

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL
CURSO DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

DOUGLAS DE SOUZA FRANCISCO

REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF) NA INDUSTRIA 4.0

DOUGLAS DE SOUZA FRANCISCO

REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF) NA INDUSTRIA 4.0

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial – IFAM/CMDI.

Orientador(a): Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

MANAUS-AM

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F819r	<p>Francisco, Douglas de Souza. Redes de sensores sem fio (RSSF) na Indústria 4.0 / Douglas de Souza Francisco. — Manaus, 2024. 62f.: il. color.</p> <p>Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, <i>Campus</i> Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, 2024. Orientador: Prof.^o Celso Souza Cordeiro, Esp.</p> <p>1. Redes de sensores sem fio. 2. RSSF. 3. Indústria 4.0. I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.</p>
	CDD 621.382

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734)

DOUGLAS DE SOUZA FRANCISCO

REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF) NA INDUSTRIA 4.0

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial – IFAM/CMDI.

Orientador(a): Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

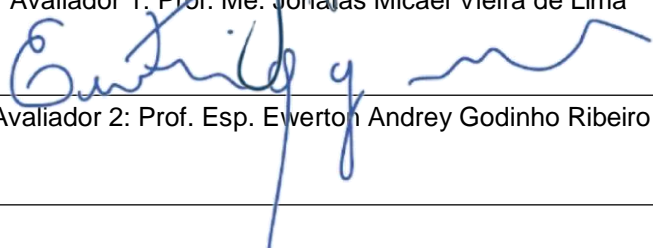
Coordenador (a): Prof. Me. Carlos Gomes Fontinelle

Aprovado em 11 de dezembro de 2024

BANCA EXAMINADORA


Orientador e Presidente: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

Avaliador 1: Prof. Me. Jonas Micael Vieira de Lima


Avaliador 2: Prof. Esp. Everton Andrey Godinho Ribeiro

MANAUS-AM

2024

DEDICATÓRIA

Dedico com sublime carinho à minha esposa, Glaucia Souza que jamais duvidou que eu conseguiria e minha filha Maria Eduarda, pois sem a ajuda delas isso não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e minha família, por todo apoio e ajuda. Aos amigos que sempre me deram apoio nas maiores dificuldades e não me deixaram desistir, sempre me ajudando manter o foco e a olhar para frente.

EPÍGRAFE

*“A informática e as
telecomunicações serão para o
século XXI o que as rodovias
foram para o século XX.”*

RESUMO

Redes de Sensores Sem Fio ou (RSSF) têm uma grande importância na Indústria 4.0, a quarta revolução industrial que envolve a digitalização e automação dos processos produtivos. As RSSF são sistemas compostos por sensores sem fio que são distribuídos em grande escala dentro de um ambiente, como uma fábrica, e se comunicam entre si para coletar e transmitir informações em tempo real.

As RSSF permitem a obtenção de dados sobre diversos aspectos das operações industriais, como temperatura, umidade, pressão, vibração, entre outros. Esses dados são essenciais para monitorar o desempenho dos equipamentos, identificar possíveis falhas, otimizar a utilização dos recursos e realizar manutenções preditivas. Por tanto, as RSSF facilitam a implementação de sistemas de controle inteligentes, nos quais os sensores coletam os dados e os enviam para sistemas de processamento e análise. Isso permite a tomada de decisões mais rápidas e precisas, aumentando a eficiência e a produtividade industrial.

No contexto da Indústria 4.0, as RSSF também têm sido utilizadas em aplicações como logística inteligente, monitoramento da cadeia de suprimentos, controle de qualidade, rastreamento de produtos, entre vários outros. Essas redes contribuem para a criação de ambientes de produção mais flexíveis, adaptáveis e conectados, impulsionando a transformação digital nas indústrias. No entanto, a implementação das RSSF na Indústria 4.0 também apresenta grandes desafios, como a segurança dos dados, a interação entre os diferentes dispositivos e a otimização do consumo de energia. Apesar disso, as RSSF têm sido cada vez mais adotadas pelas indústrias em busca de melhorias nos processos produtivos e competitividade no mercado.

Palavras-chave: RSSF, Indústria 4.0, redes de sensores sem fio.

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks or (WSN) are of great importance in Industry 4.0, the fourth industrial revolution that involves digitalization and automation of production processes. WSN are systems composed of wireless sensors that are distributed on a large scale within an environment, such as a factory, and communicate with each other to collect and transmit information in real time.

The WSN allow obtaining data on various aspects of industrial operations, such as temperature, humidity, pressure, vibration, among others. This data is essential for monitoring equipment performance, identifying possible failures, optimizing the use of resources and carrying out predictive maintenance. Therefore, WSN facilitate the implementation of intelligent control systems, in which sensors collect data and send them to processing and analysis systems. This allows for faster and more accurate decision-making, increasing efficiency and industrial productivity. In the context of Industry 4.0, WSN have also been used in applications such as intelligent logistics, supply chain monitoring, quality control, product tracking, among many others. These networks contribute to the creation of more flexible, adaptable and connected production environments, driving digital transformation in industries. However, the implementation of WSN in Industry 4.0 also presents major challenges, such as data security, the interaction between different devices and the optimization of energy consumption. Despite this, WSN have been increasingly adopted by industries in search of improvements in production processes and competitiveness in the market.

Keywords: WSN, Industry 4.0, wireless sensor networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Modelo de comunicação OSI dividido em camadas	20
Figura 2.	Estrutura simples de um nó dividida em partes: transceptor de rádio, memória, processador, bateria e sensor.	21
Figura 3.	Principais topologias de rede sem fio e principais componentes de uma rede de sensores sem fio.	23
Figura 4.	Principais aplicações de redes sem fio na indústria e os principais domínios responsáveis pelas tecnologias em atuação.	31
Figura 5.	Ciclo de implantação de uma rede de sensores sem fio dividido em etapas.	36
Figura 6.	Exemplo de organização de uma rede WirelessHART com dispositivos de campo, dispositivos portáteis, pontos de acesso, gateway, e gerentes de rede e segurança.	42
Figura 7.	Organização de uma rede ISA100.11a composta por dispositivos I/O, dispositivos portáteis, roteadores, roteadores backbone e gateway com gerentes de sistema e segurança.	43
Figura 8.	Figura 8. Organização de uma rede celular 4G LTE dividida em equipamento do usuário EU, E-UTRAN, EPC e Internet.	46
Figura 9.	Organização da estrutura NSA, onde a infraestrutura da tecnologia 4G E-UTRAN e EPC é aproveitada pelo 5G para uso em frequências de até 6 GHz.	47
Figura 10.	Organização da arquitetura Stand Alone. Estrutura independente com infraestrutura NG-RAN e 5G Core e atua com frequências superiores a 24 GHz.	48
Figura 11.	Organização das 3 principais áreas de atuação da tecnologia 5G.	48
Figura 12.	Diferentes cenários da tecnologia 5G: eMBB, mMTC e URLLC.	50
Figura 13.	Organização da rede LoRaWAN composta por dispositivos finais LoRa, gateway, internet e servidores de aplicação.	51
Figura 14.	Esquema de funcionamento do LiFi dividido em transmissor, canal e receptor.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificações das tecnologias IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1.	55
Tabela 2	Especificações das tecnologias de instrumentação.	56
Tabela 3	Tecnologias de longa distância.	58
Tabela 4	Comparativo entre aplicações Flow Based, Job Based e Remoto.	60
Tabela 5	Comparativo entre aplicações Segurança de Pessoal, Backhaul e Segurança.	61
Tabela 6	Comparativo entre aplicações rastreamento e manutenção.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSSF	Redes de sensores sem fio
OSI	Open systems interconnection
MAC	Medium access control
HTTP	Hypertext transfer protocol
FTP	File transfer protocol
SMTP	Simple mail transfer protocol
ISO	International organization for standardization
IOT	Internet of things
IA	Inteligência artificial
AR	Augmented reality
WI-FI	Wireless fidelity
NFC	Near field communication
RFID	Radio frequency identification
WIMAX	Worldwide interoperability for microwave access
LI-FI	Light fidelity
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
HART	Highway Addressable Remote Transducer
BLE	Bluetooth Baixa Energia (Bluetooth Low Energy)
OFDM	Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência
MIMO	Entrada Múltipla Saída Múltipla
EU	Equipamento do Usuário (User equipment)
RAN	Rede de Acesso via Rádio (Radio access network)
E-UTRAN	Rede de Acesso Terrestre Universal Evoluída
eNodeB	eNodeB Evolved Node B

IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
UDP	User Datagram Protocol
NR	New Radio
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ITU	International telecommunications union
NSA	Non-stand alone
AN	Access network
CN	Core network
AS	Stand alone
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
mMTC	massive machine type communication
URLLC	Ultra-reliable and low latency communication
LoRa	Long Range
LoS	Linha de Visão (Line of Sight)
ADR	Taxa de dados adaptativa (Adaptive Data Rate)
NIR	Near-Infrared
WLAN	Wireless Local Area Network
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
TDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivo específico	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Modelo OSI	18
2.2	Estrutura de rede de sensores sem fio	20
2.3	Topologias de rede	21
3	INDÚSTRIA 4.0	22
3.1	Indústria 4.0 no Brasil	24
4	TECNOLOGIAS PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO	25
4.1	Fundamentos da tecnologia sem fio voltado para indústria	25
4.1.1	Tecnologias sem fio	26
4.2	Princípios da tecnologia sem fio	27
4.2.1	Comunicação por rádio frequência	27
4.3	Principais problemas das redes de sensores sem fios industriais	28
4.3.1	Aplicações de uma rede de Sensores sem fio	30
4.3.1.1	Instrumentação	30
4.3.1.2	Segurança de pessoal	31
4.3.1.3	Conectividade Backhaul	31
4.3.1.4	Tecnologias de Backhaul	31
4.3.1.5	Rastreamento	32
4.3.1.6	Segurança e vigilância	33
4.3.1.7	Ativos com localização remota	33
4.3.1.8	Suporte e Manutenção	33
4.4	Critérios de avaliação	34
4.5	Ciclo de implantação de rede de sensores sem fio	34
5	PADRÕES ATUAIS E PRODUTOS	35
5.1	Wireless-Fidelity – WiFi	35

5.1.1	Principais características de funcionamento do Wi-Fi	36
5.1.2	Aplicações do WI-FI	36
5.2	Bluetooth Low Energy (BLE)	37
5.2.1	Aplicações do bluetooth low energy	38
5.3	Instrumentação	38
5.3.1	ZigBee	39
5.3.1.1	Aplicações	40
5.3.2	WirelessHART	40
5.3.2.1	Aplicações	41
5.3.3	ISA 100.11a	42
5.3.3.1	Aplicações	43
5.4	Longas distâncias	44
5.4.1	Tecnologia LTE 4G	44
5.4.1.1	Princípios e conceitos da tecnologia 4G	44
5.4.1.2	Aplicações	45
5.4.2	Tecnologia 5G	46
5.4.2.1	Cenários e aplicações	47
5.4.3	LoRa	49
5.4.3.1	Princípio de funcionamento	50
5.5	Light Fidelity LiFi	51
6.	COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS	53
6.1	Tecnologias IEEE 802.11	53
6.2	Tecnologias de instrumentação	54
6.3	Tecnologia de longa distância	56
6.4	Tecnologia LiFi	57
6.5	Matriz comparativa das tecnologias	58
7	CONCLUSÃO	62
8	REFERENCIA	63

1 INTRODUÇÃO

A Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) tem se mostrado uma tecnologia que cada vez mais vai revolucionar a Indústria 4.0. Com diversos dispositivos inteligentes e interconectados, as empresas vêm buscando soluções tecnológicas para otimizar seus processos produtivos e tornar suas operações mais eficientes.

A RSSF consiste em um conjunto de dispositivos sensores sem fio que são implantados em um ambiente industrial, coletando dados em tempo real de diferentes variáveis, exemplo: temperatura, umidade, pressão, vibração, entre outras. Esses dados são transmitidos pelos sensores sem fio para uma unidade de processamento central, onde são analisados e utilizados para tomar decisões rápidas e assertivas.

Nesse contexto, a RSSF tem sido amplamente utilizada na Indústria 4.0 para monitorar a produção em tempo real, identificar falhas e anomalias, prever problemas, melhorar a manutenção preventiva, melhorar a eficiência energética, entre outras aplicações. Com uma ampla capacidade de coletar dados em larga escala e em tempo real, a RSSF permite às empresas tomarem decisões com base em dados concretos, aumentando sua competitividade e reduzindo custos operacionais.

No entanto, a RSSF proporciona grande flexibilidade e escalabilidade na implantação de soluções industriais, uma vez que dispensa a necessidade de cabos para a transmissão de dados, facilitando a instalação e permitindo uma rápida expansão em qualquer ambiente industrial.

Portanto, a RSSF desempenha um papel fundamental na Indústria 4.0, possibilitando a criação de ambientes de produção inteligentes e interconectados, onde os dispositivos de sensores sem fio trabalham em conjunto para coletar e transmitir dados em tempo real, impulsionando a eficiência operacional e promovendo a transformação digital das indústrias.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é fazer um estudo das redes de sensores sem fio (RSSF) na indústria 4.0 fazer coleta de dados em tempo real e automatizada, para melhorar a eficiência, produtividade e qualidade dos processos industriais e uma visão detalhada e de todo o processo produtivo, identificar falhas e problemas.

1.1.2 Objetivo específico

Fazer o estudo de tecnologias voltados para Redes de sensores sem fio (RSSF) na indústria 4.0 com vista da necessidade da indústria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentado brevemente a fundamentação teórica para melhor compreender as tecnologias apresentadas neste trabalho.

2.1 Modelo OSI

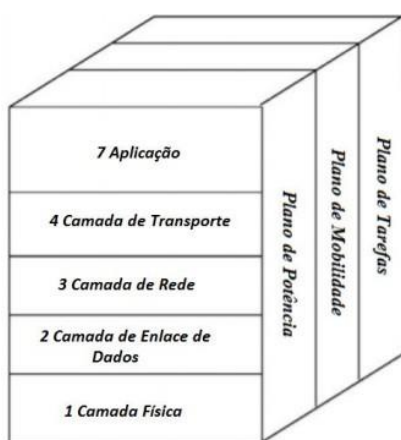
O modelo OSI (Open Systems Interconnection) foi criado tendo o objetivo de ser um modelo padrão para protocolos de comunicação entre diferentes tipos de sistemas. Dessa maneira, muitos fabricantes conseguem definir diretivas genéricas para a elaboração de redes de computadores independente da tecnologia utilizada. Este modelo exige o cumprimento de etapas para atingir a compatibilidade, portabilidade, interoperabilidade e escalabilidade de comunicações entre dispositivos. Foi desenvolvido pela Organização Internacional de Padronização (ISO) em 1984 e consiste em sete camadas diferentes. As sete camadas do modelo OSI são as seguintes:

- Camada física: Esta camada é responsável pela transmissão de bits através de meios físicos como cabos de cobre, fibra óptica ou ondas de rádio. Define as características elétricas, mecânicas e funcionais dos meios de transmissão.
- Camada de Enlace de Dados: Esta camada é responsável pela transmissão confiável de dados através de um enlace físico. É responsável por dividir os dados em frames e adicionar informações de controle para detectar e corrigir erros.
- Camada de Rede: Esta camada é responsável por rotear pacotes de dados através de uma rede de computadores. É responsável por determinar a melhor rota para enviar dados e tratar o endereçamento lógico.
- Camada de Transporte: Esta camada é responsável pela transferência de dados entre dois hosts. Ele divide os dados em segmentos e garante que cheguem ao destino corretamente e na ordem correta.
- Camada de Sessão: Esta camada estabelece, mantém e finaliza sessões de comunicação entre duas aplicações. É responsável pela sincronização e controle do diálogo entre aplicações.
- Camada de Apresentação: Esta camada é responsável pela representação e formatação dos dados. É responsável por compactar, criptografar e converter dados para que sejam compreensíveis pelas aplicações.

