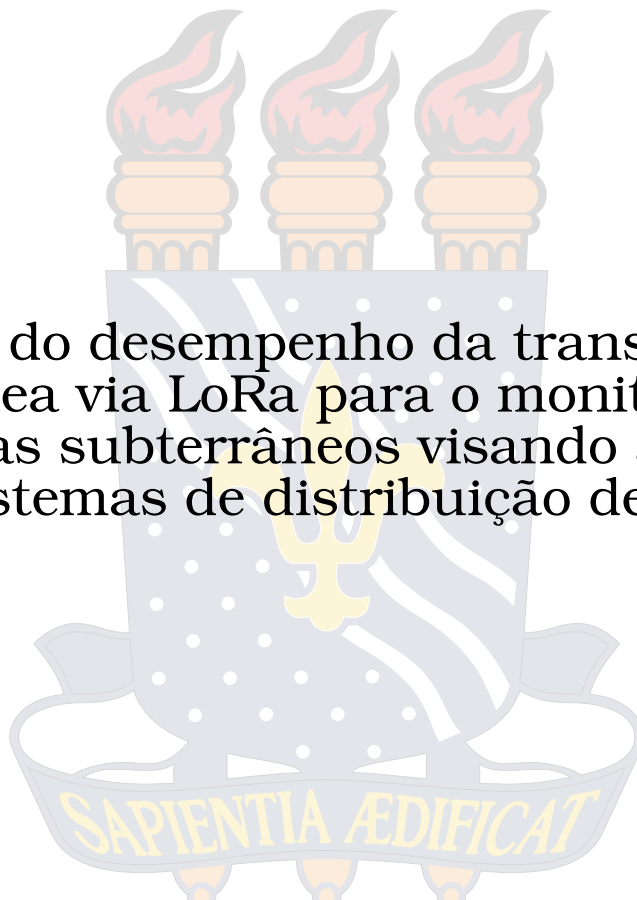


UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Estudo do desempenho da transmissão  
subterrânea via LoRa para o monitoramento  
de sistemas subterrâneos visando aplicações  
em sistemas de distribuição de água

Andréa Willa Rodrigues Villarim

João Pessoa

2023

Andréa Willa Rodrigues Villarim

**ESTUDO DO DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA VIA LORA PARA  
O MONITORAMENTO DE SISTEMAS SUBTERRÂNEOS VISANDO APLICAÇÕES  
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica -  
PPGEM da Universidade Federal da Paraíba -  
UFPB como requisito para a obtenção do título  
de Doutora em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

João Pessoa

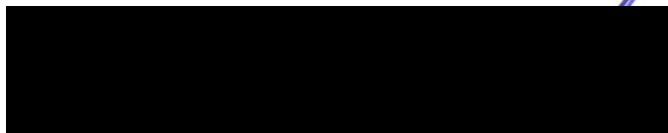
2023

# ESTUDO DO DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA VIA LORA PARA O MONITORAMENTO DE SISTEMAS SUBTERRÂNEOS VISANDO APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

por

**ANDRÉA WILLA RODRIGUES VILLARIM**

*Tese aprovada em 29 de novembro de 2023*



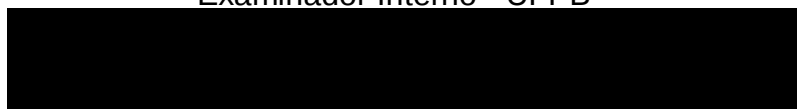
Prof. Dr. CICERO DA RÓCHA SOUTO  
Orientador – UFPB



Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES  
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. MOISES DANTAS DOS SANTOS  
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ALEXSANDRO JOSÉ VIRGINIO DOS SANTOS  
Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA  
Examinador Externo – UFCG



Prof. Dr. ANDRÉ FELLIPE CAVALCANTE SILVA  
Examinador Externo – IFPB

*João Pessoa – PB, 2023*

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

V722e Villarim, Andréa Willa Rodrigues.

Estudo do desempenho da transmissão subterrânea via LoRa para o monitoramento de sistemas subterrâneos visando aplicações em sistemas de distribuição de água / Andréa Willa Rodrigues Villarim. - João Pessoa, 2023. 91 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.  
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Sistemas de abastecimento de água. 2. Indústria 4.0. 3. Redes de sensores sem fio subterrâneas. 4. Comunicação subterrânea. 5. Tecnologia LoRa. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 628.1(043)

*Dedico este trabalho ao meu pai André Villarim. Meu maior apoiador e quem mais sonhou com a realização desse doutorado. Acompanhou o início dessa jornada presencialmente e sei que acompanha a vitória de um lugar melhor. Te amarei para sempre, pai.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que sempre colocou o caminho, mesmo quando dei passos sem saber para onde estava indo. Agradeço à Maria Santíssima, minha mãe e Senhora, que intercedeu por mim todos os dias de minha vida.

Agradeço aos professores que fizeram parte desta jornada, principalmente ao Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto, que me orientou nesse trabalho, se tornando um exemplo para mim e me fornecendo as ferramentas para evoluir como pesquisadora. Também agradeço aos membros da banca Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes, Prof. Dr. Moisés Dantas dos Santos, Prof. Dr. Juan Moisés Maurício Villanueva, Prof. Dr. Alessandro José Virgínio dos Santos e Prof. Dr. André Fellipe Cavalcante Silva, que contribuíram de diversas formas para o crescimento do meu trabalho.

Agradeço à minha família, que me apoia e segura a minha mão desde o momento em que nasci. Agradeço especialmente ao meu pai e à minha mãe, que nunca mediram esforços para me fazer chegar aonde meus sonhos quisessem ir. Agradeço à minha irmã Mariana, que é minha melhor amiga e companheira de profissão e sempre fez o possível para me ajudar a concluir todos os meus objetivos. Agradeço a Gabriel, quem Deus escolheu para dividir a vida comigo e que me acompanhou, aconselhou e apoiou durante toda essa longa jornada.

Agradeço a todos que me escutaram celebrar ou lamentar os resultados obtidos com algum experimento. A todos que compartilharam um café como uma pausa para organizar os pensamentos. A todos que viraram noites produzindo comigo. Obrigada a todos que fizeram parte dessa intensa etapa da minha vida e da minha formação.

*"Ninguém é suficientemente perfeito,  
que não possa aprender com o outro e,  
ninguém é totalmente destituído de valores  
que não possa ensinar algo ao seu irmão"*  
São Francisco de Assis

## RESUMO

### ESTUDO DO DESEMPENHO DA TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA VIA LORA PARA O MONITORAMENTO DE SISTEMAS SUBTERRÂNEOS VISANDO APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A indústria 4.0 busca soluções nas áreas de automação inteligente, geração/troca de dados e análise do processo de produção. A adequação das empresas à realidade dessa nova geração da indústria torna necessária a substituição dos equipamentos utilizados anteriormente por dispositivos inteligentes, utilizando o conceito de IoT (Internet of Things) em equipamentos de baixo custo para monitorar o estado das variáveis de determinado sistema. Esse monitoramento pode ser realizado a partir de microsensores inteligentes espalhados e interligados por canais de comunicação sem fio em pontos específicos da rede. Uma questão importante a ser considerada quando se trata de microsensores é a tecnologia de comunicação utilizada, visto que é a etapa que determina o alcance de transmissão dos dados obtidos e é a principal responsável pelo consumo de energia do sistema. Algumas aplicações que necessitam realizar o monitoramento do sistema estão localizadas em um ambiente subterrâneo, como o monitoramento de variáveis de uma rede de distribuição de água para controle de perdas. Considerando os diversos desafios apresentados pela comunicação em ambiente subterrâneo, é proposto um estudo do comportamento de uma tecnologia de comunicação sem fio selecionada para operar em tal cenário. Nesse contexto, foi analisado o comportamento da tecnologia LoRa, por apresentar características de interesse, como longo alcance de transmissão e baixo consumo de energia. Este trabalho de tese apresenta um estudo do desempenho da tecnologia de comunicação LoRa em ambientes subterrâneos, com a avaliação de diversos parâmetros de comunicação entre transmissor e receptor. A análise do desempenho da comunicação considerou a influência de diversas variáveis para avaliar a aplicabilidade desse tipo de comunicação, já bastante explorada em redes convencionais, para utilização em sistemas subterrâneos, visando a aplicação em cidades inteligentes, como para o monitoramento de sistemas de abastecimento de água.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0; Internet das Coisas; Sistemas de abastecimento de água; Redes de Sensores Sem Fio Subterrâneas; Comunicação Subterrânea; Tecnologia LoRa.

## ABSTRACT

### PERFORMANCE STUDY OF UNDERGROUND TRANSMISSION VIA LORA FOR THE MONITORING OF UNDERGROUND SYSTEMS AIMING FOR APPLICATIONS IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

Industry 4.0 seeks solutions in various areas, such as intelligent automation, data generation/exchange and production process analysis. The adaptation of companies to the reality of this industry new generation makes it necessary to replace the equipments previously used by smart devices, using the IoT (Internet of Things) concept in low-cost equipment to monitor the state of variables of a given system. This monitoring can be performed using intelligent microsensors scattered and interconnected by wireless communication channels. An important issue to be considered when it comes to microsensors is the communication technology used, since it is the part that determines the transmission range of the data obtained and is the main responsible for system energy consumption. Some applications that need system monitoring are located in an underground environment, such as monitoring variables in a water distribution network to loss control. Considering the various challenges presented by communication in an underground environment, a study of the performance of a wireless communication technology selected to operate in such scenario is proposed. In this context, the performance of LoRa technology was analyzed, as it presents characteristics of interest, such as long transmission range and low energy consumption. This thesis presents a study of LoRa communication technology performance in underground environments, with the evaluation of several communication parameters between transmitter and receiver. The analysis of the communication performance considered the influence of several variables to evaluate the applicability of this type of communication, already quite explored in conventional networks, for use in underground systems, aiming at the application in smart cities, such as for the monitoring of water distribution systems.

**Keywords:** Industry 4.0; Internet of Things; Water distribution systems; Underground Wireless Sensor Networks; Underground Communication; LoRa Technology.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Esquema básico de um sistema de abastecimento de água . . . . .                                                                        | 21 |
| Figura 2 – Exemplos de estruturas de captação de água bruta . . . . .                                                                             | 23 |
| Figura 3 – Esquema do funcionamento básico de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) . . . . .                                                   | 24 |
| Figura 4 – Traçados da rede de distribuição a) malhada b) ramificada e c) mista . . . . .                                                         | 26 |
| Figura 5 – Definição dos vazamentos em um sistema de distribuição de água. . . . .                                                                | 28 |
| Figura 6 – Índices de perdas na distribuição considerando as regiões geográficas e média do Brasil em 2019 . . . . .                              | 29 |
| Figura 7 – Índice de perdas na distribuição dos prestadores de serviços de abrangência regional nos anos de 2018 e 2019 . . . . .                 | 29 |
| Figura 8 – Nós sensores distribuídos em um campo de sensoriamento. . . . .                                                                        | 33 |
| Figura 9 – Exemplos de topologias de redes de sensores sem fio . . . . .                                                                          | 36 |
| Figura 10 – Classificação das redes de sensores sem fio de acordo com as tecnologias de comunicação. . . . .                                      | 37 |
| Figura 11 – Comparação de consumo de potência em uma RSSF. . . . .                                                                                | 38 |
| Figura 12 – Arquitetura de uma rede LoRa. . . . .                                                                                                 | 41 |
| Figura 13 – RSSFS para monitoramento de dutos subterrâneos. . . . .                                                                               | 46 |
| Figura 14 – Experimento realizado para testes da tecnologia de comunicação LoRa em ambientes com e sem obstáculos. . . . .                        | 50 |
| Figura 15 – Protótipo desenvolvido para testes de transmissão via LoRa em ambiente subterrâneo. . . . .                                           | 51 |
| Figura 16 – Procedimento realizado em experimento subterrâneo. . . . .                                                                            | 52 |
| Figura 17 – Experimento realizado para testes da tecnologia de comunicação LoRa em ambientes subterrâneos. . . . .                                | 54 |
| Figura 18 – Fluxograma que apresenta a metodologia do experimento realizado. . . . .                                                              | 55 |
| Figura 19 – Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente com linha de visada direta. . . . .                         | 58 |
| Figura 20 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente com visada direta e SF = 7. . . . .  | 59 |
| Figura 21 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente com visada direta e SF = 12. . . . . | 60 |
| Figura 22 – Ambiente florestal com mata fechada. . . . .                                                                                          | 61 |
| Figura 23 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente florestal e SF = 7. . . . .          | 61 |
| Figura 24 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente florestal e SF = 12. . . . .         | 62 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 – Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente florestal. . . . .                                                                                                                                                                                                       | 63 |
| Figura 26 – Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente urbano denso. . . . .                                                                                                                                                                                                    | 64 |
| Figura 27 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente urbano denso e SF = 7. . . . .                                                                                                                                                                    | 65 |
| Figura 28 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente urbano denso e SF = 12. . . . .                                                                                                                                                                   | 66 |
| Figura 29 – Análise da Taxa de Pacotes Recebidos em função da distância entre os dispositivos comparando os diferentes ambientes de transmissão utilizando SF = 7, de acordo com a profundidade do transmissor, sendo (a) Profundidade de 50 cm, (b) Profundidade de 1 m e (c) Profundidade de 1,5 m . . . . . | 68 |
| Figura 30 – Análise da Taxa de Pacotes Perdidos em função da distância entre os dispositivos comparando os diferentes ambientes de transmissão utilizando SF = 7, de acordo com a profundidade do transmissor, sendo (a) Profundidade de 50 cm, (b) Profundidade de 1 m e (c) Profundidade de 1,5 m . . . . .  | 70 |
| Figura 31 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente com visada direta e profundidade igual a 50 cm. . . . .                                                                                                                                        | 74 |
| Figura 32 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente com visada direta e profundidade igual a 1 m. . . . .                                                                                                                                          | 74 |
| Figura 33 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente florestal e profundidade igual a 50 cm. . . . .                                                                                                                                                | 75 |
| Figura 34 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente florestal e profundidade igual a 1 m. . . . .                                                                                                                                                  | 75 |
| Figura 35 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente urbano denso e profundidade igual a 50 cm. . . . .                                                                                                                                             | 76 |
| Figura 36 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente urbano denso e profundidade igual a 1 m. . . . .                                                                                                                                               | 76 |
| Figura 37 – Relação entre RSSI e a Distância comparando diferentes valores de fator de espalhamento e de profundidade para ambiente urbano denso. . . . .                                                                                                                                                      | 78 |
| Figura 38 – Relação entre RSSI e a Profundiade comparando diferentes valores de fator de espalhamento e em diferentes cenários em uma distância de 5 metros entre os dispositivos transmissor e receptor. . . . .                                                                                              | 79 |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                                                                                                       |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – Relação de entrada e saída de água em um sistema de abastecimento. . . . .                                                                          | 27 |
| Tabela 2 | – Aplicações da tecnologia LoRa em diferentes áreas. . . . .                                                                                          | 44 |
| Tabela 3 | – Comparação de algumas das principais tecnologias de comunicação em ambiente subterrâneo. . . . .                                                    | 48 |
| Tabela 4 | – Parâmetros utilizados no experimento para configurar a modulação LoRa . .                                                                           | 52 |
| Tabela 5 | – Cenários considerados para avaliar a comunicação subterrânea via comunicação LoRa. . . . .                                                          | 53 |
| Tabela 6 | – Exemplo de distâncias máximas alcançadas para aplicação com PDR > 70% para diferentes condições de transmissão. . . . .                             | 71 |
| Tabela 7 | – Parâmetros utilizados no modelamento matemático de perda de caminho. . .                                                                            | 73 |
| Tabela 8 | – Valores de coeficiente de correlação linear e erro médio quadrático para os diferentes cenários considerando SF = 7 para o modelo proposto. . . . . | 77 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                                  |
|--------|--------------------------------------------------|
| BW     | <i>Bandwidth</i>                                 |
| CR     | <i>Code Rate</i>                                 |
| CAGEPA | Companhia de Água e Esgotos da Paraíba           |
| EM     | Eletromagnética                                  |
| ETA    | Estação de Tratamento de Água                    |
| IoT    | <i>Internet of Things</i>                        |
| LoRa   | <i>Long Range</i>                                |
| LPWAN  | <i>Low Power Wide Area Networks</i>              |
| NB-IoT | <i>Narrow-Band IoT</i>                           |
| PDR    | <i>Packet Delivery Ratio</i>                     |
| PLR    | <i>Packet Loss Ratio</i>                         |
| RSSF   | Redes de Sensores Sem Fio                        |
| RSSFS  | Redes de Sensores Sem Fio Subterrâneas           |
| RSSI   | <i>Received Signal Strenght Indication</i>       |
| SNIS   | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento |
| SF     | <i>Spreading Factor</i>                          |
| ToA    | <i>Time on Air</i>                               |

