu caráter aplicado e socialmente orientado.

6.1 CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS

Do ponto de vista teórico, esta tese apresenta quatro contribuições principais. A primeira refere-se ao desenvolvimento de um artefato na forma de arquitetura que sustenta a aplicação da Internet das Coisas sob a ótica da Logística 5.0. Esse artefato amplia a compreensão sobre o papel dos armazéns logísticos, reposicionando-os como agentes conectados capazes de integrar dados de diferentes fontes, recombina informações e produzir conhecimento útil não apenas para as operações internas, mas também para comunidades do entorno, trazendo a centralidade do ser humano, a resiliência e a sustentabilidade como outros eixos estruturantes da logística.

A segunda contribuição consiste na proposição de um novo modelo de armazém inteligente que inclui a sociedade como um de seus componentes estruturantes. Baseado nas premissas da Logística 5.0, essa inovação teórica ressignifica a própria concepção de logística ao extrapolar os limites organizacionais e incorporar o impacto social das operações. Ao estabelecer um paralelo com os princípios da Sociedade 5.0, o modelo posiciona os armazéns como infraestruturas sociotécnicas com funções estendidas, que vão desde a eficiência operacional até o apoio em situações de emergência, como enchentes, incêndios e outros desastres climáticos.

¹A prefeitura de Londres e sua região metropolitana elaborou em 2015 um documento contendo uma metas para 2050 e o que precisa ser feito para atendê-las. O documento está disponível em <https://www.london.gov.uk/sites/default/files/01_london_infrastructure_plan_2050_-_presentation.pdf>.

²Informações sobre os projetos desenvolvidos podem ser consultados em <https://opportunity.london/about/>

A terceira contribuição corresponde à apresentação de evidências empíricas que fortalecem a Logística 5.0 como uma nova fase evolutiva. A avaliação dos artefatos em ambientes reais e simulados demonstra, de forma prática, como os princípios dessa abordagem podem ser aplicados e testados. Essa demonstração é relevante porque oferece um corpo inicial de validações que aproxima a literatura ainda incipiente de resultados concretos, consolidando a Logística 5.0 como campo legítimo de investigação científica.

Por fim, destaca-se a contribuição da tese ao integrar os princípios da Logística 5.0 com a aplicação da *IoT* em um modelo conceitual direcionado a armazéns inteligentes. Ao transformar um conceito emergente em representações estruturadas e testáveis, a pesquisa fornece uma base teórica mais consistente, que poderá ser explorada em estudos futuros, seja por meio de aprofundamentos, comparações ou replicações. Essa sistematização reforça a legitimidade da Logística 5.0 como abordagem científica e amplia o repertório conceitual disponível para pesquisadores e profissionais da área.

Assim, a incorporação dos princípios da Logística 5.0, aliada a tecnologias *IoT*, habilita armazéns inteligentes a atuarem como infraestruturas sociotécnicas capazes de integrar simultaneamente capacidades operacionais avançadas e funções socioambientais. Nessa configuração emergente, os armazéns deixam de atuar apenas como unidades de armazenagem para se tornarem plataformas híbridas de criação de valor compartilhado, sustentadas por práticas de colaboração orientada por dados - compreendidas aqui como o compartilhamento controlado de informações, a integração e interoperabilidade entre sistemas e atores internos e externos e a cocriação de serviços orientados a dados a partir desse ecossistema de dados.

6.2 CONTRIBUIÇÕES GERENCIAIS

Do ponto de vista gerencial, esta tese apresenta quatro contribuições principais. A primeira refere-se à demonstração de que a recombinação dos dados de sensoriamento em armazéns inteligentes pode gerar informações alinhadas aos ODS e às práticas de *ESG*. Essa possibilidade amplia a relevância estratégica da *IoT*, pois conecta o desempenho operacional interno às demandas externas de sustentabilidade e responsabilidade corporativa, permitindo que gestores integrem métricas ambientais e sociais diretamente às rotinas logísticas.

A segunda contribuição consiste em evidenciar a viabilidade da Logística 5.0 como uma evolução natural da Logística 4.0, inclusive em empresas que já utilizam *IoT*. Nesse sentido, não há necessidade de grandes investimentos adicionais em infraestrutura tecnológica: o simples compartilhamento dos dados de sensoriamento com órgãos públicos e organizações de socorro já se mostra suficiente para agregar valor. Alternativamente, as empresas podem processar os dados internamente e entregá-los analisados a essas instituições, fortalecendo sua atuação em situações críticas, como desastres climáticos.

A terceira contribuição relaciona-se ao papel estratégico da recombinação de dados como habilitador da adoção da *IoT* em armazéns inteligentes. Ao demonstrar que a mesma

infraestrutura tecnológica pode servir tanto à eficiência operacional quanto à integração com a sociedade, a tese oferece subsídios para que gestores reconheçam a *IoT* não apenas como ferramenta de produtividade, mas também como um recurso de resiliência e de legitimação institucional junto às comunidades em que estão inseridos.

Por fim, a quarta contribuição reside em mostrar que a *IoT* pode ser implementada de forma incremental e escalável, adaptando-se às condições de empresas de diferentes portes e níveis de maturidade digital. Essa perspectiva gerencial reforça que iniciativas orientadas à Logística 5.0 não se limitam a grandes corporações, mas podem ser adotadas progressivamente, criando valor tanto para a competitividade organizacional quanto para a sociedade. Ao possibilitar essa visão, a tese fornece um exemplo prático para que gestores alinhem estratégias operacionais e de sustentabilidade sem demandar rupturas ou investimentos inviáveis.

6.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como limitações desta pesquisa, destaca-se inicialmente que a reconstrução histórica da evolução da logística e do processo de armazenagem foi orientada predominantemente pelo viés da evolução tecnológica dos computadores e das redes de comunicação de dados. Embora esse recorte esteja diretamente alinhado ao objetivo da tese e ao desenvolvimento dos artefatos baseados em *IoT*, ele desconsidera outras transformações estruturantes do campo logístico - como a containerização, a expansão dos modais intermodais e a evolução das práticas de gestão da cadeia de suprimentos - que também moldaram de maneira significativa o desenho e o funcionamento dos armazéns modernos.

Do ponto de vista empírico, a avaliação dos artefatos desenvolvidos considerou apenas uma parcela dos atores que compõem o ecossistema de proteção e resposta a emergências, envolvendo principalmente a Defesa Civil, o Corpo de Bombeiros e a Cruz Vermelha. A ausência de outros agentes, como forças de segurança, unidades hospitalares, serviços de saúde pública, empresas de infraestrutura urbana e especialistas em meteorologia, limita a abrangência e a pluralidade de percepções que poderiam enriquecer o entendimento sobre o potencial de uso dos dados gerados pelos armazéns inteligentes.

Adicionalmente, os testes realizados ocorreram em cenários específicos - alguns simulados e outros em ambiente real - vinculados à realidade da empresa parceira e às características ambientais e climáticas da Serra Gaúcha. Esse contexto particular pode restringir a generalização dos resultados para outras regiões, setores ou empresas com dinâmicas logísticas, arquiteturas operacionais ou riscos ambientais distintos.

Por fim, ressalta-se que os artefatos produzidos foram testados sob condições controladas ou de pequena escala. Essa limitação impediu a análise de resultados relacionados à escalabilidade, interoperabilidade entre plataformas, governança de dados e questões regulatórias - aspectos importantes quando se discute a inserção da Logística 5.0 como infraestrutura de interesse público.

6.4 TRABALHOS FUTUROS

Como possibilidades para pesquisas futuras, sugerem-se diferentes linhas de investigação. Uma delas consiste na recombinação dos dados coletados nesta tese em outros contextos da Logística 5.0, como agricultura urbana, ambientes hospitalares, monitoramento de microclima e análise da pegada de carbono. Um exemplo de recombinação que pode ser explorado é a busca de relações entre variáveis aparentemente periféricas - como o ruído identificado no armazém de Flores da Cunha - e eventos ambientais, como chuvas intensas, ampliando a capacidade preditiva dos sistemas.