- Camada de Aplicação: Esta camada fornece serviços de rede para aplicativos de software. Inclui protocolos como HTTP, FTP, SMTP, entre outros.

O modelo OSI fornece uma estrutura lógica para comunicação entre aplicativos de software em uma rede. Cada camada possui funções específicas e se comunica com as camadas adjacentes por meio de interfaces bem definidas. Isto permite a interoperabilidade entre diferentes sistemas e facilita o desenvolvimento de novas aplicações e serviços de rede.

Figura 1. Modelo de comunicação OSI dividido em camadas responsáveis por cada parte da comunicação entre diferentes dispositivos.



Fonte: adaptado de [3].

Essas camadas do modelo OSI servem para deixar mais fácil o entendimento de um serviço de comunicação. Em uma rede sem fio, as camadas 1, camada física e 2, camada de enlace de dados, incluem todo o enquadramento, acesso ao meio, codificação de correção de erros, modulação, transmissão de um sinal e controle de acesso ao meio (MAC). A camada de rede, camada 3, é responsável pelo endereçamento lógico, roteamento e controle de tráfego. A camada 4, camada de transporte, é a camada responsável pela transferência de dados entre duas máquinas, independente da aplicação usada e do tipo, topologia ou configuração das redes físicas existentes entre elas.

As camadas 5 e 6 nem em todo momento são necessárias e podem ser combinadas com a camada mais alta, a camada 7. A camada de aplicações, serve como interface para as funções do sistema que usam o serviço de comunicação sem fio.

2.2 Estrutura de rede de sensores sem fio

A estrutura de uma rede de sensores sem fio é composta por três principais elementos: os sensores, os nós de rede e o nó coordenador.

Sensores: são dispositivos eletrônicos responsáveis por coletar dados do ambiente em que estão implantados. Podem ser sensores de temperatura, umidade, luminosidade, movimento, entre outros. Eles são responsáveis por capturar as informações e transmiti-las para os nós de rede.

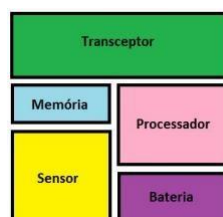
Nós de rede: são dispositivos que possuem capacidade de comunicação sem fio e são responsáveis por receber os dados dos sensores e transmiti-los para o nó coordenador. Esses nós podem ser dispositivos móveis, como smartphones, ou dispositivos fixos, como roteadores ou gateways. Eles são responsáveis por encaminhar os dados pela rede, garantindo a sua integridade e confiabilidade.

Nó coordenador: é o elemento central da rede de sensores sem fio. Ele é responsável por receber os dados dos nós de rede e processá-los. Pode ser um servidor ou um computador que realiza a análise dos dados coletados pelos sensores. O nó coordenador também pode ser responsável por enviar comandos de controle para os nós de rede, como por exemplo, ativar ou desativar os sensores.

Além desses elementos, a estrutura de uma rede de sensores sem fio também pode incluir outros componentes, como baterias ou fontes de energia para alimentar os sensores e nós de rede, e algoritmos de roteamento que definem a melhor forma de encaminhar os dados pela rede.

A comunicação entre os elementos da rede de sensores sem fio pode ser realizada por meio de diferentes tecnologias sem fio, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, entre outras. A escolha da tecnologia depende das características da aplicação e dos requisitos de comunicação, como alcance, consumo de energia e taxa de transferência de dados.

Figura 2. Estrutura simples de um nó dividida em partes: transceptor de rádio, memória, processador, bateria e sensor.



Fonte: adaptado de [45].

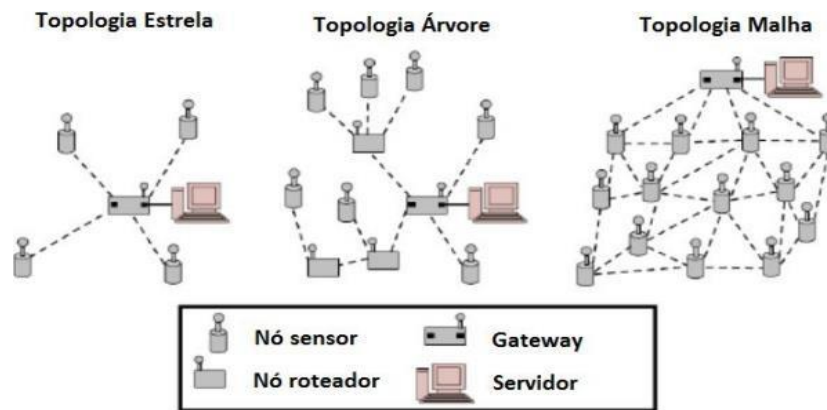
2.3 Topologias de rede

As topologias de rede são as diferentes formas de organização dos dispositivos em uma rede de computadores. Existem várias topologias de rede, sendo as principais:

- Topologia em barramento: Nesta topologia, todos os dispositivos são conectados a um único cabo, chamado de barramento. Os dados são transmitidos em ambos os sentidos pelo cabo, e todos os dispositivos recebem os dados. No entanto, apenas um dispositivo pode transmitir dados de cada vez.
- Topologia em anel: Nesta topologia, os dispositivos são conectados em forma de anel, onde cada dispositivo está conectado ao dispositivo vizinho. Os dados são transmitidos em um único sentido ao longo do anel, passando por cada dispositivo até chegar ao destino.
- Topologia em estrela: Nesta topologia, todos os dispositivos são conectados a um dispositivo central, chamado de hub ou switch. Todos os dados passam pelo hub ou switch, que os encaminha para o dispositivo correto. Se um dispositivo falhar, os outros dispositivos ainda podem se comunicar.
- Topologia em árvore: Nesta topologia, os dispositivos são organizados em uma estrutura hierárquica de árvore. Um dispositivo central, como um switch, se conecta aos dispositivos de nível inferior, que, por sua vez, podem se conectar a outros dispositivos de nível inferior.
- Topologia em malha: Nesta topologia, todos os dispositivos são conectados entre si, formando uma rede completa. Cada dispositivo tem uma conexão direta com todos os outros dispositivos, permitindo várias rotas para a transmissão de dados. Isso torna a rede altamente redundante e confiável.

Essas são apenas algumas das topologias de rede mais comuns. Cada topologia tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha da topologia adequada depende das necessidades e requisitos específicos da rede.

Figura 3. Principais tipos de topologias de rede sem fio e principais componentes de uma rede de sensores sem fio



Fonte: adaptado de [44].

3 INDÚSTRIA 4.0

A indústria 4.0 é um termo que se refere à quarta revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas no processo de produção industrial. Essa revolução busca criar fábricas inteligentes, nas quais máquinas, sistemas e pessoas estão interligadas e podem se comunicar entre si.

Algumas dessas principais tecnologias que impulsionam a indústria 4.0 incluem a Internet das Coisas (IoT), a inteligência artificial (IA), a robótica avançada, a computação em nuvem, a realidade aumentada (AR) e a impressão 3D. Essas tecnologias permitem que as empresas otimizem a produção, reduzam custos, aumentem a eficiência e melhorem a qualidade dos produtos.

Algumas das características da indústria 4.0 incluem:

- Interconexão: as máquinas e sistemas estão conectados entre si e podem compartilhar informações em tempo real.
- Virtualização: os sistemas físicos são representados digitalmente, permitindo a simulação e otimização de processos.
- Descentralização: as decisões são tomadas de forma autônoma pelos sistemas, com menor necessidade de intervenção humana.
- Orientação a serviços: os sistemas são projetados para serem modulares e reutilizáveis, permitindo a fácil integração de novas tecnologias.

- Capacidade de resposta em tempo real: os sistemas podem responder rapidamente a mudanças e demandas do mercado.

Benefícios da indústria 4.0:

- Aumento da eficiência e produtividade: a automação dos processos e a análise de dados em tempo real permitem otimizar a produção, reduzir custos e aumentar a eficiência.
- Melhoria da qualidade e redução de erros: a digitalização dos processos e a utilização de tecnologias avançadas permitem um maior controle e monitoramento da produção, reduzindo erros e melhorando a qualidade dos produtos.
- Maior flexibilidade e agilidade: a modularidade dos sistemas permite uma maior flexibilidade na produção, facilitando a adaptação a mudanças nas demandas do mercado.
- Personalização em massa: a orientação a serviços permite a produção de produtos personalizados em larga escala, atendendo às demandas específicas dos clientes.
- Melhoria da segurança e redução de riscos: a utilização de tecnologias avançadas, como robôs e sensores, permite reduzir a exposição dos trabalhadores a ambientes de trabalho perigosos e minimizar os riscos de acidentes.

Desafios da Indústria 4.0:

- Investimento em tecnologia: a implementação da Indústria 4.0 requer investimentos significativos em tecnologia e infraestrutura, o que pode ser um desafio para muitas empresas.
- Capacitação dos trabalhadores: a adoção da Indústria 4.0 requer trabalhadores qualificados, capazes de lidar com as novas tecnologias e processos.
- Segurança de dados: a interconectividade dos sistemas aumenta os riscos de ataques cibernéticos e vazamento de dados, sendo necessário investir em medidas de segurança adequadas.
- Mudança cultural: a implementação da Indústria 4.0 requer uma mudança cultural nas empresas, com uma maior abertura para a inovação e a adoção de novas formas de trabalho.

A Indústria 4.0 está transformando a forma como a produção industrial é realizada, trazendo benefícios em termos de eficiência, qualidade, flexibilidade, personalização e tem um impacto significativo em diferentes setores, como manufatura, logística, saúde, energia, transporte e agricultura. No entanto, sua implementação requer planejamento e investimentos adequados, além de uma adaptação por parte das empresas e dos trabalhadores como requalificação da mão de obra e a preocupação com a segurança cibernética.

3.1 Indústria 4.0 no Brasil

Em 2017 foi fundado o grupo da Indústria 4.0 no Brasil, foi instituído pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços MDIC, que é um grupo contendo mais de 50 instituições com o objetivo de debater sobre as perspectivas e realização de ações da indústria 4.0 no Brasil. [2]

Segundo [3] com a implantação da indústria 4.0 no Brasil, a redução de custos poderia chegar a R\$73 bilhões por ano. Essa quantia seria economizada com redução dos custos de reparação, ganhos de eficiência produtiva e diminuição com gastos de energia.

A Indústria 4.0, está transformando a indústria brasileira, trazendo inovações tecnológicas e mudanças significativas na forma como as empresas produzem, operam e se relacionam com os clientes. Aqui estão alguns aspectos importantes sobre a Indústria 4.0 no Brasil:

- **Cenário Atual:** A Indústria 4.0 no Brasil está em constante crescimento e evolução. Muitas empresas de diferentes setores estão adotando tecnologias avançadas para melhorar a eficiência e a competitividade.
- **Setores-Chave:** O Brasil tem implementado a Indústria 4.0 em diversos setores, incluindo manufatura, agricultura, saúde, energia e logística. Cada um deles aproveita as tecnologias de forma específica para suas necessidades.
- **IoT e Sensores:** A Internet das Coisas (IoT) desempenha um papel fundamental na Indústria 4.0 brasileira. Sensores e dispositivos conectados são usados para coletar dados em tempo real, permitindo uma tomada de decisões mais informada.
- **Manufatura Inteligente:** A manufatura inteligente é uma das aplicações mais comuns da Indústria 4.0 no Brasil. As fábricas estão se tornando mais automatizadas e eficientes, com o uso de robótica avançada, análise de dados e impressão 3D.

- **Agricultura de Precisão:** A agricultura no Brasil se beneficia da Indústria 4.0 por meio da agricultura de precisão, que envolve o uso de drones, sensores, e análise de dados para otimizar o cultivo, reduzir o desperdício e melhorar a produtividade.
- **Inovação em Energia:** A indústria de energia está adotando tecnologias avançadas para otimizar a distribuição de energia, tornar a rede mais eficiente e implementar fontes de energia limpa.
- **Logística e Cadeia de Suprimentos:** A logística no Brasil está sendo transformada com o uso de tecnologias da Indústria 4.0. Rastreamento em tempo real, sistemas de roteirização e gerenciamento de estoque estão se tornando mais sofisticados.
- **Educação e Pesquisa:** Universidades e instituições de pesquisa no Brasil desempenham um papel importante na formação de profissionais qualificados e na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas à Indústria 4.0.
- **Políticas Públicas:** O governo brasileiro tem buscado criar políticas de incentivo à adoção da Indústria 4.0, com o objetivo de melhorar a competitividade da indústria nacional.
- **Desafios:** O Brasil enfrenta desafios, como a infraestrutura de conectividade em algumas áreas rurais, a necessidade de desenvolver mão de obra especializada em tecnologias da Indústria 4.0 e a segurança cibernética.

Em resumo, a Indústria 4.0 está ganhando espaço no Brasil, com empresas e setores diversos adotando tecnologias avançadas para melhorar a eficiência e a competitividade. A continuidade desse processo dependerá da superação de desafios e do apoio contínuo de políticas públicas e investimentos em inovação e educação.

4 TECNOLOGIAS PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO

4.1 Fundamentos da tecnologia sem fio voltado para indústria

Neste tópico será abordado alguns dos principais fundamentos que envolvem redes de sensores sem fio (RSSF) em um ambiente industrial com diferentes tipos de redes sem fio e desafios diversos.

