



**UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DO  
MARANHÃO**



**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO  
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO BACHARELADO**

**DARLISSON SANTOS DE JESUS**

**TECNOLOGIAS SEM FIO APLICADAS NA INDÚSTRIA 4.0**

**SÃO LUÍS**

**2025**

**DARLISSON SANTOS DE JESUS**

**TECNOLOGIAS SEM FIO APLICADAS NA INDÚSTRIA 4.0**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado junto ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

**Orientador:** Prof.º Dr. Paulo Fernandes da Silva  
Junior

SÃO LUÍS

2025

Jesus, Darlison Santos.

Tecnologias sem fio aplicadas na indústria 4.0, Darlison Santos de Jesus–  
São Luís, 2025.

58 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia de Computação,  
Universidade Estadual do Maranhão, 2025.

Orientador: Profº. Dr. Paulo Fernandes da Silva Junior

1. Protocolos de comunicação sem fio. 2. Wireless 3. Internet das coisas.  
4.conectividade sem fio. I.Título


CDU: XXXXXXXXXXXX

**DARLISSON SANTOS DE JESUS**

**TECNOLOGIAS SEM FIO APLICADAS NA INDÚSTRIA 4.0**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado junto ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovado em: 28 / 07 /2025


Documento assinado digitalmente  
 PAULO FERNANDES DA SILVA JUNIOR  
Data: 25/08/2025 13:54:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva Junior**

Orientador

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Documento assinado digitalmente  
 CARLOS MAGNO SOUSA JUNIOR  
Data: 26/08/2025 14:16:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Carlos Magno Sousa Júnior**

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

**Prof. Me. Adriano Mendes Magalhães**  
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Dedico,

*“Aos meus pais,  
José Santana de Jesus;  
Maria de Jesus dos Santos de Jesus  
As minhas irmãs em especial  
Denise Santos de Jesus In Memoriam”,  
Minha esposa e filhos,  
Maria Benedita Kerly B.Viana de Jesus;  
Elisa Aurora Viana de Jesus,  
Yuri Viana de Jesus”*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e perseverança em cada etapa desta caminhada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva Junior, pela paciência, dedicação e por compartilhar seu conhecimento ao longo deste trabalho.

Aos meus familiares, pelo amor incondicional, apoio e compreensão nos momentos de desafios. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

Aos amigos e colegas de curso, pela parceria, troca de experiências e pelos momentos que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora.

À Universidade Estadual do Maranhão - UEMA por viabilizar a realização desta graduação.

Aos professores que contribuíram para minha formação, transmitindo conhecimento e despertando o interesse pela pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão.

Muito Obrigado!

## **RESUMO**

Este trabalho aborda as tecnologias sem fio aplicadas à Indústria 4.0. Para seu desenvolvimento, adotou-se a metodologia de revisão sistemática da literatura, com base em artigos e artigos de anais de conferência que discutem o tema e contribuem para o aprofundamento da análise. O objetivo geral é apresentar as tecnologias sem fio utilizadas no contexto indústria 4.0, avaliando suas principais características e critérios técnicos. Foram extraídos metadados como resumos, autores, palavras-chave, ano de publicação e número de citações, com recorte temporal entre os anos de 2014 e 2025, permitindo acompanhar a evolução das pesquisas em paralelo à adoção prática dessas tecnologias. O estudo propõe a comparação das soluções tecnológicas identificadas, com base em critérios como cobertura, eficiência energética e custo de implantação, buscando oferecer um panorama geral técnico que auxilie na tomada de decisão em projetos industriais baseados em conectividade sem fio.

Palavras-chave: Protocolos de comunicação sem fio. Conectividade sem fio. Internet das Coisas. LPWAN. Indústria 4.0.

## **ABSTRACT**

This study focuses on wireless technologies applied to the context of Industry 4.0. A systematic literature review methodology was adopted, based on scientific articles and conference papers that discuss the topic and contribute to a deeper analysis. The main objective is to identify and present the wireless technologies used in this context, evaluating their most relevant technical characteristics. Metadata such as abstracts, authors, keywords, year of publication, and number of citations were extracted, considering the time frame from 2014 to 2025. This period allows for tracking the evolution of research alongside the practical adoption of these technologies in the industrial sector. The study proposes a comparison of the identified technological solutions based on criteria such as coverage, energy efficiency, and implementation cost, aiming to provide a comprehensive technical overview that supports decision-making in industrial projects based on wireless connectivity.

**KEYWORDS:** Wireless communication protocols; Wireless; Internet of Things; Wireless connectivity; LPWAN

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Remessas de dispositivos Bluetooth .....	22
Figura 2. Modos de implantação NB-IoT.....	31
Figura 3. Comparativo entre as gerações .....	35

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1. Frequência dos Critérios Técnicos avaliados .....	42
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métricas relacionadas aos padrões Bluetooth .....	23
Tabela 2. Visão geral dos Padrões Wi-Fi .....	24
Tabela 3. Camadas do protocolo ISA100.11a .....	27
Tabela 4. Caracterização dos artigos incluídos na revisão sistemática.....	39
Tabela 5. Tecnologias de longo alcance .....	49
Tabela 6. Tecnologias de curto alcance .....	53

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>IoT</b>	Internet das Coisas
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ISA</b>	International Society of Automation
<b>LPWAN</b>	Low Power Wide Area Network
<b>LTE-M</b>	Long Term Evolution for Machines
<b>NB-IoT</b>	Narrowband Internet of Things
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>RSSF</b>	Redes de Sensores Sem Fio
<b>UWB</b>	Ultra-Wideband
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1. Problema e Justificativa.....	12
1.2. Objetivos.....	13
1.2.1. Objetivo Geral .....	13
1.2.2. Objetivos Específicos .....	13
1.3. Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1. Tecnologias Sem Fio e Ambientes Industriais .....	14
2.2. Princípios Fundamentais da Indústria 4.0 .....	15
2.3. Internet das Coisas (IoT) .....	18
2.4. Tecnologias sem fio: Conceitos e Aplicações .....	19
2.4.1. Bluetooth .....	20
2.4.2. Wi-Fi.....	24
2.4.3. ZigBee .....	25
2.4.4. ISA100.11a.....	26
2.4.5. LoRaWAN.....	29
2.4.6. NB-Iot.....	30
2.4.7. Sigfox .....	33
2.4.8. 5G .....	34
3. METODOLOGIA.....	37
3.1. Seleção e Organização dos Documentos .....	37
4. ANÁLISE DE RESULTADOS .....	39
4.1. Análise das Tecnologias Para Atender Diversos Objetivos de Cada Projeto.....	43
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	51
REFERÊNCIAS .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de geração de energia, como robotização e automação, existia por muito tempo, a internet veio revolucionando a organização de processos, conectando redes robóticas e dispositivos automatizados (Osterrieder; Budde; Friedli, 2020). O desenvolvimento da Internet e da tecnologia cria uma rede contínua de pessoas, máquinas e empresas, através do compartilhamento contínuo de processos de criação de valor, possibilitando um produto competitivo e totalmente personalizado (Artetxe *et al.*, 2023).

O estudo Ganschar et al. (2013) analisou o potencial de produtividade e crescimento de empresas que utilizam tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, o estudo demonstra como a integração de tecnologias como o IIot (IoT industrial), inteligência artificial, big data e robótica potencializam melhoras na produção, reduz custos e otimiza processos. Seu principal impacto vem de cinco áreas de tecnologia: sistemas embarcados, fábricas inteligentes, redes fortes, computação em nuvem e segurança de TI (tecnologia da informação) (Caruso, 2017).

Na Indústria 4.0, as fábricas passam a contar com máquinas interconectadas que atuam como uma comunidade colaborativa. Essa evolução exige o uso de ferramentas avançadas de previsão, capazes de transformar dados em informações relevantes para reduzir incertezas e, conseqüentemente, apoiar a tomada de decisões mais assertivas (Hassoun et al., 2024).

O termo Indústria 4.0 descreve de diferentes formas em especial a Tecnologia da Informação (TI) que consiste em mudanças nos sistemas de fabricação. Esses desenvolvimentos não apenas têm vantagens tecnológicas, como também tem implicações organizacionais versáteis (Freddi, 2017).

Hassoun *et al.* (2024) ressaltam que a indústria 4.0 é a digitalização real da indústria, que agora abrange uma nova concepção bastante ampla e inclui novas tecnologias e conceitos relacionados, apromorando a organização de toda cadeia de valor. A Indústria 4.0 cria uma fábrica inteligente estruturada modularmente, desenvolvendo significado do sistemas *Cyber Physical System* (CPS) que possui o desafio de conectar o mundo digital com físico em meio ao ganho de produtividade, eficiência e segurança industrial (Zhou; Liu; Zhou, 2016).

A implementação da Indústria 4.0 requer a horizontal integração da cadeia de valor, um sistema de produção em rede, integração vertical e digitalização final do projeto ao longo de toda a cadeia de valor. Segundo Majid et al. (2022), esses requisitos são suportados por

tecnologias emergentes, incluindo a internet das coisas, redes de sensores sem fio, big data, serviços baseados em nuvem, sistemas embarcados e Internet móvel.

Conforme apresentado por Chilamkurthy *et al.* (2022) o estudo apresenta a utilização das várias tecnologias de comunicação sem fio de curto e longo alcance utilizados em aplicações IoT, demonstrando a variedade das tecnologias e fazendo um relacionamento entre distância e taxa de dados das tecnologias.

A integração dessas tecnologias sem fio no contexto da indústria 4.0 enfrenta diferentes barreiras, como garantir a segurança adequada, lidar com possíveis interferências, além de manter uma conexão de confiança em cenários críticos. Assim como entender a necessidade da utilização de tecnologias sem fio para substituir em alguns casos a utilização de sistemas cabeados e já sedimentados na indústria, é um obstáculo a ser enfrentado. Superar esses obstáculos exigirá um entendimento dos requisitos e limitações de cada tecnologia e aplicações industriais.

Portanto as tecnologias sem fio oferecerem soluções para possibilitar a conectividade nas fábricas inteligentes e Indústria, cada uma dessas tecnologias deve ser escolhida com base nas necessidades específicas do ambiente industrial, entretanto é fundamental analisar seus pontos fortes e fracos para assegurar uma implementação eficiente e um desempenho ideal atendendo os requisitos de cada projeto.

### **1.1. Problema e Justificativa**

O expressivo crescimento no uso de dispositivos sem fio no ambiente industrial tem impulsionado pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias voltadas à conectividade. Elementos centrais da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial, desempenham papel fundamental na integração e automatização dos processos produtivos. Segundo a IoT Analytics (2023), em 2022, havia aproximadamente 14,3 bilhões de dispositivos IoT em uso no mundo, com projeção de alcançar cerca de 29,4 bilhões até 2030. Esse avanço acelerado tem gerado impactos relevantes na economia global. De acordo com relatório do McKinsey Global Institute (2023), a IoT apresenta potencial para agregar valores entre US\$ 3,9 trilhões e US\$ 11,1 trilhões anuais à economia mundial.

A adoção dessas tecnologias favorece a conectividade industrial ao promover maior eficiência, agilidade e produtividade nos serviços. Desde residências inteligentes até plantas fabris automatizadas, os benefícios decorrentes da aplicação estratégica da IoT, das redes de

sensores sem fio e dos princípios da Indústria 4.0 têm sido observados em diversos setores. Nesse contexto, este estudo propõe-se a revisar a literatura acadêmica sobre as tecnologias sem fio aplicadas à Indústria 4.0, buscando compreender seus avanços, desafios e perspectivas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral identificar as principais tecnologias sem fio utilizadas na Indústria 4.0.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Pesquisar as principais tecnologias sem fio aplicadas na Indústria 4.0, detalhando suas características e aplicações.
- Realizar revisão sistemática demonstrando o panorama das tecnologias sem fio na indústria 4.0
- Realizar uma análise e comparativo com as principais características das tecnologias utilizadas na indústria 4.0

## **1.3. Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)**

Este trabalho está estruturado em três partes além desta Introdução. No Capítulo 2 é abordada a Fundamentação Teórica utilizada. No Capítulo 3 os Materiais e Métodos utilizados na realização do trabalho. No Capítulo 4 os Resultados e Discussões são apresentados e por fim as Considerações Finais.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Tecnologias Sem Fio e Ambientes Industriais

A crescente demanda por conectividade e mobilidade tem impulsionado significativamente o setor de telecomunicações, favorecendo a rápida expansão das redes sem fio, também conhecidas como redes wireless (Lei *et al.*, 2025). Essas redes têm se destacado como uma alternativa atrativa às soluções cabeadas, sobretudo por oferecerem maior flexibilidade e redução de custos operacionais. Tais vantagens vêm despertando o interesse da indústria, que passa a considerar o uso de tecnologias sem fio como uma estratégia viável para modernizar suas infraestruturas de comunicação (Santos et al., 2016).

Além da mobilidade intrínseca a esse tipo de rede, outros benefícios relevantes reforçam sua adoção. A compatibilidade com a maior parte da infraestrutura de redes cabeadas previamente instalada facilita a transição tecnológica, ao mesmo tempo em que possibilita suporte nativo a comunicações *multicast* e *broadcast* (Santos et al., 2016). A facilidade de instalação e expansão, o baixo custo de manutenção, a capacidade de superar obstáculos físicos com mais eficiência e a maior adaptabilidade na distribuição da rede constituem aspectos que podem contribuir de forma significativa para a otimização dos processos produtivos (Lopez, 2014).

A utilização sem fio em ambientes industriais tem se expandido como resposta às demandas por flexibilidade, escalabilidade e eficiência nas redes de comunicação, especialmente no contexto da Indústria 4.0. A crescente complexidade dos processos produtivos requer soluções de conectividade que sejam não apenas confiáveis e seguras, mas também capazes de operar em tempo real, mesmo sob condições adversas como interferências eletromagnéticas e estruturas metálicas densas (Raza et al., 2017).

Dentre as tecnologias sem fio aplicadas em ambientes industriais, destacam-se os padrões IEEE 802.15.4, ISA100.11a e IEEE 802.11 (Wi-Fi), cada qual com características específicas em termos de latência, confiabilidade, consumo energético e topologia de rede. Em particular, as tecnologias baseadas no padrão ISA100 Wireless têm ganhado relevância por oferecerem comunicação determinística, suporte a QoS (Quality of Service), interoperabilidade e resiliência frente a falhas e interferências e segurança. Esses atributos as tornam

especialmente adequadas para aplicações críticas, como instrumentação e controle de processos contínuos (ISA 100, 2022).

