

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
ENGENHARIA ELETRÔNICA

Eduardo Lessmann Ronchi

**Análise de redes de comunicação sem fio para aplicações industriais**

Florianópolis

2020



Eduardo Lessmann Ronchi

**Análise de redes de comunicação sem fio para aplicações industriais**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ronchi, Eduardo

Análise de redes de comunicação sem fio para aplicações industriais / Eduardo Ronchi ; orientador, Jean Viane Leite, 2020.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Eletrônica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Indústria 4.0. 3. Redes de comunicação sem fio. 4. IoT. I. Viane Leite, Jean. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Eletrônica. III. Título.



Eduardo Lessmann Ronchi

**Análise de redes de comunicação sem fio para aplicações industriais**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica

Florianópolis, 03 de agosto de 2020.



Documento assinado digitalmente  
Fernando Rangel de Sousa  
Data: 26/08/2020 18:36:55-0300  
CPF: 884.649.114-91

---

Prof. Fernando Rangel de Sousa, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Jean Viane Leite  
Data: 26/08/2020 17:22:34-0300  
CPF: 003.474.909-80

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Orientador  
UFSC



Documento assinado digitalmente  
Jefferson Luiz Brum Marques  
Data: 26/08/2020 17:33:24-0300  
CPF: 457.624.060-91

---

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Dr.  
Avaliador  
UFSC



Documento assinado digitalmente  
Carlos Aurelio Faria da Rocha  
Data: 26/08/2020 17:29:55-0300  
CPF: 060.075.032-91

---

Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha, Dr.  
Avaliador  
UFSC

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e família.





## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Universidade Federal de Santa Catarina e aos professores que me proporcionaram um ensino de qualidade.

Gostaria de agradecer aos meus pais e minha família. Gostaria de agradecer também à minha namorada Ana Beatriz por estar sempre ao meu lado durante a graduação.



## RESUMO

A automação de processos industriais com redes sem fio tem recebido grande atenção e interesse nos últimos anos devido às suas vantagens de baixo custo e alta flexibilidade sobre as redes com fio tradicionais. Redes de sensores sem fio industrial tem um grande potencial para melhorar o monitoramento e controle de vários processos e equipamentos em automação distribuída e sistemas por causa dos avanços em redes sem fio. Este trabalho discute diversas tecnologias para aplicação na indústria, desde monitoramento, controle de processos e transferência de dados. São descritas e explicadas tecnologias para uso em ambientes industriais, como ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, IEEE 802.11, IEEE 802.15, redes LTE (4G) e 5G. São elencados também os principais problemas encontrados em uma instalação de rede de sensores sem fio em indústrias, assim como o ciclo de implementação de uma rede e feito uma comparação entre protocolos de comunicação e capacidade de resolver os problemas e obstáculos para se implementar uma rede de sensores em ambiente industrial. Com isso, é apresentado uma matriz com os resultados e as comparações das tecnologias discutidas.

**Palavras-chave:** Rede industrial de sensores sem fio, Industrial IoT, Indústria 4.0, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, IEEE802.11, IEEE802.15.1.

## ABSTRACT

Automation with wireless networks has received a lot of interest in recent years due to its low cost advantages and high flexibility over traditional wired networks. Industrial wireless sensor networks have great potential to improve the monitoring and control of various processes and equipment in distributed automation and systems because of advances in wireless networks. This work discusses several technologies for application in the industry, from monitoring, process control and data transfer. Technologies for use in industrial environments are described and explained, such as ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, IEEE 802.11, IEEE 802.15, LTE (4G) and 5G networks. Also listed are the main problems found in a wireless sensor network installation in industries, as well as the implementation cycle of a network. A comparison is made between communication protocols and the ability to solve problems and obstacles in order to implement a sensor network in an industrial environment. Thus, a matrix is presented with the results and comparisons of the technologies discussed.

**Keywords:** Industrial wireless sensor network, Industrial IoT, Industry 4.0, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, IEEE802.11, IEEE802.15.1.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de comunicação OSI dividido em camadas responsáveis por cada parte da comunicação entre diferentes dispositivos.	20
Figura 2. Estrutura simplificada de um nó dividida por partes: transceptor de rádio, memória, processador, bateria e sensor.	21
Figura 3. Principais topologias de rede sem fio, estrela, árvore e malha e principais componentes de uma rede de sensores sem fio: nós, roteadores, <i>gateways</i> e servidores.	23
Figura 4. Princípios e pilares da Indústria 4.0.	25
Figura 5. Canal simplificado de rádio com a representação do elemento emissor da onda eletromagnética, a antena transmissora, e o elemento receptor, a antena receptora. Os caminhos de propagação são representados pelas setas e as interferências pelos segmentos perpendiculares aos caminhos de propagação.	30
Figura 6. Principais aplicações de redes sem fio na indústria e os principais domínios responsáveis pelas tecnologias em atuação.	31
Figura 7. Ciclo de implantação de uma rede de sensores sem fio dividido nas seguintes etapas: Definir objetivos, pesquisa na fábrica, seleção de candidatos, desenvolvimento de solução e implantação da rede.	35
Figura 8. Exemplo de organização de uma rede WirelessHART com dispositivos de campo, dispositivos portáteis, pontos de acesso, <i>gateway</i> , e gerentes de rede e segurança.	41
Figura 9. Organização de uma rede ISA100.11a composta por dispositivos I/O, dispositivos portáteis, roteadores, roteadores backbone e <i>gateway</i> com gerentes de sistema e segurança.	43
Figura 10. Organização de uma rede celular 4G LTE dividida em equipamento do usuário EU, E-UTRAN, EPC e Internet.	45
Figura 11. Organização da estrutura Non Stand Alone, onde a infraestrutura da tecnologia 4G E-UTRAN e EPC é aproveitada pelo 5G para uso em frequências de até 6 GHz.	46
Figura 12. Organização da arquitetura Stand Alone. Estrutura independente com infraestrutura NG-RAN e 5G Core e atua com frequências superiores a 24 GHz.	47
Figura 13. Diferentes cenários da tecnologia 5G: eMBB, mMTC e URLLC.	48
Figura 14. Organização da rede LoRaWAN composta por dispositivos finais LoRa, <i>gateway</i> , internet e servidores de aplicação.	49
Figura 15. 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.	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Domínios das tecnologias sem fio.	28
Tabela 2. Especificações das tecnologias IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1.	54
Tabela 3. Especificações das tecnologias de instrumentação.	55
Tabela 4. Tecnologias de longa distância.	57
Tabela 5. Comparativo entre aplicações Flow Based, Job Based e Remoto.	59
Tabela 6. Comparativo entre aplicações Segurança de Pessoal, Backhaul e Segurança.	60
Tabela 7. Comparativo entre aplicações rastreamento e manutenção.	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IWSN Industrial Wireless Sensor Network  
IoT Internet of Things  
ISA International Society of Automation  
LoRaWAN Long Range Wide Area Network  
LTE Long Term Evolution  
WLAN Rede Local Sem Fio (Wireless Local Area Network)  
WPAN Rede de Área Pessoal Sem Fio (Wireless Personal Area Network)  
WWAN Rede de Área Ampla Sem Fio (Wide Wireless Area Network)  
PAN Personal Area Network  
IR Infravermelho (Infrared)  
LoS Linha de Visão (Line of Sight)  
GSM Sistema Global Para Comunicações Móveis (Global System for Mobile Communications)  
EM Eletromagnética  
OSI Open Systems Interconnection  
ISO International Organization for Standardization  
MAC Controle de Acesso ao Meio (Medium Access Control)  
PHY Físico (Physical)  
IP Protocolo de Internet (Internet Protocol)  
API Interface de Programação de Aplicação (Application Programming Interface)  
FFD Dispositivo de Função Completa (Full Function Device)  
RFD Dispositivo de Função Reduzida (Reduced Function Device)  
ICS Sistema de Controle Industrial (Industrial Control System)  
BLE Bluetooth Baixa Energia (Bluetooth Low Energy)  
RF Radiofrequência  
IEM Interferência Eletromagnética  
SIS Sistema de Integração de Segurança  
SVM Máquina de Vetor de Suporte  
DCF Função de Coordenação Distribuída  
CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance  
RTS Request To Send  
CTS Clear To Send  
FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum  
DSSS Direct Sequence Spread Spectrum  
AP Access Point  
TDMA Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo  
AODV Ad Hoc on Demand Vector

HART Highway Addressable Remote Transducer  
ISM Industrial Scientific and Medical  
RFID Radio Frequency Identification  
QoS Quality of Service  
IPv6 Internet Protocol version 6  
6LoWPAN IPv6 over Low -Power Wireless Personal Area Networks  
UDP User Datagram Protocol  
DL Link de Dados (Data Link)  
I/O Entrada/Saída (In/Out)  
OFDM Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência  
MIMO Entrada Múltipla Saída Múltipla  
UE Equipamento do Usuário  
MCS Esquema de Modulação e Codificação  
SNR Razão Sinal Ruído (Signal to Noise Ratio)  
RAN Rede de Acesso via Rádio  
E-UTRAN Rede de Acesso Terrestre Universal Evoluída  
eNodeB Evolved Node B  
MME Mobility Management Entity  
EPC Núcleo de Pacote Evoluído  
SC-FDMA Portadora Única - Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência  
TDD Duplex por Divisão de Tempo  
FDD Duplex por Divisão de Frequência  
QPSK Quadrature Phase Shift Key  
QAM Quadrature Amplitude Modulation  
RRC Controle de Recursos de Rádio  
PDCP Protocolo de convergência de dados em pacotes  
RLC Radio Link Control  
NR New Radio  
NSA Non-Stand Alone  
SA Stand Alone  
eMBB Enhanced Mobile Broadband  
mMTC massive machine type communication  
URLLC Ultra-reliable and low latency communication  
ADR taxa de dados adaptativa (Adaptive Data Rate)  
UDP User Datagram Protocol  
CN Core Network  
AN Access Network  
MNO Operadora de Rede Celular (Mobile Network Operator)  
PCRF Policy and Charging Rules Function