## SUMÁRIO

|              |                                                                              |           |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                                  | <b>13</b> |
| 1.1          | JUSTIFICATIVA . . . . .                                                      | 15        |
| 1.2          | OBJETIVOS . . . . .                                                          | 17        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Objetivo Geral . . . . .</b>                                              | <b>17</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Objetivos Específicos . . . . .</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>                                       | <b>19</b> |
| 2.1          | SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA . . . . .                                  | 19        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Mananciais . . . . .</b>                                                  | <b>21</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Estruturas de Captação . . . . .</b>                                      | <b>22</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Estações elevatórias e Adutoras . . . . .</b>                             | <b>22</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Estação de Tratamento de Água (ETA) e Reservatórios . . . . .</b>         | <b>22</b> |
| <b>2.1.5</b> | <b>Redes de distribuição e ligações prediais . . . . .</b>                   | <b>24</b> |
| 2.2          | SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA - CENÁRIO DE PERDAS                        | 26        |
| 2.3          | INDÚSTRIA 4.0 . . . . .                                                      | 30        |
| 2.4          | REDE DE SENSORES SEM FIO . . . . .                                           | 33        |
| 2.5          | LPWAN - <i>LOW POWER AND WIDE AREA NETWORK</i> . . . . .                     | 38        |
| <b>2.5.1</b> | <b>Modulação LoRa . . . . .</b>                                              | <b>40</b> |
| <b>2.5.2</b> | <b>Estudo das técnicas de comunicação em sistemas subterrâneos . . . . .</b> | <b>45</b> |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA . . . . .</b>                                                 | <b>49</b> |
| 3.1          | ETAPAS DO PROJETO . . . . .                                                  | 49        |
| 3.2          | DESENVOLVIMENTO DO PROJETO . . . . .                                         | 49        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS OBTIDOS . . . . .</b>                                          | <b>57</b> |
| 4.1          | AMBIENTE COM VISADA DIRETA . . . . .                                         | 57        |
| 4.2          | AMBIENTE FLORESTAL . . . . .                                                 | 60        |
| 4.3          | AMBIENTE URBANO DENSO . . . . .                                              | 64        |
| 4.4          | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE TAXA DE PACOTES RECEBIDOS                       | 66        |
| 4.5          | ANÁLISE DO RSSI EM TRANSMISSÕES SUBTERRÂNEAS . . . . .                       | 71        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES . . . . .</b>                                                  | <b>80</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                                 | <b>81</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A água desempenha um papel fundamental para a sociedade e sobrevivência humana. É considerada um recurso natural limitado e seu consumo em excesso pode acarretar a escassez de mananciais e gerar problemas ambientais e sociais em virtude da possibilidade de interrupção do abastecimento de água para a população.

O conceito de abastecimento de água, considerado um serviço imprescindível para a vida da população, insere-se em outro conceito amplo, o de saneamento. O saneamento compreende um conjunto de ações com o objetivo de garantir condições de salubridade e proteger a saúde da população. Dentre as ações que constituem o saneamento básico, estão o abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem de águas pluviais e destinação de resíduos sólidos (HELLER; PADUA, 2006).

O investimento em saneamento básico é essencial para garantir a qualidade de vida da população e, considerando a atividade de distribuição de água, deve ser realizado levando em consideração dois fatores importantes, a disponibilidade de água e o consumo do sistema. O consumo de energia das redes de distribuição representa uma parcela considerável da energia global. Devido a isso, torna-se objeto de estudos, considerando o desenvolvimento sustentável e o aumento da eficiência energética (LOUSADA et al., 2019).

O crescimento populacional exponencial, além do aumento dos níveis de consumo e de poluição das águas, torna necessária a realização de ampliações e atualizações no sistema de abastecimento para garantir o fornecimento de água com qualidade e quantidade adequadas. Portanto, considerando esses problemas e buscando os objetivos citados, cresce a necessidade de aumentar a eficiência em todo o processo de exploração e distribuição de sistemas de abastecimento de água, considerando os aspectos de sustentabilidade econômica e natural (ALEGRE et al., 2005) (BRITTON; STEWART; O'HALLORAN, 2013).

Um dos principais indicadores da eficiência em um sistema de abastecimento está relacionado com as perdas de água do sistema, sua detecção, controle e redução. O controle e redução de perdas na rede acarreta uma economia de recursos naturais e financeiros, reduzindo custos de produção, transporte e consumo de energia, além de evitar o desperdício de recursos naturais (LOUSADA et al., 2019). Com a busca por eficiência, o aumento da demanda e a crise hídrica em muitas regiões, o controle e redução de perdas de água se torna essencial para os serviços de distribuição de água, sejam públicos ou privados (SCHULZ; SHORT; PETERS, 2012) (CARDOSO et al., 2012).

Historicamente, a quantificação das perdas é realizada com base no indicador percentual que relaciona o volume disponibilizado para distribuição (macromedido) com o volume recebido pelo consumidor (micromedido) (BEZERRA; CHEUNG, 2013). Ou seja, as perdas podem ser mensuradas a partir da diferença no volume de entrada e saída de uma unidade do sistema

de abastecimento. Porém, os sistemas de abastecimento de água, em geral, possuem grandes extensões, o que torna a detecção de perdas ao longo da rede um desafio para as empresas de abastecimento.

Um método bastante utilizado para monitorar variáveis em longos perímetros ou em locais de difícil acesso, como no caso de redes de distribuição de água, é a utilização de dispositivos sensores distribuídos no ambiente para avaliar dados de interesse. Esses sensores possuem a capacidade de sensoriamento, possível processamento e transmissão dos dados até que a informação chegue ao usuário. Dessa forma, é constituída uma rede, denominada Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), capaz de monitorar variáveis de interesse em um ambiente, a partir desses chamados nós sensores, e transmiti-las ao usuário (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

As redes de sensores sem fio são uma das tecnologias mais promissoras do terceiro milênio e são usadas em diversas aplicações. Alguns dos motivos responsáveis pela ampla utilização de RSSFs são, por exemplo, seu baixo custo de produção, baixo custo de instalação, operação de rede sem supervisão, operação autônoma e de longa duração. As RSSF, com o passar do tempo, começaram a incluir outras funcionalidades, como a incorporação do conceito de Internet das Coisas (IoT) por meio da introdução do recurso de acesso à internet nos nós sensores (BUTUN; ÖSTERBERG; SONG, 2019).

A tecnologia de sensoriamento e controle aliada à comunicação sem fio está sendo utilizada para conectar parâmetros do mundo físico ao mundo virtual da eletrônica (SHARMA; BANSAL; BANSAL, 2013). Porém, o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio apresenta alguns desafios, como a capacidade de fornecimento da fonte de energia para alimentar os dispositivos ou o alcance da tecnologia de comunicação para estabelecer a transmissão e recepção das informações desejadas (IBRAHIM; MAHDI; YAS, 2021).

A decisão da tecnologia de comunicação das RSSF depende diretamente da aplicação, sendo necessária a adequação de alcance e consumo com a realidade do projeto. Uma das áreas que apresenta maiores desafios é a de comunicação em aplicações subterrâneas, pois a implementação de dispositivos inteligentes em ambiente subterrâneo exige sensores de pequeno porte, baixo consumo de energia, comunicação eficiente e técnicas precisas de localização (SAEED; ALOUINI; AL-NAFFOURI, 2019). Poucos estudos voltados à essa realidade são desenvolvidos se comparados à quantidade de pesquisas realizadas para redes de sensores sem fio convencionais.

Devido a isso, é proposto como tema desse projeto o estudo do comportamento da comunicação entre dispositivos de uma rede de sensores sem fio subterrânea com o objetivo de determinar a viabilidade da implantação dessa solução para detecção de vazamentos visando à redução de perdas em sistemas de abastecimento de água. Serão utilizadas ferramentas do paradigma tecnológico da Indústria 4.0 para desenvolver o estudo e determinar um padrão de comportamento que permita avaliar a aplicabilidade de se utilizar esse tipo de comunicação em

redes sem fio para diferentes cenários e aplicações variadas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de distribuição de água estão cada vez mais complexos, com o crescente aumento da demanda e com a necessidade de não interromper o fornecimento de água. Em muitos sistemas atuais, as intervenções geralmente são realizadas de forma manual pelos operadores ou técnicos em rondas periódicas. Dessa forma, as alterações frequentes tornam o controle do sistema ineficiente. Uma maneira de aumentar a eficiência da rede é agregar sistemas de automação e controle à sua estrutura (PAGE; ABU-MAHFOUZ; YOYO, 2016) (RAI; DHANYA; CHAHAR, 2016).

Os sistemas de automação e controle podem ser utilizados para diminuir a necessidade de intervenção humana e garantir a rápida detecção e resposta para possíveis problemas da rede. Considerando esse objetivo, é necessário utilizar sistemas de sensoramento de parâmetros desejados e possíveis estruturas de controle remoto com vistas à redução de perdas nas estruturas da rede.

As perdas de água em sistemas de abastecimento são influenciadas por diversos fatores infraestruturais e operacionais e são determinadas pelas características da rede hidráulica, pelo nível de tecnologia do sistema, pelas práticas de operação e pela expertise dos técnicos responsáveis pelo processo (BEZERRA; CHEUNG, 2013). Os problemas estruturais nas tubulações das redes de abastecimento causam um impacto negativo considerável na qualidade da água e no funcionamento do sistema (QI et al., 2018). Em Shortridge e Guikema (2014), foi apresentado que o número de rupturas nas tubulações de um sistema de abastecimento está diretamente relacionado, por exemplo, com a incidência de doenças gastrointestinais na população abastecida pela rede.

As tubulações de água, principalmente com o decorrer dos anos, estão sujeitas a vazamentos e rupturas, o que afeta a quantidade de água fornecida, além de apresentar riscos à qualidade da água e segurança da população consumidora. Devido à rápida aceleração da urbanização, as redes de distribuição de muitas regiões precisam ser atualizadas com um planejamento adequado para atender a demanda e garantir o funcionamento adequado do sistema (HU et al., 2021).

O aumento da demanda de água em conjunto com o crescimento das taxas de vazamento nos sistemas de distribuição representa uma das maiores preocupações de autoridades e empresas quando se trata de recursos hídricos e é estimado que dezenas de milhões de metros cúbicos de água são desperdiçados anualmente através de vazamentos na rede de distribuição, o que seria suficiente para abastecer milhões de pessoas por ano (The Guardian, 2015). Esse volume de água perdido não representa apenas uma diminuição dos recursos hídricos, mas também um consumo desnecessário de energia.

Um dos principais indicadores de desempenho das prestadoras de serviço de saneamento

é a perda de água, que pode ocorrer em qualquer parte do sistema de abastecimento, desde a captação até a distribuição da água. A presença de vazamentos na rede de distribuição é considerada uma ineficiência geral do sistema (COVAS; RAMOS, 2010). É comum as empresas não terem políticas de controle de vazamentos, os quais acabam resultando em uma parcela significativa de água perdida.

Os programas para combate às perdas de água devem ser realizados pelas concessionárias e são, geralmente, constituídos por ações no âmbito estrutural e operacional. Esses programas devem possuir ações baseadas em análises específicas e diagnósticos detalhados para proporcionar uma redução nos níveis de perdas e consequente melhoria nos índices de desempenho considerando o horizonte de planejamento estipulado (FILHO, 2016).

O desenvolvimento de políticas para a redução desses vazamentos e, consequentemente, para a diminuição das perdas de água recebe poucos investimentos por parte das concessionárias. Um dos principais motivos da falta de investimentos é que os sistemas atuais não fornecem informações suficientes sobre o uso da água para determinar a implementação de tais programas. A utilização de dispositivos inteligentes no sistema permite que esses problemas sejam detectados e sejam desenvolvidas ações e políticas para solucioná-los e, posteriormente, evitar sua recorrência (BRITTON; STEWART; O'HALLORAN, 2013).

A implementação de ações para detecção e redução de vazamentos existentes na rede de distribuição é uma necessidade de empresas e autoridades públicas, já que ambas buscam o uso sustentável dos recursos naturais e a economia de recursos financeiros. Com isso, será alcançada a redução da necessidade de trocas/consertos no sistema de distribuição de água e nos sistemas públicos ou privados afetados por eventuais vazamentos, além da consequente diminuição no desperdício de água e no consumo de energia da rede.

Muitos sistemas de abastecimento de água, como é o caso da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), possuem pouca ou nenhuma ação implementada para detecção automatizada de parâmetros da rede, o que pode levar a ineficiência na detecção de falhas e uma possível perda financeira considerável. Uma das principais barreiras encontradas para implementar redes de monitoramento ao longo de sistemas de abastecimento é sua grande extensão localizada abaixo do solo.

Para realizar o monitoramento de diferentes sistemas, é possível utilizar as redes de sensores sem fio. No caso de sistemas subterrâneos, as principais limitações das RSSF, como fonte de alimentação e tecnologia de comunicação, se apresentam de forma ainda mais crítica, pois o local é muitas vezes de difícil acesso e possui obstáculos que influenciam no funcionamento da rede. Além do fato que, em redes subterrâneas para monitoramento de longos perímetros, como é o caso dos sistemas de abastecimento de água, a tecnologia de comunicação a ser utilizada se torna um parâmetro que requer ainda mais atenção no desenvolvimento da rede.