4.1.1 Tecnologias sem fio

Neste tópico apresentaremos algumas das tecnologias sem fio que desempenham um papel fundamental em nossa vida cotidiana e em diversos setores da indústria. Aqui estão algumas das principais tecnologias sem fio:

- **Wi-Fi (Rede Local Sem Fio):** O Wi-Fi é amplamente utilizado para conectar dispositivos à internet e a redes locais sem a necessidade de cabos. Ele é onipresente em residências, empresas, escolas e locais públicos.
- **Bluetooth:** Bluetooth é uma tecnologia de comunicação de curto alcance usada para conectar dispositivos, como fones de ouvido sem fio, alto-falantes, teclados e mouses a smartphones, tablets e computadores.
- **Celulares e Redes Móveis:** Redes móveis, como 3G, 4G e 5G, permitem a comunicação sem fio em larga escala, tornando possível a comunicação de voz, mensagens de texto e acesso à internet por meio de smartphones e outros dispositivos móveis.
- **NFC (Near Field Communication):** NFC é usado para transferir dados de curta distância, geralmente em aplicações de pagamento móvel, compartilhamento de informações e conexões instantâneas entre dispositivos.
- **RFID (Identificação por Radiofrequência):** RFID é usado para rastrear e identificar objetos usando sinais de rádio. É usado em logística, controle de estoque e passaportes, entre outros.
- **Redes Mesh Sem Fio:** Essas redes permitem que dispositivos se comuniquem diretamente entre si, criando uma rede auto organizada. São usadas em casas inteligentes, cidades inteligentes e aplicações de IoT.
- **Redes de Sensores Sem Fio (RSSF):** Redes de sensores sem fio são usadas em aplicações de monitoramento ambiental, saúde, agricultura e indústria para coletar dados de sensores distribuídos.
- **WiMAX:** É uma tecnologia de banda larga sem fio que oferece conectividade de longo alcance em áreas urbanas e rurais.
- **Tecnologias sem fio emergentes:** Novas tecnologias, como Li-Fi (comunicação por luz visível), comunicação quântica e redes 6G, estão em desenvolvimento e prometem revolucionar ainda mais as comunicações sem fio.

Essas tecnologias sem fio desempenham um papel crítico na conectividade moderna, tornando possível a mobilidade, a comunicação em larga escala e a automação em diversos setores. Elas continuam a evoluir e desempenharão um papel cada vez mais importante à medida que a tecnologia avança.

4.2 Princípios da tecnologia sem fio

Nesta subseção serão apresentados alguns fundamentos e aspectos técnicos das tecnologias sem fio.

4.2.1 Comunicação por rádio frequência

A comunicação por radiofrequência (RF) é uma forma de comunicação sem fio que utiliza ondas eletromagnéticas de rádio para transmitir informações. É uma tecnologia amplamente utilizada em diversas aplicações e setores. Aqui estão algumas informações importantes sobre a comunicação por radiofrequência:

- **Princípio de Funcionamento:** A comunicação por radiofrequência é baseada na modulação de uma portadora de rádio em uma determinada frequência. A informação é codificada nas variações da amplitude, frequência ou fase do sinal de rádio.
- **Faixa de Frequência:** A RF abrange uma ampla faixa de frequências, desde ondas de rádio de baixa frequência até micro-ondas de alta frequência. Cada faixa de frequência tem aplicações específicas. Por exemplo, as frequências mais baixas são usadas em rádio AM e FM, enquanto as frequências mais altas são usadas em comunicações móveis e Wi-Fi.

Aplicações Comuns:

1. Radiodifusão: Rádio AM e FM, transmissões de TV.
2. Telecomunicações Móveis: Redes de celular (2G, 3G, 4G, 5G).
3. Comunicações de Satélite: Comunicações via satélite, como GPS.
4. Comunicações por Micro-ondas: Redes de longa distância.
5. RFID (Identificação por Radiofrequência): Rastreamento e identificação de produtos e ativos.
6. Wi-Fi: Conexão à internet sem fio em locais.

7. Controle Remoto: Controle de dispositivos eletrônicos sem fio.
8. Comunicações de Emergência: Rádio de comunicações para serviços de emergência.
9. Indústria Automobilística: Comunicação entre veículos (V2V) e com infraestrutura (V2I).
10. Indústria de Aviação: Comunicações entre aeronaves e torres de controle.
11. Segurança: A segurança é uma preocupação na comunicação por radiofrequência. A criptografia é frequentemente usada para proteger as informações transmitidas, especialmente em comunicações sensíveis.
12. Interferência: A interferência eletromagnética é um desafio comum na comunicação por RF, especialmente em ambientes lotados de dispositivos sem fio. Protocolos e tecnologias são projetados para mitigar interferências.
13. Regulamentação: A utilização de frequências de rádio é regulamentada em muitos países. As autoridades reguladoras, como a Anatel no Brasil, a FCC nos EUA e a UIT internacionalmente, atribuem frequências específicas para diferentes serviços e aplicam regulamentações para evitar interferências e garantir o uso eficiente do espectro eletromagnético.
14. Desenvolvimentos Futuros: A comunicação por radiofrequência continua a evoluir, com tecnologias como o 5G, comunicações por satélite de baixa órbita (LEO) e Internet das Coisas (IoT) expandindo as possibilidades de conectividade sem fio.

A comunicação por radiofrequência é uma tecnologia fundamental que permite a comunicação sem fio em muitos aspectos da vida moderna. É um campo em constante evolução, com o potencial de oferecer ainda mais inovações no futuro.

4.3 Principais problemas das redes de sensores sem fios industriais

As redes de sensores sem fio industriais têm diversos benefícios, como monitoramento em tempo real, redução de custos e automação de processos. Todavia, também enfrentam uma série de desafios e problemas específicos devido ao ambiente industrial exigente em que operam. Abaixo estará citado alguns principais problemas relacionados a essas redes:

- **Confiabilidade e Disponibilidade:** As redes de sensores sem fio industriais devem ser altamente confiáveis, uma vez que são usadas para monitorar processos críticos. A interferência de sinais, falhas em dispositivos e obstruções físicas podem afetar a disponibilidade e a confiabilidade da rede.
- **Interferência Eletromagnética:** Ambientes industriais costumam ter muitos dispositivos eletrônicos que geram interferência eletromagnética, o que pode afetar a qualidade da comunicação nas redes de sensores sem fio.
- **Gerenciamento de Energia:** Os sensores sem fio são frequentemente alimentados por baterias, o que exige um gerenciamento eficiente de energia. Prolongar a vida útil das baterias é essencial, e o desenvolvimento de protocolos de economia de energia é fundamental.
- **Escalabilidade:** Em ambientes industriais, é comum a necessidade de escalabilidade das redes à medida que novos sensores são adicionados. Garantir que a rede possa crescer de forma eficiente é um desafio.
- **Segurança:** A segurança é crítica, uma vez que as redes de sensores sem fio podem ser frágeis a ataques. A exposição a riscos de cibersegurança pode ter sérias consequências em ambientes industriais.
- **Latência:** Em algumas aplicações industriais, a latência é crítica. Garantir que os dados dos sensores sejam transmitidos e recebidos em tempo real é um desafio.
- **Padrões e Interoperabilidade:** A falta de padronização pode dificultar a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes. Isso pode criar problemas de integração em ambientes industriais que utilizam uma variedade de sensores e equipamentos.
- **Manutenção:** A manutenção de sensores sem fio industriais em ambientes difíceis, como fábricas e instalações de produção, pode ser cara e desafiadora. Garantir que os sensores estejam funcionando corretamente é essencial.
- **Custo:** A implementação de redes de sensores sem fio industriais pode ser cara devido ao custo dos dispositivos e da infraestrutura necessária.
- **Desgaste Físico:** Em ambientes industriais, os sensores estão sujeitos a desgaste físico devido a vibrações, poeira, umidade e variações de temperatura. Isso pode afetar a durabilidade e a vida útil dos dispositivos.

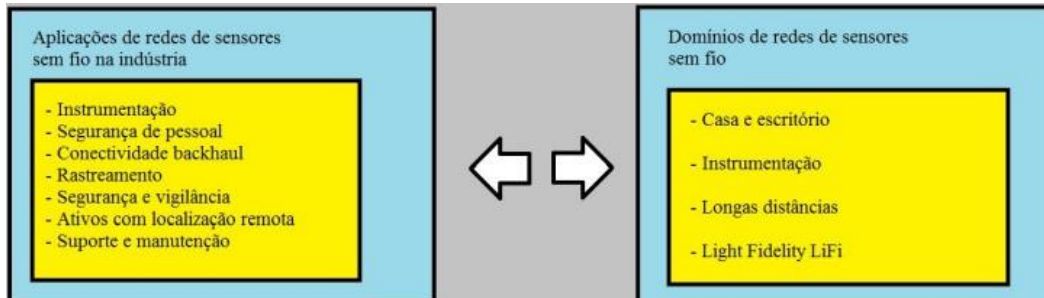
- **Integração com Sistemas Existentes:** Integrar novas redes de sensores sem fio com sistemas e infraestruturas industriais existentes pode ser complexo e requer planejamento adequado.

Embora as redes de sensores sem fio industriais apresentem desafios significativos, elas também oferecem benefícios substanciais. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias e protocolos específicos para ambientes industriais estão ajudando a superar esses desafios e tornar as redes de sensores sem fio mais robustas e confiáveis.

4.3.1 Aplicações de uma rede de Sensores sem fio

Existem muitos desafios em indústrias onde as redes de sensores sem fio podem atuar, proporcionando uma solução adequada. Na figura abaixo estão listadas diversas aplicações que podem ser colocadas em prática dentro de indústrias.

Figura 4. Principais aplicações de redes sem fio na indústria e os principais domínios responsáveis pelas tecnologias em atuação.



Fonte: adaptado de [43].

4.3.1.1 Instrumentação

A instrumentação é de suma importância nos processos industriais. A instrumentação compreende a transmissão de variáveis medidas por sensores e variáveis manipuladas por atuadores. Essa área funcional geralmente requer latência e confiabilidade determinísticas, bem como compatibilidade de interface com protocolos de comunicações industriais. Os requisitos de latência e confiabilidade variam de acordo com as necessidades das informações da fábrica, como o sistema de automação e aplicativos de otimização. Em [4], é mostrado uma análise de um algoritmo de criptografia para aplicação das tecnologias IEEE 802.15.4 no uso em indústrias de óleo e gás natural. Os autores avaliam se a rede IEEE 802.15.4 é capaz de entregar dados

suficientes com a latência necessária para aplicações de controle, monitoramento e supervisão e transmissão de dados. Os resultados obtidos através de simulação foram positivos tanto para 20, 30 e 40 nós simulados na rede em uma área de 1000 m² e distância máxima de 184m entre os nós. A latência máxima para aplicações de controle foi de 38ms, abaixo de 100ms que é o recomendado.

4.3.1.2 Segurança de pessoal

Aplicações de segurança de pessoal tem como objetivo evitar que funcionários se machuquem. Existem diversas aplicações com o objetivo de evitar acidentes ou ferimentos como monitoramento da qualidade do ar, detecção e controle de vazamento de gás e acidentes relacionados a robôs, com prevenções de quedas ou em trabalhos em localização perigosa.

4.3.1.3 Conectividade Backhaul

A conectividade de backhaul é um componente crucial nas redes de comunicação, especialmente em redes de telecomunicações e infraestruturas de Internet. O termo "backhaul" refere-se à parte da rede que conecta os nós de acesso (por exemplo, estações de base em redes móveis, pontos de acesso em redes Wi-Fi) à infraestrutura central ou à "rede principal". Aqui estão alguns postos-chaves relacionados à conectividade de backhaul:

- Definição de Backhaul: O backhaul é a parte da rede que transporta tráfego dos nós de acesso para a rede principal. Em redes móveis, por exemplo, isso conecta as estações de base (células) aos comutadores centrais.
- Importância na infraestrutura de comunicação: A qualidade e a capacidade do backhaul influenciam diretamente o desempenho e a confiabilidade de uma rede. Uma conectividade de backhaul eficiente é fundamental para garantir uma comunicação rápida e estável.

4.3.1.4 Tecnologias de Backhaul

- Fibra Óptica: Oferece alta capacidade de transmissão e baixa latência, sendo uma opção preferida quando a infraestrutura está disponível.

- Micro-ondas: Utiliza frequências de micro-ondas para transmitir dados. É uma opção comum em áreas onde a instalação de fibras ópticas é desafiadora.
- Satélite: Em locais remotos ou rurais, a conectividade de backhaul via satélite pode ser uma opção para estabelecer a comunicação.
- Capacidade e Latência: A capacidade do backhaul é crítica para garantir que a rede possa lidar com o volume de tráfego. Além disso, a latência (o tempo de ida e volta dos dados) é um fator importante em aplicações sensíveis ao tempo, como videoconferência e jogos online.
- Redes Móveis e 5G: Com o advento do 5G, a importância da conectividade de backhaul aumenta ainda mais, uma vez que o 5G exige uma infraestrutura robusta e de alta capacidade para suportar as altas taxas de transferência de dados.
- Escalabilidade e Atualizações: As redes estão em constante evolução, e o backhaul precisa ser escalável para suportar futuras atualizações e demandas de tráfego.
- Desafios em Áreas Remotas: Em regiões remotas, onde a infraestrutura é limitada, estabelecer uma conectividade de backhaul pode ser desafiador. Isso pode exigir o uso de tecnologias via satélite ou outras soluções criativas.
- Segurança: A segurança é uma consideração crítica, especialmente ao usar tecnologias sem fio para o backhaul. Criptografia e outras medidas de segurança são essenciais para proteger os dados transmitidos.

Em resumo, a conectividade de backhaul desempenha um papel vital na garantia da eficiência e confiabilidade das redes de comunicação, sendo fundamental para o funcionamento adequado de serviços de telecomunicações, redes móveis e infraestruturas de Internet em geral.

4.3.1.5 Rastreamento

A tecnologia sem fio também é utilizada para rastreamento, localização e identificação de materiais, inventário, pessoal e ferramentas. As características e aplicações de várias tecnologias de rastreamento, localização e identificação são apontadas em [6], onde os autores apresentam diversas técnicas de localização utilizando redes sem fio, como técnicas de triangulação, técnica “Fingerprinting” e técnica de proximidade.

4.3.1.6 Segurança e vigilância

Outra aplicação na indústria é na segurança e na vigilância. Dentro desta aplicação estão incluídas as transmissões de informações de voz, vídeo e identificação relacionadas à segurança da fábrica. Tecnologias comerciais, como Wi-Fi, são frequentemente usadas quando não desejasse usar cabos [5]. Em [7], são usadas redes de sensores sem fio para localização de alvos móveis. Os nós da rede, inicialmente, detectam o sinal recebido, então é usado um algoritmo de aprendizagem de máquina que detecta os nós próximos aos sinais recebidos, delimitando uma região de interesse. Após a região de interesse ter sido marcada são estimados os centros e a localização dos objetos.