A implantação de redes sem fio em ambientes industriais envolve desafios técnicos significativos, incluindo a necessidade de garantir a integridade e a sincronização dos dados, o gerenciamento eficiente de energia nos dispositivos de campo, bem como a robustez das comunicações frente a ruídos e obstruções físicas. Para lidar com essas limitações, diversas soluções têm sido propostas, como o uso de algoritmos de agendamento determinístico, protocolos com tolerância a falhas, e mecanismos de reconfiguração automática da rede. (Osterrieder; Budde; Friedli, 2020).

Além dos ganhos em flexibilidade, as redes sem fio reduzem significativamente os custos relacionados à instalação e manutenção de cabeamentos, principalmente em instalações com infraestrutura complexa ou de difícil acesso. Contudo, para que essas tecnologias sejam plenamente integradas aos sistemas de controle industrial, é imprescindível que atendam aos rigorosos requisitos de tempo real e segurança operacional. Dessa forma, observa-se uma convergência entre os avanços das redes sem fio e os sistemas ciberfísicos, com destaque para aplicações em controle distribuído, monitoramento remoto e manutenção preditiva, aspectos centrais da Indústria 4.0 e da transição rumo à Indústria 5.0 (Qu et al., 2018).

Nesse capítulo será realizado uma revisão sobre as tecnologias utilizadas na indústria, contribuições do IoT e rede de sensores sem fio na revolução industrial que está ocorrendo.

## **2.2. Princípios Fundamentais da Indústria 4.0**

A revolução industrial, desde sua iniciação no século XVIII, tem sido um motor primordial para transformações globais. No coração desta evolução está a Indústria 4.0, um termo que surgiu na Alemanha para descrever a integração de várias tecnologias digitais e físicas em ambientes industriais (Silveira, 2016) . Esta quarta revolução industrial é caracterizada pelo uso de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial, remodelando a forma como os produtos são fabricados e os serviços são prestados (Zeb et al, 2020).

A base inicial da digitalização industrial é a rede de dispositivos. Isso é comumente conhecido, como a Internet das Coisas, Segundo Tran et al. (2019), este é um termo para "dispositivos móveis" que são equipados com um chip, RFID, sensor ou qualquer outro dispositivo capaz de conectar-se em rede e são capazes de se comunicar e compartilhar dados.

O autor referenciado, ainda retratou que, a principal idéia por trás da Internet das Coisas é que, nas últimas décadas, TI e telecomunicações evoluiu. Com o objetivo de criar observações precisas e de longo prazo usando análises analíticas complexas, e utilizando métodos para criar melhores soluções de planejamento, operação, otimização e manutenção.

Neste contexto, pode-se verificar que trata-se de uma revolução industrial digital que levará a uma verticalização, interligação (intra-corporativa) e horizontal (inter-mercado) de sensores, máquinas, peças de trabalho e Sistemas de TI em toda a cadeia de suprimentos e valor (Tran *et al.*, 2019).

A Indústria 4.0 representa muito mais do que uma simples atualização tecnológica, trata-se de uma transformação profunda nos modos de produzir, gerir e interagir dentro dos sistemas industriais. Nesse novo cenário, ganham espaço as fábricas inteligentes, os processos produtivos autônomos e as operações flexíveis, que demandam soluções inovadoras e abordagens mais integradas. O que se observa é o surgimento de um ecossistema conectado, em que dispositivos, cadeias de suprimentos e consumidores se integram de forma dinâmica, promovendo ambientes de produção cada vez mais eficientes, customizáveis e orientados por dados (Osterrieder; Budde; Friedli, 2020).

Essa revolução é fortemente impulsionada por tecnologias digitais avançadas, com destaque para a Internet das Coisas (IoT) e as redes de sensores sem fio (WSN – Wireless Sensor Networks), que têm desempenhado papel estratégico na modernização dos processos industriais. Essas ferramentas permitem não apenas a coleta e o envio de informações em tempo real, mas também a análise inteligente dos dados, viabilizando ações imediatas e precisas nos mais diversos níveis da produção (Majid *et al.*, 2022). Como destacam Osterrieder, Budde e Friedli (2020), a interligação dos dispositivos inteligentes por meio da IoT industrial (IIoT) proporciona uma visão integrada e contínua de toda a cadeia produtiva, enquanto as redes de sensores monitoram condições essenciais de operação, como temperatura, pressão e vibração, aspectos decisivos para garantir eficiência, segurança e sustentabilidade nos processos.

A implementação da Indústria 4.0 requer a horizontal integração da cadeia de valor e sistema de produção em rede e integração vertical e digitalização de ponta a ponta do projeto de engenharia ao longo de toda a cadeia de valor. Segundo Ngwenyama e Webber (2025), esses requisitos são suportados por tecnologias emergentes, incluindo a internet das coisas, redes de sensores sem fio, big data, serviços baseados em nuvem, sistemas embarcados e Internet móvel.

A indústria 4.0 é, portanto, um fenômeno que, por meio de ativos e atividades de tecnologia, maximiza a transparência dos processos, explorando as possibilidades de

digitalização e integra a cadeia de valor corporativa e a cadeia de suprimentos em um novo nível de criação de valor para o cliente (Silveira, 2016).

Lima e Gomes (2020) explicam que Indústria 4.0 “ faz referência às mudanças oriundas de inovações, muitas delas em desenvolvimento, que tendem a alterar profundamente os processos e a organização da produção e interação entre os agentes econômicos”, os autores listaram sete conceitos fundamentais da Indústria 4.0:

- a) fábrica inteligente: usando tecnologia inteligente e modelos de fábrica holisticamente digitalizados de produtos e fábricas inteligentes que são autonomamente controladas;
- b) sistemas ciberfísicos: o mundo real e o mundo digital estão se fundindo porque o mundo físico e o mundo digital não podem mais ser dissociados de maneira razoável;
- c) auto-organização: uma mudança acontecerá da hierarquia tradicional de produção aos sistemas auto-organizados descentralizados;
- d) novos sistemas de distribuição e aquisição: vários canais e processos conectados aumentarão a individualização da aquisição e distribuição;
- e) novos sistemas no desenvolvimento de produtos e serviços: abordagens de inovação aberta e inteligência de produto serão de grande importância quando os produtos estiverem se tornando individualizados;
- f) adaptação às necessidades humanas: os seres humanos estarão em foco e os sistemas de manufatura serão projetados principalmente para atender às necessidades humanas;
- g) responsabilidade social corporativa: as condições fundamentais para o sucesso dos produtos são sustentabilidade e eficiência de recursos.

Nesse contexto, as tecnologias sem fio surgem como um dos pilares fundamentais para tornar essa nova realidade possível. Desde os primeiros sistemas baseados em comunicação por rádio até as soluções atuais com redes 5G, a evolução desses recursos tem permitido uma conectividade confiável, estável e abrangente. Essa conectividade é o que sustenta a automação inteligente, o monitoramento remoto e a capacidade de resposta rápida a eventos críticos, consolidando um novo padrão de tomada de decisão nas indústrias, mais ágil, informada e conectada ao tempo real das operações.

### 2.3. Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) vem se consolidando como um dos pilares da transformação digital ao possibilitar a conexão entre o mundo físico e o digital. Trata-se da capacidade de interligar objetos do cotidiano, como eletrodomésticos, veículos, sensores agrícolas e equipamentos industriais, por meio da internet, permitindo que esses dispositivos colem, processem e compartilhem dados de forma autônoma (Raza et al., 2017). Segundo Majid et al. (2022), a IoT representa uma tecnologia estratégica para promover maior automação e eficiência em setores diversos, como a saúde, a indústria e as cidades inteligentes.

Na prática, a IoT funciona a partir da integração de sensores, conectividade em rede e plataformas de análise de dados, que juntos, formam sistemas inteligentes capazes de otimizar recursos, prever falhas e orientar decisões com base em informações em tempo real. Essa tecnologia tem se espalhado por diferentes áreas, incluindo transporte, agricultura, mobilidade urbana, serviços públicos e, com especial destaque, o setor industrial (Qu et al., 2018).

No ambiente industrial, a IoT tem viabilizado a construção das chamadas fábricas inteligentes, onde o monitoramento contínuo de máquinas e processos permite não apenas ganhos de desempenho, mas também a redução de custos operacionais. Por meio da manutenção preditiva, por exemplo, é possível antecipar falhas e evitar paradas não programadas, o que eleva consideravelmente a produtividade e a confiabilidade dos sistemas (Kanoun et al., 2021).

Entretanto, apesar de seu enorme potencial, a plena implementação da IoT ainda enfrenta desafios importantes. Questões como a segurança da informação, a interoperabilidade entre dispositivos e a escolha das tecnologias mais adequadas para cada aplicação exigem atenção (Raza *et al.*, 2017). Superar esses obstáculos é essencial para garantir que a IoT continue avançando como uma tecnologia transformadora, capaz de tornar as operações mais inteligentes, sustentáveis e conectadas às reais necessidades da sociedade contemporânea.

As ferramentas de Internet das Coisas são os componentes tecnológicos que permitem que um produto ou máquina de produção se conecte, a uma rede corporativa e para coletar e ou compartilhar dados. Estes podem incluir os mencionados anteriormente, sensores, RFIDs, scanners 3D, câmeras e assim por diante (Tran *et al.*, 2019).

O CPS conecta dispositivos físicos ao ciberespaço. O CPS usa sensores, scanners 3D, câmeras, ou dispositivos de identificação por radiofrequência (RFID) e fornece dados em massa para o processo. Isto é na verdade, a realização da Internet das Coisas, a solução CPS usada especificamente na produção do Sistema de Produção Ciber-Física (CPPS), é um sistema em

rede de equipamentos de produção, trabalhadores com produtos no processo de produção (Ryalat et al., 2023).

Para superar esse desafio, os CPPSs devem ser integrados aos locais de produção para criar ambientes inteligentes. Um CPS é central para essa visão e deve ser incorporado a máquinas inteligentes, sistemas de armazenamento e instalações de produção capazes de trocar informações com autonomia e inteligência (Tran et al., 2019).

Os produtos inteligentes podem sinalizar o estado atual da produção ou a supervisão do processo, com as características do processo e a necessidade futura de manutenção e o fornecimento de sugestões sobre a natureza da intervenção. Com a disseminação de robôs e inteligência artificial, se faz necessário a elaboração de um trabalho cada vez menos monótono. Essas tarefas são executadas com precisão por máquinas, com custos financeiros por vezes mais baixos (Caruso, 2017).

#### **2.4. Tecnologias sem fio: Conceitos e Aplicações**

As tecnologias sem fio representam um componente crucial da indústria atual, oferecendo flexibilidade, mobilidade e eficiência em diversos aspectos da manufatura moderna. O avanço dessas tecnologias tem permitido a implementação de sistemas mais inteligentes e conectados nas indústrias, revolucionando a forma como os processos são monitorados, controlados e otimizados (Paiva e Neto, 2024).

Além disso, as tecnologias sem fio abrangem uma ampla gama de sistemas e padrões, cada um com suas características e aplicações específicas. No núcleo dessas tecnologias está a transmissão de dados sem a necessidade de conexões físicas, o que permite uma maior liberdade de movimento e a possibilidade de monitorar e controlar dispositivos à distância (Mahmood *et al.*, 2024).

Entre os principais protocolos de comunicação sem fio aplicados à Indústria 4.0, destacam-se tecnologias como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRaWAN e 5G. Cada uma delas oferece vantagens distintas em termos de alcance, consumo energético, velocidade de transmissão e confiabilidade. Por exemplo, enquanto o Wi-Fi é amplamente utilizado para transferências de dados em alta velocidade dentro de ambientes industriais controlados, o ZigBee se mostra mais adequado para aplicações que exigem baixo consumo de energia e comunicação entre dispositivos com baixo volume de dados, como sensores em redes de monitoramento ambiental (Palattella *et al.*, 2016).

Já o LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) vem ganhando espaço em soluções que exigem cobertura de longas distâncias com consumo energético mínimo, sendo muito empregado em monitoramento remoto de ativos e em áreas de difícil acesso. O protocolo Bluetooth, especialmente em suas versões mais recentes como o Bluetooth Low Energy, também tem sido amplamente adotado para integração de sensores e dispositivos portáteis em tempo real (Bluetooth Sig, 2024).

O surgimento do 5G, por sua vez, marca uma mudança significativa no cenário industrial, oferecendo velocidades de transmissão extremamente elevadas, latência reduzida e maior densidade de dispositivos conectados por unidade de área. Essa tecnologia tem potencial para transformar processos de automação industrial, permitindo, por exemplo, a operação de veículos autônomos em chão de fábrica, a realização de manutenção preditiva baseada em análise em tempo real e a integração de sistemas ciberfísicos complexos (Solyman; Yahya, 2022).

É importante destacar que a adoção dessas tecnologias não depende apenas da infraestrutura técnica disponível, mas também de um planejamento estratégico que considere as necessidades específicas da planta industrial, o ambiente operacional e os requisitos de segurança e confiabilidade dos dados transmitidos (Palattella *et al.*, 2016). Nesse sentido, a escolha do protocolo sem fio mais adequado deve estar alinhada aos objetivos da empresa, ao tipo de aplicação pretendida e às exigências de escalabilidade e interoperabilidade entre dispositivos e sistemas.

Em síntese, as tecnologias sem fio são elementos estruturantes da Indústria 4.0, contribuindo para a construção de ambientes industriais mais dinâmicos, autônomos e responsivos. O conhecimento e a aplicação adequada dessas tecnologias tornam-se, portanto, fundamentais para empresas que desejam se manter competitivas e alinhadas às transformações digitais que redefinem o setor produtivo.