Tendo em vista essas limitações e visando alcançar o objetivo de validar a viabilidade de

implementação de uma rede de sensores sem fio de baixo custo, baixo consumo e longo alcance para monitoramento de variáveis de interesse em sistemas subterrâneos, é avaliada a performance da tecnologia de comunicação escolhida, visto que é a etapa mais crítica no desenvolvimento de RSSF, responsável pelo alcance da transmissão e consequente quantidade necessária de dispositivos, além de ser a etapa responsável pelo maior consumo de energia da rede.

Devido a isso, foi escolhida a tecnologia de comunicação LoRa, muito utilizada em RSSF convencionais, e foi avaliado seu comportamento em ambientes subterrâneos, analisando o desempenho da comunicação e a influência de diferentes parâmetros do ambiente subterrâneo e da própria tecnologia utilizada para a comunicação entre dispositivos da rede. Após a análise dos resultados, é possível avaliar a viabilidade de utilização dessa tecnologia para diferentes aplicações em cidades inteligentes, visando principalmente a possibilidade de implementação para monitoramento de perdas ao longo da tubulação em sistemas de abastecimento de água.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um estudo sobre a comunicação entre sensores que constituem uma rede de sensores sem fio subterrânea. Esse trabalho visa avaliar a performance da conexão estabelecida entre os dispositivos e definir como seus diferentes parâmetros se comportam nesse cenário. Nesse sentido, será realizado um estudo comparativo com redes convencionais para determinar a influência do ambiente subterrâneo na comunicação.

A tecnologia de comunicação utilizada será a tecnologia LoRa, por apresentar características como longo alcance, baixo consumo de energia, dentre outras que serão detalhadas ao longo do trabalho. Devido a sua ampla utilização em RSSF, esta tecnologia, que se adequa a diferentes aplicações sobre a superfície, foi escolhida para ter seu comportamento subterrâneo analisado e avaliar sua possível utilização em sistemas que se localizam abaixo do solo.

Será realizado um estudo com sensores em cenários distintos e com alteração de diferentes parâmetros para estabelecer uma comunicação entre os dispositivos. Dessa forma, será possível estabelecer um padrão que auxilie determinar a viabilidade da utilização da tecnologia LoRa para comunicação em RSSF subterrâneas a depender da aplicação. Além disso, os resultados poderão auxiliar no desenvolvimento das redes, ao definir os critérios que constituem o limite para a conexão ser estabelecida em determinadas situações, podendo auxiliar na decisão de geolocalização para a distribuição dos sensores.

Esse estudo visa avaliar a viabilidade dessa comunicação sem fio para aplicação em uma rede de sensores para sistemas de distribuição de água, nos quais os dispositivos serão distribuídos nos dutos da rede de abastecimento para realizar o sensoriamento dos parâmetros de interesse e posterior envio desses dados entre sensores subterrâneos e outros situados sob a superfície. Essa aplicação apresenta inúmeras vantagens, como a rápida detecção de falhas,

economia de recursos financeiros e naturais, além da proteção do sistema de monitoramento contra vandalismos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar as possíveis técnicas de comunicação sem fio, por revisão bibliográfica, e determinar a que mais se adequa ao sistema em questão;
- Analisar o protótipo já utilizado pela empresa parceira do projeto (CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba) para aprimorar os parâmetros passíveis de melhorias;
- Desenvolver um protótipo de nó sensor com capacidade de comunicação sem fio à longa distância e baixo consumo de energia;
- Realizar testes físicos em ambiente subterrâneo para coletar os dados necessários para análise;
- Desenvolver um estudo comparativo e determinar os limites atingidos pela comunicação subterrânea sob diferentes condições e em diferentes cenários;
- Avaliar a aplicabilidade da tecnologia de comunicação estudada para diferentes situações, em especial, para monitoramento de sistemas de abastecimento de água.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de abastecimento de água são estruturas desenvolvidas para fornecer água potável para diversos fins em zona urbana ou rural. Essas estruturas compõem o setor de saneamento e são essenciais para garantir elevados índices de desempenho de saúde e qualidade de vida da população, além de colaborar com o desenvolvimento econômico do local.

A Constituição da República Federativa do Brasil, publicada no ano de 1988, garante em seu artigo 196 que "A saúde é direito de todos e dever do Estado, garantido mediante políticas sociais e econômicas que visem à redução do risco de doença e de outros agravos e ao acesso universal e igualitário às ações e serviços para sua promoção, proteção e recuperação"(BRASIL, 1988).

O saneamento básico é então um direito garantido pela constituição federal e é definido pela Lei nº. 14026/2020 em seu artigo 7º como serviços, instalações e infraestruturas que abrangem as atividades de abastecimento de água, esgotamento sanitário, coleta e destino de resíduos sólidos, tratamento de efluentes e limpeza e drenagem urbanas (BRASIL, 2020). Porém, dados divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) referentes ao ano de 2019, apresentaram que quase metade da população do Brasil, aproximadamente 46% dos brasileiros, não têm acesso a sistemas de esgotamento sanitário e aproximadamente 16% da população, ou seja, quase 35 milhões de pessoas não possui acesso à água tratada (SNIS, 2020).

A qualidade do saneamento de um país afeta diretamente seus indicadores de saúde pública, ou seja, a falta ou ineficiência desses sistemas pode ser responsável pelo prejuízo na qualidade de vida da população, além de possibilitar o surgimento de diversas doenças, principalmente em áreas de baixa renda. A existência e adequação do saneamento para atender as necessidades básicas da população são imprescindíveis para garantir uma melhor qualidade de vida.

Considerando o conceito apresentado na lei de saneamento, uma das principais atividades que compõem o conceito de saneamento básico é o abastecimento de água de áreas urbanas e rurais. Gomes (2019) apresenta diversos fatores que influenciam diretamente o consumo de água realizado por determinada população, como por exemplo, o clima do local, o padrão de vida e os hábitos da população, a qualidade e o custo da água fornecida, a pressão na rede de abastecimento e as perdas de água ao longo do sistema. Além disso, a demanda do sistema de abastecimento de determinado local depende, além da quantidade requerida para o uso domiciliar, do atendimento para:

- **Uso Comercial:** que representa a água disponibilizada para restaurantes, bares, hotéis e demais estabelecimentos comerciais, que, em geral, representam uma parcela de consumo

muito superior ao das residências.

- **Uso Industrial:** que representa a quantidade utilizada em indústrias que utilizam a água como matéria prima ou para suas diversas atividades, como refrigeração e lavagens. A água para uso industrial geralmente é consumida em uma quantidade superior àquela consumida pelo uso comercial ou doméstico.
- **Uso Público:** a água utilizada para uso público pode ser usada na lavagem de ruas, edifícios públicos, irrigação de canteiros e jardins, dentre outras atividades. Essas atividades para usos públicos consomem água de forma bastante significativa.

É difícil prever o valor exato da quantidade de água necessária para suprir a demanda de cada uma dessas atividades, mas são conhecidos valores médios de consumo que podem ser tomados como base ao se realizar um levantamento do consumo de determinado local. Além disso, é necessário considerar o aumento da população durante o período de alcance do projeto, as possíveis variações de consumo e as perdas no sistema de distribuição (GOMES, 2019).

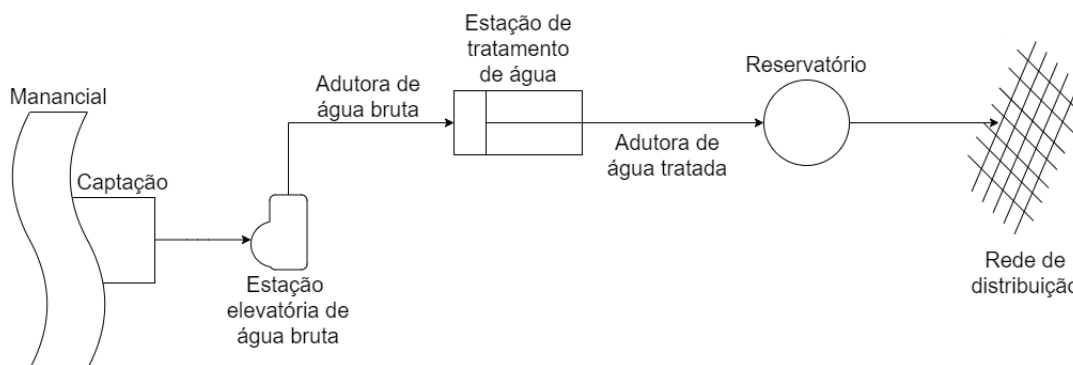
O alcance do projeto é considerado como o tempo de vida útil do sistema, no qual ele conseguirá atender a população. O alcance dos projetos de sistemas de abastecimento de água, em geral, varia de 10 a 30 anos no Brasil e esse tempo é influenciado por fatores como a tendência de crescimento da população, o desenvolvimento da região, a vida útil dos equipamentos que compõem o projeto, a facilidade de ampliação das obras físicas e o investimento disponível para o projeto. Essa previsão considera aspectos físicos, econômicos, sociais e políticos e, devido a isso, apresenta certa complexidade em seus cálculos.

Um projeto de abastecimento de água requer informações sobre a quantidade de água requerida, a disponibilidade hídrica do local e as restrições hidráulicas do sistema, e sua concepção visa minimizar os custos de instalação e produção, levando em consideração os possíveis impactos ambientais. De acordo com a NBR 12211, publicada em 1992, a concepção de um sistema público de abastecimento de água requer um estudo, quantitativo e qualitativo, dos arranjos de diferentes partes do sistema de modo a formarem um todo com a melhor solução, considerando os pontos técnico, econômico e ambiental.

Os sistemas de abastecimento de água são compostos, em geral, por mananciais, unidades de captação de água, estações elevatórias, estações de tratamento de água (ETAs), adutoras, reservatórios, redes de distribuição e ligações prediais. Na Figura 1 pode-se observar um exemplo de sistema de abastecimento com essas etapas detalhadas, mas essa estrutura pode variar de acordo com as necessidades de cada sistema. Em cidades de médio ou grande porte, por exemplo, pode ser utilizado mais de um manancial ou múltiplas estações de tratamento para garantir o abastecimento necessário para o local.

Nas subseções a seguir, são descritas as partes básicas que constituem o sistema de abastecimento de água.

Figura 1 – Esquema básico de um sistema de abastecimento de água



Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006).

### 2.1.1 Mananciais

A etapa de definição das características do projeto exige a análise do tipo de manancial que irá atender determinada demanda. Os mananciais podem ser de fontes superficiais, como rios, lagos, barragens e represas artificiais, ou subterrâneas, como os diversos tipos de aquíferos, que utilizam poços para a captação da água.

A decisão de qual manancial, ou quais mananciais, escolher para abastecer uma região deve ser realizada baseada em amplos estudos, não apenas em aspectos econômico-financeiros. Essa escolha depende de alguns fatores, como a disponibilidade hídrica, ou seja, a quantidade e a qualidade da água disponível, o custo para captar, tratar e transportar a água da fonte, as suas tendências de preservação e condições de segurança (RICHTER; NETTO, 1991). Além dos fatores já citados, também deve ser analisada a distância do manancial à área consumidora, considerando a cota piezométrica da fonte de água em relação aos níveis topográficos da zona a ser abastecida.

Ao passar dos anos, com o crescimento das cidades, os mananciais situados próximos às áreas urbanas se tornam escassos para atender o aumento da demanda, além de, muitas vezes, sofrerem com a poluição nos centros urbanos. Um caso conhecido desse problema é o dos rios que cruzam a cidade de São Paulo, que se tornaram poluídos e não podem ser utilizados para o abastecimento da cidade, sendo necessária a captação em mananciais a mais de cem quilômetros do centro urbano.

Atualmente, com a escassez hídrica que afeta diversas cidades, é crescente a busca por fontes de água não convencionais para o abastecimento. Em muitos locais, se utiliza a água do mar para garantir o abastecimento hídrico da região, como é o caso da cidade de Barcelona, na Espanha, que utiliza técnicas de dessalinização para abastecer parte da cidade (ANDRADE, 2019). Outra solução, é a potabilização de águas do esgotamento sanitário para utilização no consumo humano através de estações de tratamento especiais, como já ocorre em Israel (DIAS, 2014). A utilização dessas técnicas só é considerada viável se os custos de implantação e operação do sistema forem inferiores à receita proveniente do consumo de água pela população.

### 2.1.2 Estruturas de Captação

As estruturas de captação são responsáveis por realizar a captação de água dos mananciais e sua estrutura depende do tipo de manancial, podendo ser superficial ou subterrâneo. Essas estruturas são, em base, constituídas de um ponto de captação e um condutor para direcionar a água captada do manancial, podendo ter a adição de outros dispositivos, como grades que impedem a passagem de materiais grosseiros flutuantes, a depender da necessidade do local. Essas estruturas têm o objetivo de retirar a água que será destinada a um sistema de abastecimento.

As obras devem ser projetadas para funcionar de forma ininterrupta, em qualquer época do ano, de acordo com a necessidade da região, permitir a captação da água em quantidade e qualidade adequadas para o posterior consumo e facilitar o acesso para manutenção e operação do sistema. Alguns exemplos de estruturas de captura estão ilustrados na Figura 2.

### 2.1.3 Estações elevatórias e Adutoras

O transporte da água pode necessitar de estações elevatórias, ocorrer por gravidade ou de uma forma que mescla as duas maneiras. Os sistemas que funcionam por gravidade não necessitam de estações elevatórias, pois os desníveis topográficos entre os mananciais e os pontos de consumo tornam possível o transporte da água utilizando a energia potencial gravitacional, sem a necessidade de utilizar energia para transportar ou pressurizar a água. Porém, em alguns casos não há a disponibilidade de cotas topográficas, então é necessário utilizar sistemas mecânicos para conduzir a água de forma pressurizada até os pontos de consumo. Uma estação elevatória, também conhecida como de recalque, é formada pelo conjunto de tubulações, bombas, motores e acessórios necessários para transportar certa vazão de água de uma cota de nível de água inferior  $Z_1$  para uma cota superior  $Z_2$ , onde  $Z_2 > Z_1$  (PORTO et al., 2006).

O transporte da água entre os mananciais, a estação de tratamento e os reservatórios é realizado por meio de adutoras, que são tubulações que transportam a água por recalque ou por gravidade, dependendo dos desníveis topográficos e das distâncias a serem percorridas pelas tubulações. Esse transporte pode ser de água bruta, após sair do manancial até chegar à estação de tratamento, ou de água tratada, após sair da ETA até chegar aos reservatórios para ser armazenada e posteriormente destinada ao local de consumo.

### 2.1.4 Estação de Tratamento de Água (ETA) e Reservatórios

A água bruta captada de um manancial pode ter impurezas ou propriedades que podem afetar negativamente a saúde de possíveis consumidores ou ser inadequada para determinada aplicação. A água bruta necessita então, na maioria das vezes, de um tratamento para se tornar potável. O tratamento de água para abastecimento público se originou da Escócia com o primeiro filtro lento e o Brasil foi pioneiro nas técnicas de filtração rápida (RICHTER; NETTO, 1991).