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Objetivo Geral	19
1.1.1 Objetivos Específicos	19
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1 Modelo OSI	20
2.2 Estrutura de Rede de Sensores Sem Fio	21
2.3 Topologias de Rede	22
<b>3. INDÚSTRIA 4.0</b>	<b>24</b>
3.1 Indústria 4.0 no Brasil	25
3.2 Aplicações	26
3.3 Indústria 4.0 e Redes de Sensores Sem Fio	26
<b>4. TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO</b>	<b>28</b>
4.1 Fundamentos da tecnologia sem fio para Indústria	28
4.1.1 Tecnologias Sem Fio	28
4.2 Princípios da tecnologia sem fio	29
4.2.1 Comunicação Por Rádio Frequência	29
4.4 Principais problemas das redes de sensores sem fios industriais	30
4.4.1 Aplicações	30
4.4.1.1 Instrumentação	31
4.4.1.2 Segurança de Pessoal	32
4.4.1.3 Conectividade Backhaul	32
4.4.1.4 Rastreamento	32
4.4.1.5 Segurança e Vigilância	32
4.4.1.6 Ativos com localização Remota	33
4.4.1.7 Suporte e Manutenção	33
4.5 Critérios de avaliação	33
4.6 Ciclo de implantação de rede de sensores sem fio	34
<b>5. PADRÕES ATUAIS E PRODUTOS</b>	<b>36</b>
5.1 Casa e Escritório	36
5.1.1 Wireless-Fidelity - WiFi	36
5.1.1.1 Princípio de funcionamento	36
5.1.1.2 Aplicações	37
5.1.2 Bluetooth Low Energy (BLE)	38
5.1.2.1 Aplicações	38

	18
5.2 Instrumentação	39
5.2.1 ZigBee	39
5.2.1.1 Aplicações	40
5.2.2 WirelessHART	40
5.2.2.1 Aplicações	41
5.2.3 ISA 100.11a	42
5.2.3.1 Aplicações	43
5.4 Longas Distâncias	43
5.4.1 Tecnologia LTE 4G	43
5.4.1.1 Princípios e conceitos da tecnologia 4G	44
5.4.1.1 Aplicações	45
5.4.2 Tecnologia 5G	45
5.4.2.1 Cenários e Aplicações	47
5.4.3 LoRa	48
5.4.3.1 Princípio de funcionamento	49
5.4.3.2 Aplicações	50
5.5 Light Fidelity LiFi	51
<b>6. COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS</b>	<b>53</b>
6.1 Tecnologias Casa e Escritório	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
<b>7. CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
<b>8. REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 é uma realidade nos dias atuais. O mundo está buscando cada vez mais informação e conhecimento. A competição entre indústrias e mercados está cada vez mais acirrada, neste contexto as indústrias estão se tornando inteligentes e é do interesse de muitos empresários, cientistas e pesquisadores conseguir melhorar a produção industrial e a efetividade das operações industriais.

Sempre em busca de melhores resultados, tradicionalmente, as indústrias tinham cabos sendo usados em seus processos de automação, porém, eles são muito caros para implantação e manutenção. Então surgiu uma necessidade para automatização de produção e sistemas de uma maneira que o custo não fosse tão alto [1]. Com essa necessidade de automação de processos com baixos custos foram surgindo as redes de sensores sem fio voltada para a indústria e foram abertas diversas possibilidades de aplicações.

Neste trabalho serão discutidos diversas tecnologias capazes de criar uma rede de sensores sem fio para utilização nas indústrias. Serão cobertos tanto protocolos criados com o objetivo de atuar na indústria como ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a e LoRa quanto tecnologias que não foram criadas com o objetivo de atender as necessidades das indústrias, mas foram adaptadas para suas aplicações como WiFi, Bluetooth Low Energy, 4G LTE, 5G e LiFi. Finalmente é feita uma comparação entre todas as tecnologias e as principais aplicações da indústria.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo fazer um apanhado geral das tecnologias disponíveis e em desenvolvimento no mercado de sistemas de comunicação sem fio para indústrias, assim como apresentar as principais dificuldades e desafios.

#### 1.1.1 Objetivos Específicos

Estudar tecnologias como IEEE 802.11, IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4, 4G, 5G, LoRa e LiFi com vistas às necessidades da indústria.

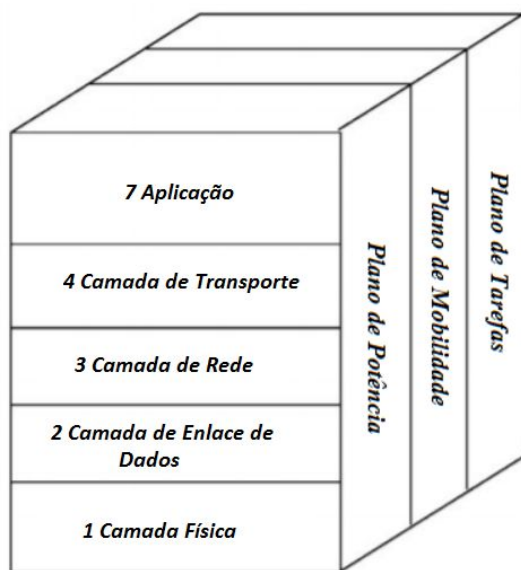
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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 com o objetivo de ser um modelo padrão para protocolos de comunicação entre diferentes tipos de sistemas. Dessa maneira, diferentes fabricantes conseguem definir diretrizes 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 [2]. A Figura 1 representa esse modelo.

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



**Fonte: adaptado de [3].**

As camadas no modelo OSI servem para facilitar 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

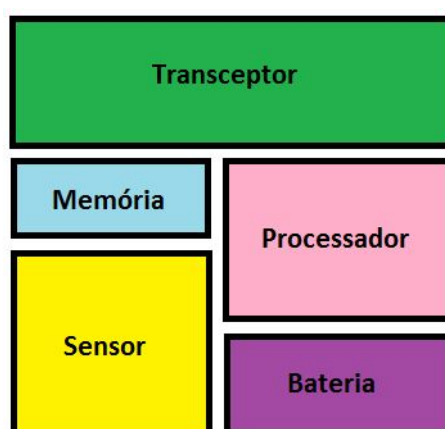
de um sinal e controle de acesso ao meio (MAC). A camada de rede, camada 3, é responsável pelo endereçamento lógico, roteamento e controle de tráfego. A camada 4, camada de transporte, é a camada responsável pela transferência de dados entre duas máquinas, independente da aplicação usada e do tipo, topologia ou configuração das redes físicas existentes entre elas [3].

As camadas 5 e 6 nem sempre 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 [3].

## 2.2 ESTRUTURA DE REDE DE SENSORES SEM FIO

As redes de sensores sem fios podem ser divididas, em geral, em dois dispositivos: nós sensores e *gateways*. Segundo [4], os nós sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando estes nós são dispostos em rede, formam as redes de sensores. Os nós coletam dados via sensores, processam dados localmente ou coordenadamente entre vizinhos podendo enviar a informação para um *gateway*. Na Figura 2 pode ser vista a estrutura básica de um nó.

**Figura 2. Estrutura simplificada de um nó dividida por partes: transceptor de rádio, memória, processador, bateria e sensor.**



Fonte: adaptado de [4].

*Gateways* são equipamentos capazes de fazer a comunicação com outros tipos de redes, como servidores ou Internet. Segundo [4], mensagens percorrem a rede de sensores até chegar a um *gateway* que irá encaminhá-las, por uma rede como a Internet, até um computador onde roda a aplicação. O usuário pode então acessar as informações disponíveis na Internet ou em um servidor privado.

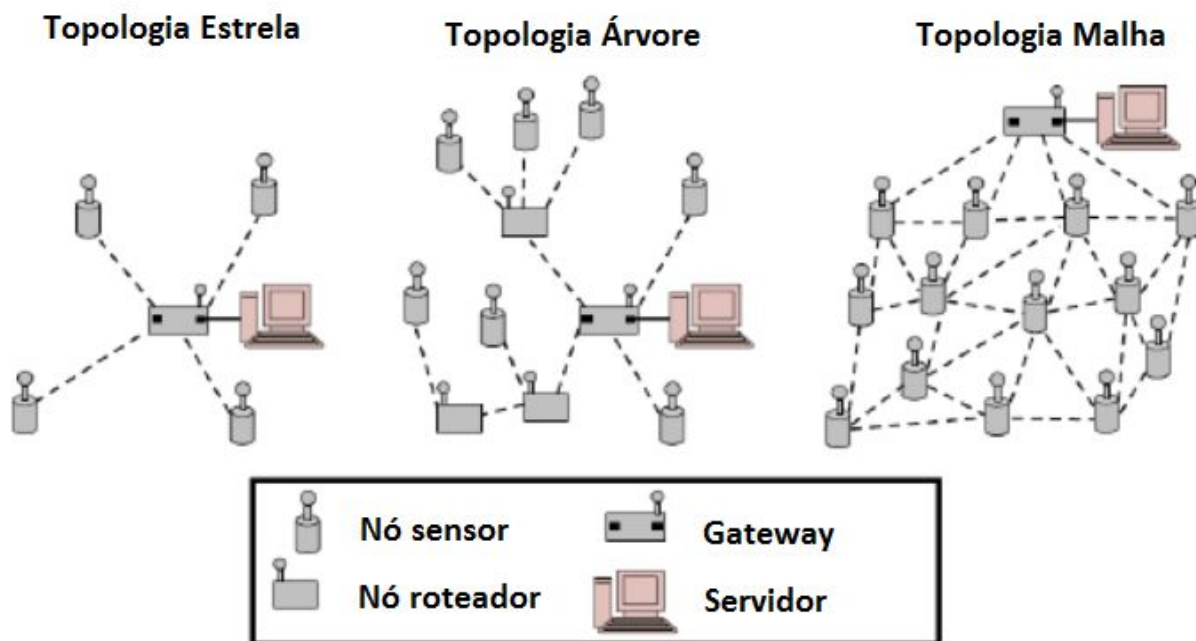
Existem diversos tipos de nós e eles podem ser arrançados de diferentes maneiras dentro de uma rede. Na seção 2.3 Topologias de Redes serão mostradas algumas das principais topologias de redes sem fio.