4.3.1.7 Ativos com localização remota

A tecnologia sem fio também é aplicada em ativos localizados em lugares remotos. É utilizada no monitoramento e controle remoto e com isso pode reduzir significativamente os custos de um projeto [5]. Tem-se como objetivo do monitoramento e controle remotos, especialmente em indústrias baseadas em fluxo, melhorar a operação de locais remotos e reduzir os custos de mão-de-obra, transporte e instalação. Sendo a segurança uma das principais preocupações para essa aplicação devido ao afastamento geográfico. Em [11], os autores usaram uma rede de sensores sem fio baseada em ZigBee para realizar a detecção remota dos parâmetros de qualidade da água e a função de monitoramento em tempo real.

4.3.1.8 Suporte e Manutenção

Outra aplicação é em suporte e manutenção. Nela está inclusa a comunicação da integridade e monitoramento de um equipamento, verificando o controle ambiental, como aquecimento e refrigeração e atualizações de software e firmware de componentes. Portanto, dependendo da quantidade de dados transferidos e do nível de risco, várias tecnologias sem fio podem ser utilizadas [5]. Em [12], os autores apresentam diversas maneiras de geração de energia, como energia solar, para manter a rede de sensor sem fio com bateria suficiente para conseguir fazer o monitoramento de máquinas para melhor controle de manutenção, como manutenções preventivas e gestão de uso. Diversas tecnologias como ZigBee, WiFi e Bluetooth Low Energy foram avaliadas.

4.4 Critérios de avaliação

Para julgar se a rede de sensor sem fio está sendo efetiva é importante definir critérios de avaliação da rede. As principais métricas consideradas no momento de avaliar uma rede sem fio para ser implantada em uma indústria são descritas a seguir [5]:

- Confiabilidade, a introdução do sistema sem fio deve melhorar a capacidade da planta de se adaptar à função ou missão exigida sob as condições de produção especificadas;
- Segurança, as pessoas ou equipamentos devem estar mais seguros, a tecnologia sem fio melhora a capacidade dos funcionários de executar seus trabalhos sem riscos reconhecidos, incluindo quedas, energia perigosa, espaços confinados, ergonomia ou materiais perigosos;
- Eficiência, a tecnologia deve melhorar a capacidade de reduzir os custos operacionais e de produção ou reduzir os custos de manutenção;
- Qualidade, a tecnologia sem fio deve ser usada para melhorar a capacidade da fábrica de produção dentro das tolerâncias de projeto especificadas ou para demonstrar a conformidade do projeto;
- Meio ambiente, a introdução da tecnologia melhora a administração ambiental, monitorando melhor o processo industrial e prevenindo acidentes industriais ou minimizando a poluição, regulamentação governamental, a tecnologia sem fio permitirá demonstrar a conformidade com as leis ambientais e de segurança aplicáveis.

4.5 Ciclo de implantação de rede de sensores sem fio

Para a implantação de uma rede de sensores sem fio ser realizada com sucesso existem algumas diretrizes a serem seguidas [5]. O primeiro passo no processo é a identificação das necessidades. Cada empresa deve ter uma visão de por que é necessária uma atualização na fábrica. É aqui que os objetivos e critérios de sucesso são definidos e que um sistema sem fio poderá ser considerado. Uma pesquisa na fábrica no local da instalação da rede deve ser feita para avaliação de alguma limitação prática ou física. Após a realização da pesquisa os sistemas candidatos são selecionados. Após a seleção do candidato, uma solução é desenvolvida e testada em parte da planta. O desempenho é validado com relação aos requisitos originais e um plano

de implantação deve ser elaborado. O resultado final é uma solução de implantação que atende aos requisitos técnicos e atende efetivamente aos objetivos pré-estabelecidos.

Figura 5. Ciclo de implantação de uma rede de sensores sem fio dividido nas seguintes etapas:



Fonte: Adaptado [5]

5 PADRÕES ATUAIS E PRODUTOS

Existem muitos segmentos de padrões para redes industriais sem fio. Nesta seção serão debatidas diversas tecnologias para a criação de rede de sensores sem fio. Instrumentação, longa distância e tecnologias promissoras.

5.1 Wireless-Fidelity – WiFi

É uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a transmissão de dados por meio de ondas de rádio. É amplamente utilizado para conectar dispositivos como computadores, smartphones, tablets e outros dispositivos habilitados para Wi-Fi a uma rede local (LAN) e à Internet sem a necessidade de cabos.

O WiFi é baseado no protocolo IEEE 802.11, que especifica o conjunto de protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) e camada física (PHY) para implementar a comunicação por computador Wi-Fi da rede local sem fio (WLAN) em várias frequências, incluindo, mas não limitada a bandas de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz. Esse protocolo foi projetado para fornecer comunicação sem fio com grande largura de banda [13].

O Wi-Fi é uma tecnologia versátil que se tornou essencial em muitos ambientes atuais, proporcionando mobilidade e conectividade sem fio. É usado em uma variedade de cenários, desde ambientes domésticos até espaços públicos, empresas e setores industriais.

5.1.1 Principais características de funcionamento do Wi-Fi

1. Conectividade Sem Fio: O Wi-Fi permite a comunicação sem fio entre dispositivos, eliminando a necessidade de cabos físicos.
2. Acesso à Internet: É frequentemente utilizado para fornecer acesso à Internet em ambientes residenciais, empresariais, educacionais e públicos.
3. Redes Locais (LANs) Sem Fio: Permite a criação de redes locais sem fio em residências e escritórios, conectando diversos dispositivos a uma rede central.
4. Alcance Variável: O alcance do Wi-Fi pode variar dependendo do ambiente e da tecnologia utilizada. Pode cobrir distâncias curtas, como em uma casa, ou distâncias mais longas, como em áreas urbanas.
5. Velocidades Variáveis: As diferentes versões do padrão Wi-Fi oferecem velocidades variáveis de transmissão de dados. Versões mais recentes geralmente proporcionam maior largura de banda e velocidades mais rápidas.
6. Segurança: O Wi-Fi oferece recursos de segurança, como a criptografia de dados (por exemplo, WPA2, WPA3) para proteger a comunicação sem fio contra acesso não autorizado.
7. Frequências: Opera em diferentes frequências de rádio, como 2,4 GHz e 5 GHz, dependendo da versão e das configurações do dispositivo.
8. Padrões de Interoperabilidade: Dispositivos Wi-Fi de diferentes fabricantes são projetados para interoperar eficientemente, seguindo os padrões estabelecidos.

5.1.2 Aplicações do WI-FI

As principais aplicações das redes WiFi estão no estabelecimento de comunicação entre dispositivos eletrônicos portáteis como smartphones, notebooks e tablets, possibilitando o compartilhamento de informações entre usuários e equipamentos dispersos. Com a implantação da Iot, as redes WiFi estão sendo usadas para conectar praticamente todos os dispositivos eletrônicos domésticos como refrigeradores, aparelhos de televisão, ar condicionados, sistemas de iluminação e máquinas de lavar roupas. Em meio industrial as possibilidades de

comunicação de dispositivos de diversos processos podem ser realizadas via WiFi, mas devem ser analisadas as questões de segurança, interferência e consumo de energia.

Um modelo de aplicação industrial é apresentado em [14]. Naquela aplicação os autores desenvolveram um sistema de controle e monitoramento remoto de um processo industrial dentro de uma linha de montagem com uso de celulares e redes WiFi.

5.2 Bluetooth Low Energy (BLE)

O Bluetooth Low Energy (BLE) é uma tecnologia de comunicação sem fio desenvolvida para proporcionar uma conectividade eficiente e de baixo consumo de energia entre dispositivos. Ele é baseado no padrão IEEE 802.15.1, é um sistema de rádio sem fio projetado para dispositivos baratos e de curto alcance [15].

A principal característica do Bluetooth Low Energy é otimizar o consumo de energia, o que o torna ideal para dispositivos alimentados por bateria, como dispositivos vestíveis, sensores IoT (Internet das Coisas) e outros dispositivos de baixo consumo. Aqui estão alguns pontos chave sobre o BLE:

1. **Consumo de Energia Reduzido:** O BLE foi projetado para minimizar o consumo de energia, permitindo que os dispositivos operem por períodos prolongados com uma única bateria.
2. **Modo de Espera Eficiente:** Os dispositivos BLE podem entrar em modos de espera energeticamente, sendo ativados apenas quando necessário para transmitir ou receber dados.
3. **Conectividade de Curto Alcance:** Assim como o Bluetooth clássico, o BLE é uma tecnologia de curto alcance, tipicamente até alguns metros.
4. **Comunicação Assíncrona:** O BLE é adequado para comunicações assíncronas, onde pequenas quantidades de dados são transmitidas de forma intermitente.
5. **Velocidade de Transmissão Variável:** O BLE suporta diferentes taxas de transferência de dados, permitindo uma adaptação às necessidades específicas de diferentes aplicativos.
6. **Perfil GATT (Generic Attribute Profile):** O GATT é um perfil no BLE que define a estrutura dos dados e as operações de comunicação entre dispositivos. Ele é comumente usado para serviços e características específicas do aplicativo.

7. Segurança: O BLE inclui recursos de segurança, como criptografia de dados, para proteger as comunicações entre dispositivos.

5.2.1 Aplicações do bluetooth low energy

O Bluetooth Low Energy (BLE) tem uma variedade de aplicações em diferentes setores devido às suas características de baixo consumo de energia e conectividade sem fio eficiente. Algumas das aplicações mais comuns do BLE incluem:

- Dispositivos Vestíveis (Wearables): Monitores de atividade física, relógios inteligentes, pulseiras de fitness e outros dispositivos vestíveis usam o BLE para se conectar a smartphones e enviar dados, como informações de saúde e atividade física.
- Saúde e Monitoramento Médico: Sensores de saúde, monitores de glicose, dispositivos de pressão arterial e outros dispositivos médicos podem utilizar o BLE para transmitir dados para aplicativos móveis ou sistemas de monitoramento.
- Automação Residencial (Smart Home): Dispositivos inteligentes em casas conectadas, como lâmpadas, termostatos, fechaduras e sensores de segurança, muitas vezes utilizam o BLE para comunicação com smartphones e outros dispositivos de controle.
- Pagamentos Móveis e Carteiras Digitais: Alguns sistemas de pagamento móvel e carteiras digitais utilizam o BLE para facilitar transações seguras entre dispositivos móveis e pontos de venda.
- IoT (Internet das Coisas): O BLE é amplamente utilizado em soluções de IoT, permitindo a comunicação eficiente entre uma variedade de dispositivos, desde sensores ambientais até dispositivos industriais.
- Controle Remoto de Dispositivos: O BLE é frequentemente usado para permitir o controle remoto de dispositivos, como câmeras, drones, veículos e outros equipamentos eletrônicos.

5.3 Instrumentação

Esta subseção demonstra três dos principais produtos relacionados ao protocolo IEEE 802.15.4 que diz respeito a tecnologias de instrumentação: zigbee, ISA 100.11a e wirelesshart.

Essas tecnologias foram separadas no domínio de instrumentação por terem as camadas física e de enlace de dados baseadas no protocolo IEEE 802.15.4.

5.3.1 ZigBee

O ZigBee é um padrão de comunicação sem fio voltado para aplicações de baixo custo, baixo consumo de energia e baixo custo de implantação para uso em aplicações residencial e predial, medição inteligente, controles industriais, periféricos de computadores, aplicações médicas, entre outros [16].

As principais características do Zigbee são:

1. Baixo Consumo de Energia: Zigbee é projetado para operar em dispositivos alimentados por bateria, oferecendo eficiência energética para maximizar a vida útil da bateria.
2. Topologia de Rede em Malha (Mesh): Uma característica distintiva do Zigbee é sua capacidade de formar redes em malha. Isso significa que os dispositivos Zigbee podem se comunicar diretamente uns com os outros ou através de outros dispositivos Zigbee na rede, ampliando o alcance e aumentando a robustez da comunicação.
3. Comunicação de Baixa Taxa de Dados: Zigbee é adequado para aplicações que não exigem altas taxas de transferência de dados, sendo mais focado em comunicações de baixa velocidade, mas eficientes em termos de energia.
4. Frequências de Operação: O Zigbee opera em diferentes faixas de frequência, incluindo 2,4 GHz, 915 MHz e 868 MHz, dependendo da região geográfica.
5. Padrão IEEE 802.15.4: Zigbee utiliza o padrão IEEE 802.15.4 para a camada física e de acesso ao meio. Isso define as especificações para comunicações sem fio de curto alcance e baixa taxa de dados.
6. Segurança: Oferece recursos de segurança, incluindo criptografia, para proteger as comunicações entre os dispositivos Zigbee.
7. Baixo Custo de Implementação: O Zigbee é conhecido por ser uma solução econômica, tornando-o adequado para aplicações em que há restrições orçamentárias.
8. Aplicações Diversas: Zigbee é utilizado em uma variedade de aplicações, como automação residencial (smart homes), controle industrial, redes de sensores sem fio, monitoramento de saúde e outras aplicações de Internet das Coisas (IoT).

5.3.1.1 Aplicações

O Zigbee é amplamente utilizado em várias aplicações devido às suas características específicas, como baixo consumo de energia, capacidade de formar redes em malha e operação em faixas de frequência diferentes. Algumas das principais aplicações para o Zigbee incluem:

- Automação Residencial (Smart Home)
- Redes de Sensores Sem Fio (WSN)
- Cidades Inteligentes (Smart Cities)
- Saúde e Monitoramento Médico
- Automóveis Conectados
- Controle Industrial
- Sistemas de Controle Ambiental
- Aplicações de Consumo
- Aplicações em Agricultura

Essas são apenas algumas das muitas aplicações do Zigbee. A versatilidade e eficiência energética do Zigbee o tornam adequado para uma ampla variedade de cenários, especialmente em ambientes nos quais a conectividade sem fio eficiente e de baixo consumo de energia é essencial.

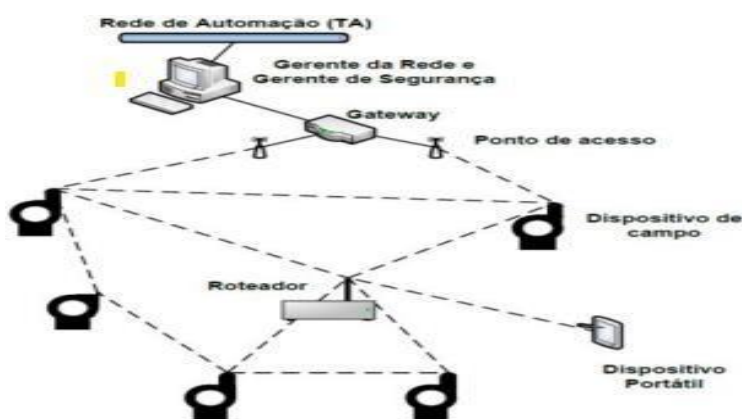
5.3.2 WirelessHART

O wirelessHART é uma extensão do protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) e foi projetado especificamente para monitoramento e controle de processos industriais. A tecnologia usa rádio baseado em IEEE 802.15.4, salto em frequência, caminhos de dados redundantes e mecanismos de repetição. As redes wirelessHART utilizam redes em malha, nas quais cada dispositivo é capaz de transmitir seus próprios dados, além de retransmitir informações de outros dispositivos na rede [17].