#### **2.4.1. Bluetooth**

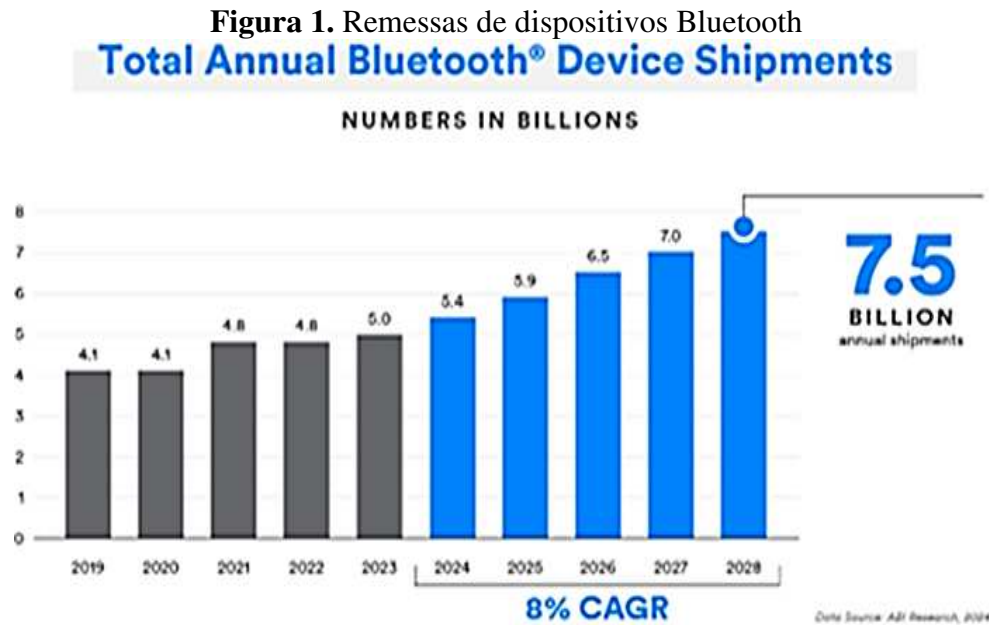
Desde a sua criação em 1994 pela empresa LM Ericsson, a tecnologia Bluetooth tem desempenhado um papel fundamental na comunicação sem fio de curto alcance. Inspirado no nome do rei dinamarquês Harald "Bluetooth" Gormsson, conhecido por unificar diferentes tribos escandinavas, o nome foi escolhido como uma metáfora para o objetivo da tecnologia: integrar e facilitar a comunicação entre diferentes dispositivos (Bluetooth Sig, 2024).

Ao longo das últimas décadas, o Bluetooth passou por diversas atualizações que ampliaram sua eficiência, alcance e aplicações. Inicialmente voltado para a substituição de cabos entre dispositivos próximos, como celulares e fones de ouvido, o padrão evoluiu significativamente. Hoje, é amplamente utilizado em áreas como saúde digital, automação residencial, controle industrial e dispositivos vestíveis, consolidando-se como uma solução versátil e de baixo consumo energético.

Dados recentes da ABI Research indicam uma tendência contínua de crescimento nas remessas globais de dispositivos Bluetooth. A previsão é de que, até 2028, mais de 7,5 bilhões de unidades sejam comercializadas anualmente. Esse número reflete não apenas a confiabilidade da tecnologia, mas também sua capacidade de adaptação frente às demandas da Indústria 4.0, em que a conectividade constante entre máquinas, sensores e usuários se tornou essencial.

A evolução para versões como o Bluetooth Low Energy (BLE) tem sido um dos marcos mais relevantes, especialmente para aplicações industriais e médicas que exigem comunicação eficiente com baixo consumo de energia. Além disso, o BLE oferece suporte à formação de redes em malha (mesh networks), permitindo a comunicação simultânea entre múltiplos dispositivos de forma distribuída e altamente escalável, ideal para ambientes industriais complexos (Raza *et al.*, 2017).

Diante disso, o Bluetooth continua sendo uma tecnologia estratégica no ecossistema da comunicação sem fio, oferecendo soluções eficientes e acessíveis para integração de sistemas em tempo real, com segurança e confiabilidade. A ABI Research e insights (2024) demonstra o crescimento anual das remessas de dispositivos Bluetooth, indicando a expansão significativa desta tecnologia, como podemos observar em 2028 teremos previsão de 7.5 bilhões de dispositivos vendidos como demonstrado na figura 2.



Fonte: Bluetooth SIG (2024).

Ao longo de sua trajetória, o Bluetooth consolidou-se como uma das tecnologias mais adotadas para comunicação sem fio de curto alcance. Inicialmente, o Bluetooth Special Interest Group (SIG) era composto por apenas cinco empresas: Ericsson, IBM, Nokia, Toshiba e Intel. No entanto, o rápido crescimento e a adoção global da tecnologia impulsionaram o aumento desse consórcio, que passou a contar com cerca de 400 membros já no primeiro ano e, atualmente, reúne mais de 40.000 empresas associadas em todo o mundo (Bluetooth Sig, 2024).

As versões iniciais, hoje conhecidas como Bluetooth Clássico, operavam com uma topologia ponto a ponto, limitada a um dispositivo mestre e até sete dispositivos escravos. Essa restrição estava relacionada ao espaço de endereçamento, que contava com apenas três bits disponíveis, limitando a escalabilidade da rede (Zeadally, 2019; Silva; Silva; Boavida, 2016). Ainda assim, essa estrutura foi suficiente para estabelecer os fundamentos de uma tecnologia que evoluiria substancialmente nas décadas seguintes.

Com a chegada do Bluetooth 4.0, também denominado *Bluetooth Smart*, a tecnologia ganhou novos recursos que a tornaram especialmente atrativa para aplicações em dispositivos inteligentes, sensores industriais, equipamentos biomédicos, como monitores cardíacos e termômetros digitais. Entre os principais avanços estão o Bluetooth Low Energy (BLE), voltado para reduzir drasticamente o consumo energético; o *Generic Attribute Profile* (GATT), utilizado para definir e acessar atributos e serviços dos dispositivos conectados; e o *Security*

*Manager* (SM), que introduziu criptografia AES como padrão de segurança, garantindo proteção às informações transmitidas (Medium, 2024).

Outro aspecto importante foi a incorporação de técnicas como slots temporais e comunicação por múltiplos saltos (*multihop*), características semelhantes às do ZigBee, tecnologia que será detalhada nos próximos tópicos. O uso de slots temporais permite a transmissão de sinais com requisitos precisos de temporização, aspecto essencial em aplicações que exigem sincronia rigorosa, como os sistemas industriais automatizados (Silva; Silva; Boavida, 2016).

Com o Bluetooth 5.0, a tecnologia passou a incorporar melhorias na camada física (PHY), responsável por transformar bits digitais em sinais de rádio analógicos para transmissão e vice-versa na recepção. Essa versão apresenta duas configurações principais: o BLE 1M PHY, operando a uma taxa de 1 mega-símbolo por segundo, e o BLE 2M PHY, que dobra essa taxa para 2 mega-símbolos por segundo. Isso significa que os mesmos dados podem ser transmitidos em metade do tempo de rádio, otimizando significativamente o uso do espectro e reduzindo o consumo energético dos dispositivos conectados (Bluetooth Sig, 2024).

**Tabela 1.** Métricas relacionadas aos padrões Bluetooth

	Bluetooth de baixa energia (BLE)	Bluetooth Clássico
Faixa de frequência	Banda ISM de 2,4 GHz (2,402 – 2,480 GHz utilizada)	Banda ISM de 2,4 GHz (2,402 – 2,480 GHz utilizada)
Canais	40 canais com espaçamento de 2 MHz (3 canais de publicidade/37 canais de dados)	79 canais com espaçamento de 1 MHz
Nós / Ativos Escravos	Teoricamente ilimitado	7
Uso do canal	Espectro de propagação de salto de frequência (FHSS)	Espectro de propagação de salto de frequência (FHSS)
Modulação	GFSK	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Taxa de dados	BLE 2M PHY: 2 Mb/s BLE 1M PHY: 1 Mb/s BLE Codificado PHY (S=2): 500 Kb/s BLE Codificado PHY (S=8): 125 Kb/s	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ( $\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Topologias de comunicação	ponto a ponto (incluindo piconet) Malha Broadcast	Ponto a ponto (incluindo piconet)
Recursos de posicionamento	Presença: Advertising Direção: Direction Finding (AoA/AoD) Distância: RSSI, HADM (Coming)	Nenhum
Aplicações comuns	Transmissão de áudio Transmissão de vídeo Serviços de localização Dispositivos de rede	Transmissão de áudio Transmissão de vídeo

Fonte: Bluetooth SIG (2024).

Segundo dados do Bluetooth SIG (2024), esse avanço resulta em uma eficiência espectral aprimorada, com possibilidade de atingir taxas reais de até 2 megabits por segundo na camada de aplicação, como ilustrado na Tabela 1.

#### 2.4.2. Wi-Fi

O IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) definiu uma série de especificações 802.11 para redes locais sem fio (WLAN), comumente conhecidas como Wi-Fi. As normas 802.11 foram baseadas no protocolo IEEE 802.3, normalmente conhecido como Ethernet (Silva *et al.*, 2016). Estas redes foram desenvolvidas para utilizar bandas de frequência, e inúmeras melhorias foram implementadas ao padrão original ao longo do tempo, como observado na Tabela 2. O Wi-Fi é destinado à transferência de dados em médias e curtas distâncias (até algumas centenas de metros), embora os comprimentos exatos variem devido a vários fatores, como variações nos padrões, distância entre dispositivos, condições atmosféricas, visibilidade óptica entre antenas e qualidade do hardware (Artetxe *et al.*, 2023; Osterrieder; Budde; Friedli, 2020). A principal dificuldade na implementação de sistemas IoT que incluem tecnologia Wi-Fi é o elevado consumo de energia em comparação com o Bluetooth e o ZigBee (Palattella *et al.*, 2016).

**Tabela 2.** Visão geral dos Padrões Wi-Fi

Padrão	Ano	Frequencia	Taxa de transferência
802.11	1997	2.4 Ghz	Até 2 Mbps
802.11b (Wi-Fi 2)	1999	2.4 Ghz	Até 11 Mbps
802.11a (Wi-Fi 3)	1999	5 Ghz	Até 54 Mbps
802.11g	2003	2.4 Ghz	Até 54 Mbps
802.11n (Wi-Fi 4)	2009	2.4/5 Ghz	Até 288.8 Mbps / 600 Mbps
802.11ac (Wi-Fi 5)	2013	5 Ghz	Até 3466,8 Mbps
802.11ah	2016	0.7/0.8/0.9 Ghz	Até 8,67 Mbps
802.11ax (Wi-Fi 6)	2021	2.4 GHz / 5 GHz	Até 9606 Mpbs
802.11ax (Wi-Fi 6E)	2021	6 GHz	Até 9606 Mpbs
802.11be (Wi-Fi 7)	2023	7 GHz	Até 46000 Mpbs

Fonte: Čolaković, Džubur, Karahodža (2021)

As taxas de transmissão suportada pela especificação 802.11 iniciaram com 1 Mbps e transmissão passou a chegar aos 11 Mbps. Desde então os padrões de tecnologia foram se aprimorando e evoluindo, diferentes versões do padrão IEEE 802.11 foram desenvolvidas

visando melhorias constantes e a eliminação de restrições, como eficiência energética, mobilidade e qualidade de serviço (QoS). (Silva, Silva, Boavida, 2016)

Certamente é notório os avanços e ganhos do padrão IEEE 802.11, a presença de dispositivos só cresce, segundo Wi-Fi Alliance (2024) em 2024 serão 21,1 bilhões de dispositivos Wi-Fi em uso em vários ambientes, como casas inteligentes, computação em nuvem telepresença avançada e monitoramento de fábricas.

### **2.4.3. ZigBee**

Entre as tecnologias mais relevantes para a Internet das Coisas (IoT) e Redes de Sensores sem Fio (RSSF), o padrão ZigBee ocupa lugar de destaque. Desenvolvido pela antiga ZigBee Alliance, atualmente incorporada à Connectivity Standards Alliance (CSA), o ZigBee foi projetado para aplicações que exigem baixa taxa de transmissão de dados e baixo consumo de energia, características essenciais para sensores distribuídos e dispositivos alimentados por bateria (Connectivity Standards Alliance, 2023).

O ZigBee é baseado no padrão IEEE 802.15.4, sendo responsável por definir as camadas superiores da pilha de comunicação, incluindo rede e aplicação, com foco em oferecer conexões eficientes, confiáveis e seguras. Ao contrário de outras tecnologias como o Bluetooth, o ZigBee permite a criação de redes com mais de 65 mil dispositivos conectados, organizados em topologia mesh, o que confere escalabilidade e robustez para diferentes ambientes industriais e domésticos (Silva; Silva; Boavida, 2016).

Além da escalabilidade, um dos diferenciais do ZigBee está em sua estrutura hierárquica de dispositivos, que compreende três categorias principais: o coordenador da rede, responsável por sua inicialização e gerenciamento; os roteadores, que garantem o encaminhamento dos dados entre os nós; e os dispositivos finais, geralmente sensores ou atuadores, cuja função é captar ou executar comandos nas extremidades do sistema. Essa arquitetura favorece a eficiência energética e a organização lógica da rede, mesmo em aplicações complexas. (Silva; Silva; Boavida, 2016).

A flexibilidade do ZigBee também se manifesta nas diferentes topologias de rede suportadas: estrela, árvore e malha (mesh). Na topologia em estrela, os dispositivos se conectam diretamente ao coordenador, sendo ideal para cenários com poucos obstáculos físicos e baixo tráfego de dados. Já a topologia em árvore utiliza uma estrutura hierárquica, permitindo ampliar

o alcance da comunicação por meio de roteadores intermediários, embora apresente vulnerabilidades em caso de falha desses nós.

Neste contexto, a topologia em malha oferece maior resiliência e confiabilidade, pois os dispositivos podem se comunicar entre si por diferentes caminhos, assegurando a continuidade da comunicação mesmo diante de falhas pontuais. Essa configuração é particularmente vantajosa em ambientes industriais dinâmicos, onde a robustez da rede é fator crítico para garantir a integridade das informações e a eficiência dos processos (Čolaković; Džubur; Karahodža, 2021).

Diante dessas características, o ZigBee se destaca como uma solução sólida para aplicações que exigem conectividade contínua, baixo consumo energético e possibilidade de expansão, consolidando-se como uma das bases tecnológicas da Indústria 4.0 e das infraestruturas inteligentes contemporâneas.

#### **2.4.4. ISA100.11a**

A norma ISA100.11a foi desenvolvida para ser uma solução universal padronizada para redes industriais sem fio. Padronizada pela ISA100, um comitê responsável por desenvolver padrões, práticas e normas voltadas para implantações tecnológicas de sistemas sem fio, com mais de 250 empresas colaborando no desenvolvimento e crescimento do padrão (ISA100, 2022).