O processo de potabilização varia de acordo com as características da água bruta e o

Figura 2 – Exemplos de estruturas de captação de água bruta



(a) Estrutura de captação flutuante



(b) Estrutura de captação subterrânea

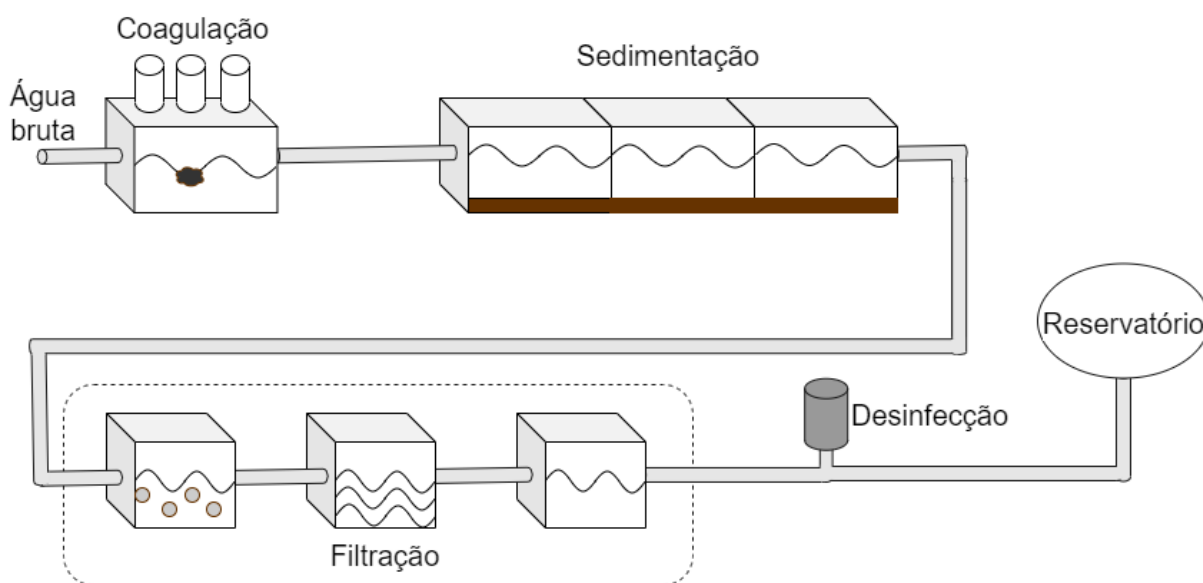


(c) Estrutura de captação utilizando técnica de gradeamento

objetivo para o qual será destinada após o tratamento. Dessa forma, torna-se variável também o valor e a complexidade do processo de potabilização. O tratamento pode possibilitar a remoção de impurezas, como bactérias, ferro, manganês, e a modificação de certas propriedades, como turbidez, cor, odor e sabor.

A estação de tratamento de água é a etapa do sistema de distribuição responsável pelo tratamento e potabilização da água. Na Figura 3 é possível observar o esquema do funcionamento básico de uma estação de tratamento. A água bruta advinda do manancial passa inicialmente por um processo de coagulação, utilizando um elemento químico coagulante na água para aglutinar as partículas finas que estão em suspensão. Em seguida, a água passa por um processo de sedimentação, onde as partículas aglutinadas em flocos são separadas em decantadores da água que segue para filtração. Nessa etapa, há um conjunto de filtros para retenção de impurezas, como areia, por exemplo. Por fim, é adicionado algum elemento químico, como o cloro, para eliminar possíveis germes e proporcionar a desinfecção da água, que será conduzida aos reservatórios.

Figura 3 – Esquema do funcionamento básico de uma Estação de Tratamento de Água (ETA)



Fonte: Adaptado de Gomes (2019).

Os reservatórios servem para suprir as diferenças entre o consumo máximo diário e o abastecimento, a denominada reserva de equilíbrio, garantir que os pontos de consumo recebam água caso haja uma breve interrupção no abastecimento, condicionar as pressões da rede de distribuição e disponibilizar água para urgências, como combate a incêndios.

### 2.1.5 Redes de distribuição e ligações prediais

As redes de distribuição são responsáveis pelo transporte da água em quantidade, qualidade e pressão suficientes para abastecer os pontos de consumo doméstico, comercial, industrial ou público. A NBR12218 descreve algumas recomendações sobre as redes urbanas de distribui-

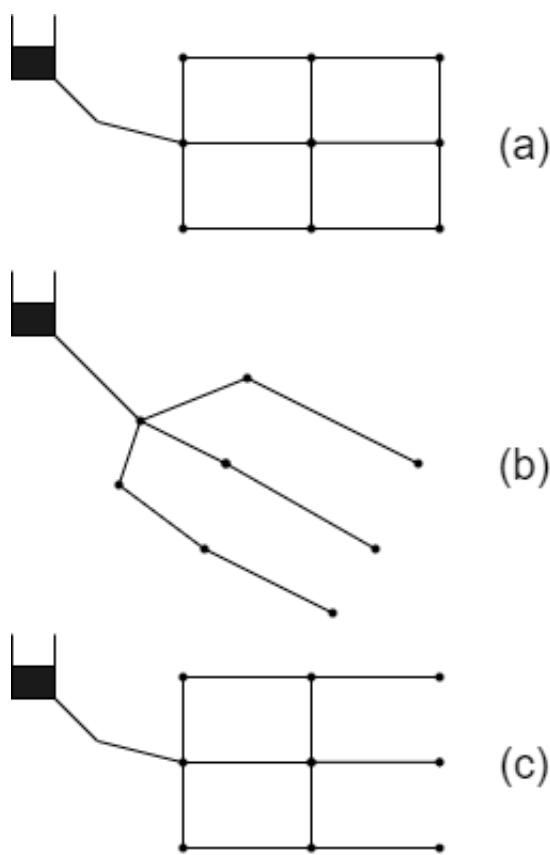
ção, como devem estar localizadas em espaços públicos não edificados, as tubulações principais devem atender às áreas de maior demanda, devendo ser previstas também tubulações secundárias para atender às ligações prediais, e a rede deve ser composta, prioritariamente, de circuitos fechados, evitando locais de água parada.

De acordo com Porto et al. (2006) e Gomes (2019), as redes de distribuição podem apresentar, basicamente, três tipos de estrutura:

- **Malhada:** onde as tubulações são distribuídas em forma de malhas ou anéis, tornando possível a reversibilidade no sentido das vazões, de acordo com a demanda em cada ponto de consumo. O desenvolvimento desse tipo de rede é mais complexo e deve ser priorizado em centros urbanos de médio e grande porte, pois contribui para que o abastecimento não sofra paralisações.
- **Ramificada:** onde as tubulações são dispostas em forma de ramos. Dessa forma, o abastecimento é realizado a partir de um ramo principal que distribui a água aos ramos secundários e, nesse caso, o sentido da vazão nos trechos da rede é conhecido. O ponto negativo dessa estrutura é que caso haja uma interrupção no abastecimento, por falhas ou para manutenção, toda área à jusante ficará sem abastecimento durante esse período. Porém, como vantagem, apresenta um custo de implantação inferior ao ser comparado com uma rede malhada de porte semelhante. Algumas aplicações são em pequenas comunidades, loteamentos e urbanizações particulares.
- **Mista:** as redes consideradas mistas apresentam a combinação dos dois tipos de distribuição citados anteriormente. Nesse caso, uma parte do sistema é distribuída em formato de malha e outra em ramos, sendo essa última normalmente localizada em periferias ou áreas de expansão do sistema.

A Figura 4 apresenta os possíveis traçados das redes de distribuição.

Figura 4 – Traçados da rede de distribuição a) malhada b) ramificada e c) mista



Fonte: Adaptado de Gomes (2019).

As interligações entre as tubulações da rede de distribuição e o interior dos pontos de consumo são realizadas por estruturas denominadas de ligações prediais. Essas ligações são os componentes finais da rede de abastecimento e compreendem um dispositivo de tomada de água da rede de distribuição, o ramal predial, que corresponde a parte da tubulação que conduz a água da rede de distribuição ao ponto de consumo, e o hidrômetro, que realiza a medição do volume de água consumido.

## 2.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA - CENÁRIO DE PERDAS

As perdas em um sistema de abastecimento se caracterizam pela diferença entre o volume de água disponibilizado para distribuição (macromedido) e o volume micromedido nos pontos de consumo. As perdas de água podem ocorrer ao longo de toda a rede e contribuem para aumentar a demanda bruta do sistema, sendo classificadas em reais ou aparentes (KUSTERKO et al., 2018). A Tabela 1 relaciona a entrada e saída de água em um sistema de abastecimento urbano de acordo com a Associação Internacional de Água (IWA). Como pode ser observado na tabela, as perdas totais (reais e aparentes) são dadas pela diferença entre a água inserida no sistema e o consumo autorizado.

Tabela 1 – Relação de entrada e saída de água em um sistema de abastecimento.

| Volume de entrada no setor | Consumo autorizado | Consumo autorizado faturado     | Consumo faturado medido                                             | Água faturada     |
|----------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                            |                    |                                 | Consumo faturado não medido (estimado)                              |                   |
|                            | Perda de água      | Consumo autorizado não faturado | Consumo não faturado medido (uso próprio, caminhão-pipa, etc)       | Água não faturada |
|                            |                    |                                 | Consumo não faturado não medido (combate a incêndios, favelas, etc) |                   |
|                            |                    | Perdas aparentes                | Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)                   |                   |
|                            |                    |                                 | Erros de medição                                                    |                   |
|                            | Perdas reais       |                                 | Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição                  |                   |
|                            |                    |                                 | Vazamento nos reservatórios                                         |                   |
|                            |                    |                                 | Vazamento nos ramais                                                |                   |

Fonte: Adaptado de Gomes (2019).

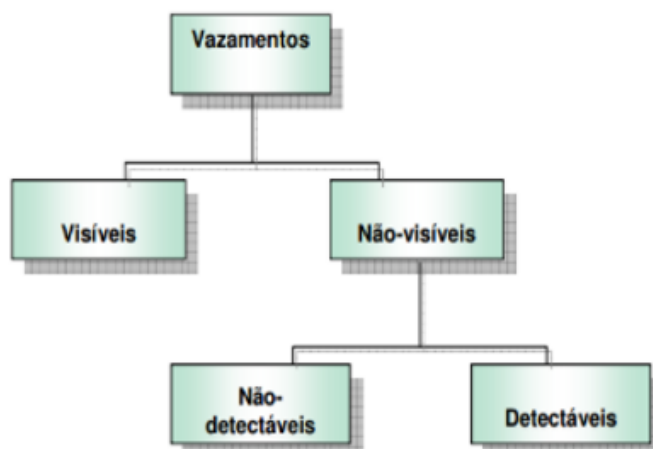
O consumo autorizado, em unidades de vazão, é a soma entre o consumo faturado e o não faturado. Nesse caso, a quantidade utilizada é a permitida para utilização do consumidor, da própria empresa de distribuição ou para atividades que a empresa dispensa o pagamento de contas, como instituições filantrópicas, hospitais, dentre outras. Por outro lado, há o consumo não autorizado pela empresa, que é considerado como perdas de água do sistema.

As perdas do sistema podem ser classificadas como reais (ou físicas) ou aparentes. As perdas reais são decorrentes de vazamentos no sistema de abastecimento, que podem ocorrer de forma reduzida e contínua, mas que pela sua vazão não são detectados facilmente e podem permanecer por um longo período, sendo responsáveis por uma parcela considerável das perdas do sistema, ou podem ser dadas por uma ruptura na tubulação, cuja vazão é maior e o vazamento aflora sobre o pavimento, sendo facilmente detectado pela população. A classificação desses vazamentos pode ser observada na Figura 5. As perdas aparentes são definidas como o volume de água consumido pela população, mas que não é medido pela empresa de abastecimento, devido a ligações clandestinas, fraudes, erros de medição ou falhas no cadastro (FARLEY; TROW, 2003) (MOASHERI; JALILI-GHAZIZADEH, 2018)(GOMES, 2019).

Considerando as perdas reais em um sistema de abastecimento, é considerado que não existem redes livres de perdas, ou seja, todas possuem vazamentos, variando apenas a quantidade. Entretanto, há níveis aceitáveis para perdas em um sistema de abastecimento e se ultrapassar 30% do total disponibilizado para distribuição é considerado inaceitável. Considerando que existem critérios diferentes para o cálculo das perdas nos sistemas, o Japão, por exemplo, reduziu seus índices de perdas para aproximadamente 10%, já a Austrália e a Nova Zelândia apresentam valores ainda menores.

No Brasil, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) é responsável

Figura 5 – Definição dos vazamentos em um sistema de distribuição de água.



Fonte: (TSUTIYA, 2008).

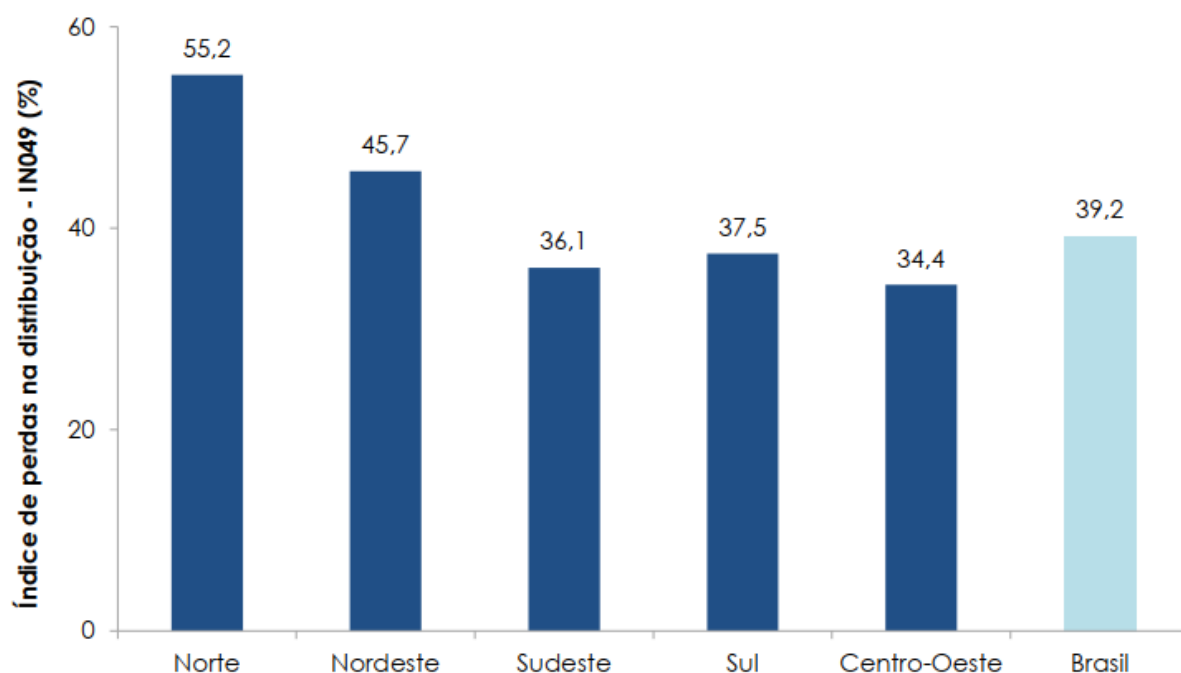
pelo acompanhamento de informações sobre o saneamento no país. O gráfico apresentado na Figura 6 apresenta os índices de perda ao longo da distribuição por região do Brasil e a média do país. Em 2019, o índice médio de perdas na distribuição no Brasil era de 39,2%, valor 0,7% mais alto que no ano anterior. Esse valor corresponde ao volume de água disponibilizado que não foi contabilizado como consumido, seja por vazamentos nas rede, ligações clandestinas, erros nas medições, dentre outros motivos. Os indicadores calculados pelo SNIS não diferenciam as perdas reais e aparentes, pois as técnicas de medição disponíveis muitas vezes não incluem informações necessárias para essa diferenciação, como a detecção de vazamentos, por exemplo (SNIS, 2020).