Outra possibilidade envolve a realização de novos testes, em ambientes reais ou simulados, que permitam avaliar a arquitetura e os artefatos sob diferentes perspectivas da Logística 5.0, especialmente aquelas relacionadas à sustentabilidade, à resiliência e à centricidade no ser humano, conforme apresentado no Capítulo 1 deste trabalho, na Tabela 2. Nessa direção, o dispositivo *IoT* desenvolvido - que contém um acelerômetro - poderia ser aplicado em cenários de detecção de eventos extremos, como terremotos, inundações e deslizamentos, mediante a análise de padrões de aceleração.

Além disso, pesquisas futuras podem explorar de forma mais aprofundada o uso dos dados coletados para aprimorar a gestão interna dos armazéns. Um exemplo é a análise de como essas informações podem contribuir para a redução de custos com seguros, a partir da detecção e prevenção de riscos estruturais. Outro caminho seria investigar a integração dos dados de armazéns inteligentes com sistemas preditivos de manutenção e planejamento urbano, reforçando o potencial de escalabilidade da solução. Nessa mesma perspectiva interna, estudos futuros também podem avaliar o efeito da recombinação dos dados de sensoriamento *IoT* sobre a curva de produtividade das operações tanto do armazém logístico quanto do processo logístico em geral, identificando em que medida tal prática pode achatar oscilações de desempenho organizacional por meio da adoção de medidas preventivas e reativas em situações de desastres ou eventos disruptivos.

Recomenda-se também como trabalho futuro a ampliação da investigação para diferentes portes e tipos de empresas, bem como para diferentes regiões, a fim de avaliar o grau de adaptação necessário em contextos variados de maturidade digital, cultura organizacional e inserção social. Tal abordagem permitiria consolidar a Logística 5.0 como conceito aplicável em múltiplos cenários e enriquecer o conjunto de demonstrações empíricas que fundamentam sua evolução como campo de pesquisa, bem como permitam avaliar a replicabilidade dos artefatos propostos.

Finalmente, sugere-se a utilização dos dados coletados nesta tese em iniciativas nacionais e internacionais de colaboração de dados, como o projeto Data Collaboratives, de modo a possibilitar o cruzamento dessas informações com outras bases públicas já disponíveis. Essa integração pode ampliar o potencial analítico e aplicado dos resultados, permitindo a exploração de novos contextos de uso dos dados à luz dos princípios da Logística 5.0 - especialmente

no que se refere à sustentabilidade, à centralidade humana e à resiliência.

REFERÊNCIAS

- ABBATE, J. Getting small: a short history of the personal computer. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 87, n. 9, p. 1695–1698, Sept. 1999.
- ABOL, A. B. d. O. L. **Perfil dos operadores logísticos - edição 2022**. Disponível em: <<https://abolbrasil.org.br/pdf/perfil-dos-operadores-logisticos-2022.pdf>>. Acesso em: 26.jul.2023.
- AGUILAR, S. et al. Energy consumption model of schc packet fragmentation over sigfox lpwan. **Sensors**, [S.l.], v. 22, n. 66, p. 2120, Jan. 2022.
- AHMED, S. et al. Towards supply chain visibility using internet of things: a dyadic analysis review. **Sensors**, [S.l.], v. 21, n. 12, p. 1–24, 2021.
- AKESTORIDIS, D.-G.; SEKAR, V.; TAGUE, P. On the security of thread networks: experimentation with openthread-enabled devices. In: ACM CONFERENCE ON SECURITY AND PRIVACY IN WIRELESS AND MOBILE NETWORKS, 15., 2022. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2022. p. 233–244.
- AL-SARAWI, S. et al. Internet of things (iot) communication protocols: review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY (ICIT), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p. 685–690.
- ALAMILLO-MONTES, G. I.; MARTÍNEZ-CRUZ, A.; URIBE, C. F. Security scheme for an rfid access control based on internet of things. In: IEEE MEXICAN INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE (ENC), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6.
- ALI, I.; PHAN, H. M. Industry 4.0 technologies and sustainable warehousing: a systematic literature review and future research agenda. **The International Journal of Logistics Management**, [S.l.], v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 2022.
- ALLEN, R. M.; STOGAITIS, M. Global growth of earthquake early warning. **Science**, [S.l.], v. 375, n. 6582, p. 717–718, 2022.
- ALPHA, G. **Grupo alpha**. Disponível em: <<https://www.bertolini.com.br/grupo>>. Acesso em: 29.abr.2024.
- ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. N. **Logística aplicada**: suprimento e distribuição física. [S.l.]: Editora Blucher, 2000.
- AMR, M.; EZZAT, M.; KASSEM, S. Logistics 4.0: definition and historical background. **NILES 2019 - Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference**, [S.l.], p. 46–49, 2019.
- ANATEL, A. N. d. T. **Tecnologia 5g**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>>. Acesso em: 04.mar.2024.
- ANDRES, B. et al. Enabling technologies to support supply chain logistics 5.0. **IEEE Access**, [S.l.], 2024.

- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: an r-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- ARIAS-ARANDA, D.; MOLINA, L. M.; STANTCHEV, V. Integration of internet of things and blockchain to increase humanitarian aid supply chains performance. **Dyna (Spain)**, [S.l.], v. 96, n. 6, p. 653–658, 2021.
- ASSUNÇÃO, M. L. d.; ALMEIDA, F. A. S. d.; PORTO, M. D. Environmental, social and governance (esg): uma revisão sistemática. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. e3248–e3248, Feb. 2024.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: a survey. **Computer Networks**, [S.l.], v. 54, n. 15, p. 2787–2805, Oct. 2010.
- AZADEGAN, A. et al. Leadership styles in supply chain disruptions: a multimethod evaluation based on practitioner insights. **International Journal of Operations & Production Management**, [S.l.], v. 41, n. 10, p. 1615–1632, 2021.
- BALLOU, R. H. The evolution and future of logistics and supply chain management. **Production**, [S.l.], v. 16, p. 375–386, Dec. 2006.
- BAMYACI, M. E. Definition, importance and historical development of logistics from the beginning to the present. **Social and humanities science: research, theory**, [S.l.], p. 243–255, 2021.
- BANISTER, D.; HICKMAN, R. Transport futures: thinking the unthinkable. **Transport Policy**, [S.l.], v. 29, p. 283–293, 2013.
- BARRETO, L.; AMARAL, A.; PEREIRA, T. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. **Procedia Manufacturing**, [S.l.], v. 13, p. 1245–1252, Jan. 2017.
- BAVARESCO, R. et al. Internet of things and occupational well-being in industry 4.0: a systematic mapping study and taxonomy. **Computers & Industrial Engineering**, [S.l.], v. 161, p. 107670, 2021.
- BEKKAI, B.; BENDJENNA, H.; KITOUNI, I. Internet of things: a recent survey. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN MATHEMATICS AND INFORMATICS (ICRAMI), 2021., 2021, Tebessa, Algeria. **Anais... IEEE**, 2021. p. 1–9.
- BENTO GONÇALVES, M. de. **Lei ordinária 12.912**. Disponível em: <<https://sapl.camarabento.rs.gov.br/norma/12902>>. Acesso em: 30.jul.2025.
- BERGER, A. A. Smartphones: everyone can do anything. In: _____. **Gizmos or: the electronic imperative: how digital devices have transformed american character and culture**. New York: Palgrave Macmillan US, 2015. p. 25–35.
- BERNERS-LEE, T. J. **Information management: a proposal**. Geneva: CERN, 1989. March 1989 version includes the annotations from Mike Sendall, Tim Berners-Lee's supervisor.
- BRAINERD, J. G.; SHARPLESS, T. K. The eniac. **Electrical Engineering**, [S.l.], v. 67, n. 2, p. 163–172, Feb. 1948.