A camada física do WirelessHART é baseada no protocolo IEEE 802.15.4. Segundo [18], essa tecnologia opera na faixa de 2400-2483,5 MHz com uma taxa de dados de até 250 kbits/s com alcance máximo de 100m. A camada de dados é baseada no MAC TDMA, que garante transmissões determinísticas e livres de colisão.

Conforme mostrado na Figura 6, os elementos básicos de uma rede WirelessHART incluem: dispositivos de campo conectados aos processos industriais, um dispositivo portátil habilitado para WirelessHART usado para configurar dispositivos, executar diagnósticos e realizar calibrações, um gateway que conecta os gerentes de rede e segurança a dispositivos de campo e roteadores de rede responsáveis por configurar a rede, agendar e gerenciar a comunicação entre dispositivos WirelessHART [18].

Figura 6. Exemplo de organização de uma rede WirelessHART com dispositivos de campo, dispositivos portáteis, pontos de acesso, gateway, e gerentes de rede e segurança.



Fonte: adaptado de [19].

O WirelessHART é uma solução valiosa para aplicações industriais que requerem comunicação sem fio confiável, eficiente em termos de energia e segura em ambientes desafiadores.

Existem dois protocolos de roteamento definidos no WirelessHART: roteamento gráfico e roteamento de origem. No roteamento gráfico são definidos diversos caminhos que conectam os nós. Esses caminhos são armazenados em uma tabela e gravados na memória dos nós. Já o roteamento de origem é um complemento do roteamento de gráficos visando o diagnóstico da rede e encontrar os melhores caminhos para a rede [18].

5.3.2.1 Aplicações

O wirelessHART foi desenvolvido para atender às necessidades específicas de ambientes industriais, onde a comunicação confiável e em tempo real é crucial para o controle de processos.

O sistema foi desenvolvido em software e funciona medindo a força do sinal recebido para estimar a distância. Em [20], foi desenvolvido uma rede WirelessHART para o monitoramento de temperatura de líquidos. Os dados foram enviados pelo gateway a um servidor e nesse servidor foi desenvolvido uma aplicação para a leitura da temperatura.

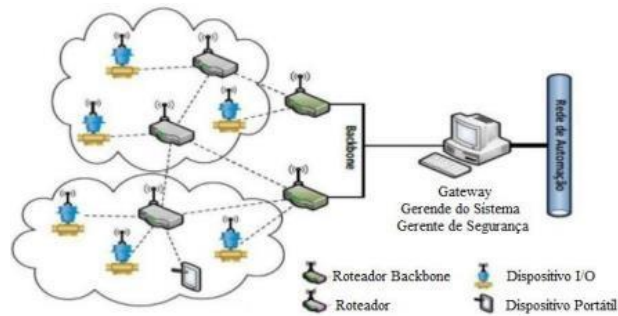
5.3.3 ISA 100.11a

A ISA100.11a é uma norma de comunicação sem fio para automação industrial desenvolvida pela International Society of Automation (ISA). Ele faz parte de uma família de padrões projetados para suportar uma ampla gama de necessidades de indústrias, incluindo automação de processos e automação de fábricas. Os critérios de design para ISA100.11a incluem: suporte à flexibilidade para vários protocolos, uso de padrões abertos, suporte à segurança com detecção de erros, salto de canal e determinismo [17].

A norma ISA100.11a é específica para ambientes industriais, incluindo setores como petróleo e gás, química, manufatura e outros. Ela suporta a operação em várias faixas de frequência, incluindo 2,4 GHz e 900 MHz, dependendo das regulamentações regionais.

A rede ISA100.11a é composta pelos seguintes componentes: gerente de segurança, gerente do sistema, gateway, roteador e aparelhos de campo, como são mostrados na figura 9. O gerente do sistema é responsável por toda a organização da rede, como gerenciar os aparelhos, as comunicações e os serviços de sincronização. Os roteadores encaminham os pacotes de dados recebidos pelos aparelhos de campo ao gateway e esse é responsável por passar as informações a outras redes como internet ou servidor privado onde atua o controle do sistema com os gerenciadores de risco e sistema [21]. A Figura 7 esquematiza a organização de uma rede ISA100.11a, composta por duas sub-redes, mostrando os diversos elementos I/O, backbone e gateway.

Figura 7. Organização de uma rede ISA100.11a composta por dispositivos I/O, dispositivos portáteis, roteadores, roteadores backbone e gateway com gerentes de sistema e segurança.



Fonte: adaptado de [19].

5.3.3.1 Aplicações

Um exemplo de aplicação da rede ISA100.11a é na indústria de petróleo e gás, onde a comunicação sem fio é crucial para monitorar e controlar processos em ambientes desafiadores. Aqui estão alguns cenários de aplicação específicos:

- Monitoramento de Ativos em uma Plataforma de Petróleo:

Em uma plataforma de petróleo, diversos ativos, como bombas, válvulas, compressores e sensores, precisam ser monitorados para garantir operações seguras e eficientes.

Cada ativo é equipado com dispositivos ISA100.11a que podem se comunicar entre si formando uma rede em malha. Alguns benefícios:

- Monitoramento em tempo real
- Manutenção Preditiva
- Redução de Fiação

Esse exemplo destaca como a rede ISA100.11a pode ser aplicada em ambientes industriais complexos para melhorar a eficiência operacional, a segurança e a capacidade de resposta a condições dinâmicas.

5.4 Longas distâncias

Este tópico descreve as principais tecnologias no domínio de longas distâncias, como redes celulares com as tecnologias 4G LTE e 5G e tecnologias de baixa potência e grande área de cobertura LPWAN, como LoRa.

5.4.1 Tecnologia LTE 4G

A tecnologia LTE, que significa Long-Term Evolution, é uma geração de padrões de comunicação móvel de alta velocidade. O 4G, ou quarta geração.

O LTE oferece velocidades de dados significativamente mais rápidas em comparação com as gerações anteriores, como o 3G.

As taxas teóricas de pico do LTE podem atingir teoricamente 100 Mb/s de download e 50 Mb/s de upload, permitindo uma experiência de navegação na internet mais rápida e uma melhor qualidade de streaming de vídeo.

A multiplexação ortogonal por divisão de frequência (OFDM) e a saída múltipla e entrada múltipla (MIMO) foram empregadas para aprimorar o desempenho dos sistemas sem fio existentes. Com o uso da OFDM e da MIMO, além de outras técnicas taxas de dados mais elevadas e maior capacidade puderam ser obtidas na rede LTE [22].

5.4.1.1 Princípios e conceitos da tecnologia 4G

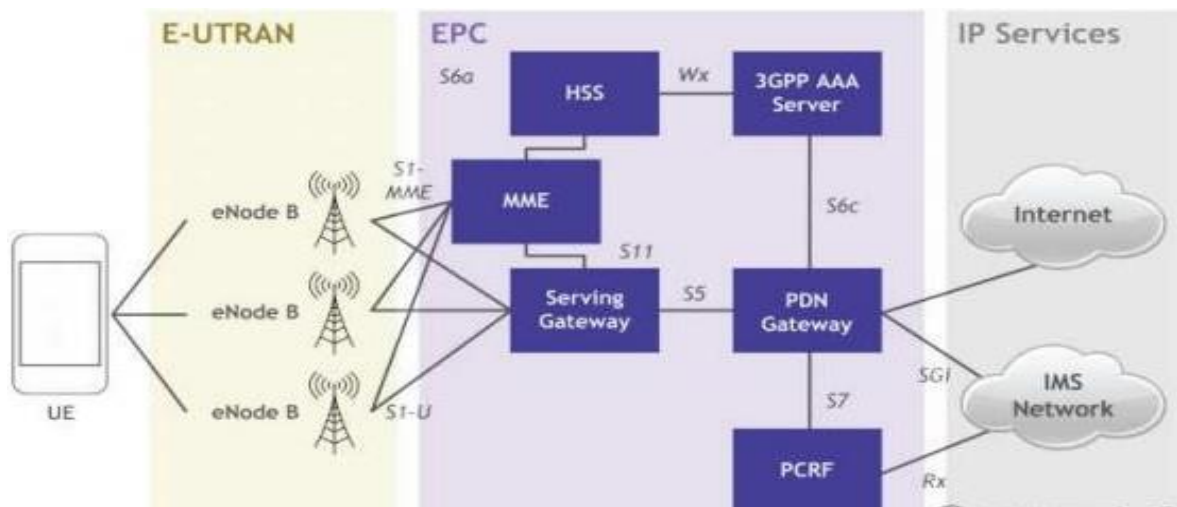
Um dos conceitos fundamentais é a arquitetura geral da rede: dispositivos móveis (UE - User Equipment) conectam a estação base eNodeBs que é a estação base na arquitetura LTE (Long-Term Evolution). Ela é responsável pela comunicação sem fio direta com os Dispositivos do Usuário. Cada eNodeB cobre uma área geográfica específica conhecida como célula. Mais à frente na figura 10 veremos o conceito de alto nível.

A tecnologia LTE atua com dois planos lógicos: o plano do usuário e o plano de controle. O plano do usuário é o plano lógico responsável por transportar dados do usuário enviados pela rede, por exemplo, comunicação por voz, SMS, tráfego de aplicativos, enquanto o plano de controle é responsável por transportar toda a comunicação de sinalização necessária para o UE ser conectado [23].

O equipamento do usuário (UE), pode ser tanto um telefone celular comum quanto equipamentos que fazem comunicação máquina para máquina (M2M) [23]. A Rede de Acesso

via Rádio (RAN) é composto por todas as eNodeBs e pela interface de rádio entre os dispositivos do usuário e a rede central. Ele gerencia a comunicação sem fio e a conectividade entre os dispositivos e a infraestrutura de rede, ao longo do tempo evoluiu para rede de acesso terrestre universal evoluída (E-UTRAN). Os UEs se conectam ao E-UTRAN para enviar dados para a rede principal. O E-UTRAN é uma rede em malha composta por estações base. Uma estação base ou Evolved Node B (eNodeB), faz a modulação e demodulação de sinais de rádio para se comunicar com UEs. A Figura 10 mostra a configuração típica de uma rede 4G LTE.

Figura 8. Organização de uma rede celular 4G LTE dividida em equipamento do usuário UE, E-UTRAN, EPC e Internet.



Fonte: [46].

Segundo [23], o núcleo de pacote evoluído (EPC) é o cérebro de roteamento e de computação da rede LTE. O EPC é responsável pelo gerenciamento e armazenamento de contextos UE, criação de identificadores temporários, paginação e controle de funções de autenticação. Ele faz também a comunicação entre a rede celular e a internet.

5.4.1.2 Aplicações

Ainda nos dias atuais a rede 4G tem aplicações em variados setores industriais indo do controle de iluminação, controle de estacionamento, monitoramento de processos industriais, rastreamento de equipamentos pesados e painéis de alarme. No caso de equipamentos ou cargas móveis, a rede 4G pode ser usada, por exemplo, no controle em tempo real de frotas de veículos e na entrega e retirada de cargas pesadas como containers.

Em [25], foi proposto um sistema capaz de fazer a cobertura de áreas rurais. A rede é baseada em nós finais com a tecnologia LoRa e usa nos gateways a tecnologia LTE como backhaul para transmitir as informações para a internet.

5.4.2 Tecnologia 5G

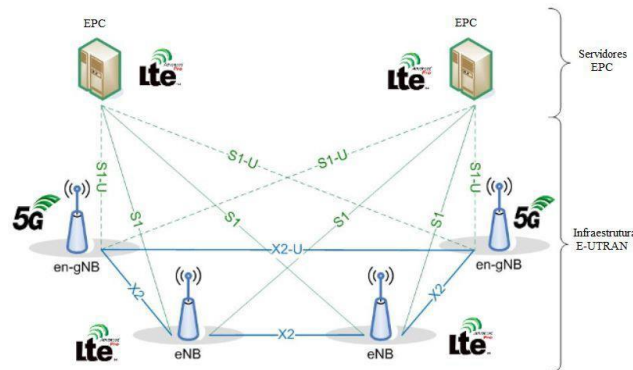
A tecnologia 5G, ou quinta geração de redes móveis, é uma evolução significativa em relação às gerações anteriores (3G e 4G). Ela foi projetada para oferecer suporte a diversos serviços com diferentes perfis de tráfego de dados, como alta taxa de transferência, baixa latência, conexões massivas e modelos como tráfego de dados IP, tráfego de dados sem IP, sequências curtas de dados e transmissões de dados de alta produtividade. Vários tipos de unidade de pacote de dados UDP são suportados, incluindo IPv4, IPv6, Ethernet e Unstructured [27].

A primeira especificação do 5G NR foi lançada em 2017 a partir de um trabalho em conjunto pela 3GPP e a ITU.

A principal característica do 5G é a introdução de uma nova interface de rádio, a New Radio (NR), que oferece a flexibilidade necessária para suportar esses serviços. Além disso, outra característica importante do 5G é que sua rede de acesso pode se conectar não apenas a uma nova rede 5G principal, mas também à rede principal 4G LTE. Isso é conhecido como arquitetura non-stand alone (NSA), enquanto o 5G access network (AN) conectado a um 5G core network (CN) é chamado de arquitetura stand alone (SA) [28].

A arquitetura non-stand alone (NSA), em que a rede 5G Radio Access Network (RAN) e sua nova interface de rádio (NR) são usadas em conjunto com a atual rede principal de infraestrutura LTE e EPC, disponibilizando a tecnologia NR sem a substituição da rede. Nesta configuração, não apenas os serviços 4G são suportados, mas desfrutam das capacidades oferecidas pelo novo rádio 5G como a maior largura de banda e menores latências [28]. Para a arquitetura NSA a frequência de operação varia de 450 MHz a 6 GHz, com maior uso das frequências de 3,4 a 4 GHz. Nessas frequências o alcance da rede 5G é similar ao do 4G LTE de até 50 Km. A arquitetura da NSA é ilustrada na Figura 11.

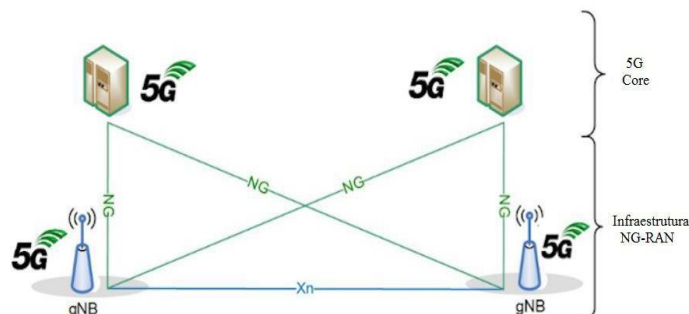
Figura 9. Organização da estrutura NSA, onde a infraestrutura da tecnologia 4G E-UTRAN e EPC é aproveitada pelo 5G para uso em frequências de até 6 GHz.