### 2.3 TOPOLOGIAS DE REDE

Dependendo do design da rede, os nós podem ser organizados em diferentes topologias. Uma topologia define como os nós dentro de uma rede são organizados e existem várias topologias de rede. As principais topologias são: estrela, árvore e malha [5]. Na Figura 3 é mostrada uma representação esquemática dessas topologias.

A topologia estrela é a mais simples, os nós sensores enviam informação direto para o *gateway*. Essa topologia tende a ser mais barata e consumir menos energia, porque os nós finais apenas transmitem mensagens para o *gateway*, por isso possuem um alcance menor. A topologia árvore possibilita o aumento do alcance da rede, com nós roteadores fazendo a comunicação entre os nós sensores e o *gateway*. Essa função extra faz com que os nós consumam mais energia e, caso um nó roteador fique fora de operação, os nós finais dependentes perdem a comunicação. A topologia malha permite que os nós transmitam dados entre si, possibilitando diversas rotas de comunicação com o *gateway*, minimizando falhas na comunicação. Entretanto, essa configuração aumenta significativamente a complexidade da rede, há um maior consumo de energia pelos nós, aumenta-se a distância até o *gateway* e a quantidade de saltos para transmitir a informação [6].

Figura 3. Principais topologias de rede sem fio, estrela, árvore e malha e principais componentes de uma rede de sensores sem fio: nós, roteadores, *gateways* e servidores.



Fonte: adaptado de [6].

### 3. INDÚSTRIA 4.0

Recentemente têm-se encontrado de forma recorrente o termo Indústria 4.0 nos meios acadêmicos, empresarial, político e científico. Trata-se de uma evolução esperada para os processos industriais, intimamente relacionada aos avanços tecnológicos. O termo faz alusão ao que pode ser considerada a quarta revolução industrial [7].

O termo Indústria 4.0 foi cunhado em 2012 e se baseia em seis princípios: processamento em tempo real, onde a aquisição e o processamento de dados ocorrem simultaneamente, auxiliando na tomada de decisão e no controle de processos; virtualização, onde é concebido um modelo virtual com a localização de todos os ativos da fábrica, auxiliando na logística e rastreamento de pessoas e materiais; descentralização, o que torna as máquinas ou processos mais independentes, com capacidade de auto ajuste; orientação a serviços, onde se prevê arquiteturas de softwares orientados a serviços, visando integrar tecnologias, ferramentas e serviços diversos para soluções na indústria; modularidade, fazendo com que os processos possam ser modificados com facilidade, aumentando ou reduzindo a capacidade; interoperabilidade, onde máquinas e pessoas possam se comunicar e trocar informações de maneira simples [8].

Os princípios básicos da indústria 4.0 são consequência dos seus pilares fundamentais e podem ser descritos como: internet das coisas IoT, conceito em que diversos dispositivos eletrônicos estão conectados à internet, desde aparelhos domésticos como televisores, celulares e lâmpadas a equipamentos industriais, gerando relatórios e produzindo dados; *big data*, que corresponde a enorme quantidade de dados sendo gerados e armazenados pela rede; inteligência artificial, que faz uso das informações coletadas pelo big data para treinar comportamentos e ações futuras de equipamentos inteligentes; segurança da informação, com a grande quantidade de dados geradas a segurança dos dados é extremamente importante, principalmente para garantir que os dados sigilosos não sejam vazados para concorrentes ou pessoas com má índole; computação na nuvem, aborda questões de armazenamento de dados na nuvem, servidores capazes de disponibilizarem dados pela internet em diversas plataformas de maneira muito simples e rápida [7]. Na Figura 4 podem ser vistos, de maneira esquemática, os princípios e os pilares da indústria 4.0.



**Figura 4. Princípios e pilares da Indústria 4.0.**

**Fonte: adaptado de [9].**

### 3.1 INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL

A indústria 4.0 ainda está crescendo no Brasil e possui diversos desafios e expectativas. Segundo [10], o Brasil possui menos de 10% do PIB relacionado a indústrias de transformação, está em apenas 69º colocado no índice global de inovação, entre 2006 e 2016 caiu 7% a produtividade da indústria no país e caiu para 26º no Índice Global de Competitividade da Manufatura em 2016. Esses dados mostram que o cenário brasileiro não está pronto e existem diversas oportunidades para melhorar o desempenho e produções industriais.

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 [10].

Segundo [11] 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.

Outro benefício seria a redução de emissão de gases poluentes, que não impacta diretamente o orçamento, mas é um ganho importante.

### 3.2 APLICAÇÕES

O Brasil possui diversos projetos em andamento baseados na indústria 4.0. Um deles é o Agro 4.0, desenvolvido pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) com os Ministérios da Economia (ME), da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) com o objetivo de criar projetos com a difusão e adoção da indústria 4.0 no setor agropecuário. O projeto é dividido nas seguintes etapas: insumos, com aplicações no controle do ambiente, monitoramento de equipamentos e materiais e manutenção preditiva; produção e colheita, com uso eficiente dos insumos e recursos naturais como monitoramento meteorológico, gestão das máquinas e controle de pragas; processamento, com rastreamento e monitoramento de materiais, com manutenção preditiva e monitoramento da qualidade; integração da cadeia de valor, com previsão e antecipação de demanda, gestão de insumos e monitoramento da origem à entrega do produto [12].

Outra aplicação em desenvolvimento é a Fronteira Tech, uma aplicação que faz a integração de tecnologias IoT e inteligência artificial para monitoramento da fronteira entre o Brasil e o Paraguai, na Ponte da Amizade em Foz do Iguaçu. O objetivo é melhorar a segurança com o monitoramento de veículos, placas, reconhecimento facial, sensores de tiro e reconhecimento de padrões com uso de inteligência artificial [13].

### 3.3 *INDÚSTRIA 4.0 E REDES DE SENSORES SEM FIO*

Com a alta capacidade de escalabilidade, monitoramento de atividades e grande autonomia energética as redes de sensores sem fio representam grande importância do desenvolvimento da indústria 4.0, possibilitando maior flexibilidade, praticidade e redução de custos de atividades normalmente executadas usando sistemas com cabos. Na seção 4 serão discutidas diversas tecnologias de sensores de redes sem fio para serem usadas na indústria. As soluções com redes sem fio variam de pequenas áreas de espaço pessoal até grandes áreas como cobertura celular.

Em [14], são mostradas três aplicações divididas em três grupos diferentes. O primeiro grupo é de medição do meio ambiente, podendo ser medido níveis de água, quantidade de gases no ambiente, sensores de fumaça e aplicações relacionadas. Nessa aplicação os autores mostram uma rede de sensores sem fio que faz a medição do nível de água dos rios para realizar a previsão de enchentes baseada nas medidas anteriores, com um pequeno número de nós eles conseguem monitorar uma grande cobertura de regiões com risco de enchente. O segundo grupo é o de medição de condição, que tem como função verificar a integridade de construções como prédios, pontes e de máquinas para auxiliar na manutenção. Nessa aplicação são implantadas redes de sensores sem fio em duas turbinas eólicas para o monitoramento da estrutura através da vibração produzida. O terceiro grupo é o de processos de automação, que oferece suporte para tomadas de decisão como quantidade de recursos disponíveis, demanda e níveis de eficiência e performance dos processos industriais. Nessa aplicação os autores descrevem o projeto, desenvolvimento e implantação de uma rede de sensores sem fio que melhora a eficiência hídrica na irrigação de campo localizado em regiões secas. Desta forma, com a informação de temperatura e umidade é possível controlar a irrigação consumindo água de forma eficiente.

## 4. TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

### 4.1 FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA SEM FIO PARA INDÚSTRIA

Nesta seção será detalhado alguns dos principais fundamentos que envolvem redes de sensores sem fio em ambiente industrial como diferentes tipos de redes sem fio e também alguns desafios.

#### 4.1.1 Tecnologias Sem Fio

Neste trabalho as diferentes tecnologias de redes sem fio serão divididas em três domínios: casa e escritório, onde fazem parte tecnologias que não foram criadas para ambientes industriais, mas seu uso foi adaptado para indústrias; instrumentação, que são tecnologias desenvolvidas especialmente para o uso da indústria; Longas Distâncias, tecnologias capazes de cobrir longas distâncias para o transporte de dados; Tecnologias promissoras, reúne tecnologias ainda em desenvolvimento. A Tabela 1 faz uma divisão e uma breve descrição entre os tipos de redes sem fios que serão abordadas ao longo deste trabalho.

**Tabela 1. Domínios das tecnologias sem fio.**

<b>Domínio</b>	<b>Descrição</b>
<b>Casa e Escritório</b>	Esta classe inclui os aparelhos encontrados em escritórios e casa, mas podem ser muito bem usados em ambientes industriais. São incluídos IEEE 802.11 e seus derivados. Bluetooth, IEEE 802.15.1, também entra nesta classe.
<b>Instrumentação</b>	São desta classe equipamentos desenvolvidos especialmente para a indústria. Padrões como IEEE 802.15.4 e <i>International Society of Automation</i> (ISA) 100.11a, WirelessHART e ZigBee fazem parte desta categoria.
<b>Longas distâncias</b>	Algumas aplicações necessitam transmitir dados sobre longas distâncias com o menor gasto de bateria possível. Tecnologias como LoRa, 4G e 5G fazem parte desta classe.
<b>Light Fidelity</b>	Nessa categoria encontra-se a tecnologia LiFi. Que ao invés de utilizar ondas de rádio para fazer a comunicação usa ondas eletromagnéticas através da luz visível, ultravioleta e infravermelho.