- BRASIL, A. **Tecnologia 5g estreia no brasil nesta quarta-feira.** Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-07/tecnologia-5g-estrela-no-brasil-nesta-quarta-feira/>>. Acesso em: 04.mar.2024.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 28.jan.2025.
- BRASIL. **Lei de licitações e contratos administrativos.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm>. Acesso em: 29.jul.2025.
- CALAFATE, D. **O layout do armazém.** Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/o-layout-do-armaz>>
- CARR, C. S.; CROCKER, S. D.; CERF, V. G. Host-host communication protocol in the arpa network. In: MAY 5-7, 1970, SPRING JOINT COMPUTER CONFERENCE, 1970, New York, NY, USA. **Proceedings...** Association for Computing Machinery, 1970. p. 589–597. (AFIPS '70 (Spring)).
- CASTIGLIONI, C. A.; DREI, A.; KANYILMAZ, A. Continuous monitoring of service conditions of a steel storage racking system. **Journal of Earthquake Engineering**, [S.l.], v. 24, n. 3, p. 485–505, 2020.
- CASTIGLIONI, C. A.; MILANO, P. di. Continuous monitoring of a steel storage racking system under service condition. , [S.l.], 2015.
- CHAUHAN, C.; SINGH, A. A review of Industry 4.0 in supply chain management studies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, [S.l.], v. 31, n. 5, p. 863–886, 2020.
- CHIAPPA, J. N. **Arpanet technical information:** geographic maps. Disponível em: <<http://mercury.lcs.mit.edu/jnc/tech/arpago.html>>. Acesso em: 03.jan.2024.
- CHINCHILLA-ROMERO, N. et al. Collision avoidance resource allocation for lorawan. **Sensors (Switzerland)**, [S.l.], v. 21, n. 4, p. 1–19, 2021. Citation Key: Chinchilla-Romero2021.
- CHOI, W.; JUNG, I. Y. Multi-sensor photoelectric fire alarm device implementation for early fire detection in campsites. **Applied Sciences**, [S.l.], v. 14, n. 2121, p. 9965, Jan. 2024.
- CHONG, C.-Y.; KUMAR, S. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 91, n. 8, p. 1247–1256, Aug. 2003.
- CHRISTOPHER, M. **Logistics and supply chain management.** [S.l.]: Pearson Uk, 2022.
- CLIMAMETER. **South brazil floods locally exacerbated by both human-driven climate change and natural variability.** Disponível em: <<https://www.climameter.org/20240502-south-brazil-floods/>>. Acesso em: 22.mai.2024.
- CNN, C. N. N. B. **Julho é o mês mais quente registrado nos últimos 120 mil anos do planeta terra, diz relatório.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/julho-e-o-mes-mais-quente-registrado-nos-ultimos-120-mil-anos-do-planeta-terra-diz-relatorio/>>. Acesso em: 02.ago.2023.

- CONWAY, L. The mpc adventures: experiences with the generation of vlsi design and implementation methodologies. **Microprocessing and Microprogramming**, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 209–228, Nov. 1982.
- CSCMP, C. o. S. C. M. P. **Cscmp supply chain management definitions and glossary**. Disponível em: <https://cscmp.org/CSCMP/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx>. Acesso em: 15.abr.2024.
- CUNHA, M. de Flores da. **Lei ordinária 3.343**. Disponível em: <<https://www.camaraflores.rs.gov.br/leis-municipais/7437>>. Acesso em: 30.jul.2025.
- DASKIN, M. S. Logistics: an overview of the state of the art and perspectives on future research. **Transportation Research Part A: General**, [S.l.], v. 19, n. 5, p. 383–398, Sept. 1985.
- DELOITTE. **Deloitte insights - tech trends 2022**. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/articles/US164706_Tech-trends-2022/DI_Tech-trends-2022.pdf>. Acesso em: 03.out.2022.
- DU, Z. (Ed.). Study of smart warehouse management system based on the iot. In: _____. **Intelligence computation and evolutionary computation**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 203–207. (Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 180).
- DING, Y. et al. Smart logistics based on the internet of things technology: an overview. **International Journal of Logistics Research and Applications**, [S.l.], v. 24, n. 4, p. 323–345, July 2021.
- DISSORN, A.; SUWANBAMRUNG, P. Smart logistics 5.0 transformation strategy applied to bridging the analytics hierarchy process and disruption intelligence inventory management trends. **Asian Administration & Management Review**, [S.l.], v. 6, n. 2, 2023.
- DIXIT, V.; VERMA, P. Identification, assessment, and quantification of new risks for Logistics 4.0. **International Journal of Logistics Research and Applications**, [S.l.], v. 0, n. 0, p. 1–25, 2022.
- DRTLOG. **Separação**. Disponível em: <<https://www.drtlog.com.br/Separacao>>. Acesso em: 01.mai.2024.
- DÍAZ-RAMÍREZ, A. et al. Wireless sensor networks and fusion information methods for forest fire detection. **Procedia Technology**, [S.l.], v. 3, p. 69–79, Jan. 2012.
- EDWARDS-SCHACHTER, M. The nature and variety of innovation. **International Journal of Innovation Studies**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 65–79, June 2018.
- ELIJAH, O. et al. An overview of internet of things (iot) and data analytics in agriculture: benefits and challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, [S.l.], v. 5, n. 5, p. 3758–3773, 2018.
- ENNAGAD, S. How effective logistics affect customer satisfaction: a literature review. **Revue Française d'Economie et de Gestion**, [S.l.], v. 4, n. 33, Mar. 2023.
- FALADE, A. et al. Evolution of computer network from inception to the internet of everything: an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING AND BUSINESS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SEB-SDG), 2023., 2023. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2023. v. 1, p. 1–7.

- FAPESP, R. P. **2024 foi o primeiro ano com aquecimento global acima de 1,5°C**. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2024-foi-o-primeiro-ano-com-aquecimento-global-acima-de-15-c/2>>. Acesso em: 03.ago.2025.
- FARAJPOUR, F. et al. Digital supply chain blueprint via a systematic literature review. **Technological Forecasting and Social Change**, [S.l.], v. 184, n. August, p. 121976, 2022.
- FAROOQ, M. S. et al. Role of iot technology in agriculture: a systematic literature review. **Electronics**, [S.l.], v. 9, n. 22, p. 319, Feb. 2020.
- FELKER, J. H. Performance of tradic transistor digital computer. In: DECEMBER 8-10, 1954, EASTERN JOINT COMPUTER CONFERENCE: DESIGN AND APPLICATION OF SMALL DIGITAL COMPUTERS, 1954, New York, NY, USA. **Proceedings...** Association for Computing Machinery, 1954. p. 46–49. (AIEE-IRE '54 (Eastern)).
- FINEP. **Kevin ashton – entrevista exclusiva com o criador do termo “internet das coisas**. Disponível em: <<http://finep.gov.br/noticias/todas-noticias/4446-kevin-ashton-entrevista-exclusiva-com-o-criador-do-termo-internet-das-coisas>>. Acesso em: 13.nov.2023.
- FREHE, V.; MEHMANN, J.; TEUTEBERG, F. Understanding and assessing crowd logistics business models – using everyday people for last mile delivery. **Journal of Business Industrial Marketing**, [S.l.], v. 32, p. 75–97, Feb. 2017.
- FUTUROMAQ. **Empilhadeiras a diesel ou elétricas? conheça as vantagens de cada**. Disponível em: <<https://www.futuroma.com.br/noticias/dicas/empilhadeiras-a-diesel-ou-eletricas-conheca-as-vantagens-de-cada>>. Acesso em: 01.mai.2024.
- G1. **Rio grande do sul ainda vai viver muitos eventos extremos, dizem cientistas brasileiras que colaboraram com ipcc**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/05/07/rio-grande-do-sul-ainda-vai-viver-muitos-eventos-extremos-dizem-cientistas-brasileiras-que-colaboraram-com-ipcc.ghtml>>. Acesso em: 09.mai.2024.
- GEEST, M. van; TEKINERDOGAN, B.; CATAL, C. Smart warehouses: rationale, challenges and solution directions. **Applied Sciences (Switzerland)**, [S.l.], v. 12, n. 1, p. 1–16, 2022.
- GERSHENFELD, N.; KRIKORIAN, R.; COHEN, D. The internet of things. **Scientific American**, [S.l.], v. 291, n. 4, p. 76–81, 2004.
- GITHENS, J. A. The tradic leprechaun computer. In: PAPERS AND DISCUSSIONS PRESENTED AT THE DECEMBER 10-12, 1956, EASTERN JOINT COMPUTER CONFERENCE: NEW DEVELOPMENTS IN COMPUTERS, 1956, New York, NY, USA. **Anais...** Association for Computing Machinery, 1956. p. 29–33. (AIEE-IRE '56 (Eastern)).
- GLOBO, U. s. p. **Brasil dá adeus ao inverno mais quente da sua história moderna e recebe primavera — com chuvas e mais calor**. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/clima/noticia/2023/09/23/brasil-da-adeus-ao-inverno-mais-quente-da-sua-historia-moderna-e-recebe-primavera-com-chuvas-e-mais-calor.ghtml/>>. Acesso em: 01.out.2023.
- RANDELL, B. (Ed.). The electronic numerical integrator and computer (eniac). In: _____. **The origins of digital computers: selected papers**. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982. p. 359–373. (Texts and Monographs in Computer Science).