Assim também a norma ISA100 definiu seis classes de aplicações baseados em uma análise exaustiva de casos de estudos em ambientes industriais. Dentro da estrutura do ISA100 Wireless, as principais definições de especificações incluem a pilha de protocolos, a administração do sistema, os detalhes relativos à implementação do gateway de rede e as considerações de segurança para dispositivos sem fio de baixa taxa de dados (estacionários e móveis) que permitem baixo consumo de energia.

Conforme a norma ISO100.11a as topologias suportadas são estrela ou mesh, baseando-se através do modelo OSI. Na tabela 3, retirada do artigo Raptis *et al.* (2020), notamos que as camadas de apresentação e sessão do OSI são ausentes no modelo. Utilizando-se também do padrão 802.15.4 (Silva *et al.*, 2016), que utiliza 27 canais, entre 3 bandas de frequência diferentes.

**Tabela 3.** Camadas do protocolo ISA100.11a

Camada OSI	Descrição	Tecnologia ISA100.11a
Aplicação	Fornecer serviços para aplicativos, como comunicação de dados, controle e gerenciamento.	Protocolo nativo sem fio ISA100. Mapeamento de objetos, protocolo de Tunelamento Extensível para suportar FOUNDATION Fieldbus, Profibus, HART e protocolos legados. Reserva de recursos baseada em demanda.
Apresentação	Estabelece um contexto entre entidades da Camada de Aplicação, no qual as entidades de camadas superiores podem usar diferentes sintaxes e semânticas.	
Sessão	Controla os diálogos (conexões) entre computadores. Estabelece, gerencia e termina as conexões entre a aplicação local e a aplicação remota.	Segurança de criptografia AES 128 bits de última geração. Segurança de chave pública por PKI (chave assimétrica). Segurança hop-by-hop e na camada de aplicação. Tecnologia anti-replay para proteger contra ataques de repetição.
Transporte	Garante a transferência transparente de dados entre aplicativos de usuário final.	UDP: Serviço padrão da Internet. Endereçamento IPv6. Roteamento de backbone, protocolo IPv6, compatível com 6LoWPAN.
Rede	Fornecer os meios de transferir sequências de dados de comprimento variável de uma origem para um destino através de uma ou mais redes; executa funções de roteamento.	
Enlace de Dados	Fornecer serviços para comunicação confiável, segura e robusta. Sincronização temporal por TDMA e channel hopping.	Rede mesh; Salto de canal; Múltiplos métodos de acesso à mídia: TDMA, CSMA e Híbrido. Bloqueio de dispositivos de roteamento e não roteamento (E/S).
Física	Define as especificações elétricas e físicas para dispositivos, em particular a relação entre um dispositivo e um meio de transmissão.	IEEE 802.15.4, 2.4GHz ISM band.

Fonte: Raptis *et al.*, (2020)

O protocolo ISA100.11a foi desenvolvido com o objetivo de atender às exigências de comunicação industrial sem fio com alto desempenho, segurança e interoperabilidade. Estruturado sobre o modelo de referência OSI (Open Systems Interconnection), o protocolo apresenta soluções específicas para cada camada, otimizadas para ambientes industriais críticos, como os encontrados em plantas químicas, petroquímicas e de energia (Raptis *et al.*, 2020).

Conforme demonstrado na Tabela 3, na camada física, o ISA100.11a utiliza a tecnologia IEEE 802.15.4, operando na faixa de 2,4 GHz da banda ISM, similar a outros protocolos como ZigBee. Essa escolha proporciona compatibilidade com dispositivos de baixo consumo energético e oferece um bom equilíbrio entre alcance e taxa de transmissão.

Na camada de enlace de dados, o protocolo incorpora mecanismos avançados de comunicação, como TDMA (*Time Division Multiple Access*) e salto de canal (*channel hopping*), combinados a métodos híbridos de acesso ao meio (como CSMA), para garantir robustez contra interferências e perda de pacotes. Além disso, permite o bloqueio seletivo de dispositivos com ou sem função de roteamento, favorecendo a estabilidade da rede mesh industrial.

Conforme Raptis *et al.*, (2020) a camada de rede é projetada para suportar o roteamento eficiente de pacotes, inclusive entre diferentes segmentos de rede, facilitando a escalabilidade. Já a camada de transporte baseia-se no protocolo UDP, com suporte ao endereçamento IPv6 e compatibilidade com o 6LoWPAN, o que amplia a interoperabilidade com a infraestrutura da Internet das Coisas (IoT).

No que se refere à segurança, a camada de sessão incorpora múltiplos mecanismos de proteção, incluindo criptografia AES de 128 bits, segurança baseada em infraestrutura de chave pública (PKI), autenticação em múltiplos saltos (*hop-by-hop*) e proteção contra ataques de repetição (*anti-replay*). Esses recursos tornam o ISA100.11a uma das soluções mais robustas disponíveis em termos de segurança industrial (ISA100, 2022).

A camada de apresentação, por sua vez, permite a padronização da semântica e sintaxe dos dados trocados entre os dispositivos, viabilizando a interoperabilidade com diferentes protocolos legados. Isso é reforçado na camada de aplicação, que oferece suporte a diversos protocolos industriais, como Foundation Fieldbus, Profibus e HART, por meio de tunelamento. Adicionalmente, o gerenciamento dinâmico de recursos garante desempenho estável em redes com grande número de nós e diferentes perfis de tráfego (Wang; Jiang, 2016).

Assim, o protocolo ISA100.11a se consolida como uma solução completa para a comunicação industrial sem fio, unindo confiabilidade, escalabilidade e segurança, sendo particularmente indicado para aplicações que exigem alta disponibilidade e interoperabilidade com sistemas industriais já existentes.

### 2.4.5. LoRaWAN

No contexto das tecnologias de comunicação para redes de longa distância e baixo consumo energético, LoRa e LoRaWAN ocupam posições de destaque, sendo frequentemente mencionadas de forma conjunta, embora exerçam funções distintas dentro da arquitetura de redes sem fio. O LoRa (*Long Range*) refere-se especificamente à tecnologia de modulação de rádio frequência utilizada para a transmissão dos dados. Trata-se, portanto, de uma tecnologia que atua diretamente na camada física (PHY) do modelo OSI, responsável por transformar sinais digitais em analógicos e vice-versa. Já o LoRaWAN é o protocolo de comunicação que opera sobre o LoRa, sendo responsável pela organização da rede, gerenciamento dos dispositivos e estruturação das mensagens. Esse protocolo atua na camada MAC (*Medium Access Control*) do modelo OSI, definindo o padrão de rede e sua arquitetura (Semtech, 2024).

A modulação utilizada pelo LoRa é baseada na técnica *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que permite uma transmissão robusta e eficiente mesmo em ambientes ruidosos. Um dos grandes diferenciais dessa tecnologia está na utilização de fatores de espalhamento ortogonais (SF7 a SF12), os quais possibilitam que diferentes dispositivos transmitam dados simultaneamente no mesmo canal sem causar interferência mútua. Essa capacidade garante maior imunidade a ruídos e melhora significativamente a eficiência espectral (Gambiroza et al., 2019; Semtech, 2024).

Para aumentar ainda mais a confiabilidade da comunicação, o LoRa emprega técnicas como a correção de erros FEC (*Forward Error Correction*). Essa abordagem adiciona bits redundantes às mensagens transmitidas, permitindo que o receptor identifique e corrija erros sem necessidade de retransmissão. Embora essa técnica aumente o tempo de transmissão e o uso de banda, ela proporciona maior robustez frente a interferências, conforme apontado por Rachkidy et al. (2018).

Um dos grandes atrativos do LoRa é sua operação em faixas de frequência ISM não licenciadas, o que reduz custos e facilita a adoção em diferentes países. No Brasil, por exemplo, a faixa de operação varia entre 915 e 928 MHz, embora também existam versões operando em 2,4 GHz para aplicações que demandam taxas de dados mais altas, ainda que com menor alcance. Em termos de cobertura, a Semtech indica que, em ambientes urbanos, a tecnologia pode atingir até 5 km, enquanto em áreas rurais esse alcance pode chegar a 15 km. Estudos como os de Iborra et al. (2019) confirmam essas estimativas, relatando, por exemplo, 10 km de alcance em campo aberto e cerca de 2 km em regiões urbanas densamente construídas. Em

ambientes fechados, como os analisados por Santos et al. (2019) na Universidade de Brasília, foi possível alcançar cerca de 600 metros, mesmo com barreiras estruturais como paredes de concreto.

Enquanto o LoRa se concentra na modulação e transmissão do sinal, o LoRaWAN organiza toda a estrutura de rede. O protocolo define como as mensagens são codificadas e decodificadas, como os dispositivos se conectam e quais rotas os dados seguem até o destino. Essa organização é baseada em uma topologia do tipo “estrela de estrelas”, em que múltiplos dispositivos finais se conectam a gateways, os quais, por sua vez, se comunicam com servidores de rede centralizados.

Essa arquitetura é composta por quatro elementos principais. Os dispositivos finais, normalmente sensores ou atuadores alimentados por bateria, são responsáveis por coletar dados ambientais e enviá-los via LoRa aos gateways. Estes atuam como pontos intermediários que retransmitem os dados para o servidor de rede, onde são processadas questões como a integridade das mensagens, gerenciamento de chaves de segurança e roteamento. Já o servidor de aplicação é responsável por interpretar os dados coletados, fornecendo-os de forma inteligível ao usuário ou sistema final. Por fim, o servidor de associação tem como função validar novos dispositivos na rede, assegurando que apenas sensores e atuadores autorizados tenham acesso à comunicação, garantindo, assim, a integridade e a segurança de toda a rede (LoRa Alliance, 2024; Semtech, 2024).

Ao reunir alcance estendido, eficiência energética, resistência a interferências e estrutura flexível, LoRa e LoRaWAN se consolidam como alternativas robustas para aplicações em cidades inteligentes, monitoramento ambiental, agricultura de precisão e diversos outros setores da Indústria 4.0. Sua versatilidade e adaptabilidade explicam a crescente adoção dessa tecnologia em projetos que demandam conectividade estável em regiões remotas ou com infraestrutura limitada.

#### **2.4.6. NB-Iot**

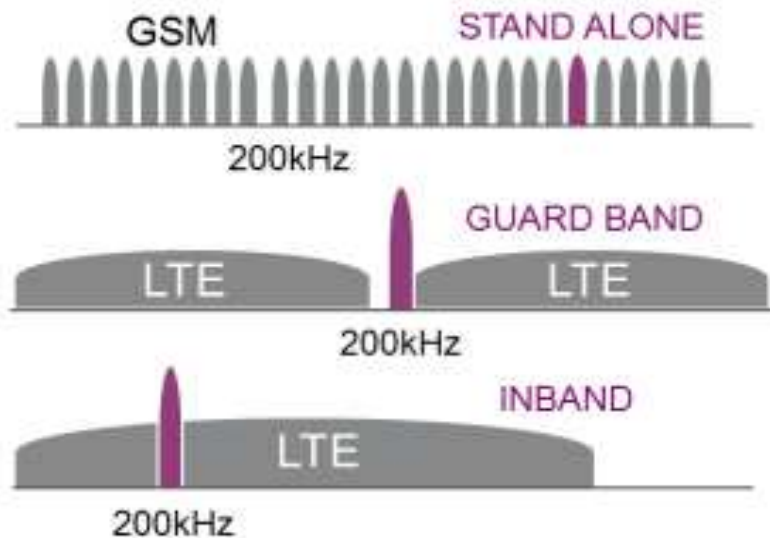
No cenário atual da Internet das Coisas (IoT), a tecnologia NB-IoT (Narrowband IoT) surge como uma das soluções mais promissoras para aplicações que exigem alta eficiência energética, grande cobertura e baixa taxa de transmissão de dados. Padronizada pelo consórcio internacional 3rd Generation Partnership Project (3GPP), a NB-IoT diferencia-se de outras tecnologias de redes IoT, como o LoRa, principalmente por utilizar espectro de frequência licenciado, o mesmo adotado pelas redes LTE (Long-Term Evolution). Essa característica

possibilita que a infraestrutura já existente de redes móveis seja aproveitada, reduzindo custos operacionais e facilitando a implementação em larga escala (Kanj; Savaux; Guen, 2020).

Segundo Tramarin et al., (2019) uma das principais vantagens do NB-IoT está na simplicidade de sua arquitetura física e de rede. A tecnologia opera com uma largura de banda de apenas 200 kHz, utilizada tanto no uplink quanto no downlink, o que permite sua integração de forma eficiente com os sistemas já instalados. Essa estrutura favorece a redução do consumo energético, tornando a NB-IoT altamente adequada para sensores e dispositivos alimentados por bateria, como aqueles empregados em medições remotas, controle ambiental ou sistemas de iluminação urbana.

A flexibilidade de implantação é uma das características que tornam o NB-IoT especialmente atrativo no cenário das redes móveis. Isso ocorre porque, diferentemente de outras tecnologias de IoT que exigem a construção de uma infraestrutura dedicada, o NB-IoT foi concebido para operar sobre as redes LTE já existentes, aproveitando seus recursos de forma eficiente e econômica (Ayoub *et al.*, 2019). Para isso, o 3rd Generation Partnership Project (3GPP) definiu três modos distintos de operação, adaptáveis a diferentes condições de rede e espectro disponíveis, conforme apresentado na Figura 3, apresentado a seguir.

**Figura 2.** Modos de implantação NB-IoT



Fonte: Ayoub *et al.*, (2019)

O primeiro modelo, conhecido *como in-band*, permite que o sinal NB-IoT seja alocado dentro da própria largura de banda do LTE, utilizando blocos de recursos físicos (PRBs) disponíveis no espectro da operadora. Essa abordagem é altamente vantajosa porque possibilita a coexistência harmônica entre os serviços LTE e NB-IoT, sem a necessidade de frequências adicionais. Além disso, o aproveitamento da estrutura já instalada reduz significativamente o tempo e os custos de implementação, mantendo a integridade do desempenho da rede (Ayoub *et al.*, 2019).

No segundo modelo, denominado *guard-band*, o sinal NB-IoT ocupa as faixas de proteção que normalmente separam os canais LTE, conhecidas como bandas de guarda. Essas bandas, que geralmente não são utilizadas na transmissão de dados, passam a ter uma função produtiva, recebendo a sinalização NB-IoT de forma eficiente e com risco mínimo de interferência. Essa solução é bastante eficaz do ponto de vista do uso racional do espectro, sobretudo em situações em que há saturação de canais primários, mas ainda existe margem técnica para a incorporação de novos serviços.