**Fonte: adaptado de [15].**

## 4.2 PRINCÍPIOS DA TECNOLOGIA SEM FIO

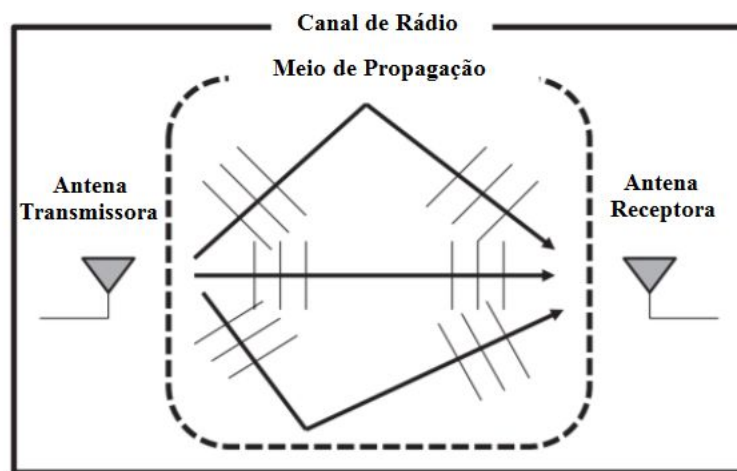
Nesta subseção serão apresentados alguns fundamentos e aspectos técnicos das tecnologias sem fio.

### 4.2.1 Comunicação Por Rádio Frequência

A comunicação por radiofrequência (RF) é usada para descrever qualquer forma de comunicação que use ondas eletromagnéticas em um espectro eletromagnético que se estende de 3 kHz a 300 GHz. A maioria das comunicações ocorrem entre 300 MHz e 6 GHz. Na comunicação por RF, um sinal elétrico oscilante é modulado de acordo com a informação que está sendo transmitida. O sinal elétrico é convertido em campos elétricos e magnéticos que se propagam como ondas no ar [15].

Objetos no ambiente podem afetar o comportamento das ondas à medida que elas se propagam pelo meio. Quando a energia de radiofrequência é transmitida, objetos no ambiente podem obstruir, atenuar ou refletir as ondas RF. As reflexões contribuem para um fenômeno conhecido como caminhos múltiplos. As arestas dos objetos também podem resultar em difração, mesmo que exista um caminho direto livre. Nos dispositivos receptores são detectados e decodificados em informações úteis a energia recebida das ondas eletromagnéticas. Reflexões de caminhos múltiplos podem resultar em interferência e perda de informações significativas, mesmo que a potência do sinal seja alta [16]. É mostrado na Figura 5 um modelo simplificado de um canal de rádio.

**Figura 5. Canal simplificado de rádio com a representação do elemento emissor da onda eletromagnética, a antena transmissora, e o elemento receptor, a antena receptora. Os caminhos de propagação são representados pelas setas e as interferências pelos segmentos perpendiculares aos caminhos de propagação.**



**Fonte: adaptado de [16].**

O sinal propagado pelo meio também pode sofrer interferência eletromagnética IEM. Ela está sempre presente nas comunicações sem fio. A IEM causa perturbações que podem chegar a interromper as comunicações. As causas de interferência eletromagnética podem ser de celulares com Wi-Fi ativado, fornos de microondas, motores e até bloqueadores de frequência intencionais [15].

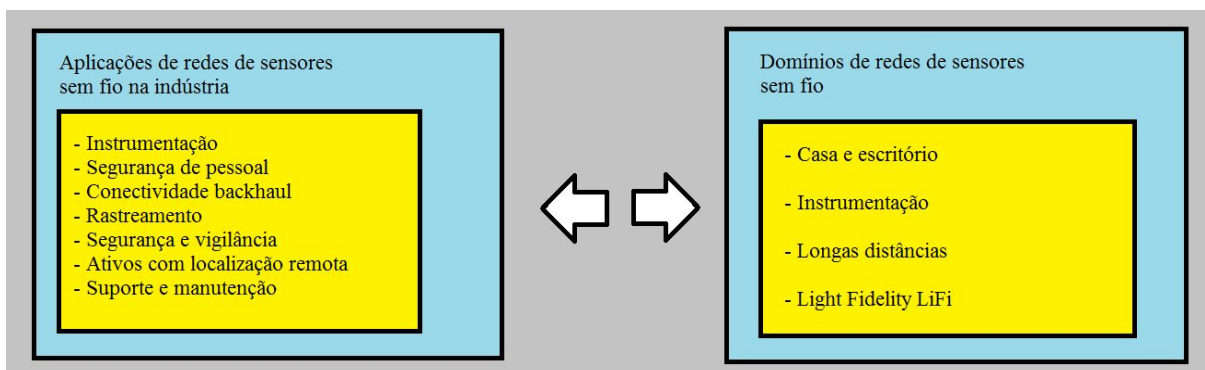
#### 4.4 PRINCIPAIS PROBLEMAS DAS REDES DE SENSORES SEM FIOS INDUSTRIAIS

O conhecimento dos problemas e das possíveis soluções de redes sem fio nas indústrias pode diminuir significativamente os desafios de selecionar e implantar sistemas sem fio. Serão apresentadas no decorrer desta subseção as aplicações industriais em que as tecnologias de rede sem fio podem ser implantadas [17].

##### 4.4.1 Aplicações

Existem diversos desafios em indústrias onde as redes de sensores sem fio podem atuar, proporcionando uma solução adequada. Na figura 6 estão listadas diversas aplicações que podem ser colocadas em prática dentro de indústrias.

**Figura 6. Principais aplicações de redes sem fio na indústria e os principais domínios responsáveis pelas tecnologias em atuação.**



**Fonte: adaptado de [15].**

#### 4.4.1.1 Instrumentação

A instrumentação é de suma importância nos processos industriais [17]. 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 [18], 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 m<sup>2</sup> e distância máxima de 184 m entre os nós. A latência máxima para aplicações de controle foi de 38 ms, abaixo de 100 ms que é o recomendado.

#### 4.4.1.2 *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 [17].

#### 4.4.1.3 *Conectividade Backhaul*

Segundo [17], a conectividade de backhaul são as transmissões de dados entre fábricas e centros de dados, entre vários edificios de uma planta e remotamente para a sede em diferentes localizações. Com isso, geralmente se transmite uma grande quantidade de dados. Em [19], é discutido uma visão geral dos desafios técnicos enfrentados pelas operadoras sem fio no fornecimento de *backhaul* de celular e examina-se a disponibilidade de novas soluções de tecnologia que podem enfrentar esses desafios.

#### 4.4.1.4 *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 [20], onde os autores apresentam diversas técnicas de localização utilizando redes sem fio, como técnicas de triangulação, técnica “Fingerprinting” e técnica de proximidade.

#### 4.4.1.5 *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 deseja-se usar cabos [17]. Em [21], 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.

#### *4.4.1.6 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 [17]. 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 [22], 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.

#### *4.4.1.7 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 [17]. Em [23], 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.

### 4.5 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 [17]: 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.

#### 4.6 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 [17]. O primeiro passo no processo é a identificação das necessidades. Cada empresa deve ter uma visão de por que é necessário 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 7. Ciclo de implantação de uma rede de sensores sem fio dividido nas seguintes etapas: Definir objetivos, pesquisa na fábrica, seleção de candidatos, desenvolvimento de solução e implantação da rede.**



**Fonte: adaptado de [17].**

## 5. PADRÕES ATUAIS E PRODUTOS

Existem vários segmentos de padrões para redes industriais sem fio. Nesta seção serão discutidas diversas tecnologias para a criação de rede de sensores sem fio. Primeiramente será discutido padrões de alcance casa e escritório, posteriormente sobre instrumentação, longa distância e tecnologias promissoras.

### 5.1 CASA E ESCRITÓRIO

Neste segmento são discutidas as tecnologias WiFi, baseado no padrão IEEE 802.11, e Bluetooth Low Energy, baseado no padrão IEEE 802.15.1. Apesar de serem tecnologias que não foram desenvolvidas diretamente para o uso em ambientes industriais, existem diversas aplicações em que seu uso pode ser eficaz.

#### 5.1.1 *Wireless-Fidelity* - WiFi

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 [24].

##### 5.1.1.1 *Princípio de funcionamento*

O WiFi possibilita uma conexão sem cabos de grande taxa de transferência de dados. Existem dois principais elementos na rede WiFi: o roteador e as antenas receptoras [25]. Os sinais de rádio são transmitidos pelo roteador para equipamentos que possuem placas de rede compatíveis, podendo ser equipamentos como computadores, celulares ou equipamentos personalizados para uso industrial.

No protocolo IEEE 802.11, o mecanismo fundamental de acesso ao meio é chamado de Função de Coordenação Distribuída (DCF). Este é um esquema de acesso aleatório,

baseado no protocolo de acesso múltiplo com detecção de portadora com protocolo CSMA/CA [26]. Existem diversas atualizações do protocolo IEEE 802.11 e o protocolo IEEE 802.11n é um dos mais comuns, podendo atingir taxas de até 150 Mb/s e alcance de até 100m.

O padrão IEEE 802.11 apresenta dois tipos de estrutura de redes sem fio. Esses tipos se diferenciam entre ter ou não um ponto de acesso. Os dois tipos de rede são: Ad Hoc e Infra Estruturada. As redes Ad Hoc estão ganhando importância para a utilização em topologias em malha, porém o uso mais comum de redes WiFi é na rede infraestruturada.

No modo ad-hoc os computadores se comunicam diretamente sem a ajuda de um intermediário. O modo ad-hoc pode ser útil para aplicações ponto a ponto temporárias, como quando dois usuários de laptop desejam trocar arquivos por Wi-Fi, porém apresentam limitações como segurança [25].

Uma rede infraestruturada é formada por estações que não se comunicam diretamente entre si. Elas necessitam de um nó central, chamado de ponto de acesso (AP). Isso cria a possibilidade das estações se comunicarem entre si ou com outros pontos de acesso, seja por uma rede cabeada ou não [27].