- GOTTUK, D. T.; DINABURG, J. Fire detection in warehouse facilities. **Fire Protection Research Foundation**, [S.l.], 2012.
- GUPTA, H. et al. Strategies to overcome barriers to innovative digitalisation technologies for supply chain logistics resilience during pandemic. **Technology in Society**, [S.l.], v. 69, n. March, p. 101970, 2022.
- GUTIERREZ-LOPEZ, A.; CRUZ-PAZ, I.; MUÑOZ MANDUJANO, M. Algorithm to predict the rainfall starting point as a function of atmospheric pressure, humidity, and dewpoint. **Climate**, [S.l.], v. 7, n. 1111, p. 131, Nov. 2019.
- HADDAWAY, N. R. et al. Prisma2020: an r package and shiny app for producing prisma 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and open synthesis. **Campbell systematic reviews**, [S.l.], v. 18, n. 2, p. e1230, 2022.
- HAIGH, T.; PRIESTLEY, P. M.; ROPE, C. **Eniac in action: making and remaking the modern computer**. [S.l.]: MIT press, 2016.
- HANSEN, J. E. et al. Global warming has accelerated: are the united nations and the public well-informed? **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, [S.l.], v. 67, n. 1, p. 6–44, 2025.
- HARDWARE.COM.BR. **O altair**. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/guias/historia-informatica/altair.html>>. Acesso em: 05.fev.2024.
- HASSEBO, A.; TEALAB, M. Global models of smart cities and potential iot applications: a review. **IoT**, [S.l.], v. 4, n. 33, p. 366–411, Sept. 2023.
- HESKETT, J. L.; BALLOU, R. H. Logistical planning in inter-organization systems. **Academy of Management Proceedings**, [S.l.], v. 1966, n. 1, p. 124–136, Dec. 1966.
- HEVNER, A. R. A three cycle view of design science research. , [S.l.], v. 19, 2007.
- HUANG, S. et al. Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution. **Journal of Manufacturing Systems**, [S.l.], v. 64, n. July, p. 424–428, 2022.
- IBGE, I. B. d. G. e. E. **Resultados do censo demográfico 2022**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>>. Acesso em: 03.ago.2025.
- INSIGHTS, S. **Top 9 warehouse management trends innovations in 2023**. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/transportation-logistics/tl2030/assets/pwc-tl2030-pub.pdf>>. Acesso em: 03.mar.2023.
- INTEL. **Announcing a new era of integrated electronics**. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/www/us/en/history/virtual-vault/articles/the-intel-4004.html>>. Acesso em: 08.jan.2024.
- INTERNATIONAL, E. **10 principais tendências globais de consumo 2022**. Disponível em: <<https://go.euromonitor.com/rs/805-KOK-719/images/wpGCT22PG-v0.4.pdf0/>>. Acesso em: 05.out.2022.
- IPSOS. **Shaping 2025 and beyond**. Disponível em: <<https://www.ipsos.com/en/shaping-2025-and-beyond>>. Acesso em: 29.set.2022.

- ISLAM, D. M. Z. et al. Logistics and supply chain management. **Research in Transportation Economics**, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 3–16, 2013. An Intensive Programme in Railway and Logistics.
- JAFARI, N.; AZARIAN, M.; YU, H. Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: what are the implications for smart logistics? **Logistics**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 1–27, 2022.
- KALSOOM, T. et al. Impact of IoT on manufacturing industry 4.0: a new triangular systematic review. **Sustainability (Switzerland)**, [S.l.], v. 13, n. 22, p. 1–22, 2021.
- KARTNIG, G.; GRÖSEL, B.; ZRNIĆ, N. Past, state-of-the-art and future of intralogistics in relation to megatrends. **FME Transactions**, [S.l.], v. 40, n. 4, p. 193–200, 2012.
- KATOCH, R. Iot research in supply chain management and logistics: a bibliometric analysis using vosviewer software. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 56, p. 2505–2515, 2022.
- KEIDAREN, J. B. F. **Logistics in the Age of society 5.0**. Disponível em: <http://www.keidanren.or.jp/en/policy/2018/085_overview.pdf>. Acesso em: 05.abr.2023.
- KEIL, M.; HAGEMANN, V.; GLOCK, C. Promoting healthy and safe driving: physiological and psychological evaluation of truck drivers for individualized shift and route planning. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, [S.l.], v. 111, p. 409–434, May 2025.
- KONDAVEETI, H. K. et al. A systematic literature review on prototyping with arduino: applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, [S.l.], v. 40, p. 100364, May 2021.
- KOPANAKIS, F. R. Embarcando esperança: o esforço logístico da marinha nas enchentes de 2024 no rio grande do sul. **Revista do Clube Naval**, [S.l.], v. 4, n. 411, 2024.
- KRAJCI, I.; CUMMINGS, D. (Ed.). The mobile device and operating system landscape. In: _____. **Android on x86: an introduction to optimizing for intel® architecture**. Berkeley, CA: Apress, 2013. p. 9–15.
- KRISTOFFERSEN, E. et al. The smart circular economy: a digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. **Journal of Business Research**, [S.l.], v. 120, n. July, p. 241–261, 2020.
- KUMAR, S. et al. Integrated blockchain and internet of things in the food supply chain: adoption barriers. **Technovation**, [S.l.], v. 118, p. 102589, 2022.
- KUMAR, S. et al. Integrated blockchain and internet of things in the food supply chain: adoption barriers. **Technovation**, [S.l.], v. 118, n. July, p. 102589, 2022.
- LAB, T. G. **Data collaboratives**. Disponível em: <<https://datacollaboratives.org/>>. Acesso em: 27.out.2025.
- LACERDA, D. P. et al. Design science research: a research method to production engineering. **Gestão Produção**, [S.l.], v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013. Citation Key: Lacerda2013.
- LEE, C. et al. Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics. **International Journal of Production Research**, [S.l.], v. 56, n. 8, p. 2753–2768, Apr. 2018.