As regiões Norte e Nordeste apresentaram valores maiores que a média nacional, assim como ocorreu nos anos anteriores. Já as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentaram níveis abaixo da média do país, mas ainda considerados altos para perdas em sistemas de abastecimento de água. Esses valores sinalizam contrastes importantes entre essas macrorregiões. Além disso, também são apresentados pelo SNIS os índices de perdas dos prestadores de serviço em abrangência nacional, comparando os valores obtidos em 2019 com os do ano anterior, como pode ser observado na Figura 7. É possível observar que a CAGEPA/PB apresenta uma média próxima, mas inferior, à média nacional (SNIS, 2020).

De acordo com Adedeji et al. (2017) e Gomes (2019), alguns dos principais problemas causados por vazamentos nos sistemas de distribuição são danos ao patrimônio público e privado, aumento nos custos de produção, operação e manutenção, o que gera valores mais elevados para o consumidor e aumento no risco de contaminação da água, em casos de pressão menor ou igual a zero, quando há a possibilidade de inserção de agentes nocivos no sistema.

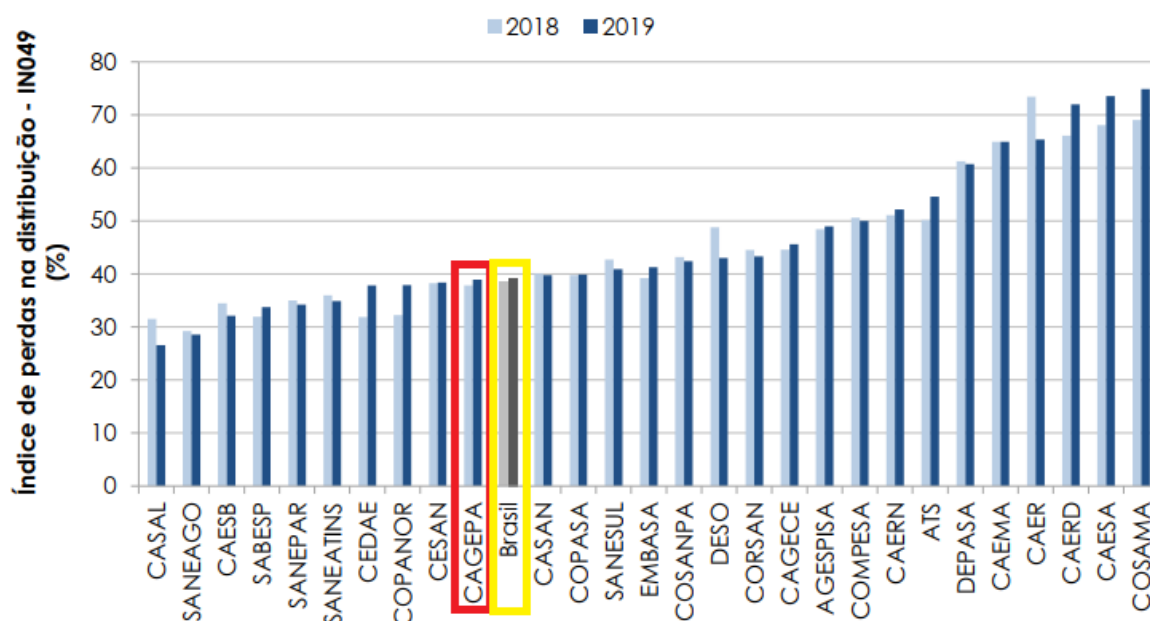
Diversos programas de políticas públicas são desenvolvidos para evitar o desperdício de água e reduzir as perdas dos sistemas. Esses programas tratam de temas como a conscientização

Figura 6 – Índices de perdas na distribuição considerando as regiões geográficas e média do Brasil em 2019



Fonte: (SNIS, 2020)

Figura 7 – Índice de perdas na distribuição dos prestadores de serviços de abrangência regional nos anos de 2018 e 2019



Fonte: (SNIS, 2020)

da população quanto ao uso da água, práticas para conservação, economia e reuso da água disponibilizada e o desenvolvimento de novas ferramentas para combater as perdas no sistema de abastecimento (COMMISSION, 2015).

### 2.3 INDÚSTRIA 4.0

A Revolução Industrial é considerada como o marco inicial da era das indústrias. Essa revolução começou na Grã-Bretanha no século XVIII e se espalhou pelo mundo, principalmente pela Europa, em seguida. Foi um período de transformação econômica, no qual as atividades realizadas manualmente foram substituídas pela manufatura industrial, realizada com o auxílio de máquinas. Desde então, ocorreu um progresso significativo no desenvolvimento tecnológico, com o surgimento ao longo dos anos de máquinas a vapor, ferrovias, siderúrgicas, eletrônica, computadores, dentre outras tecnologias. O período industrial da história foi dividido de acordo com esses avanços em novas eras, alcançando recentemente a Quarta Revolução Industrial, também denominada de Indústria 4.0 (LELE, 2019).

O conceito que embasa o nome é de fácil compreensão, pois traduz a progressão das revoluções industriais. A ideia desse novo período é trazer aspectos de conectividade, informação e inteligência para a manufatura. O objetivo é que empresas integrem suas máquinas, sistemas de armazenamento e serviços de produção na forma de sistemas ciberfísicos (LELE, 2019). Essas tecnologias permitem uma abordagem industrial automatizada e interconectada que envolve máquinas, produtos e seres humanos para atingir um maior desempenho industrial (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018).

A indústria 4.0 utiliza soluções nas áreas da automação inteligente, geração/troca de dados e análise do processo produtivo (CHEN et al., 2017) (SCHMIDT et al., 2015) (ROJKO, 2017), introduzindo tecnologias de comunicação e sensoriamento na indústria, o que possibilita uma supervisão em tempo-real do processo industrial, resultando em uma grande quantidade de dados gerados e analisados (SCHMIDT et al., 2015). O rápido avanço da eletrônica, das tecnologias de informação e do processo de produção possibilitou que a Indústria 4.0 inserisse sistemas de medição e Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things*- IoT) em praticamente todas as áreas do processo industrial (CHEN et al., 2017) (ROJKO, 2017) (ZHONG et al., 2017).

As empresas de distribuição de água têm vários modos de monitorar e controlar as diferentes variáveis que são importantes para o bom funcionamento de seu sistema. O monitoramento de parâmetros como nível de pH, pressão, temperatura, vazamentos, oxigênio dissolvido, entre outros, é realizado de acordo com as necessidades de cada empresa, a fim de reduzir perdas e aumentar a eficiência do sistema. Esse monitoramento pode ser realizado por operadores de campo, mas não é uma solução eficiente para esse tipo de sistema devido à sua grande extensão e inacessibilidade. Considerando isso, as empresas estão investindo cada vez mais em soluções automatizadas.

Um sistema IoT é responsável pela conexão entre os sistemas físicos e as informações virtuais que integram muitas áreas das tecnologias modernas (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016) (MITTAL et al., 2019). Uma das principais características da tecnologia IoT é que permite a conexão entre os equipamentos da indústria através de componentes eletrônicos embutidos conectados à Internet (COSTA et al., 2019) (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Ou seja, com a tecnologia IoT os equipamentos físicos podem fazer parte de redes de informação, tornando-se partes do processo como dispositivos inteligentes (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018) (ROSSIT; TOHMÉ; FRUTOS, 2019).

Os sistemas IoT são utilizados para integrar a capacidade de sensoriamento, interconexão e geração de dados aos equipamentos da indústria (CHEN et al., 2017). Devido à utilização desses sistemas, a Indústria 4.0 possui o necessário para obter uma grande quantidade de informações das diversas etapas do processo industrial. Em termos gerais, a Indústria 4.0 visa aumentar o desempenho industrial utilizando tecnologias emergentes para alcançar produtividade, flexibilidade, interoperabilidade e sustentabilidade na produção (DALENOGARE et al., 2018) (TORTORELLA; FETTERMANN, 2018) (NARA et al., 2021).

Entretanto, para se adequarem à era da Indústria 4.0, é necessária a substituição dos equipamentos utilizados anteriormente por dispositivos inteligentes, o que poderá acarretar um custo financeiro considerável. É provável que grandes indústrias e empresas possam custear essas despesas, mas para as de pequeno ou médio porte, essa realidade torna-se um obstáculo. Uma possível solução para essas indústrias é introduzir em seus equipamentos características de sensoriamento, comunicação e processamento digital de informações, o denominado processo de “IoTização”. Um processo de “IoTização” é definido como um processo para introduzir em equipamentos já existentes na indústria características de sensoriamento, comunicação e processamento digital de informações.

Em Lieping, Peng e Fei (2016), é apresentado um sistema para monitoramento da qualidade da água. O sistema é composto por dispositivos com capacidade de monitoramento e roteamento com um centro de monitoramento remoto. Esses equipamentos podem integrar diferentes tipos de transdutores de medição, como monitoramento do nível de pH, da temperatura e do oxigênio dissolvido.

É necessário que os sistemas de distribuição de água garantam a eficiência e padrões de serviço de parâmetros como pressão, qualidade da água e confiabilidade. A utilização de dispositivos inteligentes nas redes de distribuição permite o monitoramento e controle em tempo real do sistema. O controle em tempo real, nesse caso, se refere a uma ação de controle que ocorre em um intervalo de até poucos minutos. Nesse caso, o controle não é manual nem em horários específicos. Diversos estudos realizados em escala mundial apresentaram sistemas em tempo real que foram implementados para atingir diversos objetivos, como melhorar a qualidade da água e a operação da rede (CREACO et al., 2019).

Em um período no qual as questões de gerenciamento de redes de abastecimento de água

são cada vez mais consideradas pelas concessionárias de água, é possível apresentar diversas razões que fundamentam a implementação de um monitoramento e controle em tempo real em redes de abastecimento, como o facilitamento da supervisão de variáveis através de sistemas SCADA e tecnologias IoT e a resposta rápida e eficiente que permite melhorar a operação do sistema e buscar a economia de recursos naturais e econômicos (BELLO et al., 2019).

AbdelMeguid, Skworcow e Ulanicki (2011) e Creaco e Walski (2018) mostraram os benefícios de se utilizar válvulas de redução de pressão controladas em tempo real quando comparadas com as de uso estático. As controladas em tempo real são modificadas em função do fluxo de água e os autores comprovaram que ao utilizá-las, é possível aumentar a eficiência na redução de pressão com vantagens em termos de redução dos vazamentos. Esses benefícios aumentam ainda mais quando é utilizado um controle remoto, ao se comparar com o controle local, no nó que apresenta estado crítico da rede (BERARDI et al., 2018) (CREACO; WALSKI, 2018).

Um sistema de baixa complexidade e alta eficiência energética para detecção de vazamentos de tubulações é apresentado em (ALSAQHAN et al., 2017). Os dispositivos devem ter baixo consumo de energia quando usados em aplicações de monitoramento de dutos devido às difíceis substituições de baterias em áreas remotas e ambientes perigosos. Neste trabalho, Alsaqhan et al. (2017), o consumo do microprocessador e a energia utilizada para transmissão são otimizados para aumentar a vida útil da bateria do sistema. Em Kim et al. (2010), um sistema autônomo chamado SPAMMS é apresentado. Ele usa um robô com tecnologias de detecção para identificar eventuais vazamentos e os corrigir. Os sensores fornecem dados em tempo real que são usados para detectar e corrigir incidentes (por exemplo, vazamentos ou corrosão), permitindo o monitoramento e a manutenção dos dutos.

Sustentabilidade é um conceito amplo que abrange diversos aspectos (BEIER; NIEHOFF; XUE, 2018). O conceito de sustentabilidade não é limitado ao ambientalismo, pois envolve também questões econômicas e sociais (CHOI; NG, 2011) (FORD; DESPEISSE, 2016). A implantação de dispositivos mais inteligentes em empresas e indústrias pode oferecer inúmeras vantagens, como aumento da produtividade, redução de desperdício e eficiência na utilização de recursos (TORTORELLA; FETTERMANN, 2018).

No sistema de distribuição de água, o transporte de água é realizado principalmente por dutos. Devido à extensão da tubulação e às condições de instalação, o sistema pode ter vazamentos que causarão grandes quantidades de perda de água. Para fornecer uma resolução mais rápida desse tipo de problema, novas tecnologias para automatizar o sistema podem ser usadas. A rede de sensores sem fio (RSSF) é uma das tecnologias mais usadas para detectar vazamentos nesse tipo de estrutura (VASANTRAO; RAJBHOJ, 2017).

Em Vasantrao e Rajbhoj (2017), um sistema que usa sensores de pressão para monitorar a pressão da água é apresentado, a estação base recebe os dados medidos usando um módulo sem fio. O resultado pode ser alcançado comparando os valores médios medidos pelos nós sensores

com um valor limite. Se o valor médio for menor que o limite determinado, significa que um vazamento é detectado nos dutos e este é mostrado na tela.

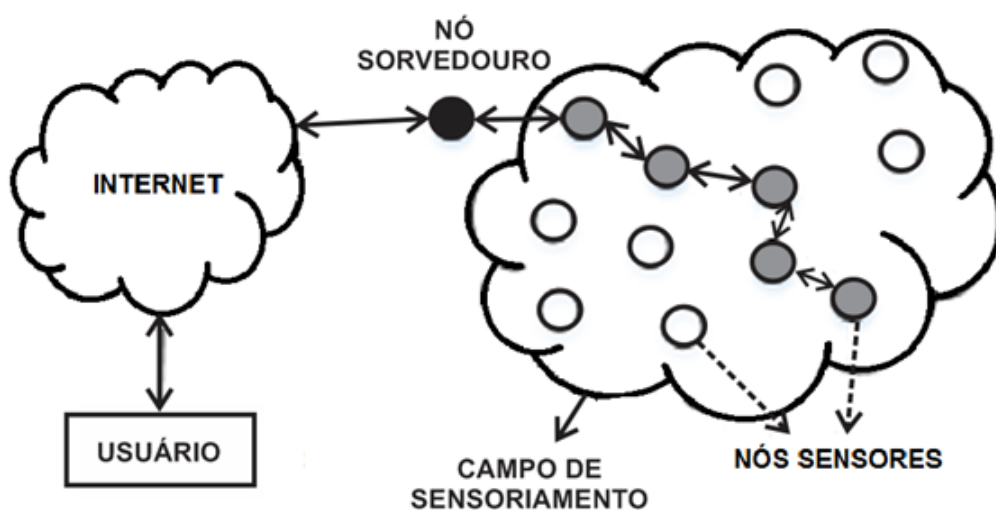
As RSSF podem ser utilizadas para o monitoramento em larga escala com base em medições espaciais e temporais, realizadas por nós sensores distribuídos e interconectados por uma comunicação sem fio (CORKE et al., 2010) (FRERIS; KOWSHIK; KUMAR, 2010). Esses nós sensores podem ser usados para a detecção de vazamentos, monitorando diferentes parâmetros de interesse, como pressão ou fluxo na rede de distribuição.