#### *5.1.1.2 Aplicações*

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 o advento 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 exemplo de aplicação industrial é o apresentado em [28]. 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.

### 5.1.2 Bluetooth Low Energy (BLE)

O Bluetooth Low Energy, baseado no padrão IEEE 802.15.1, é um sistema de rádio sem fio projetado para dispositivos baratos e de curto alcance [29]. O BLE é uma atualização do Bluetooth Basic Rate com melhor desempenho em ambientes industriais devido ao seu baixo consumo de energia. BLE opera na faixa de 2.4 GHz e sua rede pode ser dividida em dois principais componentes, o componente central e o componente periférico. O componente central geralmente possui maior capacidade de processamento, bateria e pode-se conectar a diversos periféricos. Os componentes periféricos são responsáveis por algum sensoriamento ou ação e geralmente necessitam de menos energia, porque não necessitam ficar o tempo inteiro transmitindo dados. Bluetooth pode chegar a taxas de transferência de até 1Mb/s e distâncias de até 10m [29].

O Bluetooth Low Energy possui dois meios de operação. Ele pode operar como advertising ou conectado a outro dispositivo. No tipo advertising o aparelho que está divulgando informações envia constantemente dados para outros dispositivos, mas não estabelece uma conexão direta. Já no modo conectado, dois dispositivos são conectados e executam troca de informações de maneira bidirecional [30].

#### 5.1.2.1 Aplicações

Tal qual as redes WiFi o BLE é geralmente usado para conectar dispositivos portáteis à curta distância. Seus usos principais estão na transmissão de dados entre dispositivos sensores aos nós da rede, geralmente aparelhos celulares ou *gateways*. A principal características dessa tecnologia são o baixo consumo de energia e um raio curto de atuação, usualmente até 10 m. A distância de comunicação tem sido ampliada e já se apresentam aplicações chegando a um raio de 100 m. Nas aplicações de IoT tem se encontrado um uso crescente desta tecnologia.

Em [31], é proposto um sistema de monitoramento de energia, eletricidade, temperatura e gás com o uso da tecnologia BLE. Os dados são enviados via bluetooth para celulares ou via *gateways* para a internet. Em [32], foi desenvolvido um sistema capaz de medir a temperatura do corpo usando sensores infravermelhos e enviar os dados em tempo real para um celular via Bluetooth Low Energy.

## 5.2 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.

### 5.2.1 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 [33].

O ZigBee é baseado no padrão IEEE 802.15.4, que especifica as camadas físicas PHY e de controle de acesso ao meio MAC [33]. A camada física é responsável por enviar os dados fornecidos pelas camadas mais altas através do canal de rádio. Opera nas frequências de 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz. É capaz de cobrir um raio de até 100 m e possui taxas máximas de transferência de 250 Kb/s. A camada de controle de acesso ao meio é do tipo CSMA/CA e é responsável pelo controle da transmissão dos dados.

A rede ZigBee possui três topologias: estrela, árvore e malha. Nas três topologias existe um nó coordenador de toda a rede, o qual é responsável por manter a rede em operação. Na topologia estrela os nós se comunicam direto com o coordenador. Na topologia árvore existe um nó roteador que faz a comunicação dos nós finais com o coordenador, aumentando a extensão da rede. Na topologia malha os nós podem comunicar-se entre si, aumentando os possíveis caminhos de comunicação até o coordenador [34].

Existem dois tipos de dispositivos ZigBee. Dependendo da capacidade de processamento de dados eles são divididos em dispositivo completo FFD ou dispositivo reduzido RFD. Os dispositivos FFDs podem ser usados para qualquer função na rede, enquanto os dispositivos RFDs estão limitados a nós finais com a função de captação e transmissão de dados [34].

### 5.2.1.1 Aplicações

Os sistemas ZigBee podem ser usados para monitoramento de processos de produção em fábricas. Em [35], os autores também destacaram que a seleção de frequência para o uso da rede ZigBee é de extrema importância e pode melhorar o alcance da rede. Em [34], foi desenvolvida uma rede ZigBee que faz o monitoramento e controle de máquinas através da leitura de um sensor de força. Os nós que fazem a leitura enviam para o coordenador da rede as informações e então enviam para um servidor externo.

### 5.2.2 WirelessHART

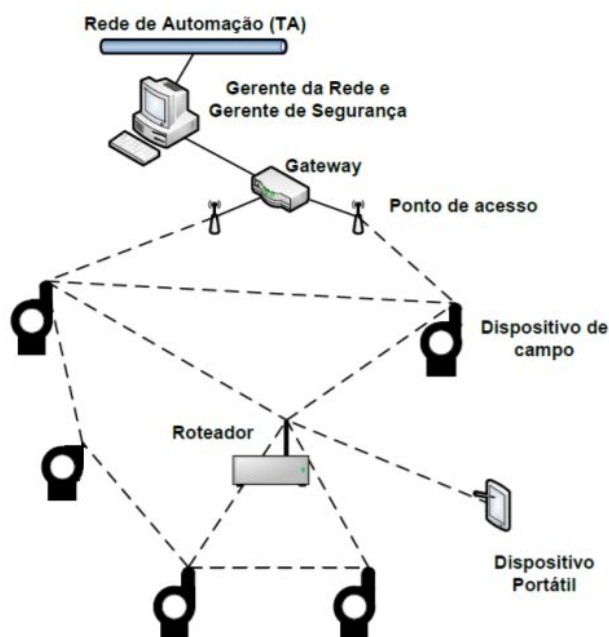
O wirelessHART é uma extensão do protocolo HART e foi projetado especificamente para monitoramento e controle de processos industriais. A tecnologia usa rádio baseado em IEEE 802.15.4, salto em frequência, caminhos de dados redundantes e mecanismos de repetição. As redes wirelessHART utilizam redes em malha, nas quais cada dispositivo é capaz de transmitir seus próprios dados, além de retransmitir informações de outros dispositivos na rede [36].

A camada física do WirelessHART é baseada no protocolo IEEE 802.15.4. Segundo [37], 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 8, 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 [37].



**Figura 8. 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 [39].**

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 [37].

#### 5.2.2.1 Aplicações

São usados majoritariamente no sensoriamento e automação de processos de produção. Em [38], foi projetado, implementado e avaliado um método de localização determinística usando WirelessHART. O sistema foi desenvolvido em software e funciona medindo a força do sinal recebido para estimar a distância. Em [40], 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.

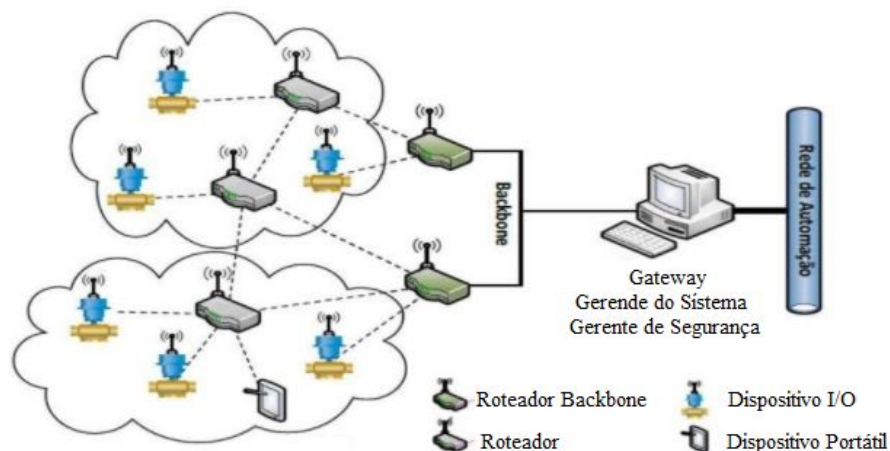
### 5.2.3 ISA 100.11a

ISA100.11a foi desenvolvido através da Sociedade Internacional de Automação (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 [36].

A tecnologia ISA100.11a possui sua camada física baseada no padrão IEEE 802.15.4. Opera na frequência de 2.4 GHz, possui alcance máximo de 100m e taxa máxima de transferência de dados de 250 kb/s. O controle de acesso ao meio é realizado pelo protocolo TDMA que oferece determinismo e salto em frequência [36].

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 [41]. A Figura 9 esquematiza a organização de uma rede ISA100.11a, composta por duas sub-redes, mostrando os diversos elementos I/O, backbone e *gateway*.

**Figura 9. 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 [39].**

### 5.2.3.1 Aplicações

As redes ISA100.11a são usualmente usadas no sensoriamento e automação de processos industriais. Em um exemplo de aplicação, em [42] os autores descrevem a utilização de uma rede ISA100.11a para fazer o monitoramento da pressão e temperatura de uma refinaria em um raio de 300m, dividida em duas sub-redes, substituindo leituras manuais que eram passíveis de erro.

## 5.4 LONGAS DISTÂNCIAS

Esta subseção 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 4G Long Term Evolution (LTE) apresenta um grande avanço nas redes de comunicação sem fio para atender às crescentes demandas por serviços multimídia de alta qualidade. 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 [43].

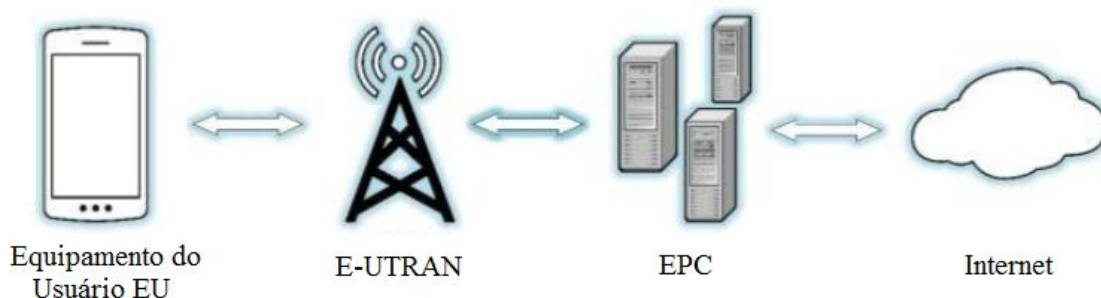
#### *5.4.1.1 Princípios e conceitos da tecnologia 4G*

Um dos conceitos fundamentais é a arquitetura geral da rede: dispositivos móveis (EUs) conectam-se a estações base (eNodeBs) por meio de sinais de rádio, e as estações base transmitem e recebem pacotes IP da rede e para a rede principal EPC. A rede principal possui um grande número de pontos de entrada e saída, incluindo a Internet e conexões com outras redes celulares. A Figura 10 ilustra esses conceitos de alto nível [44].