- LEE, C. T. et al. Sustaining the low-carbon emission development in asia and beyond: sustainable energy, water, transportation and low-carbon emission technology. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 146, p. 1–13, Mar. 2017.
- LENG, J. et al. Industry 5.0: prospect and retrospect. **Journal of Manufacturing Systems**, [S.l.], v. 65, n. September, p. 279–295, 2022.
- LEU, F. Y. et al. A smartphone-based wearable sensors for monitoring real-time physiological data. **Computers and Electrical Engineering**, [S.l.], v. 0, p. 1–17, 2017. Citation Key: Leu2017.
- LI, J. et al. Logistics 5.0: from intelligent networks to sustainable ecosystems. **IEEE Transactions on Intelligent Vehicles**, [S.l.], v. 8, n. 7, p. 3771–3774, July 2023.
- LIU, C.; MA, T. Green logistics management and supply chain system construction based on internet of things technology. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, [S.l.], v. 35, p. 100773, Sep 2022.
- LIU, Y. et al. Quantitative study on ghg emissions and the gwp influence of cemetery green space maintenance based on lca. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, [S.l.], v. 31, n. 11, p. 67–81, Feb. 2023.
- LOGÍSTICA, A. para. **9 soluções simples utilizadas na armazenagem de produtos**. Disponível em: <<https://www.arquiteturaparalogistica.com.br/9-solucoes-simples-utilizadas-na-armazenagem-de-produtos/>>. Acesso em: 01.mai.2024.
- LONGO, F.; PADOVANO, A.; UMBRELLO, S. Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: a human-centric perspective for the design of the factory of the future. **Applied Sciences**, [S.l.], v. 10, n. 12, p. 4182, 2020.
- MACHADO, N. T.; RODRIGUEZ, C. M. T. A measurement model of logistics 5.0 maturity: an integrative review and framework proposal based on literature. **ITEGAM-JETIA**, [S.l.], v. 11, n. 5151, p. 171–178, Feb. 2025.
- MACHADO, N. T.; RODRIGUEZ, C. M. T. A logistics 5.0 maturity model: a human-centric and sustainable approach for the supply chain of the future. **ITEGAM-JETIA**, [S.l.], v. 11, n. 5151, p. 164–170, Feb. 2025.
- MACK, C. A. Fifty years of moore’s law. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, [S.l.], v. 24, n. 2, p. 202–207, May 2011.
- MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. Internet of things (iot): a literature review. **Journal of Computer and Communications**, [S.l.], v. 3, n. 55, p. 164–173, May 2015.
- MAHROOF, K. A human-centric perspective exploring the readiness towards smart warehousing: the case of a large retail distribution warehouse. **International Journal of Information Management**, [S.l.], v. 45, p. 176–190, 2019. Citation Key: Mahroof2019.
- MAIA, M.; BEZERRA, C. A. Bibliometric analysis of scientific articles on jurimetry published in brazil. **RDBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, [S.l.], v. 18, p. e020018, 2023.
- MALIK, P. K. et al. Industrial internet of things and its applications in industry 4.0: state of the art. **Computer Communications**, [S.l.], v. 166, n. August 2020, p. 125–139, 2021.

- MALKI-EPSHTEIN, L. et al. Application of co2 monitoring methods for post-occupancy evaluation of ventilation effectiveness to mitigate airborne disease transmission at events. , [S.l.], Apr. 2022.
- MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers and Industrial Engineering**, [S.l.], v. 127, n. November 2017, p. 925–953, 2019.
- MANLEY, J. H. Embedded computers: software cost considerations. In: MAY 6-10, 1974, NATIONAL COMPUTER CONFERENCE AND EXPOSITION, 1974, New York, NY, USA. **Proceedings...** Association for Computing Machinery, 1974. p. 343–347. (AFIPS '74).
- MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, [S.l.], v. 15, n. 4, p. 251–266, Dec. 1995.
- MARTIN, C. Eniac: press conference that shook the world. **IEEE Technology and Society Magazine**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 3–10, 1995.
- MARTINS, V. W. B. et al. Sustainable practices in logistics systems: an overview of companies in brazil. **Sustainability**, [S.l.], v. 11, n. 1515, p. 4140, Jan. 2019.
- MARTÍNEZ CESEÑA, E. A.; MANCARELLA, P. Energy systems integration in smart districts: robust optimisation of multi-energy flows in integrated electricity, heat and gas networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 1122–1131, Jan. 2019.
- MECALUX. **As docas de carga e descarga.** Disponível em: <<https://www.mecalux.com.br/manual-de-armazenagem/desenho-do-armazem/docas-de-carga-descarga>>. Acesso em: 01.mai.2024.
- MENÊZES, A. K. M. d.; MARTINS, M. d. F. Conexões entre as temáticas objetivos de desenvolvimento sustentável (ods), indicadores de sustentabilidade e gestão municipal sustentável: uma revisão sistemática da literatura contemporânea. **Research, Society and Development**, [S.l.], v. 10, n. 55, p. e57810515309–e57810515309, May 2021.
- METCALFE, R. M.; BOGGS, D. R. Ethernet: distributed packet switching for local computer networks. **Communications of the ACM**, [S.l.], v. 19, n. 7, p. 395–404, July 1976.
- METSUL, M. **Serra gaúcha tem mês mais chuvoso já visto com marcas desconunais.** Disponível em: <<https://metsul.com/serra-gaucha-tem-mes-mais-chuvoso-ja-visto-com-marcas-descomunais/>>. Acesso em: 22.mai.2024.
- MILNER, A. M. et al. River ecosystem resilience to extreme flood events. **Ecology and Evolution**, [S.l.], v. 8, n. 16, p. 8354–8363, 2018.
- MIN, H. Smart warehousing as a wave of the future. **Logistics**, [S.l.], v. 7, n. 22, p. 30, June 2023.
- MOHAJAN, H. **Third industrial revolution brings global development.** 2021. 239–251 p. v. 7.
- MONFERDINI, L.; TEBALDI, L.; BOTTANI, E. From industry 4.0 to industry 5.0: opportunities, challenges, and future perspectives in logistics. **Procedia Computer Science**, [S.l.], v. 253, p. 2941–2950, Jan. 2025.
- MOSTAFA, N.; HAMDY, W.; ALAWADY, H. Impacts of internet of things on supply chains: a framework for warehousing. **Social Sciences**, [S.l.], v. 8, n. 3, p. 84, Mar. 2019.

- MUSTAPIĆ, M. et al. Use of green industry 5.0 technologies in logistics activities. **Tehnički glasnik**, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 471–477, July 2023.
- NAGY, D.; SCHUESSLER, J.; DUBINSKY, A. Defining and identifying disruptive innovations. **Industrial Marketing Management**, [S.l.], v. 57, p. 119–126, Aug. 2016.
- NICOLETTI, B.; APPOLLONI, A. Green logistics 5.0: a review of sustainability-oriented innovation with foundation models in logistics. **European Journal of Innovation Management**, [S.l.], v. 27, n. 9, p. 542–561, Dec. 2024.
- NINKOV, A.; FRANK, J. R.; MAGGIO, L. A. Bibliometrics: methods for studying academic publishing. **Perspectives on Medical Education**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 173–176, 2022.
- OGBODO, E. U.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; KURIEN, A. M. A survey on 5g and lpwan-iot for improved smart cities and remote area applications: from the aspect of architecture and security. **Sensors**, [S.l.], v. 22, n. 1616, p. 6313, Jan. 2022.
- ONU, O. d. N. U. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 17.ago.2025.
- ORACLE. **Supply chain 2030**: considerations for the future. Disponível em: <https://www.oracle.com/webfolder/s/delivery_production/docs/FY16h1/doc35/Aberdeen-SupChain2030ConsideFuture.pdf>. Acesso em: 07.out.2022.
- PAHLAVAN, K.; KRISHNAMURTHY, P. Evolution and impact of wi-fi technology and applications: a historical perspective. **International Journal of Wireless Information Networks**, [S.l.], v. 28, n. 1, p. 3–19, Mar. 2021.
- PAKSOY, T.; KOCHAN, C. G.; ALI, S. S. **Logistics 4.0**: digital transformation of supply chain management. [S.l.]: CRC Press, 2020.
- PAN, T.; ZHU, Y. (Ed.). Getting started with arduino. In: _____. **Designing embedded systems with arduino**: a fundamental technology for makers. Singapore: Springer, 2018. p. 3–16.
- PARK, S.; JAYARAMAN, S. Chapter 1 - wearables: fundamentals, advancements, and a roadmap for the future. In: SAZONOV, E. (Ed.). **Wearable sensors (second edition)**. Second Edition. ed. Oxford: Academic Press, 2021. p. 3–27.
- PEROTTI, S. et al. Assistive technologies and the human factor in warehousing: a picking experimental case with active and passive exoskeletons. **Procedia Computer Science**, [S.l.], v. 253, p. 1601–1610, Jan. 2025.
- PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; SANTOS, T. M. d. Design science research: pesquisa científica atrelada ao design de artefatos. **RE@D - Revista de Educação a Distância e Elearning**, [S.l.], v. 3, n. 11, p. 37–61, May 2020.
- PINHEIRO, A. A. Entraves para a consolidação da tecnologia de quinta geração (5g) no brasil. **Revista Contemporânea**, [S.l.], v. 4, n. 12, p. e7088–e7088, Dec. 2024.
- PIONEIRO, J. **Não há clima e não há logística, diz coordenador da tricofest sobre adiamento do evento em nova petrópolis**. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/pioneiro/colunistas/juliana-bevilaqua/noticia/2024/05/nao-ha-clima-e-nao-ha-logistica-diz-coordenador-da-tricofest-sobre-adiamento-do-evento-em-nova-petropolis-clvpk2e9n01pg011wnofk1841.html>>. Acesso em: 03.mai.2024.