O terceiro modelo, denominado *stand-alone*, oferece ainda mais independência operacional. Nesse caso, o NB-IoT é transmitido fora da banda LTE, utilizando o espectro anteriormente reservado para tecnologias legadas como o GSM. Aqui, o sistema ocupa uma largura de banda de 200 kHz, sendo que 180 kHz são destinados à transmissão efetiva, enquanto os 10 kHz restantes são utilizados como bandas de guarda nas extremidades, garantindo estabilidade e segurança na propagação do sinal (Ayoub *et al.*, 2019). Esse modelo é particularmente útil em regiões onde o espectro GSM foi desativado e pode ser reaproveitado para fins de IoT, sem comprometer o desempenho de redes móveis modernas.

Esses três modos de operação tornam o NB-IoT altamente versátil e escalável, adaptando-se a diferentes realidades operacionais e possibilitando a sua adoção em larga escala por operadoras de telecomunicações em todo o mundo. Tal flexibilidade contribui diretamente para a disseminação de soluções inteligentes em áreas como agricultura de precisão, cidades inteligentes, saúde digital e monitoramento industrial, consolidando o NB-IoT como uma das principais tecnologias habilitadoras da Internet das Coisas.

Do ponto de vista técnico, a NB-IoT também se destaca pela utilização de sinais de referência específicos, como o Narrowband Reference Signal (NRS), essencial para a estimativa do canal e definição da potência de transmissão no downlink. Em cenários *in-band*, coexistem ainda os sinais de referência do LTE, como o Cell-specific Reference Signal (CRS),

o que exige mecanismos de convivência harmônicos entre os dois sistemas (Kanj; Savaux; Guen, 2020).

Além disso, a eficiência energética é reforçada por meio de mecanismos como o eDRX (*Extended Discontinuous Reception*) e o PSM (*Power Saving Mode*). Essas funcionalidades permitem que o dispositivo entre em estados de baixo consumo, despertando apenas em intervalos predefinidos para receber comandos ou transmitir dados. Isso prolonga de forma significativa a vida útil das baterias, especialmente em aplicações onde o envio de dados não precisa ser contínuo. Como apontado por Feltrin (2019), o NB-IoT utiliza temporizadores como T3324, que determina o tempo em que o dispositivo permanece acessível na rede, e o T3412, que define a frequência com que o terminal se reconecta para atualizar sua posição na área de rastreamento.

Por todas essas razões, a NB-IoT tem se consolidado como uma alternativa estratégica para viabilizar a conectividade massiva e segura em ambientes urbanos e industriais. Sua capacidade de penetrar em áreas de difícil acesso, aliada à robustez e eficiência energética, torna essa tecnologia especialmente relevante para aplicações como telemedição de utilidades públicas (água, gás e energia), monitoramento ambiental, segurança patrimonial e gestão de cidades inteligentes.

#### **2.4.7. Sigfox**

A tecnologia Sigfox foi criada em 2010 por Ludovic Le Moan e Christophe Fournet, na França, com o propósito de viabilizar aplicações de Internet das Coisas (IoT) que demandam baixo consumo energético, longo alcance e baixa taxa de transmissão de dados. A proposta surgiu como alternativa às limitações de tecnologias como Wi-Fi e Bluetooth, especialmente no que se refere à autonomia energética e à extensão da cobertura (Sigfox, 2024).

Diferentemente de redes convencionais, a Sigfox estruturou uma rede global dedicada à IoT, operando em faixas de frequência ISM (Industrial, Scientific and Medical): 915 MHz no Brasil, 868 MHz na Europa e outras variações conforme a regulamentação local. De acordo com a própria empresa, a rede atende mais de 1 bilhão de usuários e conta com o apoio de mais de 800 parceiros ao redor do mundo. No Brasil, está presente na maioria dos estados (SIGFOX, 2024).

Em sua concepção inicial, a Sigfox oferecia apenas comunicação de uplink, ou seja, do dispositivo final para a estação base, utilizando a modulação *Differential Binary Phase Shift Keying* (DBPSK). Posteriormente, incorporou a capacidade de downlink, com a utilização da

modulação *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK) (Chilamkurthy et al., 2022; Chochul; Ševčík, 2020).

A tecnologia adota uma topologia em estrela, permitindo que um único gateway gerencie milhões de dispositivos conectados. Cada mensagem de uplink pode conter até 12 bytes, com um limite de 140 mensagens por dia. Já o downlink permite até quatro mensagens diárias, com 8 bytes cada (Chilamkurthy et al., 2022; Chochul e Ševčík, 2020).

Quanto à sensibilidade das estações base, os valores variam conforme a taxa de transmissão: de  $-142$  dBm a 100 bps até  $-134$  dBm a 600 bps. Essa característica possibilita uma cobertura de até 10 km em ambientes urbanos e 50 km em áreas rurais (Chochul e Ševčík, 2020).

Adicionalmente, a Sigfox implementa um mecanismo de diversidade de tempo e frequência, que retransmite cada mensagem três vezes em frequências e intervalos aleatórios, reduzindo as chances de colisão ou interferência e aumentando a confiabilidade e a segurança da comunicação (Chochul e Ševčík, 2020).

#### **2.4.8. 5G**

O avanço exponencial da tecnologia representa um avanço significativo nas redes móveis, trazendo melhorias em velocidade de dados, latência e capacidade de conexão. A primeira geração de redes móveis, conhecida como 1G, foi introduzida na década de 1970. Essa geração utilizava sistemas analógicos, como o sistema avançado de telefonia móvel (AMPS) na América do Norte, o telefone móvel nórdico (NMT) na Escandinávia, e o sistema de comunicações de acesso total (TACS) no Reino Unido. As tecnologias 1G ofereciam apenas serviços de voz com uma qualidade limitada, velocidades de dados de até 2.4 kbps e problemas de segurança devido à ausência de criptografia (Solyman; Yahya, 2022).

Por sua vez, O avanço para o 2G, introduzido na década de 1990, marcou a transição para sistemas digitais. A comunicação móvel global (GSM) foi o padrão dominante, utilizando modulação chaveamento de deslocamento mínimo gaussiano (GMSK) e tecnologias de acesso como acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). A digitalização permitiu melhorias na qualidade da chamada, capacidade de sistema, e segurança através da criptografia de dados. O 2G também introduziu serviços de dados básicos com o General Packet Radio Service (GPRS), classificado como 2.5G, que permitia taxas de até 50 kbps (Shah et al., 2021). Segundo Solyman e Yahya, 2022 o 3G surgiu como uma resposta à crescente demanda por dados e multimídia, utilizando tecnologias como o acesso múltiplo por divisão de código de banda larga (WCDMA)

e o acesso a pacotes de alta velocidade (HSPA). Com o 3G, as velocidades de dados aumentaram significativamente, permitindo vídeo chamadas e navegação na web com uma experiência melhorada.

A quarta geração, ou 4G, introduziu o *Long Term Evolution* (LTE), uma tecnologia baseada em multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM). O LTE e sua evolução LTE-Advanced (LTE-A) possibilitaram velocidades de até 1 Gbps teoricamente, utilizando técnicas como Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas (MIMO) e agregação de portadora para aumentar a capacidade e a eficiência espectral (Hassan et al., 2020). A tecnologia MIMO foi essencial para permitir grandes taxas de dados e transmitir vários fluxos para obter eficiência espectral. Essa geração trouxe uma experiência de banda larga móvel comparável à de conexões fixas, permitindo a transmissão de vídeos em alta definição e jogos online (Solyman, Yahya, 2022).

**Figura 3.** Comparativo entre as gerações

### Comparison\* of different Technology Generations

	2G	3G (HSPA+)	4G	5G	6G**
Year	1990	2000	2010	2020	2030
Max DL Speed (theoretical)	473.6 Kbps	42 Mbps	3 Gbps	20 Gbps	1 Tbps
Avg DL Speed (practical)	50 Kbps	8 Mbps	100 Mbps	300 Mbps	1 Gbps
Max UL Speed (theoretical)	473.6 Kbps	11.5 Mbps	1.5 Gbps	10 Gbps	10 Gbps
Avg UL Speed (practical)	50 Kbps	2 Mbps	50 Mbps	100 Mbps	1 Gbps
E2E Latency (practical)	600 ms	120 ms	30 ms	10 ms	1 ms
Reliability	99%	99.9%	99.99%	99.999%	99.99999%
Connection Density	N/a	N/a	10 <sup>5</sup> devices/km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> devices/km <sup>2</sup>	10 <sup>7</sup> devices/km <sup>2</sup>
Mobility	150 km/h	300 km/h	350 km/h	500 km/h	1000 km/h

\* Approximate values to show comparisons. \*\*Subject to change when standards process starts.



Fonte: Free6gtraining, (2024)

Por fim, o 5G, promete revolucionar a comunicação móvel com velocidades de até 10 Gbps, latência ultra-baixa menores que 10 ms, como observado na figura 9 mostrando avanço das gerações das redes móveis, uma capacidade de conexão para um grande número de dispositivos, possibilitando avanços em IoT, realidade aumentada e virtual, entre outros (Commsbrief, 2023). Essa tecnologia é crucial para aplicações que requerem transmissão de

dados quase instantânea e confiável, como carros autônomos e cirurgias remotas (Čolaković, Džubur, Karahodža, 2021).

A arquitetura 5G ampliou o escopo oferecendo um amplo range de serviços sem fio ao usuário final, composta por vários componentes-chave (Pallattella et al.,2016). Redes de Acesso via Rádio (RAN) no 5G utilizam uma estrutura mais inteligente e flexível, promovendo a desagregação e virtualização da rede. Isso é facilitado por iniciativas como a Open-RAN, que incentiva o uso de hardware comercial e interfaces abertas, permitindo a rápida introdução de novas funcionalidades e tecnologia RAN. O espectro de frequências utilizado pelo 5G é diverso, incluindo desde ondas milimétricas (30-300 GHz) até frequências mais baixas, como a banda C (3,7-3,98 GHz). As ondas milimétricas, em particular, são ideais para áreas densamente povoadas devido à sua alta capacidade de largura de banda, embora tenham um alcance mais limitado. Por outro lado, frequências mais baixas são usadas para cobertura em áreas mais amplas.

Outro componente crucial da arquitetura 5G é o *Edge Computing de Múltiplo Acesso* (MEC). O MEC aproxima a computação e o armazenamento dos usuários finais, reduzindo a latência e melhorando a eficiência no fornecimento de serviços. Isso é essencial para suportar aplicações que exigem respostas rápidas, como jogos online e realidade aumentada (Solyman, Yahya, 2022).

A Virtualização da Função de Rede (NFV) é outra inovação importante no 5G. A NFV permite a criação de redes virtuais que operam simultaneamente em uma infraestrutura física compartilhada, uma técnica conhecida como fatiamento de rede. Esse recurso é particularmente útil para atender a diferentes requisitos de serviço, como a Internet das Coisas (IoT), onde muitos dispositivos podem estar conectados, mas com baixa demanda de largura de banda (Solyman, Yahya, 2022).

Regiões líderes em tecnologia como América do Norte, Ásia e Europa estão acelerando a implementação rapidamente. Segundo dados do Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (2024) chinês, em junho de 2024 o país aumentou para quase 3,92 milhões o número de estações base 5G, um país que vem investindo massivamente na tecnologia 5G, construiu mais de 300 fábricas e lançou mais de 13.000 projetos para aplicação do chamado “5G mais internet industrial”.

### 3. METODOLOGIA

Para identificar os estudos relevantes, foi realizada uma busca na base de dados da Web of Science, reconhecidos por sua cobertura abrangente de literatura nas áreas de ciência, tecnologia e negócios.

Diante do crescimento exponencial do uso de tecnologias sem fio em ambientes industriais e da complexidade envolvida na seleção adequada dessas soluções, este trabalho adotou como procedimento metodológico uma revisão sistemática da literatura, com o intuito de reunir, classificar e analisar criticamente os principais estudos científicos sobre o tema. A abordagem é de natureza descritiva e exploratória, permitindo compreender o estado atual do conhecimento e identificar as tendências, desafios e contribuições relacionadas à aplicação da conectividade sem fio no contexto da Indústria 4.0.

A seleção dos documentos foi realizada a partir da plataforma Web Of Science, que possui em sua base de dados artigos científicos reconhecidos e fontes institucionais consolidadas, com destaque para: IEEE Xplore, MDPI, ScienceDirect, SpringerLink e publicações técnicas setoriais. Foram considerados estudos publicados no período de 2014 a 2025, por refletirem o avanço das discussões científicas e tecnológicas compatíveis com a consolidação da Indústria 4.0 e a transição para a Indústria 5.0.

Os termos de busca foram definidos com base nos objetivos do estudo e combinados com operadores booleanos, envolvendo descritores como:

- *"wireless communication\*" OR "wireless technolog\*"*
- *"Industry 4.0" OR "smart manufacturing"*

#### 3.1. Seleção e Organização dos Documentos

Ao todo, foram selecionados os documentos principais, previamente extraídos e organizados em repositório próprio, que incluem artigos científicos, artigos de anais de conferência e manuais técnicos. Esses documentos abordam diferentes aspectos das tecnologias sem fio, incluindo:

- Protocolos de baixa potência e longo alcance (LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M);
- Tecnologias de rede local sem fio (Wi-Fi, ZigBee, ISA100);

- Requisitos industriais de confiabilidade, segurança e desempenho em redes de sensores;
- Perspectivas de integração da IoT em fábricas inteligentes e aplicações industriais avançadas.

Cada documento foi identificado por autor, título, instituição e ano de publicação, garantindo rastreabilidade e organização padronizada dos dados coletados.

Foram incluídos os documentos que atenderam simultaneamente aos seguintes critérios:

- Disponibilidade integral do conteúdo (texto completo);
- Relevância direta com o tema de tecnologias sem fio em ambientes industriais;
- Publicação entre os anos de 2014 e 2025;
- Idiomas: português ou inglês;
- Artigos revisados por pares ou documentos técnicos de fonte institucional reconhecida.

Essa filtragem buscou garantir a atualidade, a qualidade técnica e a pertinência temática das fontes analisadas.

Os seguintes critérios foram adotados para a exclusão de documentos:

- Estudos que abordam tecnologias sem fio exclusivamente em contextos não industriais (como domicílios ou Escritório);
- Documentos incompletos, inacessíveis ou sem fundamentação científica;
- Materiais opinativos ou com foco em temas não diretamente relacionados à conectividade (ex: IA, manufatura aditiva, sem menção à comunicação sem fio).