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 EU ser conectado [44].

O equipamento do usuário (EU), pode ser tanto um telefone celular comum quanto equipamentos que fazem comunicação máquina para máquina (M2M) [44]. A Rede de Acesso via Rádio (RAN) evoluiu ao longo do tempo para a 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 [44]. A Figura 10 mostra a configuração típica de uma rede 4G LTE.

**Figura 10. Organização de uma rede celular 4G LTE dividida em equipamento do usuário EU, E-UTRAN, EPC e Internet.**



**Fonte: adaptado de [44].**

De acordo com [44], 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.

#### 5.4.1.1 Aplicações

As aplicações industriais das redes 4G são variadas indo do controle de iluminação, controle de estacionamentos, 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 [45], 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

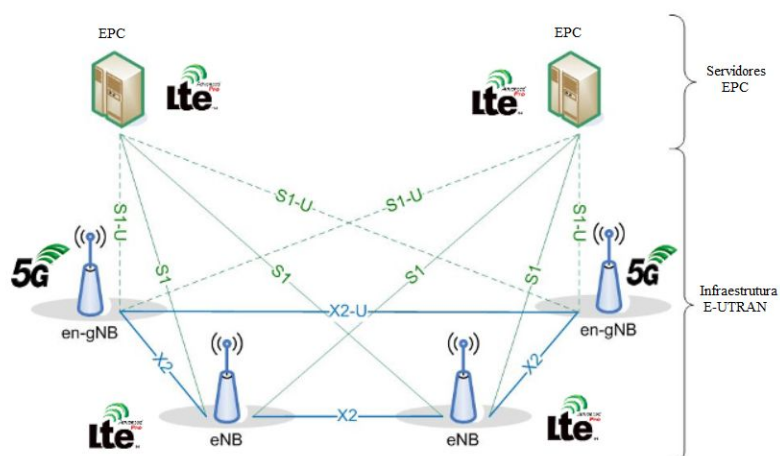
O 5G representa a quinta geração de tecnologia celular e foi projetado para oferecer suporte a diversos serviços com diferentes perfis de tráfego de dados, como alta taxa de

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 PDU são suportados, incluindo IPv4, IPv6, Ethernet e Unstructured [46].

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) [47].

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 [47]. 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.

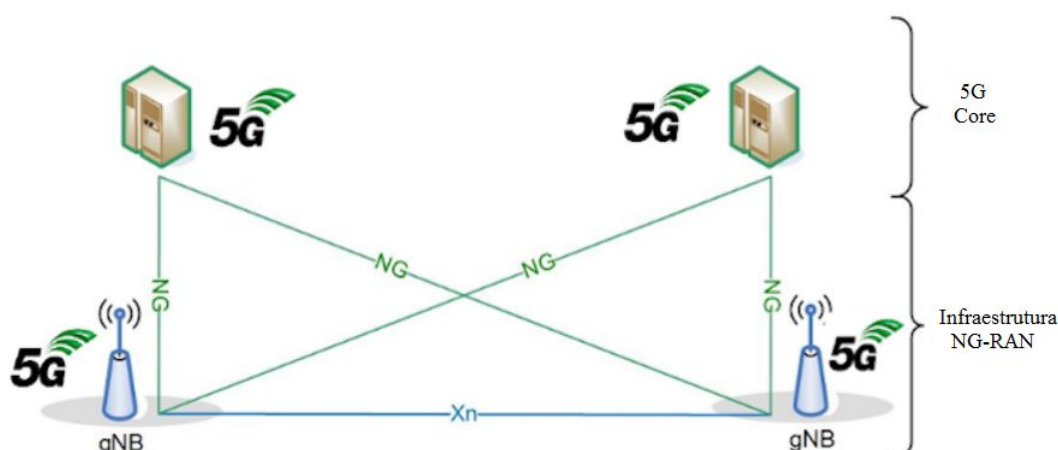
**Figura 11. Organização da estrutura Non Stand Alone, onde a infraestrutura da tecnologia 4G E-UTRAN e EPC é aproveitada pelo 5G para uso em frequências de até 6 GHz.**



Fonte: adaptado de [48].

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 [47]. 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 [49], 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 12. 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 [48].**

#### 5.4.2.1 Cenários e Aplicações

A tecnologia 5G possui três principais áreas de atuação: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), massive machine type communication (mMTC) e Ultra-reliable and low latency communication (URLLC). Na Figura 13 estão exemplificado estes cenários.

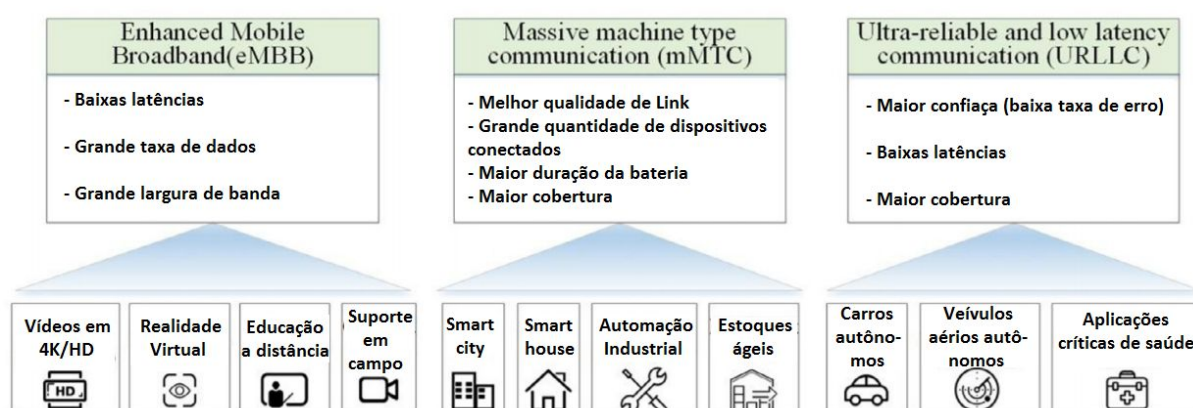
O primeiro cenário é o Enhanced Mobile Broadband (eMBB). O eMBB significa a mais alta experiência em comunicação e grande melhoria de desempenho em comparação com o cenário de serviço de banda larga móvel existente. As possíveis aplicações

representativas do eMBB incluem vídeo em 4K de alta definição (HD), realidade virtual, realidade aumentada, telemedicina, educação a distância, suporte externo, entre outros [50].

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 cidades inteligentes, casas inteligentes, informações industriais, armazenamento e logística inteligentes [50].

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 13 é possível ver os três cenários e suas aplicações [50].

**Figura 13. Diferentes cenários da tecnologia 5G: eMBB, mMTC e URLLC.**



Fonte: adaptado de [50].

#### 5.4.3 LoRa

O LoRa oferece comunicação de baixa potência e baixa taxa de dados e grande área de cobertura. De acordo com [51], o LoRa possibilita implantações de redes privadas e fácil

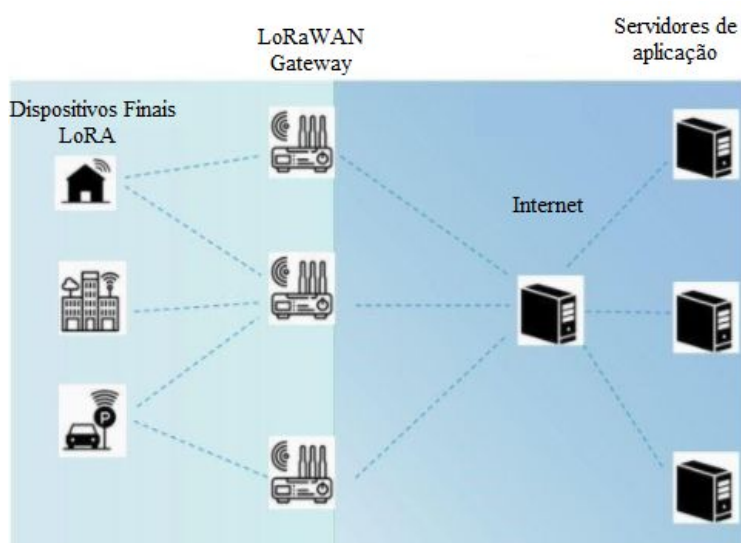


integração com várias plataformas de rede. Outra característica do LoRa são suas especificações de acesso aberto, o que tornou esta tecnologia competitiva.

#### 5.4.3.1 Princípio de funcionamento

A arquitetura de rede LoRaWAN possui uma topologia em estrela, na qual os dispositivos finais podem se comunicar apenas com *gateways* LoRaWAN e não diretamente entre si. Vários *gateways* estão conectados a um servidor de rede central. Os *gateways* LoRaWAN são responsáveis pelo encaminhamento de pacotes de dados brutos dos nós finais para o servidor de rede. O servidor de rede é responsável por enviar pacotes de downlink e comandos MAC para os dispositivos finais, se necessário. 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 14 [51].

**Figura 14. Organização da rede LoRaWAN composta por dispositivos finais LoRa, gateway, internet e servidores de aplicação.**



Fonte: [51].

O padrão LoRaWAN define três classes de dispositivos finais, Classes A, B e C. 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 [51].

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 [51].