Fonte: adaptado de [29].

A arquitetura SA pode ser vista como a implantação completa de 5G, sem a necessidade de nenhuma parte de uma rede 4G para operar. Na seção abaixo são apresentados os cenários da tecnologia 5G. A estação base NR (nó lógico "gNB") se conecta através da interface Xn, e a Rede de Acesso (denominada "arquitetura NG-RAN para SA") se conecta à rede 5GC usando a interface NG [27]. Com a estrutura SA o 5G possui frequência de operação entre 24 e 100 GHz, com foco principal na faixa de 24 a 28 GHz. Devido à alta frequência de operação, segundo [30], o alcance da rede pode chegar a 500 m e seriam espalhadas antenas em diversos locais dentro da área de cobertura. Na Figura 12 pode-se ver a rede SA.

Figura 10. Organização da arquitetura Stand Alone. Estrutura independente com infraestrutura NG-RAN e 5G Core e atua com frequências superiores a 24 GHz.



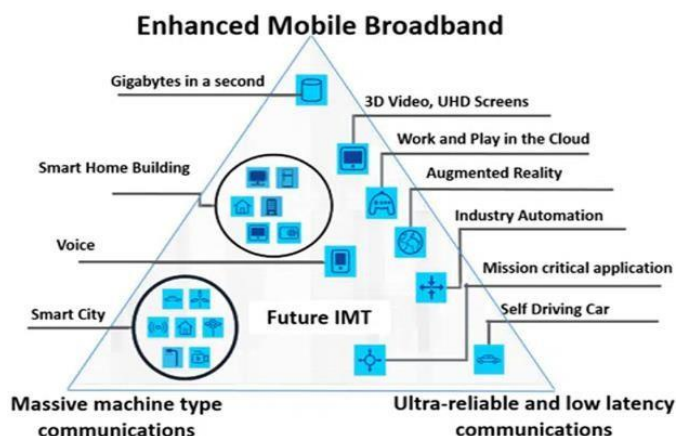
Fonte: adaptado de [29].

5.4.2.1 Cenários e aplicações

O objetivo da tecnologia 5G é permitir novos tipos de aplicações. Não é apenas uma atualização evolucionária para a geração anterior de celular, mas uma tecnologia inovadora que

visa eliminar os limites de acesso, capacidade, desempenho e latência na conectividade globalmente. Conforme figura 13 abaixo, os três principais casos de uso do 5G são: Banda Larga Móvel Aprimorada, Comunicação Massiva do Tipo Máquina e Comunicação de Baixa Latência Ultra Confiável.

Figura 11. Organização das 3 principais áreas de atuação da tecnologia 5G.



Fonte: adaptado de [31].

A tecnologia 5G possui três principais áreas de atuação: Enhanced Mobile Broadband (banda larga aprimorada) (eMBB), massive machine type communication (comunicação massiva do tipo máquina) (mMTC) e Ultra-reliable and low latency communication (comunicação de baixa latência ultra confiável) (URLLC).

O primeiro cenário é o Enhanced Mobile Broadband (eMBB). O eMBB significa a mais alta experiência em comunicação e grande melhoria de desempenho em comparação com o cenário de serviço de banda larga móvel existente. As possíveis aplicações representativas do eMBB incluem:

- Vídeo UHD (4K, 8K) e Vídeo 3D
- Internet tátil, jogos em nuvem e quiosques de banda larga
- Sala de aula remota, holograma
- Realidade Virtual (VR) e Realidade Aumentada (AR)
- Simulação e treinamento em tempo real

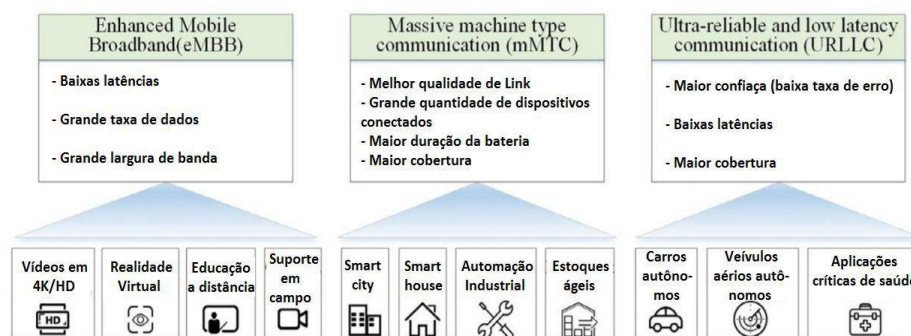
O segundo cenário é o de comunicação massive machine type communication (mMTC). O 5G promete capacidade de interconexão entre todas as máquinas e que todas os equipamentos envolvidos na sociedade funcionem de maneira inteligente. A internet das coisas de alta

densidade e larga escala pode ajudar as indústrias a serem atualizadas para indústrias inteligentes mais avançadas. As aplicações representativas incluem:

- Casa inteligente
- Cidade inteligente
- Informações industriais
- Armazenamento
- Logística inteligentes

Terceiro cenário é de Ultra-reliable and low latency communication (URLLC). O cenário URLLC é usado principalmente nos cenários de alta qualidade de comunicação e baixa latência, como rede de carros autônomos, rede de veículos aéreos não tripulados. Somente quando os dados a serem transmitidos são precisos e confiáveis, é possível realizar o monitoramento em tempo real. Em conclusão, embora muitos aplicativos e serviços não sejam suportados na era 4G, o desenvolvimento do 5G e seus aplicativos estão em andamento. Na Figura 14 é possível ver os três cenários e suas aplicações [32].

Figura 12. Diferentes cenários da tecnologia 5G: eMBB, mMTC e URLLC.



Fonte: adaptado de [32].

5.4.3 LoRa

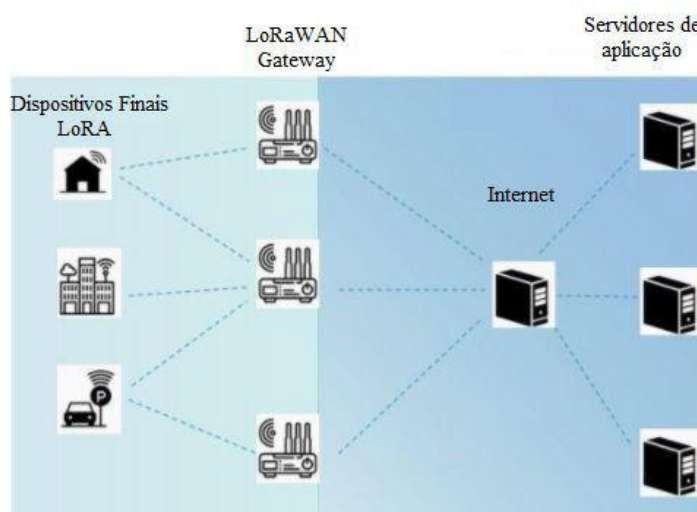
LoRa, que significa "Long Range", é uma tecnologia de comunicação sem fio projetada para suportar comunicações de longo alcance com baixo consumo de energia. Ela é especialmente adequada para aplicações de Internet das Coisas (IoT) e redes de sensores, onde a longa distância de transmissão e a eficiência energética são requisitos críticos.

5.4.3.1 Princípio de funcionamento

A arquitetura de rede do LoRaWAN é tipicamente uma topologia estrela de estrelas, onde os dispositivos finais se comunicam com os gateways, e os gateways encaminham os dados para o servidor de rede central. Essa arquitetura permite escalabilidade e eficiência na gestão da rede.

Essa arquitetura do LoRaWAN consiste em três componentes principais: dispositivos finais (nós), gateways e um servidor de rede. Os dispositivos finais são os sensores ou dispositivos de baixa potência que coletam dados. Os gateways recebem os dados dos dispositivos finais e os encaminham para o servidor de rede, que processa e encaminha os dados para a aplicação correspondente. Além disso, a comunicação termina nos servidores de aplicação que podem pertencer a terceiros. Várias camadas de aplicativos podem ser conectadas a um único servidor de rede. A tecnologia LoRaWAN consegue entregar taxas de comunicação de até 150 kb/s e possui um alcance de até 15 Km com linha de visão LOS e de 5 Km em centros urbanos. A arquitetura de rede LoRaWAN resultante é mostrada na Figura 15 [33].

Figura 13. Organização da rede LoRaWAN composta por dispositivos finais LoRa, gateway, internet e servidores de aplicação.



Fonte: adaptado de [33]

O padrão LoRaWAN define três tipos de dispositivos: Classe A, Classe B e Classe C. Todos os dispositivos LoRaWAN devem implementar Classe A, enquanto Classe B e Classe C são extensões da especificação de dispositivos Classe A. Todas as classes de dispositivos suportam comunicação bidirecional (uplink e downlink).

Os dispositivos da classe A ficam sempre silenciosos a não ser que tenham alguma informação para transmitir. Quando eles querem transmitir algo eles enviam um pacote de transmissão para avisar o servidor que uma transmissão está iniciando. Os dispositivos da Classe B são similares aos da classe A com a diferença de que eles abrem janelas de recebimento programadas para receber informações do servidor ou gateway. Os dispositivos de classe C se diferenciam dos Classe A, porque eles abrem constantemente janelas de recebimento a menos que eles estejam transmitindo.

O protocolo LoRaWAN especifica vários mecanismos que garantem uma comunicação confiável e segura. Ele usa o mecanismo taxa de dados adaptativa ADR, bem como procedimentos de junção de rede para nós finais. O mecanismo ADR é incorporado ao LoRaWAN para gerenciar dinamicamente os parâmetros de link de um nó final, a fim de aumentar a taxa de entrega de pacotes. O mecanismo ADR gerencia a taxa de dados e transmite a energia dos dispositivos finais [33].

O LoRaWAN é amplamente utilizado em diversas aplicações de IoT, como monitoramento agrícola, cidades inteligentes, rastreamento de ativos, monitoramento ambiental e muitos outros cenários onde a comunicação de longo alcance e baixa potência é crucial.

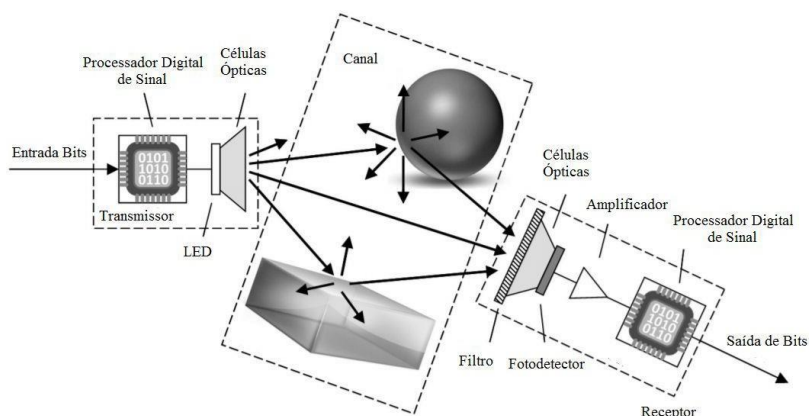
Em [34] foi desenvolvido uma rede LoRa para o monitoramento e telemetria de três regatas em uma corrida realizada no porto de Vigo, na Espanha. Foram monitoradas diversas horas de atividade a uma distância de até 1 Km do porto. Os dispositivos finais LoRa presentes nos barcos enviaram as informações captadas por sensores para o gateway localizado no porto e o gateway transmitia as informações para um servidor na nuvem que disponibiliza uma página na internet para o acompanhamento dos dados com atualização automática, porém com atrasos.

5.5 Light Fidelity LiFi

Li-Fi, ou Fidelidade de Luz (Light Fidelity), é uma tecnologia de comunicação sem fio que utiliza a luz visível ou luz infravermelha próxima (NIR - Near-Infrared) para transmitir dados. Ao contrário do Wi-Fi, que utiliza ondas de rádio para comunicação, o Li-Fi aproveita a luz como meio de transmissão. Quando se refere ao termo "Fidelidade de Luz", isso sugere uma alta fidelidade na transmissão de dados por meio da luz. Essa tecnologia faz uso de LEDs para transmitir dados através da modulação na intensidade da luz. O LED é controlado eletricamente, sendo energizado e desenergizado em altas frequências, tornando as variações de luminosidade imperceptíveis ao olho humano.

Veremos na Figura 14 que ele é dividido em três etapas: transmissor, canal e receptor. O transmissor é responsável por receber bits e processá-los através de um processador digital de sinais que transforma os bits em sequências de códigos que são responsáveis por controlar a intensidade da luz transmitida. A luz é transmitida através de LEDs e Células Ópticas para o canal. O canal é o meio de transmissão, nesse caso o ar, e ele pode bloquear ou refletir o sinal para o receptor. O receptor capta a intensidade da luz transmitida com a ajuda de um filtro para eliminar as frequências indesejadas e um fotodetector para transformar a intensidade da luz em sinal elétrico. Após o fotodetector é usado um amplificador para melhorar a qualidade do sinal e então um processador digital de sinais faz a transformação do sinal para informações através de bits [35].

Figura 14. Esquema de funcionamento do LiFi dividido em transmissor, canal e receptor. A informação de entrada é transformada para sinais de luz e emitidas para o canal, na outra extremidade encontra-se o receptor com um fotodetector e faz a transformação da luz em informação.



Fonte: adaptado de [35].

Diversos testes com a tecnologia LiFi estão sendo feitos e os resultados são bastante promissores. Em [36], o Instituto Fraunhofer realizou testes em uma fábrica da BMW na Alemanha em robôs da linha de montagem com funções de solda, movimentação e testes em uma área de produção de 5 m². O sistema operou com taxas superiores a 100 Mb/s com latência de 5 ms.

A tecnologia Li-Fi ainda está em desenvolvimento contínuo, e os pesquisadores estão explorando maneiras de superar suas limitações. Isso inclui melhorias na estabilidade do sinal, expansão da cobertura e otimização da eficiência.

Embora o Li-Fi tenha suas vantagens, ele é frequentemente visto como uma tecnologia complementar ao Wi-Fi em vez de uma substituição completa. Ambas as tecnologias podem coexistir em ambientes onde a conectividade diversificada é necessária.

Por mais que o Li-Fi tenha desafios e limitações, seu potencial para fornecer comunicação de alta velocidade em ambientes específicos torna-o uma área de pesquisa e desenvolvimento interessante para aplicações futuras.

6. COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS

Este tópico tem o objetivo de resumir os pontos positivos e negativos de cada tecnologia e estabelecer uma comparação visando evidenciar qual a melhor tecnologia para diferentes aplicações. Inicialmente, para melhor compreensão do texto, serão retomadas, de forma resumida, as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, as tecnologias de instrumentação e, finalmente, as tecnologias de longa distância.