- PIONEIRO, J. **Tremor de terra atinge pelo menos quatro bairros em caxias do sul**. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/pioneiro/geral/noticia/2024/05/tremor-de-terra-atinge-pelo-menos-quatro-bairros-em-caxias-do-sul-clw4r19dk000301fxvs70w7er.html>>. Acesso em: 10.jun.2024.
- PIONEIRO, J. **Nosso foco é o impacto emocional, diz diretor de grupo de bento gonçalves engajado na reconstrução do estado pós-enchentes**. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/pioneiro/colunistas/juliana-bevilaqua/noticia/2024/05/nosso-foco-e-o-impacto-emocional-diz-diretor-de-grupo-de-bento-goncalves-engajado-na-reconstrucao-do-estado-pos-enchentes-clw12wbk6004o012w3d3h6gkk.html>>. Acesso em: 10.jun.2024.
- POVO, J. G. do. **Bloqueios comprometem logística de transporte e setor produtivo no rio grande do sul**. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/brasil/impactos-bloqueios-rodovias-ferrovias-rio-grande-do-sul/>>. Acesso em: 09.mai.2024.
- PRESS, L. Dynabook revisited—portable computers past, present and future. **Communications of the ACM**, [S.l.], v. 35, n. 3, p. 25–32, Mar. 1992.
- PUGH, E. W. Stars: ibm system/360 [scanning our past]. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 101, n. 11, p. 2450–2457, Nov. 2013.
- PWC, P. **Transportation logistics 2030**. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/transportation-logistics/tl2030/assets/pwc-tl2030-pub.pdf>>. Acesso em: 07.out.2022.
- QUY, V. K. et al. Iot-enabled smart agriculture: architecture, applications, and challenges. **Applied Sciences**, [S.l.], v. 12, n. 77, p. 3396, Jan. 2022.
- RAJARAMAN, V. A concise history of the internet—i. **Resonance**, [S.l.], v. 27, n. 11, p. 1841–1856, 2022.
- RAMELAN, A. et al. Iot based weather station prototype with crhuda algorithm and regression for rain prediction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ICT FOR SMART SOCIETY (ICISS), 2024., 2024. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–4.
- RATHORE, B. et al. Identification and analysis of adoption barriers of disruptive technologies in the logistics industry. **International Journal of Logistics Management**, [S.l.], v. 33, n. 5, p. 136–169, 2022.
- REGISTER, T. **California asks people not to charge evs during heatwave**. Disponível em: <https://www.theregister.com/2022/09/01/california_ev_heatwave/>. Acesso em: 07.out.2022.
- REGIÃO, S. dos Trabalhadores Metalúrgicos da região Caxias do Sul e. **Sindicato dos metalúrgicos e simecs assinam nota em conjunto sobre conforto térmico**. Disponível em: <<https://metalurgicoscaxias.com.br/noticia/sindicato-dos-metalurgicos-e-simecs-assinam-nota-em-conjunto-sobre-conforto-termico/>>. Acesso em: 04.mar.2025.
- REJEB, A. et al. Integrating the Internet of Things in the halal food supply chain: a systematic literature review and research agenda. **Internet of Things (Netherlands)**, [S.l.], v. 13, n. 2021, p. 100361, 2021.

- RIO GRANDE DO SUL, E. do. **Balço energético do rio grande do sul - relatório síntese 2015-2022**. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202412/12184322-relatoriosintese-bergs-2015-2022.pdf>>. Acesso em: 29.jul.2025.
- RIORDAN, M.; HODDESON, L.; HERRING, C. The invention of the transistor. **Reviews of Modern Physics**, [S.l.], v. 71, n. 2, p. S336–S345, Mar. 1999.
- ROBERTS, L. The arpanet and computer networks. In: **A history of personal workstations**. [S.l.: s.n.], 1988. p. 141–172.
- ROCHIM, A. F. et al. Performance comparison of wireless protocol ieee 802.11ax vs 802.11ac. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART TECHNOLOGY AND APPLICATIONS (ICOSTA), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5.
- ROUWENHORST, B. et al. Warehouse design and control: framework and literature review. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v. 122, n. 3, p. 515–533, May 2000.
- SADEGHI-NIARAKI, A. Internet of thing (iot) review of review: bibliometric overview since its foundation. **Future Generation Computer Systems**, [S.l.], v. 143, p. 361–377, June 2023.
- SADEROVA, J. et al. Example of warehouse system design based on the principle of logistics. **Sustainability (Switzerland)**, [S.l.], v. 13, n. 8, 2021.
- SALAM, A. (Ed.). Internet of things for environmental sustainability and climate change. In: _____. **Internet of things for sustainable community development: wireless communications, sensing, and systems**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 33–69.
- SALEH, R. et al. System-on-chip: reuse and integration. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 94, n. 6, p. 1050–1069, 2006.
- SANIUK, S.; GRABOWSKA, S.; STRAKA, M. Identification of social and economic expectations: contextual reasons for the transformation process of industry 4.0 into the industry 5.0 concept. **Sustainability**, [S.l.], v. 14, n. 3, 2022.
- SANIUK, S.; GRABOWSKA, S.; STRAKA, M. Identification of social and economic expectations: contextual reasons for the transformation process of industry 4.0 into the industry 5.0 concept. **Sustainability**, [S.l.], v. 14, n. 33, p. 1391, Jan 2022.
- SANTOS, G. F. Z.; KOERICH, G. V.; ALPERSTEDT, G. D. A contribuição da design research para a resolução de problemas complexos na administração pública. **Revista de Administração Pública**, [S.l.], v. 52, n. 5, p. 956–970, 2018.
- SARMIENTO GUEDE, J. R.; ESTEBAN CURIEL, J. d.; ANTONOVICA, A. La comunicación viral a través de los medios sociales: análisis de sus antecedentes. **Revista Latina de Comunicación Social**, [S.l.], n. 72, p. 69–86, 2017.
- SCA, S. C. A. **What will the logistics world look like in 2030?** Disponível em: <<https://supplychainasia.org/what-will-the-logistics-world-look-like-in-2030/>>. Acesso em: 05.out.2022.
- BALAS, V. E. et al. (Ed.). The history, present and future with iot. In: _____. **Internet of things and big data analytics for smart generation**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 27–51. (Intelligent Systems Reference Library, v. 154).