## 2.4 REDE DE SENSORES SEM FIO

Uma Rede de Sensores Sem Fio é constituída por nós sensores distribuídos em um ambiente e utilizados para monitorar determinadas variáveis de interesse, como por exemplo, monitoramento de distância, umidade, temperatura, atividade sísmica, peso, pressão, dentre outras (NAYAK; STOJMENOVIC, 2010).

Os nós sensores são dispositivos eletrônicos distribuídos no ambiente responsáveis pela medição da variável desejada e pela transmissão dos dados coletados para outros nós sensores da rede ou para um nó sorvedouro. Esses dados são, em seguida, transmitidos a uma central de controle para análise e processamento. Em alguns casos, o nó sorvedouro faz parte da central de controle, que deve ser capaz de, após manipular os dados recebidos, executar tarefas de gerenciamento e controle pré-determinadas (SOUSA; LOPES, 2011). Além disso, é possível que o nó sorvedouro seja capaz de se conectar à Internet, por exemplo, possibilitando ao usuário ter acesso aos dados da rede (AKYILDIZ et al., 2002). A estrutura básica de uma RSSF pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 – Nós sensores distribuídos em um campo de sensoriamento.



Fonte: Adaptado de Akyildiz et al. (2002).

De acordo com Labrador e Wightman (2009), os nós sensores de uma rede de sensores sem fio possuem diversos componentes básicos que os constituem, sendo eles:

- Sensores e atuadores: possuem a capacidade de sensoriamento e controle das variáveis de interesse do sistema;
- Processador: responsável pelo controle do dispositivo, execução do programa e processamento dos dados;
- Memória: capacidade de armazenamento dos dados medidos e do código utilizado para programação do dispositivo;
- Transceptor de rádio: responsável pela transmissão e recepção dos dados obtidos;
- Fonte de energia: responsável por manter o funcionamento do sistema, sem que este seja interrompido, geralmente utilizando baterias ou, atualmente, com técnicas de colheita de energia.

Quanto às características dos nós sensores, uma RSSF pode ser definida como homogênea quando todos os nós sensores possuem as mesmas características de sensoriamento, processamento, comunicação e potência, ou como uma rede heterogênea, quando os nós sensores possuem diferentes capacidades ou funções de monitoramento (AL-KARAKI; KAMAL, 2004). Em geral, as RSSF podem ser formadas por dois tipos distintos de nós, tem-se o denominado como *Full Function Device* (FFD), que pode atuar como um simples nó sensor, como roteador ou assumir a função de coordenador, podendo se comunicar com qualquer nó da rede, ou pode ser classificado como *Reduced Function Device* (RFD), que é um dispositivo desenvolvido para atuar como um simples nó sensor, com suas atividades voltadas para o sensoriamento. São dispositivos que, em geral, apresentam menos recursos que os classificados como FFD.

As redes de sensores sem fio podem ser definidas de acordo com o modo que os dispositivos se conectam entre si. Segundo Farej e Abdul-Hameed (2015), as principais formas de se agrupar são, de acordo com a topologia, em:

- Estrela: essa topologia utiliza nós sensores que transmitem os dados diretamente para um receptor ou *gateway*. Possui uma implementação mais simples, mas um menor alcance, já que todos os nós devem ser capazes de se comunicar com o nó central.
- Árvore: utiliza nós roteadores que fazem com que a distância alcançada pela rede seja maior, mas também aumenta o custo de implantação da rede por utilizar dispositivos mais complexos. A desvantagem dessa topologia é que se um nó roteador apresentar falha, toda a sub-rede conectada a ele também irá perder a comunicação com o gateway.

- Malha: também conhecida pelo termo em inglês, *mesh*. Nessa topologia, os nós são dispositivos capazes de se comunicar entre si, enviando e recebendo informações dos demais nós da rede e possibilitando o surgimento de diferentes caminhos para comunicação com o *gateway*. Nessa topologia, caso um nó apresente falhas, outros podem assumir suas funções, logo a rede se torna menos susceptível a falhas, mas apresenta um maior consumo de energia já que todos os nós possuem características mais complexas.

Na Figura 9, é possível observar uma representação para cada uma das topologias apresentadas, onde os *gateways* são representados em círculos de cor branca, os nós repetidores em círculos de cor cinza, e os nós-sensores em círculos de cor preta.

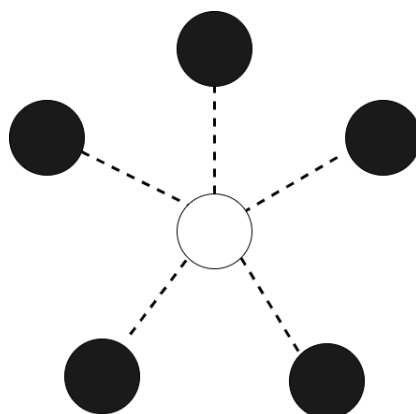
As RSSF podem ser utilizadas com diferentes objetivos e devem atender a questões específicas, de acordo com as necessidades da aplicação. Alguns dos principais desafios a serem abordados em projetos de RSSF são eficiência energética, baixo custo, tolerância a falhas, escalabilidade, segurança dos dados e amplo alcance de comunicação (PATEL; KUMAR, 2018).

As RSSF podem ter diferentes aplicações em diferentes áreas, dentre elas, na área militar para realizar a identificação e/ou monitoramento de exércitos inimigos (AKYILDIZ et al., 2002), na área ambiental para detecção de incêndio em florestas ou monitoramento de poluição de grandes cidades, por exemplo (SOUZA et al., 2016); (CARVALHO et al., 2012), na área de prevenção de falhas, como em detecção de vazamentos em dutos de redes de abastecimento de água (ENACHE et al., 2018), no acompanhamento dos parâmetros de saúde e prevenção de doenças (YU; KIM; PARK, 2020), na automação de residências ou indústrias (TAN; JARVIS, 2013), dentre outras aplicações.

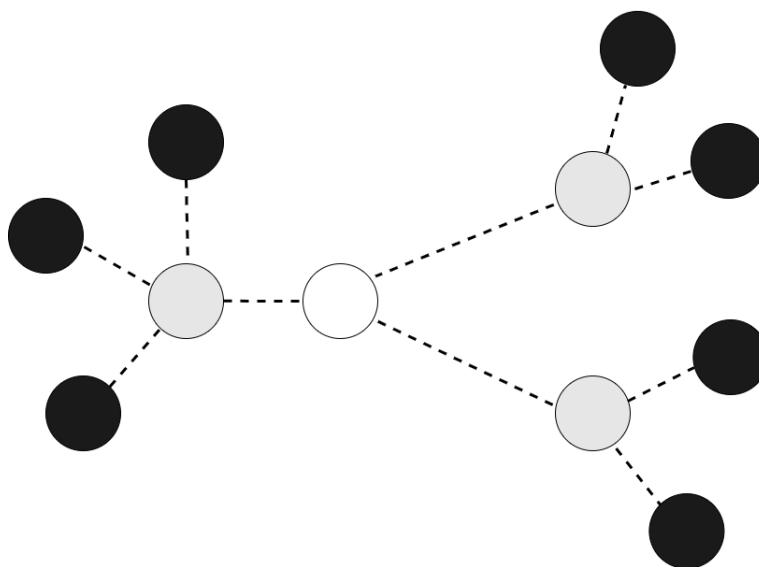
As RSSF também podem ser constituídas em forma de redes aquáticas (do inglês, *Underwater Wireless Sensor Network*), que possuem seus sensores distribuídos em águas de oceanos ou mares, por exemplo, com objetivos de monitorar níveis de poluição, atividades sísmicas, coletar dados e realizar exploração de áreas profundas (SUNITHA; KARUNAVATHI, 2019). Além disso, os nós sensores também podem ser distribuídos sob o solo, com os objetivos de monitorar parâmetros como temperatura, volume e qualidade da água de sistemas de abastecimento (ZAMAN et al., 2016), ou para obtenção de dados de minas de difícil acesso em casos de emergência ou desastre ambiental, por exemplo (WANG; ZHANG; LU, 2008) (MEZGHANNI; KANDIL; HAKEM, 2016).

A questão energética é um dos principais fatores ao se tratar de RSSF, pois o consumo de energia dos dispositivos está diretamente relacionado com a vida útil da rede, ou seja, com a duração da aplicação sem necessidade de trocas ou recargas de baterias. Considerando isso, a decisão sobre a tecnologia de comunicação, parte responsável pelo maior consumo de energia da rede, é considerada de grande relevância no desenvolvimento de uma RSSF. As tecnologias de comunicação de RSSF podem ser classificadas como (OLATINWO; JOUBERT, 2019):

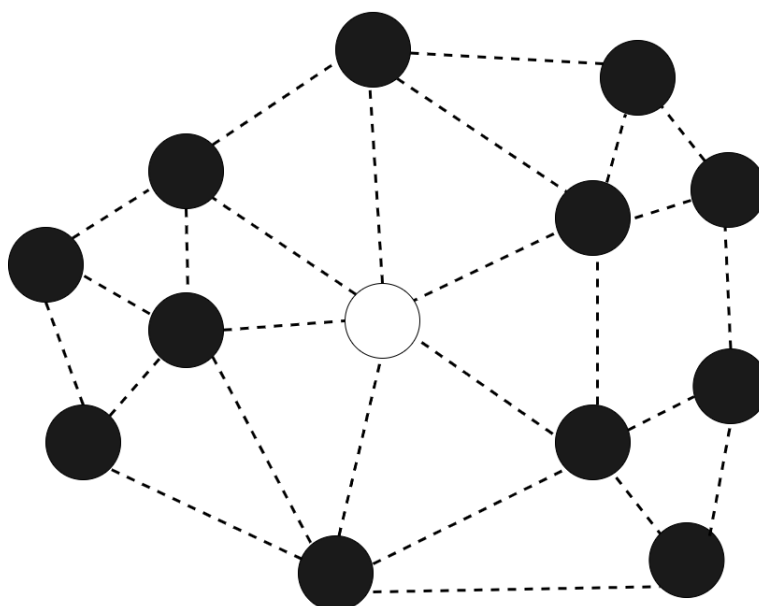
Figura 9 – Exemplos de topologias de redes de sensores sem fio



(a) Topologia em Estrela



(b) Topologia em Árvore



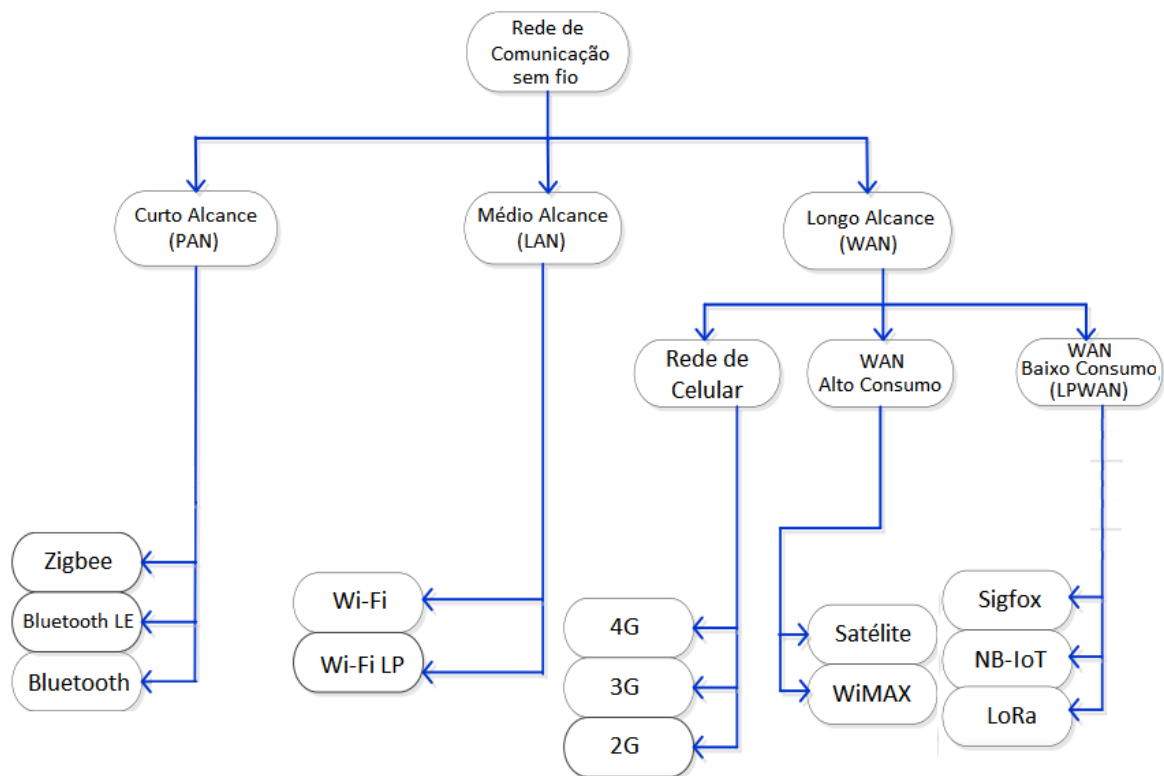
(c) Topologia em Malha

Fonte: Elaborado pela autora

- PAN (*Personal Area Networks*): redes de curto alcance, com cobertura na faixa de dezenas a centenas de metros; como exemplos das principais tecnologias que se enquadram nessa categoria pode-se citar Zigbee e Bluetooth.
- LAN (*Local Area Networks*): redes de médio alcance, apresentando cobertura de centenas de metros, podendo atingir a faixa de quilômetro, a depender do local de instalação e da presença de obstáculos. O principal exemplo para se constituir uma rede LAN é utilizando tecnologia Wi-Fi.
- WAN (*Wide Area Networks*): redes de longo alcance, podendo alcançar diversos quilômetros. As redes WAN podem ser de alto consumo de energia, como redes celulares ou via satélite, ou podem apresentar um baixo consumo, sendo denominadas LPWAN (*Low Power and Wide Area Network*). Logo, essa sub-categoria é constituída por tecnologias de longo alcance de comunicação e consumo reduzido de energia.

Essa classificação pode ser observada na Figura 10. Devido às características citadas, as tecnologias que se enquadram na categoria LPWAN são consideradas apropriadas para diversas aplicações de RSSF, como em *smart cities*, por exemplo.