A aplicação desses critérios assegurou a consistência e a objetividade na formação documental da revisão.

A análise dos documentos selecionados seguiu um processo sistemático em três etapas:

1. Leitura exploratória dos títulos, resumos e palavras-chave, com verificação da aderência aos objetivos da pesquisa;
2. Leitura analítica e integral dos textos, com extração de dados relevantes sobre as tecnologias, suas aplicações, vantagens e limitações;
3. Classificação comparativa das tecnologias sem fio com base em critérios técnicos de cobertura, eficiência energética, taxa de dados, custo de implementação e adequação a ambientes industriais.

Os dados obtidos foram organizados em planilhas para facilitar a comparação entre as tecnologias identificadas. As categorias de análise adotadas foram:

- Alcance da comunicação;
- Consumo energético;
- Taxa de transmissão de dados;
- Custo de implementação;

Essa sistematização permitiu construir uma visão integrada sobre os principais protocolos e soluções de conectividade sem fio aplicadas à Indústria 4.0, contribuindo para o mapeamento das tendências e das lacunas na literatura atual.

Os estudos selecionados foram então analisados e as informações relevantes foram extraídas. As informações extraídas foram então sintetizadas e analisadas para identificar padrões, tendências e lacunas na literatura existente.

Este método de revisão sistemática permitiu uma análise abrangente e objetiva da literatura atual, fornecendo insights valiosos sobre o estado atual do setor e as direções futuras da pesquisa.

#### 4. ANALISE DE RESULTADOS

A análise dos artigos selecionados evidenciou a diversidade de abordagens e critérios técnicos associados à utilização de tecnologias sem fio no contexto da Indústria 4.0. Foram identificados diferentes protocolos e tecnologias de comunicação, como 5G, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, Wi-Fi, ISA100, ZigBee, entre outros. As tecnologias foram discutidas sob os aspectos de alcance de cobertura, eficiência energética, taxa de dados, custo de implantação e adequação a ambientes industriais e outros.

A Tabela 4 apresenta a síntese dos artigos incluídos na revisão, com destaque para os objetivos, tecnologias analisadas e principais contribuições para o entendimento da conectividade sem fio no ambiente industrial.

**Tabela 4.** Caracterização dos artigos incluídos na revisão

Título / Ano	Tecnologias / Protocolos	Crítérios Técnicos Avaliados
A Digital Twin (DT) approach to Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) wireless communication optimization in an industrial scenario, 2024	Gêmeo Digital (DT), NB-IoT, LPWAN, LTE	Taxa de Erro, qualidade do sinal, throughput
Device-Free AMR Crossing Detection Using LTE Signals for Smart Factory Applications, 2025	LTE, 5G/6G, RSSI	Latência, precisão da detecção,

Wireless communication technologies the Internet of Things, 2021	Wi-Fi, ZigBee, LoRaWan, Sigfox, NB-IoT,Bluetooth	Alcance, consumo de energia, QoS, interoperabilidade
Applications of Wireless Sensor Networks An Up-to-Date Survey, 2020	WSN, ZigBee, NB-IoT, LoRaWan	Cobertura, segurança, eficiência energética, escalabilidade
Enabling Communication Networks for Water Quality Monitoring Applications: A Survey, 2019	Sigfox, LoRa, INGENU, NB-IoT, Wi-Fi	Conectividade, monitoramento, interoperabilidade, segurança
Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. 2019	WiFi-6E, 5G, TSN,	Velocidade, latência, confiabilidade
LPWAN State of the Art: Trends and Future Directions, 2021	LoRa, Sigfox, NB-IoT, LTE-M	Baixo consumo, energético, longo alcance, custo
Internet of Things applications in the industry, health-care, and environment	LoRa, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, Z-Wave, RedCap	Alcance, Consumo de energia, Custo, Segurança, QoS
Wireless Technologies for Industry 4.0 Applications	Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, ISA100.11a, WirelessHART, LoRa e NB-IoT	Alcance, eficiência energética
Multi-Protocol LoRaWAN/Wi-Fi Sensor Node Performance Assessment for Industry 4.0 Energy Monitoring, 2019	Wi-Fi, LoRa	Eficiência energética, Latência, Interoperabilidade
IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey, 2023	NB-IoT, LTE-M, LoRa, Sigfox, Wi-Fi, BLE	Alcance, Custo, Eficiência, Densidade de conexão
Comparative Examination on Architecture and Protocol of Industrial Wireless Sensor Network Standards, 2018	ZigBee, ISA100.11a, and WIA-PA	Arquitetura, Desempenho, Escalabilidade
Low-Power Wide-Area Networks for Industrial Sensing Applications, 2018	LoRa, Bluetooth, Wi-Fi, IEEE 802.15.4g	Alcance, Energia, Custo, QoS
Trends in Industrial Networks incl. APL, TSN, WiFi-6E and 5G Technologies, 2022	Bluetooth, WiFi-6E, e 5G	Consumo, Confiabilidade, Robustez, Latência
Reference Architectures for Industry 4.0: Literature Review	CPS, IIoT, Big Data, Cloud	Evolução conceitual, Tecnologias habilitadoras
Integração de Digital Twin, IoT e LoRa em robôs SCARA para automação descentralizada com redes de sensores sem fio, 2025	Digital Twin (DT), IoT, LoRa, LoRaWAN, Redes de Sensores Sem Fio (WSN)	Digital Twin (DT), IoT, LoRa, LoRaWAN, Redes de Sensores Sem Fio (WSN)
Implementing an Industry 4.0 UWB-Based Real-Time Locating System for Optimized Tracking, 2025	UWB , IoT, IEEE 802.15.4	Precisão da localização
C-SLA-MLO: Enhancing SLA Compliance in Industrial Wi-Fi through Cooperative Multilink Operation, 2024	Wi-Fi 7 , IIoT, Ethernet TSN	Latência, conformidade com SLA, vazão (throughput),QoS
Combining 5G New Radio, Wi-Fi, and LiFi for Industry 4.0: Performance Evaluation, 2024	5G , Wi-Fi 6, LiFi, Multi-conectividade	Throughput, latência, Interoperabilidade,
Industry 4.0: a tertiary literature review, 2023	Cloud, IoT, AI, CPS	Domínios de aplicação, Avanços tecnológicos

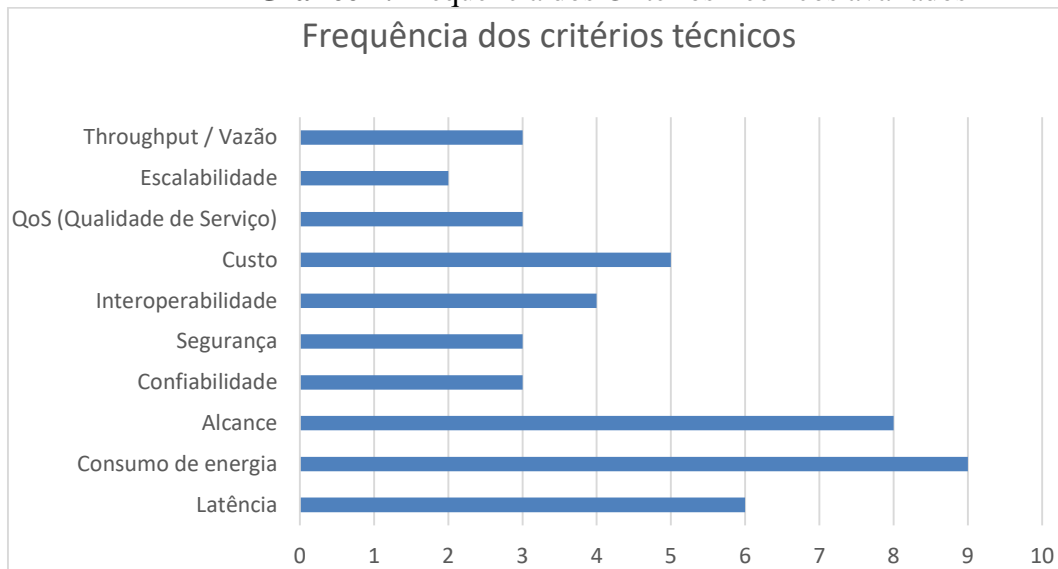
A Survey of 5G Emerging Wireless Technologies Featuring LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT and LTE-M, 2019	LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M	Desempenho, Consumo energético
A Survey of Low Power Wide Area Network Technolog, 2020	Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT	Alcance, Consumo energético, Taxa de transmissão
Real-Time Performance of Industrial IoT Communication Technologies: A Review, 2024	Iot, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M	Baixa latência, Redundância, Confiabilidade
An Empirical Study of 5G, Wi-Fi 6, and Multi-Connectivity Scalability in an Indoor Industrial Scenario, 2024	5G SA , Wi-Fi 6	Escalabilidade , latência, desempenho em cenários estacionários e de mobilidade
5G-Cloud-based real-time robotic part repairing for advanced manufacturing, 2024	5G	Latência, Processamento , taxa de transferência de dados
Coherent enterprise information modeling for 5G private network feasibility, 2024	Redes Privadas 5G , IoT	Sobreposição de redes , requisitos de infraestrutura
Enabling Communication Networks for Water Quality Monitoring Applications: A Survey, 2019	ZigBee and IEEE 802.15.4, Bluetooth, Wi-Fi	Eficiência energética, Alcance, Robustez
Análise da visibilidade e intensidade do sinal da rede LoRaWAN em uma área urbanizada.	LoraWan	Alcance, Consumo energético
Future Industrial Applications: Exploring LPWAN-Driven IoT Protocols, 2024	LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-MT	Consumo, Alcance, Segurança e Custo
Coverage Analysis of LoRa and NB-IoT Technologies on LPWAN-Based Agricultural Vehicle Tracking Application	LoraWAN, NB-IoT	Alcance, custo

Fonte: O autor (2025).

Verifica-se que os critérios mais recorrentes entre os artigos são: eficiência energética, alcance de cobertura, custo de implementação e latência. Esses aspectos são fundamentais para a tomada de decisão em ambientes industriais, onde fatores como confiabilidade, robustez e interoperabilidade impactam diretamente na produtividade e segurança operacional.

As aplicações descritas nos artigos abrangem desde sistemas de monitoramento e rastreamento de ativos, automação de processos industriais, ambientes *SCADA*, até monitoramento ambiental e de qualidade da água, revelando a diversidade de contextos em que as tecnologias sem fio vêm sendo adotadas.

A análise conjunta dos estudos evidencia um crescente avanço nas linhas de pesquisas e um alinhamento das soluções de conectividade aos princípios da Indústria 4.0, tais como análise da complexidade, descentralização, capacidade de decisão autônoma e integração digital de ponta a ponta. Além disso, os artigos apontam desafios persistentes, como a necessidade de padronização de protocolos, utilização sistema híbrido de tecnologias, segurança cibernética e escalabilidade de redes heterogêneas, o que reforça a relevância de investigações contínuas sobre o tema.

**Gráfico 1.** Frequência dos Critérios Técnicos avaliados

Fonte: O Autor com base nos estudos

Ao examinar artigos selecionados, tornou-se evidente que a escolha de tecnologias sem fio na Indústria 4.0 vai muito além de uma simples preferência por protocolos de comunicação. Trata-se de uma decisão técnica que exige sensibilidade às particularidades de cada ambiente produtivo, aos objetivos operacionais e, sobretudo, às limitações físicas e financeiras que caracterizam os diferentes setores industriais. Além disso, tecnologias com as mesmas duas propriedades também podem apresentar diferenças no modo de rede, topologia e assim por diante, para atender a contextos de aplicação específicos.

O gráfico 1 ilustra os critérios técnicos mais recorrentes na literatura analisada. Dentre eles, a eficiência energética ou consumo energético foi bastante citado. Isso não é surpreendente: em um cenário onde a automação depende cada vez mais de sensores e dispositivos conectados de forma permanente, o consumo de energia torna-se uma variável crítica. Protocolos como LoRa e NB-IoT, por exemplo, ganham destaque por sua capacidade de operar com baterias de longa duração, reduzindo custos de manutenção e garantindo a continuidade das operações.

Outro critério amplamente mencionado é o alcance de cobertura, detalhado na tabela 5 de cada tecnologia, especialmente importante em ambientes industriais extensos, como plantas de produção e centros logísticos. A comunicação confiável entre dispositivos localizados em pontos distantes da infraestrutura exige soluções capazes de manter a integridade do sinal sem depender de múltiplos repetidores.

A latência, por sua vez, reflete a crescente exigência por respostas em tempo real. Em processos industriais críticos, onde qualquer segundo pode representar perda de qualidade, segurança ou produtividade, a capacidade de transmitir dados instantaneamente é indispensável. Tecnologias como o 5G industrial e o Wi-Fi 6 surgem nesse contexto como alternativas de alta performance.

Também se destacam os critérios relacionados à segurança, à taxa de transmissão de dados e ao custo de implementação. A combinação desses fatores evidencia o dilema constante entre desempenho técnico e viabilidade econômica. Afinal, nem sempre a solução mais avançada é a mais aplicável, especialmente em setores com orçamento limitado ou infraestrutura legada.

O que a análise dos artigos revela, portanto, é que a conectividade industrial não pode ser pensada em termos absolutos, mas sim de forma estratégica, integrada e adaptada ao contexto. A escolha do protocolo ideal é uma construção que depende da compreensão do ambiente físico, das metas da organização e da maturidade tecnológica do ecossistema onde será aplicado.

#### **4.1. Análise das Tecnologias Para Atender Diversos Objetivos de Cada Projeto**

A Indústria 4.0 inaugura uma nova fase da automação industrial, pautada na conectividade inteligente e na integração entre sistemas físicos e digitais. Nesse contexto, as tecnologias de comunicação sem fio não apenas viabilizam a descentralização dos processos, mas também otimizam a capacidade de resposta, a eficiência energética e a gestão de recursos. No entanto, como evidenciam Oztemel e Gursev (2018), não existe uma solução única aplicável a todos os contextos industriais: a escolha da tecnologia depende diretamente dos objetivos do projeto, das características operacionais e das limitações de cada ambiente fabril.

Segundo Lemstra e Mesquita (2023), projetos que visam à digitalização industrial com foco em arquiteturas distribuídas e sistemas embarcados tendem a adotar tecnologias que conciliam confiabilidade e interoperabilidade, como as redes baseadas em Cloud Computing e M2M. Já Ngwenyama e Webber (2025) enfatiza a importância da eficiência energética e da integração entre dispositivos móveis e sensores inteligentes, aspectos essenciais em ambientes que demandam operações contínuas com baixo consumo de energia.