- SHEFFI, Y.; KLAUS, P. Logistics at large: jumping the barriers of the logistics function. In: TWENTY-SIXTH ANNUAL TRANSPORTATION AND LOGISTICS EDUCATORS CONFERENCE, 1997. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1997. n. October, p. 1–26.
- SHEFFI, Y.; RICE JR, J. B. A supply chain view of the resilient enterprise. **MIT Sloan management review**, [S.l.], 2005.
- SIEKKINEN, M. et al. How low energy is bluetooth low energy? comparative measurements with zigbee/802.15.4. **2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, WCNCW 2012**, [S.l.], p. 232–237, 2012. Citation Key: Siekkinen2012.
- SIG, B. S. I. G. **Bluetooth core specification (amended) 5.4**. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-amended-5-4/>>. Acesso em: 09.ago.2025.
- SIG, B. S. I. G. **Bluetooth core specification 6.1**. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-6-1/>>. Acesso em: 09.ago.2025.
- SIMON, H. A. **The sciences of the artificial**. 3. ed., [Nachdr.]. ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996.
- SINGH, K. J.; KAPOOR, D. S. A survey of iot platforms: create your own internet of things. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 57–68, Apr. 2017.
- SOBIN, C. C. A survey on architecture, protocols and challenges in iot. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v. 112, n. 3, p. 1383–1429, June 2020.
- SONG, Y. et al. Applications of the internet of things (iot) in smart logistics: a comprehensive survey. **IEEE Internet of Things Journal**, [S.l.], v. 8, n. 6, p. 4250–4274, Mar. 2021.
- WEISS, E. A. (Ed.). Who invented the first electronic digital computer? In: _____. **A computer science reader: selections from abacus**. New York, NY: Springer, 1988. p. 19–34.
- SUCERQUIA, A.; LÓPEZ, J. D.; VARGAS-BONILLA, J. F. Real-life/real-time elderly fall detection with a triaxial accelerometer. **Sensors**, [S.l.], v. 18, n. 44, p. 1101, Apr. 2018.
- SUL, U. de Caxias do. **Grupo bertolini passa a integrar o parque de ciência, tecnologia e inovação**. Disponível em: <<https://www.ucs.br/site/noticias/grupo-bertolini-passa-a-integrar-o-tecnoucs/>>. Acesso em: 10.jun.2024.
- SZEREDI, V. V.; TRENKA, Z. J.; POGATSNIK, M. Smart logistics and sustainability in logistics 5.0. In: IEEE 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LOGISTICS AND INDUSTRIAL INFORMATICS (LINDI), 2024., 2024. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2024. p. 109–114.
- SÁNCHEZ-CORCUERA, R. et al. Smart cities survey: technologies, application domains and challenges for the cities of the future. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], v. 15, n. 6, p. 1550147719853984, 2019.
- TELEGRAM. **Bots: an introduction for developers**. Disponível em: <<https://core.telegram.org/bots/>>. Acesso em: 04.jul.2025.
- TIAN, L. et al. Wi-fi halow for the internet of things: an up-to-date survey on ieee 802.11ah research. **Journal of Network and Computer Applications**, [S.l.], v. 182, p. 103036, May 2021.

- TRAN-DANG, H. et al. The Internet of Things for Logistics: perspectives, application review, and challenges. **IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)**, [S.l.], v. 39, n. 1, p. 93–121, 2022.
- TREIBLMAIER, H. et al. The Physical Internet as a New Supply Chain Paradigm: a systematic literature review and a comprehensive framework. **International Journal of Logistics Management**, [S.l.], v. 31, n. 2, p. 239–287, 2020.
- TRSTENJAK, M. et al. Logistics 5.0 Implementation Model Based on Decision Support Systems. **Sustainability (Switzerland)**, [S.l.], v. 14, n. 11, 2022.
- TSOUKANERI, G.; MARINA, M. K. On device grouping for efficient multicast communications in narrowband-iiot. In: IEEE 38TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS (ICDCS), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1442–1447.
- TTN, T. T. N. **Especificação lorawan**. Disponível em: <www.thethingsnetwork.org>. Acesso em: 29.nov.2022.
- TUDISCO, V.; PEROTTI, S.; TAPPIA, E. The role of human factor in sustainable warehousing with a logistics 5.0 perspective: a conceptual framework. In: _____. [S.l.: s.n.], 2024. Accepted: 2025-03-31T23:59:10Z.
- VENKATAPATHY, A. K. R. et al. Human machine synergies in intra-logistics: creating a hybrid network for research and technologies. In: FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS (FEDCSIS), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p. 1065–1068.
- VERVOORT, J.; GUPTA, A. Anticipating climate futures in a 1.5 c era: the link between foresight and governance. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [S.l.], v. 31, p. 104–111, 2018.
- VIRTANEN, J. et al. Printed humidity sensor for uhf rfid systems. In: IEEE SENSORS APPLICATIONS SYMPOSIUM (SAS), 2010., 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p. 269–272.
- VOOSEN, P. New google effort uses cellphones to detect earthquakes. **Science**, [S.l.], v. 48, p. 101721, 2021.
- WANG, P. et al. Prediction of epidemic trends in covid-19 with logistic model and machine learning technics. **Chaos, Solitons Fractals**, [S.l.], v. 139, p. 110058, 2020.
- WEI, L.; MA, Z.; LIU, N. Design of reverse logistics system for b2c e-commerce based on management logic of internet of things. **International Journal of Shipping and Transport Logistics**, [S.l.], v. 13, n. 5, p. 484–497, 2021.
- WEIGAND, H.; JOHANNESSON, P.; ANDERSSON, B. An artifact ontology for design science research. **Data and Knowledge Engineering**, [S.l.], v. 133, n. March, p. 101878, 2021.
- WEISER, M. The computer for the 21 st century. **Scientific American**, [S.l.], v. 265, n. 3, p. 94–105, 1991.
- WETHERALL, D. J.; TANENBAUM, A. S. **Computer networks**. [S.l.]: Pearson Education, 2013.

- WINKELHAUS, S.; GROSSE, E. H. Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. **International Journal of Production Research**, [S.l.], v. 58, n. 1, p. 18–43, 2020. Citation Key: Winkelhaus2020.
- XU, X. et al. Industry 4.0 and industry 5.0—inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**, [S.l.], v. 61, p. 530–535, 2021.
- ZHANG, H.; GILBERT, B. P.; RASMUSSEN, K. J. R. Drive-in steel storage racks. ii: reliability-based design for forklift truck impact. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 138, n. 2, p. 148–156, 2012.
- ZHANG, M.; YANG, B. Swarm robots cooperative and persistent distribution modeling and optimization based on the smart community logistics service framework. **Algorithms**, [S.l.], v. 15, n. 2, 2022. Citation Key: Zhang2022.
- ZHEN, L.; LI, H. A literature review of smart warehouse operations management. **Frontiers of Engineering Management**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 31–55, 2022.
- ZIZIC, M. C. et al. From industry 4.0 towards industry 5.0: a review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology. **Energies**, [S.l.], v. 15, n. 1414, p. 5221, Jan. 2022.

APÊNDICE A – PREMIAÇÕES E ARTIGOS PUBLICADOS

Durante o desenvolvimento desta tese foram publicados e apresentados diversos trabalhos relacionados à temática investigada. Destaca-se a publicação do artigo "Análise do comportamento da rede *LoRaWAN* pública da cidade de Caxias do Sul/RS", na Revista Brasileira de Computação Aplicada, e do artigo "*An empirical examination of user adoption of Internet of Things in the Brazilian context*", no *International Journal of Scientific Management and Tourism*. Além disso, o trabalho "Avaliação do ganho de desempenho usando paralelismo em dados IoT de Cidades Inteligentes" foi apresentado na edição de 2025 da Escola Regional de Alto Desempenho da Região Sul (ERAD-RS).

Também foram aceitos, nas edições de 2024 e 2025 do Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (EnANPAD), os trabalhos "*IoT para Cidades Inteligentes: habilitação tecnológica em uma cidade da Serra Gaúcha*", "*Do novo ao estabelecido: uma análise das tendências centrais nos modelos de negócios emergentes e suas estratégias na criação de valor*", e "*Habilitadores e barreiras relacionadas à adoção de tecnologias IoT em ambientes logísticos e intralogísticos*". Este último teve, ainda, seu resumo aceito para o *Paper Development Workshop* promovido pelo *Journal of Supply Chain Management* durante o EnANPAD do presente ano.