Figura 10 – Classificação das redes de sensores sem fio de acordo com as tecnologias de comunicação.

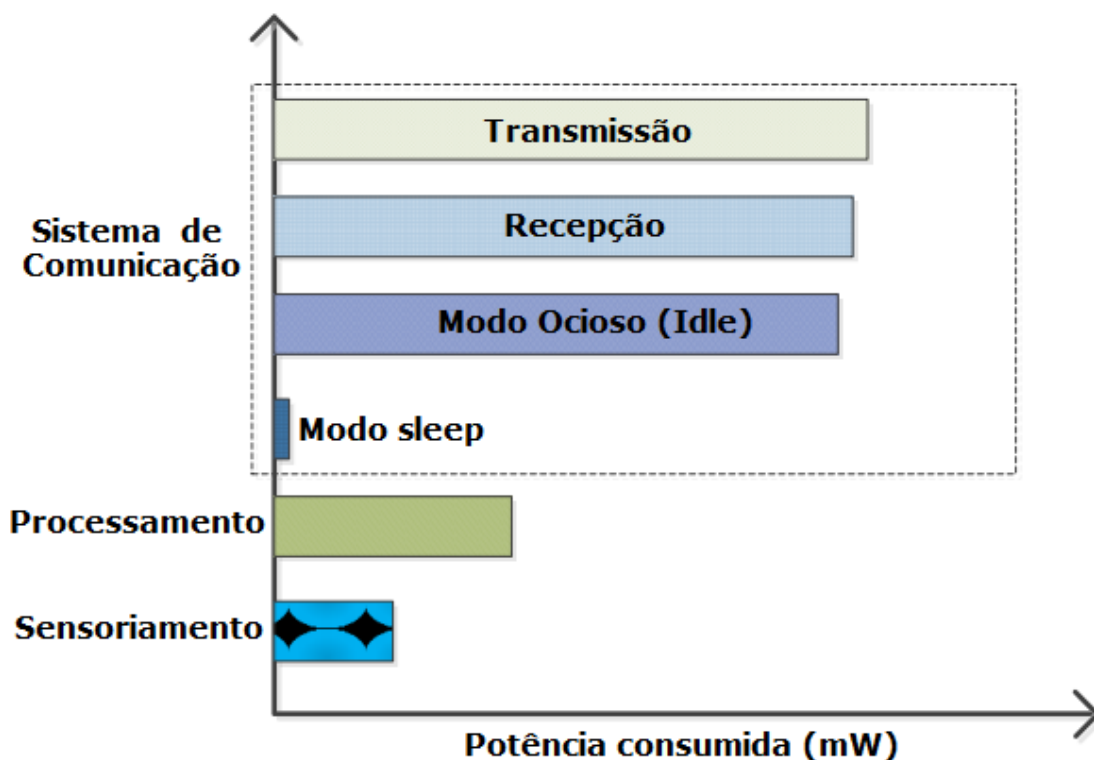


Fonte: Adaptado de Olatinwo e Joubert (2019)

## 2.5 LPWAN - LOW POWER AND WIDE AREA NETWORK

Algumas das principais características no desenvolvimento de Redes de Sensores Sem Fio são o alcance de comunicação da rede e o seu consumo de energia. Esses dois parâmetros estão fortemente relacionados com a tecnologia de comunicação utilizada. Quando comparada às etapas de processamento e sensoriamento, a comunicação geralmente é responsável por um consumo de energia consideravelmente superior, como pode ser observado na Figura 11 (OLATINWO; JOUBERT, 2019).

Figura 11 – Comparação de consumo de potência em uma RSSF.



Fonte: Adaptado de Olatinwo e Joubert (2019).

Os dispositivos de uma RSSF são, geralmente, alimentados energeticamente por baterias, o que limita a capacidade do sistema ao tempo de vida útil da mesma, necessitando assim de troca ou recarga em períodos regulares (CHOU et al., 2014). Isso pode se tornar inviável em locais de difícil acesso ou com uma grande quantidade de dispositivos, além de acarretar um custo para a manutenção do sistema em questão.

Diversas aplicações de RSSF buscam realizar a cobertura de longos perímetros e utilizam diversos dispositivos inteligentes para isso, como no caso de *smart cities*. Os dispositivos IoT possuem alguns requisitos, como longo alcance, baixa taxa de dados e baixo consumo de energia. As tecnologias de rádio de curto alcance amplamente utilizadas, como por exemplo, ZigBee e

Bluetooth não são adequadas para situações que necessitam de transmissão em longas distâncias. Soluções baseadas em comunicações celulares, como 2G, 3G e 4G, fornecem uma comunicação de maior alcance, mas apresentam um alto consumo de energia. Portanto, os requisitos das aplicações IoT impulsionaram o surgimento de uma nova tecnologia de comunicação sem fio, a LPWAN (*Low Power and Wide Area Network*), que é uma tecnologia de comunicação que apresenta um longo alcance e baixo consumo de energia (MEKKI et al., 2019).

As redes LPWAN estão sendo foco de diversas pesquisas e estudos devido às suas características de comunicação de baixo consumo de energia e longo alcance. Ela proporciona uma comunicação de longo alcance, na faixa de 10–40 km em áreas rurais e 1–5 km em zonas urbanas (CENTENARO et al., 2016). Além disso, é uma tecnologia bastante eficiente em termos de energia, auxiliando o dispositivo a atingir até mais de 10 anos de vida útil da bateria (PATEL; WON, 2017). Esses aspectos promissores dessa tecnologia incentivaram a realização de estudos recentes sobre o desempenho de redes LPWAN em ambientes externos e internos. Em resumo, a tecnologia LPWAN é indicada para aplicações que requerem a transmissão de pequenas quantidades de dados a longas distâncias e consumindo baixa energia para isso (MEKKI et al., 2019).

As redes LPWAN conseguem reduzir o consumo de energia adotando algumas técnicas como novas estratégias de modulação e adaptação de *duty-cycle*. Considerando isso, algumas das principais tecnologias de comunicação que se enquadram na definição de LPWAN são Sigfox, NB-IOT e LoRa.

Sigfox é uma operadora de rede LPWAN, que surgiu na França e oferece soluções de conectividade IoT ponta a ponta utilizando suas tecnologias patenteadas. A Sigfox utiliza estações próprias, equipadas com rádios definidos por *software* e realiza a comunicação entre eles e os servidores finais através de uma rede baseada em IP. Essa tecnologia utiliza bandas ISM não licenciadas, que variam de acordo com o local, para realizar sua comunicação. Inicialmente, a Sigfox suportava apenas a comunicação por *uplink*, ou seja, suportava apenas o envio de dados dos dispositivos finais para a estação base. Porém, posteriormente, evoluiu para a tecnologia bidirecional possibilitando a comunicação de *downlink*, ou seja, envio de dados das estações base para os dispositivos finais, que só pode ocorrer após uma comunicação de *uplink* (MEKKI et al., 2019).

Cada dispositivo final envia suas mensagens repetidas vezes (três por padrão) em canais de frequência distintos. As estações base podem receber mensagens de forma simultânea em todos os canais, então o dispositivo final pode escolher aleatoriamente um canal de frequência para transmissão, o que simplifica o design do dispositivo final e reduz seu custo (MEKKI et al., 2019). Entretanto, por se tratar de um segredo industrial, a documentação da rede Sigfox não é aberta ao público, o que dificulta sua utilização em estudos e aplicações (CENTENARO et al., 2016).

A NB-IoT (*Narrow-Band IoT*) é uma tecnologia LPWAN que pode operar nas bandas

de frequência licenciadas utilizadas pelas tecnologias GSM e LTE. Considerando esta seleção de banda de frequência, é possível operar utilizando as bandas de frequências GSM utilizadas atualmente, utilizando as faixas não utilizadas dentro da banda de segurança de uma portadora LTE ou usando bandas de frequência utilizadas dentro de uma portadora LTE.

O protocolo de comunicação NB-IoT é baseado no protocolo LTE, reduzindo as funcionalidades do protocolo LTE e as aprimorando conforme necessário para aplicações de IoT. Conforme apresentado em Adhikary, Lin e Wang (2016), com a tecnologia NB-IoT pode-se atingir até 10 anos de vida útil da bateria se utilizada para transmissão de, em média, 200 bytes por dia. Essa tecnologia é operada por empresas de telecomunicações e é uma extensão da infraestrutura de redes celulares (TADAYONI; HENTEN; FALCH, 2017). Essas são características relevantes, pois dificultam a utilização dessas tecnologias em estudos acadêmicos sobre a rede e simulação ou reprodução de resultados.

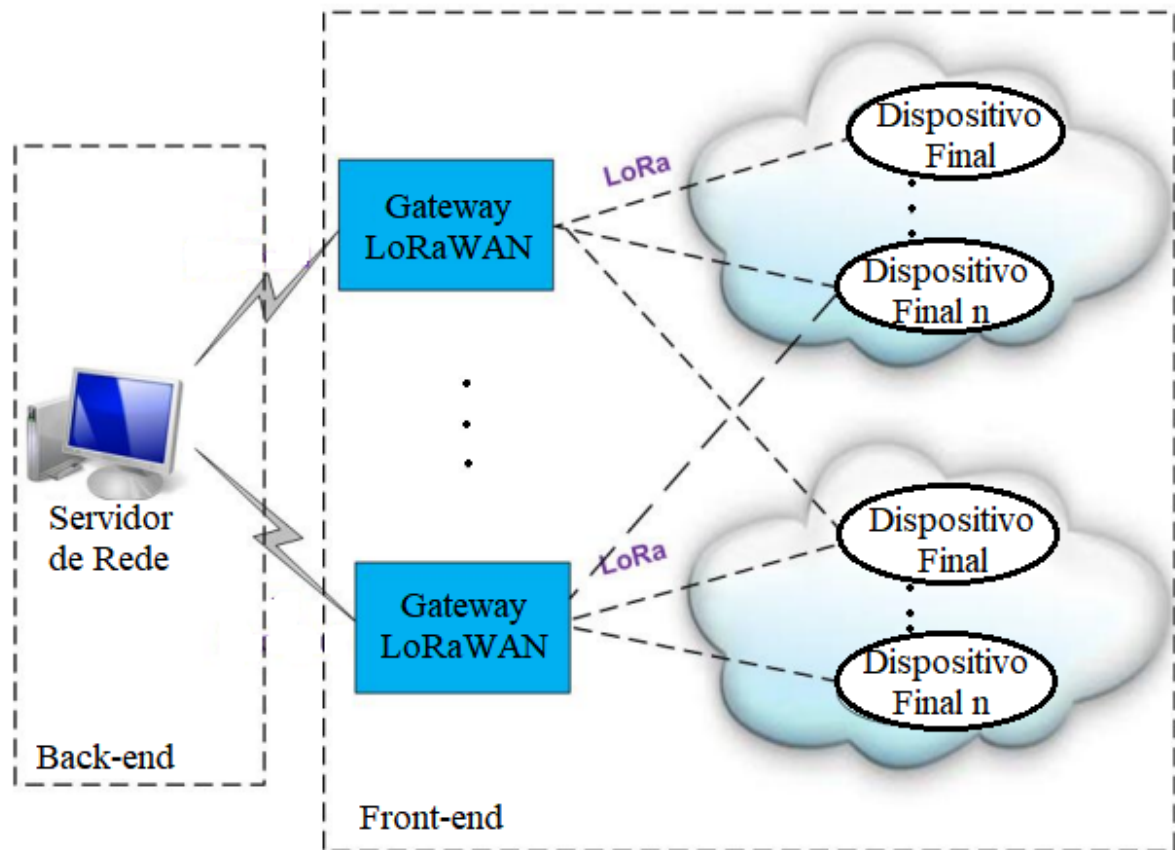
A tecnologia LoRa, outra importante tecnologia LPWAN, foi a escolhida para a comunicação nesse projeto devido às suas características de alcance, consumo de energia, taxa de transmissão e robustez, todos parâmetros adequados para o monitoramento a ser desenvolvido. Essas características serão detalhadas na subseção a seguir.

### 2.5.1 Modulação LoRa

As tecnologias LPWAN oferecem longo alcance de comunicação e baixo consumo de energia e, dentre essas, pode-se citar a modulação LoRa (*Long Range*) como uma das principais soluções nessa área. LoRa é uma tecnologia desenvolvida pela empresa Semtech e surgiu com o objetivo de possibilitar a expansão de redes de IoT (*Internet of Things*).

O protocolo de comunicação LoRaWAN define a arquitetura da rede e garante a interação entre dispositivos IoT sem a necessidade de uma infraestrutura complexa. A estrutura da rede utiliza uma topologia em estrela e pode ser dividida em duas partes: a *front-end*, composta pelos dispositivos finais e *gateways*, os primeiros transmitirão os dados através da modulação LoRa para os *gateways*, que servirão de ponte entre essa parte e a segunda, denominada de *back-end* e constituída pelos servidores da rede, que receberão os dados através de um endereço de IP (LAVRIC; POPA, 2017). Essa estrutura pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Arquitetura de uma rede LoRa.



Fonte: Adaptado de Lavric e Popa (2017).

LoRa é a camada física utilizada e que usa a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) não-licenciada para comunicação. Para alcançar os objetivos propostos para ser considerada uma LPWAN, a tecnologia LoRa usa a modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*) para comunicação dos dados. Nessa modulação, o sinal transmitido é composto por chirps (*Compressed High Intensity Radar Pulse*), sinais senoidais com amplitude constante e frequência crescente ou decrescente (denominados *upchirps* ou *downchirps*, respectivamente) que varre uma largura de banda predefinida. Teoricamente, a tecnologia LoRa alcança baixas taxas de transmissão de dados, mas que são suficientes em aplicações LPWAN, em que é priorizado o alcance de comunicação à taxa de transmissão (LIANDO, 2018).

LoRa utiliza uma variação da modulação CSS, em que alguns parâmetros podem ser modificados para definir as configurações da rede, dentre os principais tem-se o fator de espalhamento, a largura de banda, a potência de transmissão e a taxa de código. De acordo com a SEMTECH (2015), na modulação LoRa por CSS cada bit de informação pode ser representado por vários chips. A relação entre o fator de espalhamento (SF) e a largura de banda (BW) consiste em cada chirp (ou símbolo, termos intercambiáveis nesse contexto) representar um valor de  $2^{SF}$  chips que correspondem a um número SF de bits de dados. Alguns conceitos dos principais parâmetros citados anteriormente serão explicados a seguir.