6.1 Tecnologias IEEE 802.11

O protocolo IEEE 802.11 descreve as características de uma rede local sem fio, WLAN (Wireless Local Area Network). Dependendo do protocolo IEEE802.11a/b/g/n utilizado para a comunicação com o meio físico, três técnicas principais são utilizadas: o FHSS, que é Espalhamento Espectral por Salto de Frequências, o DSSS, que é Espalhamento Espectral por Sequência Direta e o OFDM-MA, que é a multiplexação por divisão de frequências ortogonais com múltiplas entradas [37].

O controle de acesso ao meio MAC (Medium Access Control) é do tipo CSMA/CA e pode alcançar velocidades de até 150mb/s. O alcance das redes IEEE 802.11 é de 100m e elas operam nas faixas de 2.4 e 5 GHz. Segundo [37], uma dificuldade na aceitação do WiFi em indústrias é a necessidade de infraestrutura para o acesso à internet. É necessário que exista uma rede backbone para entregar internet até o ponto de acesso que então comunica-se sem fio. As vantagens do WiFi estão na flexibilidade da rede, grandes taxas de transferência, fácil implantação e grande aceitação de diversos dispositivos. O Bluetooth Low Energy opera na faixa de 2.4 Ghz, com taxa máxima de transmissão de 1 Mb/s e alcance máximo de 10m. Sua modulação é GFSK e a técnica de transmissão é do tipo FHSS. O método de controle de acesso ao meio é por múltiplo acesso por divisão de tempo TDMA. Sua atratividade está em seu baixo

consumo de energia, com vida útil de meses a anos e ampla adoção na indústria de smartphones. Segundo [38], o Bluetooth é menos favorável à automação de processos devido à complexidade de seu protocolo, problemas de escalabilidade e falta de flexibilidade na topologia.

Na Tabela 1 é possível ver banda de frequência, taxa máxima do sinal, alcance nominal, potência de transmissão, largura de banda do canal, controle de acesso ao meio MAC e modulação para as tecnologias da categoria casa e escritório. Para o WiFi existe a possibilidade de operar tanto em 2.4 GHz como em 5 GHz, enquanto para o Bluetooth apenas em 2.4 GHz. Pode-se ver que a taxa máxima do padrão IEEE 802.11 é muito superior do que o padrão IEEE 802.15.1 e que o alcance nominal e a potência de transmissão são maiores para o IEEE 802.11.

Tabela 1. Especificações das tecnologias IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1.

Tecnologia	WI-FI IEEE 802.11	Bluetooth Low Energy IEEE 802.15.1
Banda de frequência	2.4 / 5 GHz	2.4 GHz
Taxa máxima de dados	150 Mb/s	1 Mb/s
Alcance nominal	100 m	10 m
Potência de transmissão	15-20 dBm	0-10 dBm
Largura de banda do canal	14 / 22 MHz	1 MHz
MAC	CSMA/CA	TDMA
Modulação	OFDM-MA (FHSS, DSSS)	GFSK

Fonte: adaptado de [39] [40]

6.2 Tecnologias de instrumentação

Dentro das tecnologias de instrumentação, o protocolo ZigBee é atraente para aplicações simples com baixa taxa de dados, baixo consumo de energia e baixo custo. Possui taxa máxima de transmissão de dados de 250 kb/s, alcance máximo de 100m, oferece diversidade de seleções de canais em três bandas: uma em 868MHz (Europa); dez canais em 902-928MHz (EUA) e dezesseis disponíveis na faixa ISM de 2,4GHz (no mundo inteiro). Possui modulação OQPSK, BPSK, técnica de transmissão DSSS e utiliza o controle de acesso ao meio MAC CSMA/CA. Segundo [41], possui baixa garantia de Qualidade de Serviço (QoS), não suporta determinismo e não emprega salto de frequência, tornando-o suscetível a interferências.

O WirelessHART atua na frequência de 2.4GHz com taxa máxima de transmissão de 250kb/s. O alcance máximo é de 100m, utiliza o controle de acesso ao meio TDMA e a camada física é baseada do protocolo IEEE 802.15.4 usando modulação OQPSK e técnicas de transmissão combinada de FHSS e DSSS. WirelessHART suporta topologias do tipo estrela, árvore e em malha. Segundo [17], a implementação do protocolo WirelessHART tem seus próprios desafios associados, incluindo: design, sincronização e segurança do temporizador.

O ISA100.11a também utiliza o protocolo IEEE802.15.4 como camada física. Possui três faixas de operação: 868 MHz para Europa, 915 MHz para América do Norte e 2.4 GHz global. Sua taxa de transmissão máxima é de 250kb/s e possui alcance máximo de 100m. Utiliza o controle de acesso ao meio do tipo TDMA e modulações OQPSK e BPSK, com DSSS como técnica de transmissão.

Na Tabela 2 é possível ver banda de frequência, taxa máxima do sinal, alcance nominal, potência de transmissão, largura de banda do canal, controle de acesso ao meio MAC e modulação para as tecnologias da categoria instrumentação. As três tecnologias possuem banda de frequência para operação global em 2.4 GHz, enquanto o ZigBee e ISA 100.11a operam em 868 MHz e 915 MHz para Europa e América do Norte, respectivamente.

Pode-se perceber que a taxa máxima de transmissão dos dados é a mesma e que o controle de acesso ao meio é baseado em TDMA para ISA 100.11a e WirelessHART enquanto para ZigBee é CSMA/CA.

Tabela 2. Especificações das tecnologias de instrumentação.

Tecnologia	ISA 100.11a	WirelessHART	ZigBee
Banda de frequência	868/915 MHz e 2.4 GHz	2.4 GHz	868/915 MHz e 2.4 GHz
Taxa máxima de dados	250 Kb/s	250 Kb/s	250 Kb/s
Alcance nominal	100m	100m	10 – 100m
Pot. de Transmissão	0 - 20 dBm	10 dBm	(-25) - 0 dBm
Largura de banda do canal	0.3/0.6 MHz e 2 MHz	2 MHz	0.3/0.6 MHz e 2 MHz
MAC	TDMA	WHART TDMA	CSMA/CA
Modulação	OQPSK, BPSK (DSSS)	OQPSK (FHSS, DSSS)	OQPSK, BPSK (DSSS)

Fonte: adaptada de [39] [40]

6.3 Tecnologia de longa distância

Dentro das tecnologias de longa distância, a tecnologia LTE 4G utiliza técnicas de transmissão baseadas em OFDM. As principais faixas de frequência usadas são 2.6 GHz, 1.8 GHz e 700 MHz. A taxa máxima de download é de 100mb/s e de upload é de 50mb/s. A tecnologia 4G permite um significativo fluxo de dados em comparação à tecnologia LoRaWAN, maior largura de banda, acesso fácil à internet e grande aceitação do mercado. Porém, segundo [32], a rede celular depende da infraestrutura disponível e da cobertura das operadoras na área desejada. Quanto maior o volume de dados a serem transmitidos, mais cara fica a solução e maior será a infraestrutura dedicada para essa tecnologia. Convém destacar que equipamentos 3G não conseguem se beneficiar da rede 4G.

A tecnologia 5G promete taxas de 10 Gb/s enquanto usa frequências nas faixas de até 6 GHz e de 24 GHz a 100 GHz com latências de até 1 ms nas comunicações. A maior diferença esperada entre as tecnologias 4G e 5G é a latência. O 5G promete latências abaixo de 1ms enquanto o 4G entrega latências entre 60 e 100 ms. Outra diferença significativa é a infraestrutura necessária, 4G utiliza torres celulares com alcance de 50 km e é esperado que o 5G utilize diversas antenas em grande quantidade de localizações com alcance de 500 m, para a rede Stand Alone. Isso ocorre devido a frequência utilizada para transmitir informações, o 4G usa frequências de 0.7, 1.8 e 2.6GHz enquanto o 5G opera com frequências superiores a 24GHz para a arquitetura Stand Alone.

Porém a tecnologia 5G ainda se encontra em desenvolvimento e está distante da 4G em questões de disponibilidade ao usuário, preço de manutenção e implementação. Neste estágio atual da tecnologia, a utilização do 5G para redes de sensores sem fio para a indústria, principalmente em países emergentes como o Brasil, ainda é uma realidade distante.

A tecnologia LoRa possui banda de operação em 868 MHz para Europa, 433/868MHz para América do Norte e 430 MHz para Ásia com taxas máximas de transmissão de 100kb/s. O alcance máximo da rede é de 15 km com linha de visão LoS e de 5 km para centros urbanos. A modulação utilizada é uma adaptação de chirp spread spectrum CSS e usa FHSS como técnica de transmissão. O controle de acesso ao meio ocorre pela arquitetura LoRaWAN. Segundo [33], os principais pontos fortes do LoRa são o fato de oferecer dispositivos finais baratos e possibilidades de implantação de redes privadas, diminuindo os custos operacionais para implantação de redes. Outros pontos fortes incluem uma grande cobertura com gateway único e operação de baixa potência para nós finais. Os principais pontos fracos atuais incluem

problemas de segurança, escalabilidade da rede e mal funcionamento do mecanismo ADR no tráfego congestionado.

Na Tabela 3 é possível ver banda de frequência, taxa máxima do sinal, alcance nominal, potência de transmissão, largura de banda do canal, controle de acesso ao meio MAC e modulação para as tecnologias da categoria instrumentação. Percebe-se a grande diferença entre as tecnologias LoRa e celular em relação a taxa de dados, frequência de banda de operação e potência de transmissão. Além disso, é possível observar que também há grandes diferenças entre as tecnologias 4G e 5G, como a banda de frequência e taxa máxima de dados, que são maiores no 5G e o alcance que é maior no 4G.

Tabela 3. Tecnologias de longa distância.

Tecnologia	LoRa	4G	5G
Banda de frequência	433/868/430 MHz	0.7/1.8/2.6 GHz	até 6 GHz; 24 a 100 GHz
Taxa máxima de dados	100 Kbp/s	100 Mb/s	10Gb/s
Alcance nominal	15 Km (LoS)	50 Km	500m
Potência de transmissão	20 dBm	43 dBm	50 dBm
Largura de banda do canal	0.3, 2.16 MHz	10 - 70 MHz	50 - 400 MHz
MAC	LoRaWAN	LTE	5G New Radio
Modulação	CSS (FHSS)	OFDM	OFDM

Fonte: adaptado de [39] [40]

6.4 Tecnologia LiFi

A tecnologia LiFi, ainda em desenvolvimento, possui pouca informação sobre aplicações industriais e produtos comerciais para se conceber uma tabela de especificações, porém a banda de frequência que ela opera está na luz visível, ultravioleta e infravermelho, a taxa máxima de dados já alcançada em uma transmissão foi de 224 Gb/s [42], o alcance nominal está na faixa de metros e utiliza modulações variando a intensidade da luz para transmissão de dados.

6.5 Matriz comparativa das tecnologias

Toda a informação anterior é possível criar uma matriz mapeando as aplicações e os protocolos de redes de sensores sem fio mais utilizados pela indústria. As Tabelas 4, 5 e 6 são adaptadas da referência [43] e resumem as tecnologias disponíveis para implementar uma rede industrial de sensores sem fio. Abaixo é apresentada a decisão racional utilizada para a montagem da tabela.

Para aplicações do tipo flow-based, em que fazem parte aplicações com matéria prima em fluxo contínuo, como refinarias de óleo, plantas de tratamento de água e reatores químicos, o protocolo IEEE 802.11 possui capacidade suficiente para atuar com o monitoramento de processos e supervisão de controle, mas pode apresentar problemas práticos de limitação de sensores e confiança de dados em tempo real para sistemas de controle de feedback. Para as aplicações Flow-based a tecnologia Bluetooth não é considerada eficaz, pois não é capaz de entregar grande quantidade de dados com latência aceitável. Considerando as tecnologias que utilizam o protocolo IEEE 802.15.4, as soluções que utilizam o MAC TDMA, WirelessHART e ISA100.11a, possuem vantagem em relação ao ZigBee que utiliza CSMA/CA. Isso ocorre, pois, o protocolo CSMA/CA utiliza o método para evitar colisões RTS/CTS para garantir que a mensagem seja entregue, causando atrasos maiores nas mensagens em relação ao protocolo TDMA. Tecnologias utilizadas para grandes áreas como o 4G possui limitações em confiança de dados e energia. A tecnologia LoRa possui limitações em fluxo de dados e latência. A tecnologia 5G ainda não possui dados suficientes para análise nessas condições, já a tecnologia LiFi, por enquanto, possui alcance baixo para aplicações em campo.

Para aplicações do tipo job based, que representam os sistemas de manufatura ou montagem em processos discretos como uma linha de produção, tecnologias como IEEE 802.11, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, e LoRa podem ser utilizadas para monitoramento de linhas de produção, porém elas não são tão eficientes para serem usadas como sensores em linha de produção, devido a grande latência, pois linhas de montagem geralmente necessitam de dados confiáveis em tempo real. Para inspeção de qualidade a maioria das tecnologias podem ser usadas, porém podem apresentar alguma limitação prática, em latência, fluxo de dados, confiança ou em consumo de energia com exceção do 4G, que sofre grande interferência em locais fechados, principalmente plantas de fábricas.

Para o monitoramento remoto o Bluetooth e LiFi não são indicados devido a baixa área de cobertura. Tecnologias como IEEE 802.11 e 4G têm limitações em relação a localização, como questões de disponibilidade de acesso, cobertura de operação e limitações de energia. As

tecnologias que utilizam os protocolos IEEE 802.15.4 e LoRa são as mais indicadas. A tecnologia 5G precisa de maiores estudos e testes para ser considerada nesta aplicação. A Tabela 4 traz o resumo dessas aplicações.

Tabela 4. Comparativo entre aplicações Flow Based, Job Based e Remoto.

		Monitoramento de Processos	Supervisão de Controle	Controle de Feedback	Monitoramento	Sensores linha de montagem	Qualidade	Monitoramento
Dominio	Tecnologia	Flow Based			Job Based			Remoto
Casa e empresa ^x	Wi-Fi	0	0	◆	0	◆	◆	◆
	BLE	X	X	X	X	◆	0	X
Instrumentação IEEE 802.15.4	ZigBee	◆	◆	X	0	◆	◆	0
	WirelessHART	0	0	◆	0	◆	◆	0
	ISA100.11a	0	0	◆	0	◆	◆	0
Longas distâncias	4G LTE	◆	◆	X	X	X	X	◆
	5G	■	■	■	■	■	■	■
	LoRa	◆	◆	X	◆	X	◆	◆
Tecnologias Promissoras	LiFi	X	X	◆	◆	◆	◆	X

0 Tecnologia que elimina problemas ◆ Resolve de forma parcial o problema
X Desaconselhado ■ Melhorias futuras possivelmente dará uma solução

Fonte: adaptado de [43].