Em aplicações de monitoramento remoto e rastreamento de ativos, tecnologias como LoRaWAN, NB-IoT e Sigfox têm se mostrado particularmente eficazes. Chilamkurthy *et al.* (2022) realizaram uma análise visual e técnica dessas soluções, destacando que seu diferencial está no equilíbrio entre alcance e consumo energético, mesmo com taxas de transmissão limitadas. Essa abordagem é reforçada por estudos como o da Ferreira (2021), que realizou testes experimentais com LoRaWAN e Wi-Fi, identificando seu potencial em ambientes industriais de média complexidade.

Por outro lado, em sistemas que exigem baixa latência e alta taxa de dados, como em linhas de produção robotizadas ou controle de processos críticos, autores como Hassan *et al.* (2023) e Sider *et al.* (2023) apontam o 5G como alternativa mais adequada. Essa tecnologia oferece garantia de tempo de resposta, algo indispensável em operações sensíveis ao tempo e à sincronização de múltiplos dispositivos.

A segurança também aparece como um critério determinante. O guia técnico da ISA100 Institute (2020) apresenta o ISA100 Wireless como uma solução consolidada para ambientes industriais exigentes, como plantas químicas e sistemas SCADA, justamente por seus mecanismos de segurança e baixa latência. De modo semelhante, a análise de Chochul e Ševčík (2020) ressalta que protocolos LPWAN como NB-IoT, LTE-M e LoRaWAN devem ser escolhidos com base em requisitos de segurança, tempo de resposta e viabilidade econômica.

Destaca-se ainda a tendência ao uso de estruturas híbridas, nas quais diferentes tecnologias são combinadas para atender múltiplos requisitos. Segundo Lopes *et al.* (2020), essa abordagem permite maior flexibilidade operacional, ao integrar protocolos de longo alcance com soluções locais de alta velocidade, como Wi-Fi e Bluetooth, otimizando a eficiência e a cobertura da rede.

Dessa forma, observa-se que a análise e a escolha das tecnologias sem fio na Indústria 4.0 devem ser orientadas por critérios múltiplos, que envolvem desde aspectos técnicos até fatores econômicos e estratégicos. A flexibilidade na adoção de diferentes soluções, longe de representar um desafio, constitui um elemento-chave para a adaptabilidade e a inovação no setor industrial contemporâneo.

A eficiência energética foi o critério técnico mais recorrente nos artigos analisados nesta revisão sistemática, sendo apontada como nos estudos analisados. Sua relevância decorre do fato de que muitos dispositivos industriais conectados à Internet das Coisas (IoT) operam em locais remotos, com restrições de acesso à rede elétrica, exigindo, portanto, soluções que minimizem o consumo energético e prolonguem a vida útil das baterias.

Segundo Chilamkurthy *et al.* (2022), protocolos como LoRaWan, Sigfox e NB-IoT foram projetados justamente para operar com consumo extremamente baixo, utilizando técnicas como transmissão esporádica, redução da taxa de atualização e modulação otimizada. Isso os torna particularmente adequados para aplicações como monitoramento ambiental, rastreabilidade logística e manutenção preditiva, nas quais os dados não precisam ser transmitidos continuamente, mas sim em intervalos específicos e com confiabilidade.

O estudo conduzido Islan *et al.* (2024) comparou diferentes tecnologias LPWAN, evidenciando que a eficiência energética é diretamente proporcional à simplicidade do protocolo de comunicação e ao tempo em que o dispositivo permanece em modo de hibernação. LoRaWAN, por exemplo, apresenta desempenho altamente eficiente ao transmitir pequenas quantidades de dados a longas distâncias, com consumo significativamente menor que redes como Wi-Fi ou 5G. Na tabela 5 é demonstrado um comparativo com as principais especificações das tecnologias de longo alcance e são apresentadas de forma consolidada, permitindo uma análise melhor.

**Tabela 5:** Tecnologias de longo alcance

Parâmetros	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M	5G
<b>Espectro</b>	Não licenciado	Não Licenciado	Licenciado	Licenciado	Licenciado
<b>Padrão seguido</b>	LoRa Alliance	Sigfox	3GPP	3GPP	3GPP
<b>Largura de banda por canal</b>	Estreita 125 kHz, 250 kHz, 500kHz	Estreita 100 Hz in EU 600 Hz in USA	Estreita 200kHz, 180kHz	Estreita	Larga
<b>Frequência</b>	Sub-GHz (433/902/915 MHz)Brasil	Sub-GHz (902/905 MHz)Brasil	Sub-GHz (700/1850/1710/824MHz)Brasil	Sub-GHz (700/1850/1710/824MHz)Brasil	Sub-6 GHz e mmWave (24-100 GHz)
<b>Bidirecional</b>	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
<b>Imunidade a interferência</b>	Alta	Muito Alta	Baixa	Média	Alta
<b>Taxa de transferência</b>	~50 Kbps	~600 Bps	~250 Kbps	~4 Mbps	~10 Gbps
<b>Consumo de energia em modo sleep</b>	0.7 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A	1 $\mu$ A	4 $\mu$ A	-
<b>Custo</b>	Baixo	Baixo	Médio	Alto	alto
<b>Expectativa de vida da bateria</b>	10+ anos	10+ anos	10+ anos	10 anos	-
<b>Topologia</b>	Estrela de estrela	Estrela	Estrela	Estrela	Estrela, Malha

Modulação	CSS	UL: BPSK DL: GFSK	UL: BPSK/QPSK DL: QPSK	UL: BPSK/QPSK DL: BPSK/QPSK	DL: OFDMA
<b>Latência</b>	2-30 s	2-30 s	1.6 - 10s	10-15 ms	1 - 10ms
<b>Localização</b>	SIM	SIM	SIM	SIM	sim
<b>Mobilidade</b>	SIM	NÃO	Não	SIM	sim
<b>Alcance</b>	~20 km rural, ~5 km urbano	~40 km rural, ~10 km urbano	~10 km rural, ~2 km urbano	~10 km rural, ~5 km urbano	1-10 km urbano

\* UL - Uplink -

DL - Downlink

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Devan *et al.* (2021), Hassan *et al.* (2020), Iborra *et al.* (2019).

Ngwenyama e Webber (2025) também destacam a eficiência energética como condição essencial para a sustentabilidade da Indústria 4.0, apontando que os ganhos de conectividade e automação devem ser acompanhados de soluções que reduzam o impacto ambiental e o consumo de recursos. Isso se alinha com a lógica da fábrica inteligente, na qual dispositivos interconectados operam de forma autônoma e distribuída, exigindo mínima intervenção humana e manutenção esporádica.

Por sua vez, Sider *et al.* (2023) observam que há uma necessidade crescente de equilibrar eficiência energética com requisitos de segurança e robustez da conexão, principalmente em ambientes industriais que operam sob condições adversas. Assim, o desafio não é apenas consumir menos energia, mas fazê-lo sem comprometer a qualidade da comunicação, a integridade dos dados e a confiabilidade dos sistemas.

Nesse sentido, a eficiência energética se consolida como um dos eixos estratégicos para a viabilidade técnica e econômica das tecnologias sem fio na Indústria 4.0, sendo decisiva na escolha de protocolos e na arquitetura de redes industriais. Sua centralidade reforça a importância do planejamento criterioso das soluções de conectividade, respeitando as características do ambiente fabril e os objetivos de cada aplicação.

O custo de implantação das tecnologias de comunicação sem fio é outro fator determinante para sua adoção na Indústria 4.0, a tabela 6 faz um comparativo entre algumas tecnologias, especialmente em projetos que demandam escalabilidade, infraestrutura robusta ou modernização de sistemas legados. Identificado como critério relevante em diversos estudos incluídos nesta revisão, esse aspecto envolve não apenas o investimento inicial em equipamentos e dispositivos, mas também os custos relacionados à infraestrutura de rede, manutenção, atualizações tecnológicas e treinamento de pessoal.

Segundo Elisiario *et al.* (2019), protocolos de rede de baixa potência e longo alcance (LPWAN), como LoRaWAN e Sigfox, destacam-se por apresentarem baixo custo de implantação, especialmente em cenários que não exigem elevada taxa de dados nem cobertura contínua. A possibilidade de operar em faixas de frequência não licenciadas e com infraestrutura reduzida favorece sua aplicação em sistemas distribuídos de monitoramento e rastreamento, permitindo implantações em larga escala com menor impacto financeiro.

Neste contexto as, tecnologias como 5G industrial, Wi-Fi 6 embora ofereçam desempenho superior em termos de latência, velocidade e segurança, demandam infraestrutura mais complexa e investimentos significativamente mais elevados. Hassan *et al.* (2023) destacam que esses protocolos são mais indicados para ambientes industriais críticos, onde o retorno sobre o investimento é justificado pela alta exigência de desempenho e confiabilidade.

Chilamkurthy *et al.* (2022) observam que, mesmo entre as soluções de baixo custo, a escolha do protocolo deve considerar o equilíbrio entre investimento inicial e custos operacionais. Por exemplo, uma solução mais barata pode acarretar manutenção mais frequente, substituição de dispositivos com menor durabilidade ou limitações técnicas que comprometem a escalabilidade do sistema a médio prazo.

Além disso, Oztemel e Gursev (2018) apontam que o custo de implantação não se resume ao aspecto financeiro. Deve-se incluir também a complexidade da integração com sistemas legados, a curva de aprendizado das equipes técnicas e os riscos associados à interoperabilidade. Em muitos casos, empresas optam por soluções intermediárias que garantam compatibilidade com a infraestrutura existente, ainda que isso limite o potencial de inovação.

Portanto, a análise dos custos de implantação mostra-se essencial na tomada de decisão estratégica, especialmente em projetos que envolvem múltiplas unidades fabris, ambientes heterogêneos ou restrições orçamentárias. A seleção da tecnologia adequada passa, assim, por uma avaliação criteriosa do custo-benefício, considerando não apenas o valor monetário, mas a adequação técnica, a escalabilidade da solução e os objetivos operacionais da organização.

A cobertura é um dos critérios técnicos mais relevantes na seleção de tecnologias sem fio para ambientes industriais. Sua importância reside na necessidade de garantir a conectividade estável e contínua entre dispositivos distribuídos em áreas amplas, tanto em zonas urbanas quanto em áreas remotas. Assim, a escolha da tecnologia adequada deve considerar não apenas o alcance físico, mas também os custos operacionais e estruturais

envolvidos, como a necessidade de infraestrutura própria, o licenciamento do espectro, o consumo energético e a densidade de dispositivos conectados.

No contexto das redes de longo alcance, destacam-se as tecnologias LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M. LoRaWAN e Sigfox operam em faixas de frequência não licenciadas, com alcances típicos de 5 a 10 km em áreas urbanas e até 40 km em áreas rurais, dependendo da topografia e das barreiras físicas (Khalifeh *et al.*, 2019). Por sua natureza de baixo consumo energético e simplicidade estrutural, essas soluções são amplamente aplicadas em projetos de monitoramento ambiental, agricultura de precisão e rastreamento de ativos.

Por outro lado, as tecnologias NB-IoT e LTE-M, que utilizam espectro licenciado, oferecem maior confiabilidade de conexão e integração direta com redes móveis existentes. Conforme apontado por Hassan *et al.* (2020), seu alcance médio é de até 10 km em zonas rurais e cerca de 5 km em áreas urbanas, com a vantagem de contar com a infraestrutura das operadoras de telefonia celular.

Estudos como o de Soy *et al.* (2023) demonstram que o NB-IoT pode ultrapassar 15 km de cobertura em faixas de 800 MHz, reforçando sua viabilidade para aplicações em larga escala. Já o LoRaWAN, ainda que tenha menor alcance em alguns cenários, apresenta uma impressionante capacidade de cobertura territorial. Mekki *et al.* (2019) ilustram essa eficiência ao mencionar que, na Bélgica, uma área de aproximadamente 30.500 km<sup>2</sup> é coberta com apenas sete estações base LoRaWAN.

Tecnologias de curto alcance, como Zigbee e Bluetooth Low Energy (BLE), também apresentam importância estratégica, especialmente em aplicações indoor. O BLE, por exemplo, alcança até 450 metros sob condições ideais e é utilizado em automação residencial, dispositivos vestíveis e monitoramento biométrico (Bluetooth SIG, 2024). O Zigbee, com alcance médio de 100 metros por dispositivo, beneficia-se de uma topologia em malha (mesh) que permite ampliar a cobertura por meio da retransmissão dos sinais.

No segmento de redes industriais especializadas, tecnologia como ISA100.11a oferece cobertura de aproximadamente 100 metros e operam na frequência de 2,4 GHz, com vantagens como tolerância a interferências, segurança embarcada e auto-organização da rede. Essas soluções são empregadas com sucesso em ambientes críticos, como refinarias, plantas químicas e sistemas de automação de processos complexos (ISA100, 2022; Decan *et al.*, 2021).

O Wi-Fi, com alcance médio de 30 a 100 metros, também encontra aplicação industrial em ambientes internos. Com a chegada do padrão Wi-Fi 6E, há ganhos expressivos em velocidade e gerenciamento de múltiplos dispositivos simultâneos. Um caso emblemático é o

SoFi Stadium, nos Estados Unidos, que implantou mais de 2.500 pontos de acesso Wi-Fi 6, registrando um tráfego de 24 TB durante um único evento, com velocidades de até 1.130 Mbps (Kapustka, 2024). Esse exemplo ilustra a eficiência e a capacidade de escalabilidade da tecnologia em cenários de alta densidade de usuários e demanda por conectividade robusta.

Já o 5G, embora possua alcance inferior às tecnologias LPWAN em ambientes abertos, destaca-se por sua capacidade de suportar uma grande densidade de dispositivos e aplicações de alta performance, como realidade aumentada, veículos autônomos e controle remoto de máquinas. Exemplo disso é o Porto de Valência, na Espanha, que implantou sua própria rede privada 5G, conectando mais de 25 mil dispositivos industriais (Cadenaser, 2024). No Brasil, a Brasil Terminal Portuário, no Porto de Santos, foi pioneira na implementação de uma rede 5G privada em ambiente portuário, demonstrando o potencial transformador dessa tecnologia na modernização da infraestrutura logística nacional.