#### 5.4.3.2 Aplicações

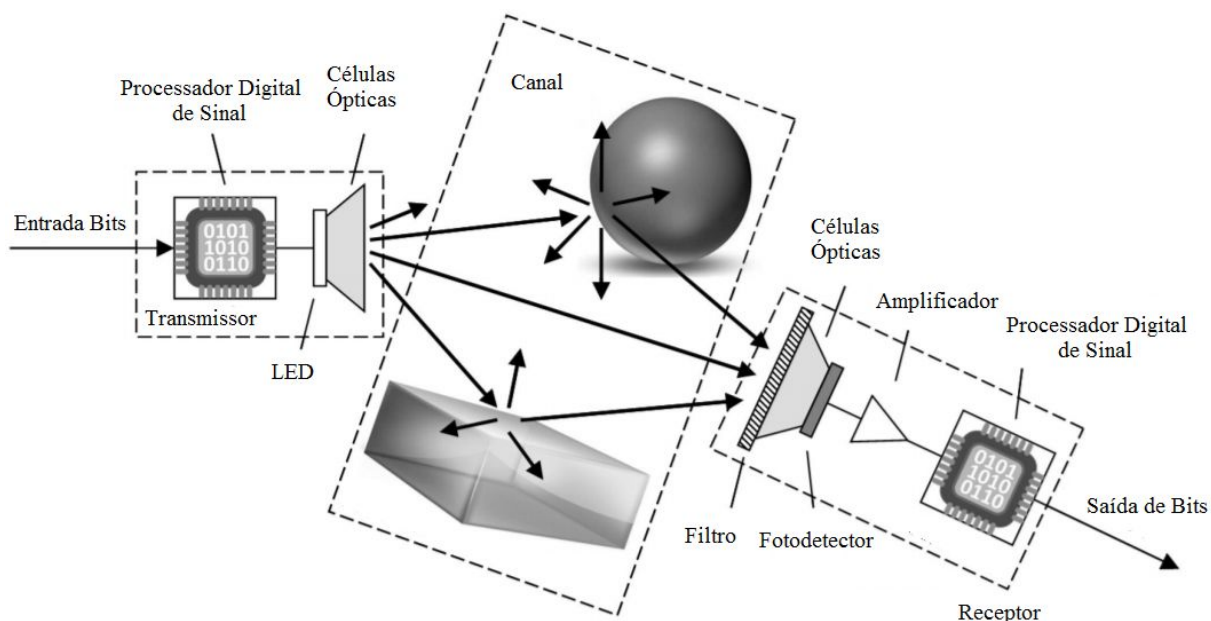
A tecnologia LoRa possibilita diversas vantagens em aplicações com grande área de cobertura, baixa quantidade de dados e baixo consumo energético. Em [52] é proposto uma rede em um hospital usando LoRa para o rastreamento e monitoramento de pacientes com problemas mentais. O sistema proposto é feito com um equipamento vestível LoRa em cada paciente e *gateways* LoRaWAN em hospitais e áreas públicas próximas e um servidor para acesso de médicos. Em [53] foi desenvolvido uma rede LoRa para o monitoramento e telemetria de três regatas em uma corrida realizada no porto de Vigo, na Espanha. Foram monitorada 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

Esta seção é dedicada a uma tecnologia ainda em desenvolvimento que possui um futuro bastante promissor. A tecnologia em destaque é o Light Fidelity ou LiFi, que utiliza a luz para propagação de dados. O LiFi é uma tecnologia em desenvolvimento capaz de transmitir quantidades significativas de dados através de diferentes espectros de luz: luz visível, ultravioleta e infravermelho. 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 [54].

Como podemos ver na Figura 15, 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 [55].

**Figura 15. 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 [55].**

Diversos testes com a tecnologia LiFi estão sendo feitos e os resultados são bastante promissores. Em [56], 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 m<sup>2</sup>. O sistema operou com taxas superiores a 100 Mb/s com latência de 5 ms. Em [57], foi desenvolvido um sistema com 8 lâmpadas de LED para a criação de uma rede LiFi em uma sala de aula. A luz emitida pelas lâmpadas foram recebidas por usbs adaptados que foram conectados nos computadores.

A tecnologia LiFi é bastante promissora e possui diversos benefícios como altas taxas de transferências de dados, ela não pode ser atrapalhada por outras ondas de rádio como wifi e as outras tecnologias mencionadas e é imune a interferência eletromagnética. Porém ela necessita de linha de visão entre o receptor e o transmissor e qualquer objeto entre os dois já torna inviável a comunicação [56].

## 6. COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS

Esta seção 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 CASA E ESCRITÓRIO

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 [26].

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 [26], 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, grande 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 [58], 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 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 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 2. Especificações das tecnologias IEEE 802.11 e IEEE 802.15.1.**

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

**Fonte: o autor.**

## 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 100 m, oferece diversidade de seleções de canais em três bandas: uma em 868 MHz (Europa); dez canais em 902-928 MHz (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 [59], 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 2.4 Ghz com taxa máxima de transmissão de 250kb/s. O alcance máximo é de 100 m, 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 [36], 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 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. 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 3. Especificações das tecnologias de instrumentação.**

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

**Fonte: o autor.**

### 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 [50], 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 1 ms 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 2.6 GHz enquanto o 5G opera com frequências superiores a 24 GHz 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, 433/868 MHz 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 [51], 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 4 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 4. Tecnologias de longa distância.**

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

**Fonte: o autor.**

#### 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 [60], 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

Com as informações acima é possível criar uma matriz mapeando as aplicações e os protocolos de redes de sensores sem fio mais utilizados pela indústria. As Tabela 5, 6 e 7 são adaptadas da referência [15] e resumem as tecnologias disponíveis para implementar uma rede industrial de sensores sem fio. Abaixo é apresentado 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 5 traz o resumo dessas aplicações.

**Tabela 5. 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
Domínio	Tecnologia	Flow Based	Job Based	Remoto				
Casa e escritório	WiFi	●	●	◆	●	◆	◆	◆
	BLE	⊗	⊗	⊗	⊗	◆	●	⊗
Instrumentação IEEE 802.15.4	ZigBee	◆	◆	⊗	●	◆	◆	●
	WirelessHART	●	●	◆	●	◆	◆	●
	ISA100.11a	●	●	◆	●	◆	◆	●
Longas distâncias	4G LTE	◆	◆	⊗	⊗	⊗	⊗	◆
	5G	■	■	■	■	■	■	■
	LoRa	◆	◆	⊗	◆	⊗	◆	●
Tecnologias promissoras	LiFi	⊗	⊗	◆	◆	◆	◆	⊗
◆ Resolve Parcialmente o problema ■ Futuras melhorias podem ser solução ● Tecnologia consegue resolver Problema ⊗ Não aconselhado								

Fonte: adaptado de [15].

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 6 traz o comparativo dessas três aplicações.

**Tabela 6. 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 escritório	WiFi	●	⊗	●	●	●	●	●
	BLE	◆	◆	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Instrumentação IEEE 802.15.4	ZigBee	◆	◆	⊗	⊗	⊗	◆	⊗
	WirelessHART	◆	◆	⊗	⊗	⊗	◆	⊗
	ISA100.11a	◆	◆	⊗	⊗	⊗	◆	⊗
Longas distâncias	4G LTE	⊗	⊗	◆	◆	◆	◆	◆
	5G	■	■	●	●	■	■	■
	LoRa	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	◆	⊗
Tecnologias promissoras	LiFi	■	■	●	■	■	■	●
◆ Resolve Parcialmente o problema ■ Futuras melhorias podem ser solução ● Tecnologia consegue resolver Problema ⊗ Não aconselhado								

Fonte: adaptado de [15].

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 7 traz o comparativo das aplicações de rastreamento e manutenção.

**Tabela 7. Comparativo entre aplicações rastreamento e manutenção.**

		Materialis	Ferramentas	Pe ssoal	Sau de da Máquina	Automação de Construções	Realidade Aumentada
Domínio	Tecnologia	Rastreamento			Manutenção		
Casa e escritório	WiFi	⊗	⊗	⊗	◆	●	●
	BLE	⊗	●	◆	◆	⊗	⊗
Instrumentação IEEE 802.15.4	ZigBee	⊗	⊗	◆	●	●	◆
	WirelessHART	⊗	⊗	◆	◆	●	◆
	ISA100.11a	⊗	⊗	◆	◆	●	◆
Longas distâncias	4G LTE	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
	5G	■	■	■	■	■	■
	LoRa	⊗	⊗	◆	◆	⊗	⊗
Tecnologias promissoras	LiFi	■	■	■	■	■	■

◆ Resolve Parcialmente o problema ■ Futuras melhorias podem ser solução  
● Tecnologia consegue resolver Problema ⊗ Não aconselhado

Fonte: adaptado de [15].

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

Os avanços tecnológicos possibilitaram uma evolução rápida das técnicas de produção. O uso de sistemas computadorizados para controle de processos levou as empresas a um novo patamar nos níveis de produção e competitividade. Sistemas antes controlados exclusivamente por intervenção humana, sujeitos a erros e imprecisões, hoje podem ser monitorados à grandes distâncias, processados em tempo real e sofrer intervenções precisas.

As redes de sensores e sistemas de automação operaram durante muitas décadas quase exclusivamente conectadas por cabos condutores ou fibra ótica. O advento da miniaturização eletrônica possibilitou a introdução de tecnologias cada vez mais integradas e o desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio veio disputar o espaço do que antes era domínio cativo do cobre e da fibra ótica.

A indústria 4.0 já é realidade e exige que as empresas que queiram continuar existindo em um mundo globalizado busquem melhorar sua eficiência e produtividade. As redes de sensores sem fio estão contribuindo para que esse objetivo seja alcançado.

Neste trabalho foram analisadas diversas tecnologias capazes de criar uma rede de sensores sem fio em ambiente industrial, cada uma com suas vantagens e pontos a melhorar. Percebe-se que não existe uma única solução para todas as necessidades das indústrias e a adoção de uma tecnologia é dependente da aplicação.