Em aplicações de segurança de pessoal como prevenção de quedas e espaços confinados, as tecnologias não indicadas para o uso são 4G e LoRaWAN, principalmente por serem melhores usadas em grandes áreas e não em locais fechados. As demais tecnologias possuem limitações em questões de confiabilidade de dados em tempo real com destaque positivo para o IEEE 802.11 em prevenção de queda, mas destaque negativo em espaços confinados devido a perda de sinal em espaços de difícil acesso e muita reflexão.

Para aplicações de grande quantidade de dados como sistemas backhaul as tecnologias indicadas são IEEE 802.11, 5G e LiFi, contando com linha de visão, as demais não possuem tanta capacidade de transmissão de dados. A tecnologia 4G pode ser usada, porém deve sofrer com problemas de latência, fluxo de dados e limitações de energia.

Para aplicações de segurança a tecnologia WiFi é a mais indicada, porque dispõe de grande largura de banda e taxas de transferência de dados elevadas. Outras tecnologias podem ser utilizadas para controle de acessos, dado que não são necessárias grandes taxas de

transferência de dados como aplicações de voz e vídeo. A Tabela 5 traz o comparativo dessas três aplicações.

Tabela 5. Comparativo entre aplicações Segurança de Pessoal, Backhaul e Segurança.

		Prevenção de queda	Espaços confinados	Próximo	Distante	Voz e vídeo	Controle	Fluxo de dados
Domínio	Tecnologia	Segurança de Pessoal		Backhaul		Segurança		
Casa e empresa x	Wi-Fi	0	X	0	0	0	0	0
	BLE	◆	◆	X	X	X	X	X
Instrumentação IEEE 802.15.4	ZigBee	◆	◆	X	X	X	◆	X
	WirelessHART	◆	◆	X	X	X	◆	X
	ISA100.11a	◆	◆	X	X	X	◆	X
Longas distâncias	4G LTE	X	X	◆	◆	◆	◆	◆
	5G	■	■	0	0	■	■	■
	LoRa	X	X	X	X	X	■	X
Tecnologias promissoras	LiFi	■	■	0	■	■	■	0
0 Tecnologia que elimina Problema		◆ Resolve de forma parcial o problema						
X Desaconselhado		■ Melhorias futuras possivelmente dará uma solução						

Fonte: adaptado de [43].

Para aplicações de rastreamento o principal desafio é o consumo de energia. A tecnologia que melhor cumpre esta função é o Bluetooth, principalmente em aplicações de rastreamento de ferramentas em áreas pequenas de cobertura. Na situação em que a área de cobertura é pequena, o fluxo de dados é baixo e é necessário grande eficiência energética. Para a localização de funcionários, tecnologias como IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 e LoRa podem ser usadas, respeitando o seu nicho de aplicação, porém com limitações de energia e quantidade de dados. As tecnologias 5G e LiFi precisam de maiores testes e estudos.

Nas aplicações relacionadas à manutenção, como estado das máquinas, automação em construções e realidade aumentada, as soluções que utilizam o protocolo IEEE802.15.4 são as mais indicadas, assim como IEEE802.11. Porém, o principal ponto negativo das tecnologias IEEE802.15.4 são o baixo fluxo de dados, enquanto o que limita o uso do WiFi é o grande consumo de energia. As tecnologias 5G e LiFi ainda estão em desenvolvimento nessas áreas. A Tabela 6 traz o comparativo das aplicações de rastreamento e manutenção.

Tabela 6. Comparativo entre aplicações rastreamento e manutenção.

		Materiais	Ferramentas	Pessoal	Saúde da máquina	Automação de construções	Realidade aumentada
Domínio	Tecnologia	Rastreamento			Manutenção		
Casa e empresa x	Wi-Fi	X	X	X	◆	0	0
	BLE	X	0	◆	◆	X	X
Instrumentação IEEE 802.15.4	ZigBee	X	X	◆	0	0	◆
	WirelessHART	X	X	◆	◆	0	◆
	ISA100.11a	X	X	◆	◆	0	◆
Longas distâncias	4G LTE	X	X	X	X	X	X
	5G	■	■	■	■	■	■
	LoRa	X	X	◆	◆	X	X
Tecnologias promissoras	LiFi	■	■	■	■	■	■
0 Tecnologia que elimina Problema		◆ Resolve de forma parcial o problema					
X Desaconselhado		■ Melhorias futuras possivelmente dará uma solução					

Fonte: adaptado de [43].

Outro ponto de análise fundamental é o preço da implementação dessas tecnologias. Para tecnologias como IEEE 802.11, 4G e 5G a implementação pode ser relativamente barata se já existir a infraestrutura necessária. Caso não exista, pode ser inviável a realização do projeto devido aos custos para implementação da rede. Como mencionado anteriormente, uma vantagem da rede LoRa é que pode ser criada uma rede particular, possibilitando criar uma rede de sensores sem fio em lugares em que essas outras tecnologias não alcançam com um preço viável.

A tecnologia Bluetooth Low Energy é uma tecnologia muito barata e disponível em comparação às outras tecnologias, porém tem sua variedade de aplicações restrita. As tecnologias ZigBee, WirelessHART e ISA100.11a, possuem um custo baixo de implementação quando comparadas às demais tecnologias. A tecnologia LiFi ainda não possui produtos comerciais e por isso não pode ter seu custo estimado em relação às outras tecnologias. É importante destacar que existe uma escolha a se fazer entre as tecnologias, cada tecnologia se comporta melhor em um cenário. A diversidade das relações entre variáveis técnicas e econômicas torna o processo de escolha da melhor tecnologia algo complexo.

7 CONCLUSÃO

Em êxito, as redes de sensores sem fio (RSSF) desempenham um papel crucial na transformação da Indústria 4.0, possibilitando um ambiente conectado e inteligente. A integração de RSSF na indústria moderna abre portas para uma série de benefícios, desde o monitoramento em tempo real até a otimização de processos e a tomada de decisões baseada em dados.

Ao longo desta pesquisa, ficou claro que a tecnologia RSSF oferece uma solução eficiente para a coleta de dados em ambientes industriais, superando desafios tradicionais como cabeamento complexo e limitações geográficas. A capacidade de implantar sensores sem fio em larga escala, monitorando condições operacionais e coletando dados de forma distribuída, é uma contribuição significativa para a evolução da indústria.

Os benefícios das RSSF na Indústria 4.0 incluem melhorias tangíveis na eficiência operacional, reduzir custos de manutenção, prevenção proativa de falhas, e a criação de ambientes de produção mais flexíveis e adaptáveis. A coleta de dados em tempo real permite uma análise mais precisa e, portanto, uma tomada de decisão mais informada.

Além disso, ao considerar a segurança e a escalabilidade das RSSF, fica evidente que essa tecnologia está bem alinhada com as demandas da Indústria 4.0. A implementação adequada de protocolos de segurança garante a integridade e a confidencialidade dos dados transmitidos, enquanto a flexibilidade da arquitetura permite a expansão conforme as necessidades evoluem.

No entanto, é essencial destacar que, embora as RSSF ofereçam muitos benefícios, é crucial considerar desafios potenciais, como a vida útil das baterias dos sensores, a interoperabilidade de dispositivos e padrões, e a necessidade contínua de atualizações de segurança para proteger contra ameaças em evolução.

Em última análise, ao adotar as RSSF na Indústria 4.0, as organizações podem alcançar uma transformação substancial em suas operações, promovendo a eficiência, a flexibilidade e a competitividade. O papel das RSSF na revolução industrial atual é claro, oferecendo um caminho promissor para um futuro onde a conectividade inteligente impulsiona a excelência operacional e impulsiona a inovação na indústria.

8 REFERÊNCIAS

Computer Networks: A Systems Approach - PETERSON, Larry L.; DAVIE, Bruce S. TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols - W. Richard Stevens

Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/assuntos/industria4-0_cits_ahk.pdf>.

Acesso 15 de agosto 2023

Disponível em: <<https://www.abdi.com.br/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil/>>. Acesso em: 15 de agosto 2023

Gandara, R., Alaydrus, M. "Analysis of the IEEE 802.15.4 Protocol with Rabbit Encryption Algorithm for Industrial Applications in Oil and Gas Sector". 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, Padang, Indonesia, 2019.

Candell, R., Kashef, M., Liu, Y., Lee, K., Foufou, S. "Industrial Wireless Systems Guidelines". IEEE Industrial Electronics Magazine. Dez 2018.

Azeez, et al. "Wireless Indoor Localization Systems and Techniques: Survey and Comparative Study". Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2016.

Javadi, S. H., Moosaei, H., Ciunzo, D. " Learning Wireless Sensor Networks for Source Localization. Sensors. 2 Fev. 2019.

Stallings, W. Wireless Communications and Networks. 23 Ago. 2001.

Palais, C. J., Fiber Optic Communications. 20 Set. 2004

Dixit, S., Prasad, R. Backhaul Strategies for Broadband Technologies. 2016

Wang, Z., Wang, Q., Hao, X., "The Design of the Remote Water Quality Monitoring System Based on WSN," 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, 2009, pp. 1-4.

Tang, X., Wang, X., Cattley, R., Gu, F., Ball, A.D. Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review. *Sensors* 2018.

Ikram, Waqas & Thornhill, Nina. Wireless communication in process automation: A survey of opportunities, requirements, concerns and challenges. *IET Seminar Digest*. 2010.

D. Brevi, L. Pilosu, F. Fileppo and R. Scopigno, "Viability and guidelines for the effective integration of consumer WiFi in industrial plants," International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems, Moscow, 2010.

Lee, J., Su, Y., Shen, C., "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, 2007.

Nowak, D., Krzak, Łukasz & Worek, Cezary. "Integration of ZigBee and IEC 61850 networks for a substation automation system". *ISGTEurope*. 2013.

Nixon, M., "A Comparison of WirelessHART™ and ISA100.11a". Emerson Process Management.

Song, et al. "WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control". Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. 2008.

Silva, I., Lopes, D., Duarte, A., Guedes, L. A., Aquino, L., Saito, K. Tecnologias emergentes para redes industriais sem fio: WirelessHART vs ISA100.11a. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP. 2013.

Supramaniam, T., Ibrahim, R., Hassan S., Bingi, K. "Development of WirelessHART adapter with industrial transmitter for process monitoring," 2017 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), Kuching, 2017.

F. P. Rezha and S. Y. Shin, "Performance Analysis of ISA100.11a Under Interference From an IEEE 802.11b Wireless Network," in IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014.

Yang, and Michael Sourya LTE Physical Layer Performance Analysis. National Institute of Standards and Technology. 1 Dez 2013.

DRAFT LTE Architecture Overview and Security Analysis. NIST IR 8071. Abr. 2016.

Telefonia Celular Digital - Livro - Editora Érica - MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR - ISBN 8536500174. [Online]. Disponível em: http://www.relativa.com.br/livros_template.asp?Codigo_Produto=6633&Livro=Telefonia-Celular-Digital. Acessado em: 11 de janeiro 2024

Carrillo, D., Seki, J. "Rural area deployment of internet of things connectivity: LTE and LoRaWAN case study". 2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Cusco, 2017.

Disponível em: <<https://fia.com.br/blog/internet-5g/>> Acesso em: 11 de janeiro 2024

I, C., etl al, "Toward Green and Soft: A 5G Perspective", China Mobile Research Institute. 5G wireless communication systems:prospects and challenges.

3GPP, "Study on Communication for Automation in Vertical Domains", 3GPP TR 22.804, Draft of Release 16, v1.0.0, Dez 2017.

Disponível em: <<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-network-infrastructure/>>. Acesso em 12 de janeiro 2024

Jones, D. Verizon to Start Fixed 5G Customer Trials in April. LightReading. Disponível em: <<https://www.lightreading.com/mobile/5g/verizon-to-start-fixed-5g-customer-trials-in-april/d/d-id/730487>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

Disponível em: <<https://embarcados.com.br/o-que-e-5g-caracteristicas-aplicacoes/>>. Acesso em: 12 janeiro 2024.

De Carvalho, E., Bjornson, E., Sorensen, J.H., Popovski, P., Larsson, E.G. “Random access protocols for massive MIMO”. IEEE Communications Magazine. 2017.

A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. Sensors. Nov 2018.

Sanchez-Iborra, et al. Tracking and Monitoring System Based on LoRa Technology for Lightweight Boats. Electronics. 2018.

Carvalho, P., Carvalho, J., Pereira, A. LI-FI (LIGHT-FIDELITY): UMA LUZ NA EVOLUÇÃO DAS COMUNICAÇÕES. CES Revista. Dez 2015.

EENews Europe. “Li-Fi passes industrial test with BMW's robotic tools”. 2018. Disponível em: <<https://www.eenewseurope.com/news/li-fi-passes-industrial-test-bmws-robotic-tools#>>. Acesso em: 13 de janeiro 2024.

G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, March 2000, doi: 10.1109/49.840210.

Ouadou, M., Zytoune, O., Aboutajdine, D., Hillali, Y., Menhaj-Rivenq, A. “Improved Cluster-tree Topology Adapted for Indoor environment in Zigbee Sensor Network”. Procedia Computer Science, Volume 94, 2016.

Disponível em: <<https://focusconsultoria.net/wireless-fidelity-sabe-o-que-e-isso/>>. Acesso em: 13 de janeiro 2024

Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/josemacedo/disciplinas/2019/2019.2/09-redes-ieee-802.15.1-bluetooth>>. Acesso: 13 de janeiro 2024.

Ergen, S., “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary”. Disponível em: <<http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/707/papers/zigbee.pdf>>. Acesso em: 13 janeiro 2024.

Cuthbertson, A. “LiFi internet breakthrough: 224Gbps connection broadcast with an LED bulb”. 2015. Disponível em: <<https://www.ibtimes.co.uk/lifi-internet-breakthrough-224gbps-connection-broadcast-ledbulb-1488204>>. Acesso em: 13 de janeiro 2024.

Candell, R., Hany, M., Lee, K., Liu, Y., Quimby, J., et al. “Guide to Industrial Wireless Systems Deployments”, NIST Advanced Manufacturing Series 300-4, abr. 2018.

Carvalho, T., dos Anjos, F., ”Topologias de Redes ZigBee”. UFRJ. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/07_1/zigbee/topologias.html>. Acesso em: 13 de janeiro 2024.

Loureiro, A., Nogueira, J., Ruiz, L., Mini, R., Nakamura, E., et al. “Redes de Sensores Sem Fio”. Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais.

Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/~linnyer/minicursoSBRC2003.pdf>>. Acesso em: 13 de janeiro 2024.

Chandran, Sarat. IMS VoLTE Architecture. 3GLTEInfo (on-line). Disponível em: <http://www.3glteinfo.com/ims-voltearchitecture/>. Acesso em: 13 de janeiro 2024.