Neste contexto, a cobertura de conectividade sem fio deve ser analisada de forma estratégica, ponderando distância, densidade, confiabilidade e tipo de aplicação industrial. Cada tecnologia oferece vantagens específicas que devem ser avaliadas com base nos objetivos de negócio e nos desafios operacionais do projeto. A tabela 6 demonstra um resumo consolidado e comparativo dos artigos e estudos abordados nesse trabalho.

**Tabela 6.** Tecnologias de curto alcance

Parâmetros	Zigbee	ISA100.11a	Wi-Fi	Bluetooth BLE
<b>Espectro</b>	Não licenciado	Não licenciado	Não licenciado	Não licenciado
<b>Padrão seguido</b>	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1
<b>Beaconing</b>	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Largura de banda por canal</b>	2 /5 MHz	5 MHz	22 MHz	1 MHz
<b>Frequência</b>	868/15 MHz e 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4/5/6 GHz	2.4 GHz
<b>Bidirecional</b>	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Imunidade a interferência</b>	Moderada	Alta	Baixa	Moderada
<b>Taxa de transferência</b>	250 kbps	250 kbps	53 Mbps -9.6 Gbps	1.4 Mbps
<b>Consumo de energia em modo sleep</b>	0,7µA	10 µA	20 µA	1 µA
<b>Custo</b>	Baixo	Alto	Moderado	Baixo
<b>Expectativa de vida da bateria</b>	10+ anos	10+ anos	-	10+ anos
<b>Topologia</b>	Estrela/Malha/Arvore	Estrela/Malha	Estrela	Estrela/Malha

<b>Modulação</b>	BPSK/OQPSK	BPSK/QPSK/QAM	BPSK/QPSK/QAM	GFSK
<b>Latência</b>	~30-	~10 - 100 ms	~ 1 - 10ms	~3 – 6ms
<b>Localização</b>	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Alcance</b>	100m	100m	100m	450m

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Devan et al. (2021), Iborra et. al. (2019), Hassan et al.( 2020)

A taxa de transmissão de dados surge como fator relevante em aplicações com grande volume de informação, como evidenciado por Kapustka (2024), que analisa soluções como Wi-Fi 6 em ambientes de alta densidade. Já o custo de implementação é analisado de forma mais estratégica, não apenas em termos financeiros, mas também quanto à integração com sistemas legados, como discutido por Oztemel e Gursev (2018). Critérios como interoperabilidade e escalabilidade refletem preocupações com a adoção de tecnologias que possam se integrar a ambientes industriais heterogêneos e crescer conforme a expansão das operações. Essas questões são abordadas por Caruso (2017), ISA100 (2022) reforçando a importância da flexibilidade técnica na adoção de soluções sem fio.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo identificar e analisar as principais tecnologias sem fio aplicadas à Indústria 4.0, por meio de uma revisão sistemática da literatura publicada entre 2014 e 2025. Com base nos artigos selecionados, foi possível mapear os avanços tecnológicos, as aplicações práticas e os desafios associados à conectividade industrial no contexto da Quarta Revolução Industrial.

Os resultados revelaram que tecnologias como LoRaWAN, Sigfox, Bluetooth, NB-IoT, LTE-M, Zigbee, Wi-Fi , 5G e ISA100.11a têm ocupado um espaço central nas discussões acadêmicas e industriais, cada uma com suas particularidades em termos de eficiência energética, cobertura, latência, custos de implantação e interoperabilidade. O destaque para protocolos LPWAN reflete uma tendência de priorização de soluções de longo alcance, baixo consumo e fácil escalabilidade, especialmente em aplicações de monitoramento remoto e automação distribuída.

Observou-se ainda que os critérios de eficiência energética e alcance de cobertura são os mais recorrentes nos estudos analisados, indicando que a sustentabilidade e a abrangência territorial continuam sendo determinantes na escolha das soluções de conectividade industrial. A latência, tem ganhado importância em cenários que demandam decisões em tempo real, como processos críticos e controle autônomo de máquinas.

No entanto, a análise também evidenciou lacunas na literatura quanto a aspectos como segurança cibernética, interoperabilidade entre plataformas legadas e novas tecnologias, além de custos ocultos de manutenção e atualização. Esses fatores exigem maior aprofundamento técnico, dada sua relevância para a estabilidade e continuidade operacional das fábricas inteligentes.

Diante disso, conclui-se que não existe uma única solução tecnológica que atenda a todas as demandas da Indústria 4.0. A adoção das tecnologias sem fio deve considerar os objetivos específicos de cada projeto, as características do ambiente industrial e os recursos disponíveis para investimento e manutenção. Nesse sentido, este trabalho contribui ao oferecer um panorama consolidado sobre as opções tecnológicas existentes, apoiando decisões mais estratégicas e fundamentadas para a transformação digital no setor produtivo.

Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de estudos de caso aplicados em diferentes setores industriais, bem como investigações que aprofundem a viabilidade econômica e os impactos sociais da implementação de redes sem fio em larga

escala. Além disso, o avanço das redes 5G e o desenvolvimento das arquiteturas da Indústria 5.0 merecem atenção especial, dada sua capacidade de integrar inteligência artificial, interação humano-máquina e conectividade ubíqua no ambiente fabril.

## REFERÊNCIAS

- ARTETXE, E. *et al.* Wireless Technologies for Industry 4.0 Applications. *Energies*, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 1349, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16031349>.
- AYOUB, Wael *et al.* Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility. *IEEE Communications Surveys & Tutorial*, 2019.
- BLUETOOTH SIG, Inc. **Electronic Shelf Labels**. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/2024-market-update/>. Acesso em: 7 fev. 2024.
- CADENASER. **El Puerto de Valencia se convierte en un referente con su propia red de conexión 5G**. Disponível em: <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/12/23/el-puerto-de-valencia-se-convierte-en-un-referente-con-su-propia-red-de-conexion-5g-radio-valencia>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- CHILAMKURTHY, N. S. *et al.* Low-Power Wide-Area Networks: A Broad Overview of Its Different Aspects. *IEEE Access*, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3200086.
- CHOCHUL, M.; ŠEVČÍK, P. A Survey of Low Power Wide Area Network Technologies. *IEEE Access*, Košice, Eslovênia, 2020. DOI: 10.1109/ICETA51965.2020.9299949
- ČOLAKOVIĆ, Alem; HASKOVIĆ DŽUBUR, Adisa; KARAHODŽA, Bakir. Wireless communication technologies for the Internet of Things. *Science, Engineering and Technology*, 2021.
- CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE. **Zigbee Specification**. Zigbee Document 05-3474-23. 15 mar. 2023. Disponível em: <https://csa-iot.org/>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- DEVAN, P. A. M. *et al.* A Survey on the Application of WirelessHART for Industrial Process Monitoring and Control. *Sensors*, Basel, v. 21, n. 15, p. 4951, 2021. DOI: 10.3390/s21154951.
- ENEKO, A. *et al.* Wireless Technologies for Industry 4.0 Applications. *Energies*, v. 16, n. 3, p. 1349-1349, 2023. DOI: 10.3390/en16031349.
- ERICSSON. **Ericsson Mobility Report**. Estocolmo: Ericsson, 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- FELTRIN, L. *et al.* Narrowband IoT: A Survey on Downlink and Uplink Perspectives. *IEEE Wireless Communications*, 2019. DOI: 10.1109/MWC.2019.1800020.
- FERREIRA, P. *et al.* Multi-Protocol LoRaWAN/Wi-Fi Sensor Node Performance Assessment for Industry 4.0 Energy Monitoring. *IEEE Wireless Communications*, 2019, DOI: 10.1109/APWC.2019.8870468.
- GAMBIROZA, J. C. *et al.* Capacity in LoRaWAN Networks: Challenges and Opportunities. 2019, *IEEE*, 2019. DOI: 10.23919/SPLITECH.2019.8783184.

GANSCHAR, Oliver *et al.* **Produktionsarbeit der Zukunft: Industrie 4.0.** Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. Disponível em: <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/296457>. Acesso em: 8 junho. 2025.

HASSOUN, Abdo *et al.* From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 2024. DOI: 10.1111/1541-4337.13393.

IOT ANALYTICS. **Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion.** Disponível em: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>. Acesso em: 16 out. 2024.

ISA100 WIRELESS COMPLIANCE INSTITUTE. **ISA100 Wireless: The Complete Guide Brochure.** [S. l.]: ISA100, 2022.

KANJ, M.; SAVAUX, V.; LE GUEN, M. A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, New York, 2020. DOI: 10.1109/COMST.2020.3022751..

KANOON, O. *et al.* Prospects of Wireless Energy-Aware Sensors for Smart Factories in the Industry 4.0 Era. **Electronics**, v. 10, n. 23, p. 2929, 2021. DOI: 10.3390/electronics10232929.

KAPUSTKA, Paul. **Converged Innovation: SoFi Stadium's networks break new ground.** Disponível em: <https://stadiumtechreport.com/feature/test-lased/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

KARABEGOVIĆ, I. *et al.* How the Core Technologies of Industry 4.0 are Changing the Automotive Industry in the World, with a Focus on China. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 2022. DOI: 10.1088/1757-899X/1271/1/012017.

KHALIFEH, A. *et al.* A Survey of 5G Emerging Wireless Technologies Featuring LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT and LTE-M. **In: 2019 IEEE**, Chennai, Índia, 2019. p. 561-566.

KUNST, R. *et al.* Improving devices communication in Industry 4.0 wireless networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 2019. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.04.014.

LEI, Jiale *et al.* Fusion of heterogeneous industrial wireless networks: a survey. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 257, e110929, 2025

LEMSTRA, Mary Anny Moraes Silva; MESQUITA, Marco Aurélio de. Industry 4.0: a tertiary literature review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 186, pt. B, p. 122204, 2023. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.122204.

LIMA, Faíque Ribeiro; GOMES, Rogério. Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, v. 19, 2020.

LORA ALLIANCE. LoRa Alliance - Homepage. **LoRa Alliance**, [s.d.]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/>. Acesso em: 30 jun. 2024.

LOPEZ, J. Wireless sensor networks: A survey. **Journal of Industrial Technology**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 15–24, 2014.

- MAJID, M. et al. Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review. *Sensors*, 2022. DOI: 10.3390/s22062087.
- ISLAM, M. et al. Future Industrial Applications: Exploring LPWAN-Driven IoT Protocols. *Sensors*, v. 24, n. 8, p. 2509, 2024. DOI: 10.3390/s24082509.
- MCKINSEY & COMPANY. **The Internet of Things: The value of digitizing the physical world**. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- MEKKI, Kais *et al.* A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, Seoul, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2019. DOI: 10.1016/j.ict.2017.12.005.
- NGWENYAMA, P. L.; WEBBER-YOUNGMAN, R. C. W. Recent advances, challenges and future trends for the applications of Low Power Wide Area Networks (LPWANs) technologies in underground mines. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, London, 2025
- OSTERRIEDER, P.; BUDDE, L.; FRIEDLI, T. The smart factory as a key construct of Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 2020.
- PALATTELLA, Maria Rita et al. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525418.
- PIARDI, et al. Role of digital technologies to enhance the human integration in industrial cyber–physical systems. *Annual Review of Control*, v. 57, p. 10093, 2024.
- QU, Y. *et al.* Privacy of Things: Emerging Challenges and Opportunities in Wireless Internet of Things. *IEEE Wireless Communications*, v. 25, n. 6, p. 91-97, dez. 2018. DOI: 10.1109/MWC.2017.1800112
- RAPTIS, Theofanis P.; PASSARELLA, Andrea; CONTI, Marco. Industrial Internet of Things: A Survey on the Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Access*, New York, v. 8, p. 183655-183683, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3019665.
- RAZA, U. *et al.* Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855-894, jun./set. 2017.
- RYALAT, M.; ELMOAQET, H.; ALFAOURI, M. Design of a Smart Factory Based on Cyber-Physical Systems and Internet of Things towards Industry 4.0. *Applied Sciences*, Basel, 2023.
- SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SANTOS, D. R. G. dos; VOLANTE, C. R. Importância da tecnologia sem fio na Indústria 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 15, n. 2, p. 245-254, 30 dez. 2019. DOI: 10.31510/infa.v16i2.605.

SEMTECH. **LoRa® and LoRaWAN®**. AN1200.86, versão 1.0, março 2024. Disponível em: <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>.

SHAH, A. F. M. S. *et al.* Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems. **IEEE Access**, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104509.

SIGFOX. **What is Sigfox?**. Disponível em: <https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>. Acesso em: 26 set. 2024.

SILVA, Jorge Sá; SILVA, Ricardo Mendão; BOAVIDA, Fernando. **Redes e sensores sem fios**. 1. ed. Lisboa: FCA, 2016.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. Indústria 4.0: O que é, e como ela vai impactar o mundo. **CITI Systems**, 2016. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>. Acesso em: 9 maio. 2024.

SOLYMAN, Ahmed; YAHYA, Khalid. Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, 2022. DOI: 10.11591/ijece.v12i4.pp3943-3950.

TRAMARIN, F.; MOK, A. K.; HAN, S. Real-Time and Reliable Industrial Control Over Wireless LANs: Algorithms, Protocols, and Future Directions. **Proceedings of the IEEE**, v. 107, n. 6, p. 1027–1052, jun. 2019. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2913450.

Tran, N.-H.; Park, H.-S.; Nguyen, Q.-V.; Hoang, T.-D. Development of a Smart Cyber-Physical Manufacturing System in the Industry 4.0 Context. **Appl. Sci.** 2019, 9, 3325

WANG, Q.; JIANG, J. Comparative Examination on Architecture and Protocol of Industrial Wireless Sensor Network Standards. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 18, n. 3, p. 2197–2219, 2016.

WND BRASIL. **Operador Sigfox para Brasil**. WND Group, [s.d.]. Disponível em: <https://www.wndgroup.io/brasil/>. Acesso em: 14 jan. 2025.

ZEADALLY, S.; SIDDIQUI, F.; BAIG, Z. 25 Years of Bluetooth Technology. **Future Internet**, v. 11, n. 9, p. 194, 2019. DOI: 10.3390/fi11090194.

ZEB, S. *et al.* The role of Industry 4.0 technologies in overcoming challenges during the COVID-19 pandemic. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 163, p. 120434, 2020.

ZHOU, K.; LIU, Taigang; ZHOU, Lifeng. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. Zhangjiajie. **IEEE Access**, 2015. DOI: 10.1109/FSKD.2015.7382284.

ZOU, X. *et al.* Visualization and analysis of mapping knowledge domain of road safety studies. **Accident Analysis and Prevention**, 2018. DOI: 10.1016/j.aap.2018.06.010.