Para as redes com base no protocolo IEEE 802.11 existe um crescente espaço para aplicações onde a infraestrutura já está disponível, há necessidade de transmissão de um grande fluxo de dados e o consumo de energia não é um ponto crítico do sistema. Para redes com base no protocolo IEEE 802.15.1 aplicações se caracterizam pelo baixo fluxo de dados a serem transferidos, baixa quantidade de nós na rede e grande necessidade de autonomia da bateria. Dispositivos integrados à vestimentas são fortes candidatos a usarem a tecnologia Bluetooth. Redes sem fio de instrumentação formadas pelos produtos ZigBee, WirelessHART e ISA100.11a, possuem grande espaço para aplicações em que lugares de difícil acesso, baixa quantidade de dados, grande autonomia de bateria e baixo custo de implementação são necessários. Redes que usam a tecnologia celular como 4G e 5G são usadas em aplicações que necessitam grande quantidade de dados e altas taxas de transferência e possuem flexibilidade no consumo de energia, porém necessitam de infraestrutura e área de cobertura

para funcionarem corretamente. A tecnologia LoRa é melhor usada em cenários de longa distância, que utilizem baixíssimo fluxo de dados, consumo muito baixo de energia e baixa complexidade da rede. A tecnologia LiFi promete grandes taxas de transferência e baixa latência para aplicações de curta distância e não sofre interferência de outras ondas de rádio, mas ainda é uma promessa e não se visualiza aplicações industriais em um futuro próximo.

É importante destacar que a escolha de uma tecnologia sem fio a ser implantada não é uma tarefa trivial. Além das questões técnicas, limitações físicas e características da planta industrial, há que se considerar questões econômicas, ambientais e evolução da tecnologia. Para uma mesma aplicação, mais de uma solução pode ser mostrar viável e os tomadores de decisão deverão escolher entre tecnologias concorrentes dentro de cenários variáveis.

Como continuidade a este trabalho de conclusão de curso, sugere-se a concepção de um sistema inteligente capaz de selecionar a melhor tecnologia sem fio para uma dada aplicação. Esse sistema poderia contar com o uso de aprendizado de máquina para fazer a seleção da melhor tecnologia para cada caso. Seriam entradas do sistema informações como taxa de transferência, distâncias de operação e cobertura, latência máxima, características físicas da planta, custos, etc, cabendo ao software obter uma seleção ranqueada das possíveis tecnologias que atenderiam aquela aplicação.

Outros trabalhos futuros podem ser desenvolvidos ampliando a gama de tecnologias comparadas ou realizando testes práticos e simulações entre as tecnologias mencionadas neste trabalho.



## 8. REFERÊNCIAS

- [1] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," in IEEE Transactions on Industrial Electronics. Out. 2009.
- [2] Redação, "O que é Modelo OSI?". Disponível em: <<https://canaltech.com.br/produtos/o-que-e-modelo-osi/>>. Acesso em: 25 mar 2020.
- [3] Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. "Wireless sensor networks: a survey". School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta. Dez 2001.
- [4] 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: 15 fev. 2020.
- [5] Carvalho, T., dos Anjos, F., "Topologias de Redes ZigBee". UFRJ. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/grad/07\\_1/zigbee/topologias.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/07_1/zigbee/topologias.html)>. Acesso em: 20 mai. 2020.
- [6] Redes de Sensores Sem Fio. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/rssf/>>. Acesso em: 15 fev. 2020.
- [7] Hermann, M.; Pentek, T.; Otto B. "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review", Working Paper No.01, 2015.
- [8] Smit, J., Kreutzer, S., Moeller, C., Carlberg, M. "Industry 4.0", 2016. Disponível em: <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL\\_STU\(2016\)570007\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU(2016)570007_EN.pdf)>. Acesso em: 12 jan 2020.
- [9] Erplan. Indústria 4.0: quando a internet toma conta da fábrica. Disponível em: <<https://www.erplan.com.br/noticias/industria-4-0-quando-a-internet-toma-conta-da-fabrica/>>. Acesso em: 18 ago 2020.
- [10] Agenda brasileira para a Indústria 4.0. Disponível em: <[www.industria40.gov.br](http://www.industria40.gov.br)>. Acesso em: 18 ago 2020.
- [11] Rotta, F. "Indústria 4.0 pode economizar R\$ 73 bilhões ao ano para o Brasil". Disponível em: <[www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil](http://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil)>. Acesso em: 18 ago 2020.
- [12] Abdi. "Agro 4.0". Disponível em: <<https://www.abdi.com.br/projetos/agro-4-0>>. Acesso em: 18 ago 2020.

- [13] Abdi. “Segurança Pública para Cidades Inteligentes”. Disponível em:<<https://www.abdi.com.br/projetos/fronteira-tech>>. Acesso em: 18 ago 2020.
- [14] Erdelj, M., Mitton, N., Natalizio, E. Applications of Industrial Wireless Sensor Networks. Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards, CRC Press, 2013.
- [15] 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.
- [16] Haneda, K. “Channel Models and Beamforming at Millimeter-Wave Frequency Bands.” IEICE Transactions 98-B (2015): 755-772.
- [17] Candell, R., Kashef, M., Liu, Y., Lee, K., Fofou, S. “Industrial Wireless Systems Guidelines” . IEEE Industrial Electronics Magazine. Dez 2018.
- [18] 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.
- [19] Chia, S., Gasparroni, M., Brick, P., "The next challenge for cellular networks: backhaul", IEEE Microwave Magazine, vol. 10, no. 5, pp. 54-66, August 2009.
- [20] Azeez, et al. “Wireless Indoor Localization Systems and Techniques: Survey and Comparative Study”. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2016.
- [21] Javadi, S. H., Moosaei, H., Ciuonzo, D. “ Learning Wireless Sensor Networks for Source Localization. Sensors. 2 February 2019.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Ikram, Waqas & Thornhill, Nina. Wireless communication in process automation: A survey of opportunities, requirements, concerns and challenges. IET Seminar Digest. 2010.
- [25] Hu, Y., Perrig, A., Johnson, D., Ariadne. “A Secure On-Demand Routing Protocol for Ad Hoc Networks”. Wireless Netw. 2005.
- [26] 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.

- [27] Machado, S. "SISTEMA DE COMUNICAÇÕES SEM FIO EM INSTALAÇÕES PORTUÁRIAS: Redes em Malha". Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais. 2014.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Leonardi, L., Patti, G., Lo Bello, L. "Multi-Hop Real-Time Communications Over Bluetooth Low Energy Industrial Wireless Mesh Networks," in *IEEE Access*, vol. 6. 2018.
- [31] Andriyanov, N., Dementev, V. Topology, protocols and databases in Bluetooth 4.0 sensor networks. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. 2018.
- [32] Li, H., Luo, J. Wireless Thermometer Based on Bluetooth 4.0 Low-Energy. 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design, Hangzhou, 2014.
- [33] Nowak, D., Krzak, Łukasz & Worek, Cezary. "Integration of ZigBee and IEC 61850 networks for a substation automation system". ISGTEurope. 2013.
- [34] Kannamma, M., Chanthini, B., Manivannan, D. "Controlling and monitoring process in industrial automation using Zigbee," 2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Mysore, 2013.
- [35] Rašović, I., Mijanovic, Z. "Proposal of an industrial communication system based on ZigBee technology". 24th International Conference on Information Technology (IT), Zabljak, Montenegro, 2020.
- [36] Nixon, M., "A Comparison of WirelessHART™ and ISA100.11a". Emerson Process Management.
- [37] 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.
- [38] X. Zhu et al., "A Location-Determination Application in WirelessHART," 2009 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, Beijing, 2009.

- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Chen, P. "Using ISA100.11a Wireless Technology to Monitor Pressure and Temperature in a Refinery". Yokogawa, 2011.
- [43] Yang, and Michael Sourya. LTE Physical Layer Performance Analysis. National Institute of Standards and Technology. 1st December 2013.
- [44] DRAFT LTE Architecture Overview and Security Analysis. NIST IR 8071. Abr. 2016.
- [45] 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.
- [46] I, C., etl al, "Toward Green and Soft: A 5G Perspective", China Mobile Research Institute. 5G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS: PROSPECTS AND CHALLENGES.
- [47] 3GPP, "Study on Communication for Automation in Vertical Domains", 3GPP TR 22.804, Draft of Release 16, v1.0.0, Dez 2017.
- [48] Disponível em: <<https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-network-infrastructure/>>. Acesso em: 18 ago 2020.
- [49] 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: 18 ago 2020.
- [50] De Carvalho, E., Bjornson, E., Sorensen, J.H., Popovski, P., Larsson, E.G. "Random access protocols for massive MIMO". IEEE Communications Magazine. 2017.
- [51] "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application". Sensors. Nov 2018.
- [52] Hayati, N., Suryanegara, M. "The IoT LoRa system design for tracking and monitoring patient with mental disorder," 2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), Semarang, 2017.
- [53] Sanchez-Iborra, et al. Tracking and Monitoring System Based on LoRa Technology for Lightweight Boats. Electronics. 2018.

- [54] Gearburn. “LiFi beats Wi-Fi with 1GB wireless speeds over pulsing LEDs”. Disponível em: <<https://memeburn.com/gearburn/2014/01/lifi-beats-wi-fi-with-1gb-wireless-speeds-over-pulsing-leds/>>. Acesso em: 18 ago 2020.
- [55] Carvalho, P., Carvalho, J., Pereira, A. LI-FI (LIGHT-FIDELITY): UMA LUZ NA EVOLUÇÃO DAS COMUNICAÇÕES. CES Revista. Dez 2015.
- [56] 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: ago 2020.
- [57] Peakin, W. “Scottish school is first in world to use light in creating a wireless network”. 2018. Disponível em: <<https://futurescot.com/pure-lifi-kyle-academy-ayr/>>. Acesso em: ago 2020.
- [58] 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.
- [59] Ergen, S., “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary”. Disponível em: <<http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/707/papers/zigbee.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2020.
- [60] 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-led-bulb-1488204>>. Acesso em: ago 2020.