Adicionalmente, o trabalho "Impacto da disseminação do conhecimento na adoção de tecnologias *IoT*: uma avaliação qualitativa" foi apresentado na XXIII Mostra de Iniciação Científica, Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão, promovida pelo Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade de Caxias do Sul, em 2023. Já os trabalhos "Habilitação de cidades da Serra Gaúcha para sensoriamento IoT" e "Logística 5.0: estado da arte, desafios e oportunidades de pesquisa" foram apresentados, respectivamente, nas edições de 2024 e 2025 do Congresso Brasileiro de Gestão e Inovação.

Por fim, durante o período de desenvolvimento da tese, o autor, em conjunto com Priscila Carvalho, Mayron Dalla Santa de Carvalho e Fábio Verruck, apresentou uma proposta vencedora no *hackathon* nacional *Hack4Cities*, promovido pela Claro, Embratel, Sanepar, Itaipu e outras instituições. A iniciativa, intitulada "Caça Vazamentos", teve como objetivo o desenvolvimento de soluções tecnológicas para a identificação de vazamentos em redes de distribuição de água.

ANEXO A – ROTEIRO SEMI-ESTRUTURADO UTILIZADO NO CORPO DE BOMBEIROS

Gerais

1. Que tipo de dados vocês utilizam na realização das suas atividades, especialmente as relacionadas aos serviços de busca e salvamento, atividades de planejamento e ações de proteção e defesa civil?

1.1 Esses dados são alimentados manualmente ou são captados por sensores?

2. Em caso de catástrofes, como são definidas as prioridades e a forma de atendimento?

3. Há troca de informações e dados com outras entidades (Defesa Civil, Cruz Vermelha, hospitais, polícia, etc)?

3.1 Como ocorre essa troca? De maneira manual ou automatizada?

Estrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC)

4. Vocês possuem alguma estrutura de TIC, além dos sistemas de licenciamento, intranet, e outros que estão disponíveis no site da instituição?

5. Existe algum sistema de informação que vocês utilizam para realizar suas atividades, especialmente as relacionadas aos serviços de busca e salvamento, e ações de proteção e defesa civil?

5.1 Vocês possuem algum sistema de gestão das atividades que contenham dados referentes aos serviços prestados (por exemplo, o local do atendimento, quantidade de atendimentos realizados, duração do atendimento, tipo de sinistro ocorrido, etc)?

5.2 Os sistemas que utilizam possuem integração com outros sistemas? Sabe dizer como funciona essa integração?

Dados

6. Dados de sensores climáticos (temperatura, umidade, pressão atmosférica, pluviômetro, gás carbônico, umidade do solo, partículas orgânicas suspensas, aceleração) poderiam ajudar na execução das atividades da instituição?

6.1 Como esses dados poderiam ajudá-los?

Regulação

7. Existe alguma legislação ou norma que regule o funcionamento da instituição, além da Lei Complementar nº 14.920?

7.1. Essa regulação pode interferir no aproveitamento e no uso de eventuais dados de sensores?

ANEXO B – ROTEIRO SEMI-ESTRUTURADO UTILIZADO NA CRUZ VERMELHA

Gerais

1. Que tipo de dados vocês utilizam na realização das suas atividades, especialmente as relacionadas aos serviços de primeiros socorros, cidades acessíveis/inteligentes e riscos, desastres e emergências?

1.1 Esses dados são alimentados manualmente ou são captados por sensores?

2. Em caso de catástrofes, como são definidas as prioridades e a forma de atendimento?

3. Há troca de informações e dados com outras entidades (Defesa Civil, bombeiros, hospitais, polícia, etc)?

3.1 Como ocorre essa troca? De maneira manual ou automatizada?

Estrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC)

4. Vocês possuem alguma estrutura de TIC além do site da instituição?

5. Existe algum sistema de informação que vocês utilizam para realizar suas atividades, especialmente as relacionadas aos serviços de primeiros socorros e riscos?

5.1 Vocês possuem algum sistema de gestão das atividades que contenham dados referentes aos serviços prestados (por exemplo, o local do atendimento, quantidade de atendimentos realizados, duração do atendimento, tipo de sinistro ocorrido, etc)?

5.2 Os sistemas que utilizam possuem integração com outros sistemas? Sabe dizer como funciona essa integração?

Dados

6. Dados de sensores climáticos (temperatura, umidade, pressão atmosférica, pluviômetro, gás carbônico, umidade do solo, partículas orgânicas suspensas, aceleração, etc) poderiam ajudar na execução das atividades da instituição?

6.1 Como esses dados poderiam ajudá-los?

Regulação

7. Existe alguma legislação ou norma que regule o funcionamento da instituição?

7.1. Essa regulação pode interferir no aproveitamento e no uso de eventuais dados de sensores?

ANEXO C – PROTOCOLO DE PESQUISA APLICADO PARA GRUPO FOCAL

Esta técnica tem por objetivo aprofundar a compreensão dos resultados empíricos, investigando se e como os resultados obtidos dos testes realizados podem ser úteis para as atividades de proteção e defesa da sociedade.

Local: Sala AgroCity LivingLab – Bloco M – Universidade de Caxias do Sul

Data: 13 de agosto de 2025

Duração estimada: Até 1 hora

Número de participantes por grupo: Entre 4 e 6

Critério de seleção: Amostra intencional formada por participantes que manifestaram interesse em colaborar e que exercem papel de liderança ou protagonismo em atividades de proteção social no contexto local.

Material: Apresentação dos resultados quantitativos (slides projetados); gravadores de áudio e vídeo; material impresso para participantes com TCLE.

Momento inicial:

- a. Recepção e agradecimento pela presença
- b. Apresentação da equipe de pesquisa
- c. Explicação das regras: confidencialidade, respeito às opiniões, participação equilibrada, evitar interrupções e uso de celular, contribuição voluntária.
- d. Assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

Passo-a-passo:

- a. Apresentação da pesquisa e dinâmica (10 min): O moderador apresenta a pesquisa como um todo e explica como funcionará a dinâmica da atividade.
- b. Início da rodada de dados (30 min):

Rodada Única – Percepção dos resultados

1. Considerando os resultados apresentados, pela percepção de vocês, existiria alguma situação em que este tipo de alerta poderia ser útil? Em que situação?
2. Pela experiência de vocês, os resultados fazem sentido?

ANEXO D – TERMO DE CONSENTIMENTO**TERMO DE CONSENTIMENTO PARA REALIZAÇÃO DE COLETA DE DADOS DE SENSORIAMENTO AMBIENTAL**

Eu,, representante da empresa, autorizo, por meio deste termo, o pesquisador, CPF, RG, estado civil, profissão, residente na Rua, a realizar a coleta de dados de sensoriamento ambiental na empresa, sem custos financeiros a nenhuma parte, para fins de pesquisa de doutorado referente ao uso de IoT em armazéns logísticos sob a perspectiva da Logística 5.0. Os dados serão coletados pelo dispositivo e reencaminhados para o gateway, ambos entregues nesta data. Essa autorização foi concedida mediante o compromisso do pesquisador em garantir à empresa os seguintes direitos:

1. Os dispositivos serão instalados no local indicado pela empresa;
2. Os dados coletados serão usados exclusivamente para gerar informações para a pesquisa aqui relatada e outras publicações dela decorrentes, quais sejam: revistas científicas, jornais, congressos entre outros eventos dessa natureza;
3. A identificação da empresa, ou de qualquer um dos funcionários, não será revelada em nenhuma das vias de publicação das informações geradas;
4. Qualquer outra forma de utilização dessas informações somente poderá ser feita mediante autorização da empresa e, se for o caso, dos funcionários nela envolvidos.
5. A empresa é livre para interromper a pesquisa a qualquer momento e/ou solicitar a posse dos dados coletados.
6. Em caso de uso ilícito de qualquer material junto à empresa ou coleta de dados indevido o pesquisador será responsável e deverá ressarcir a empresa em perdas e danos.

....., de de 2025.

.....

Assinatura