- Fator de espalhamento (SF - *Spreading Factor*): o fator de espalhamento corresponde ao número de bits transmitidos em cada chip, podendo assumir valores na faixa de 7 a 12. Por exemplo, o SF7 corresponde a um fator de espalhamento de valor 7, logo cada chip é constituído por 7 bits. A modulação ocorre variando a frequência de início ou fim de cada chip, então é necessária uma quantidade de  $2^{SF}$  posições de frequência de início ou fim. Considerando que um chirp deve varrer uma determinada largura de banda, o tempo de cada chip é dado como  $\frac{1}{BW}$  seg. Neste caso, a cada unidade acrescentada ao valor de SF, o tempo para transmissão de cada chirp é dobrado, considerando que os demais parâmetros permaneçam constantes. Ao dobrar o tempo de transmissão do chirp, o valor da relação sinal-ruído (SNR) aumenta, ou seja, a probabilidade do chirp ser recebido corretamente é maior.
- Largura de banda (BW - *Bandwidth*): determina a largura do sinal transmitido e a duração do chirp. Como visto anteriormente, cada chirp é constituído por  $2^{SF}$  número de chips e a duração de cada chip é definida como  $\frac{1}{BW}$  seg. Ou seja, modificando a largura de banda, o tempo de duração de cada chip é alterado, assim como a duração do chirp e o SNR.
- Potência de transmissão (TX): a potência de transmissão é diretamente relacionada com a potência utilizada para transmitir cada chirp. Ao aumentar a potência de transmissão, a probabilidade do sinal superar a atenuação causada pelo ambiente é maior, logo a potência de sinal recebido pelos receptores também é superior.
- Taxa de Código (CR - *Code Rate*): é definida como um código utilizado para detecção de erros. Pode ser definido com valores como 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8. Quando utiliza-se um valor de CR de 4/5, por exemplo, significa que a cada quatro bits de dados enviados, será adicionado 1 bit para detecção de erros e no caso de CR de 4/8, a cada 4 bits de dados, quatro bits adicionais para correção são inseridos, o que aumenta a confiabilidade e a quantidade de dados transmitidos.

Diversos projetos estão sendo desenvolvidos, tanto na área acadêmica quanto fora dela, utilizando a tecnologia LoRa. Algumas das principais aplicações são nas áreas de cidades inteligentes (*smart cities*), monitoramento ambiental, acompanhamento de parâmetros da saúde humana e em agricultura de precisão (*precision agriculture*) (ZHOU et al., 2019).

No contexto de cidades inteligentes, a modulação LoRa pode ser utilizada, por exemplo, para auxiliar na coleta de lixo, como realizado na cidade de Seul, capital da Coreia do Sul, onde multidões atravessam as ruas diariamente. A administração da cidade instalou lixeiras inteligentes, que possuem dispositivos habilitados para verificar periodicamente a capacidade do recipiente e informar quando estiver cheio para que seja realizada a coleta e, dessa forma, evitar rondas desnecessárias para verificar essa necessidade. Esta aplicação proporcionou uma redução de 66% na frequência de coleta de lixo, uma queda de 83% nos custos e um aumento de 46% na taxa de materiais reciclados (SUNDARAM; DU; ZHAO, 2019).

Em Wang et al. (2018), foi apresentada uma rede para coletar dados em um sistema agrícola, que realiza a medição de parâmetros como umidade e temperatura e utiliza a modulação LoRa para a transmissão dessa informação entre os nós sensores e os *gateways*. Além disso, em (Semtech, 2017), são apresentados dispositivos habilitados com tecnologia LoRa que são utilizados para o rastreamento do gado, em que cada animal tem sua temperatura e movimentação monitorados, e para maximizar os rendimentos das colheitas, monitorando os níveis de água, detectando conteúdos de ferro e verificando a salinidade do solo para otimizar suas técnicas de irrigação e fertilização.

Uma possível aplicação na área da saúde é realizada em Misran et al. (2019). Nesse trabalho, um sistema para monitoramento de parâmetros da saúde de pacientes foi desenvolvido, em que dispositivos IoT são capazes de monitorar temperatura, saturação de oxigênio e pulsação dos pacientes e transmitir esses dados via LoRa para uma central de controle, onde serão analisados. A modulação LoRa se mostrou uma técnica eficiente por suas características que permitem a interoperabilidade entre dispositivos IoT.

No período da pandemia mundial da doença relacionada ao coronavírus de 2019 (COVID-19), Rawat et al. (2020) desenvolveu um trabalho no qual dispositivos IoT eram utilizados para verificar a temperatura de pessoas que frequentavam certos locais e transmitiam essas informações via LoRa, apontando em tempo real casos de alta temperatura e possibilitando que profissionais de saúde agissem com eficiência para realizar os exames necessários. Esses dispositivos foram desenvolvidos para auxiliar nos esforços de reação ao novo coronavírus. A Tabela 2 apresenta algumas das principais áreas e aplicações da tecnologia LoRa.

Porém, algumas aplicações necessitam do monitoramento de variáveis que se encontram abaixo do nível do solo e poucos estudos foram realizados para caracterizar a interferência desse tipo de ambiente na comunicação via LoRa. Em Gehani et al. (2021), é desenvolvido um sistema para detecção precoce do apodrecimento de raízes de plantas. Uma câmera colocada perto da raiz tira fotos periodicamente e envia as imagens para uma central de processamento que executa um algoritmo para avaliar se a raiz está apodrecendo ou não. Esses dados serão enviados via LoRa por um transmissor localizado abaixo do solo para um receptor acima, que será responsável por enviar as informações para a nuvem, onde o agricultor poderá acessá-las.

O objetivo do trabalho citado anteriormente é avaliar a interferência do solo no sinal transmitido via LoRa. O trabalho avaliou os valores de RSSI e SNR para diferentes profundidades, mas só realizou o estudo para profundidades de até 60cm e recomendou a utilização, nesse contexto, da tecnologia LoRa em dispositivos enterrados com profundidade máxima de 50cm.

Em Lin e Hao (2020), é estabelecida a comunicação entre um dispositivo abaixo do solo e um acima para verificar a interferência de diversos parâmetros, como o impacto da direção de propagação, da profundidade do dispositivo enterrado e dos parâmetros LoRa definidos. São analisados alguns indicadores como taxa de pacotes recebidos e relação sinal-ruído para caracterizar a comunicação. Porém, a profundidade analisada atinge o valor máximo em 80 cm.

Tabela 2 – Aplicações da tecnologia LoRa em diferentes áreas.

| Área                    | Aplicações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Referências                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Medicina                | Medição de temperatura;<br>saturação de oxigênio; pulsação;<br>auxílio de pessoas com mobilidade limitada; monitoramento de pacientes com distúrbio psiquiátrico;<br>detecção de postura;<br>monitoramento de batimentos cardíacos;<br>rastreamento de adesão a medicamentos, etc                                                                                                                     | (MISRAN et al., 2019);<br>(RAWAT et al., 2020);<br>(SHREEPRIYA; BOTTIA; DU, 2018);<br>(NUGRAHA; HAYATI; SURYANEGARA, 2018);<br>(HAN et al., 2020);<br>(ADI; KITAGAWA, 2020);<br>(SHERIF et al., 2020);<br>(ALSARAIIRA et al., 2023)                 |
| Agricultura             | Medição de umidade; de temperatura;<br>rastreamento de gado; detecção de ferro,<br>nível de salinidade; irrigação;<br>controle de pragas;<br>previsão da saúde das plantas;<br>estudo do solo;<br>aumento da qualidade dos produtos;<br>redução de aditivos químicos;<br>monitoramento de colheitas; etc.                                                                                             | (WANG et al., 2018);<br>(Semtech, 2017);<br>(SANTOS et al., 2019);<br>(ADRIANO et al., 2018);<br>(PARK et al., 2018);<br>(ZHAO et al., 2017);<br>(SINGH et al., 2022);<br>(ADI et al., 2021);<br>(PAGANO et al., 2022);<br>(GUTIÉRREZ et al., 2019) |
| Indústria               | Utilização de sensores e atuadores em plantas industriais;<br>consumo de energia de sistemas;<br>monitoramento de tarefas;<br>estado do maquinário;<br>monitoramento de carga;<br>monitoramento de pontos de incêndio;<br>desperdício de água;<br>monitoramento de vibração;                                                                                                                          | (RIZZI et al., 2017);<br>(KHUTSOANE et al., 2019);<br>(TESSARO et al., 2018);<br>(DHANASEKAR et al., 2023);<br>(VISALAKSHI; AARTHI, 2019)<br>(LENTZ et al., 2018)                                                                                   |
| Cidades Inteligentes    | Controle de coleta de lixo;<br>automação de iluminação pública;<br>monitoramento de vagas em estacionamentos; monitoramento de trânsito e transportes públicos;<br>de sistemas de abastecimento de água e gás;<br>da rede elétrica; do nível de energia em painéis solares;<br>detecção de vazamentos de produtos químicos;<br>garantir a segurança de estruturas físicas;<br>casas inteligentes; etc | (SUNDARAM; DU; ZHAO, 2019);<br>(ASHOKKUMAR et al., 2022);<br>(MANOHARAN; RATHINASABAPATHY, 2018);<br>(NOR; ZAMAN; MUBDI, 2017);<br>(SRIVATCHAN; RANGARAJAN, 2020)<br>(SIDOROV et al., 2019)<br>(BRAVO-ARRABAL et al., 2021);<br>(KIM et al., 2021)  |
| Monitoramento Ambiental | Monitoramento da qualidade do ar;<br>detecção de níveis de poluição;<br>monitoramento de temperatura;<br>de umidade; medição de gradiente de temperatura em troncos de árvore;<br>monitoramento de material particulado;<br>detecção de incêndios florestais;<br>detecção de animais selvagens;<br>monitoramento de temperatura em áreas florestais; etc                                              | (HAIHAHEM et al., 2019);<br>(ZGUIRA; RIVANO; MEDDEB, 2018);<br>(ALI et al., 2019);<br>(VILLARIM et al., 2021);<br>(CAMBOIM et al., 2020);<br>(GAITAN; HOJBOTA, 2020);<br>(OJO; ADAMI; GIORDANO, 2021);<br>(VILLARIM et al., 2019a)                  |

Fonte: Elaborada pela autora

Nos estudos citados anteriormente, nos quais é analisada a comunicação subterrânea via LoRa, o valor da profundidade não alcança altos níveis, atingindo apenas alguns centímetros abaixo do solo. Isso gera uma lacuna no conhecimento para caracterizar o comportamento da

tecnologia LoRa para aplicações que necessitam de maiores profundidades.

### 2.5.2 Estudo das técnicas de comunicação em sistemas subterrâneos

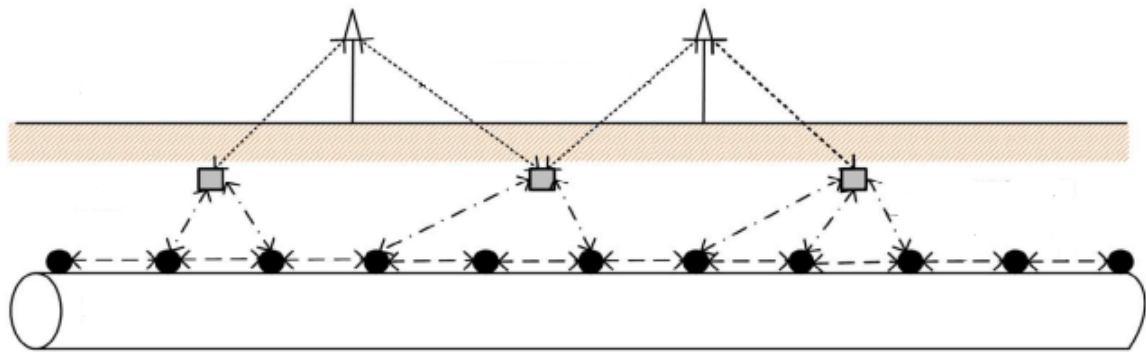
A extensão do paradigma das redes de sensores sem fio, as redes de sensores sem fio subterrâneas (RSSFS), também conhecidas pelo termo em inglês Wireless Underground Sensor Networks (WUSNs), é considerada uma área com potencial de possibilitar a exploração de aplicações que antes eram inviáveis. As RSSFS consistem em nós sensores subterrâneos que estabelecem uma conexão sem fio e que se comunicam com dispositivos abaixo ou acima do solo (SILVA; VURAN, 2009).

Algumas técnicas para coletar dados subterrâneos são utilizadas há décadas, como no gerenciamento de irrigação, por exemplo. Em geral, os sensores de umidade do solo são usados para avaliar os requisitos de irrigação do campo. Esses dispositivos são enterrados a uma profundidade de 30 a 120 cm e utilizam uma conexão cabeada para enviar dados para acima da superfície e possibilitar assim a coleta dos dados, que pode ser realizada de forma manual por um operador que se desloca até cada sensor para fazer a leitura das informações ou pode ser realizada a conexão com um microcontrolador responsável por enviar as leituras para uma central de controle via comunicação sem fio (IRMAK, 2006).

As redes sem fio subterrâneas podem fornecer uma ampla gama de novas aplicações, como em agricultura de precisão (VURAN et al., 2018) e monitoramento ambiental (ZHANG et al., 2019). Embora as RSSF convencionais sejam implantadas em uma variedade de ambientes, suas aplicações no ambiente subterrâneo não são amplamente investigadas, como no monitoramento de sistemas de abastecimento de água, por exemplo.

Os principais desafios da implantação de RSSFS são baseados em reduzir o consumo de energia dos dispositivos subterrâneos, uma vez que os nós sensores estão enterrados, o que torna impraticável trocar suas baterias de forma periódica, e em superar as barreiras do solo para aumentar o alcance da comunicação. Várias tecnologias de comunicação sem fio foram investigadas na propagação de ondas subterrâneas. Em (SILVA et al., 2015), os autores investigam experimentalmente as características de qualidade do link na transmissão entre sensores subterrâneos ou entre um sensor subterrâneo e um sensor localizado acima do solo, como ilustrado na Figura 13, para monitoramento de dutos subterrâneos. O objetivo desse trabalho é obter mais informações sobre o desenvolvimento de protocolos para RSSFS. Porém, este experimento só analisou o sensor subterrâneo a uma profundidade de até 40 cm e distância máxima entre os dispositivos de aproximadamente 10 m.

Figura 13 – RSSFS para monitoramento de dutos subterrâneos.



Fonte: Adaptado de (SILVA et al., 2015).

Em Trang, Hwang et al. (2018), é realizada uma análise da conectividade de sensores subterrâneos em redes de sensores sem fio subterrâneas em termos de probabilidade de isolamento do nó. Nesse artigo, são fornecidas comparações qualitativas e quantitativas entre o sistema de ondas eletromagnéticas e o sistema de indução magnética para comunicações subterrâneas. São apresentadas expressões matemáticas para a probabilidade de isolamento do nó ao utilizar algum desses dois sistemas de comunicação e validada a exatidão dos modelos analíticos por meio de simulações.

As aplicações e desafios apresentados em uma rede de sensores sem fio subterrânea aumentam a necessidade de diferentes pesquisas nessa área. A diferença significativa entre a comunicação de uma RSSF convencional e de uma rede subterrânea é o meio de comunicação onde os dispositivos estão inseridos. Existem sensores que são distribuídos em um espaço subterrâneo aberto, como minas e túneis. Nesse caso, a configuração da rede é subterrânea, mas a comunicação entre os dispositivos ocorre pelo ar e, portanto, são utilizadas tecnologias sem fio terrestres, como em (SINGH; KUMAR; HÖTZEL, 2018) e (MUDULI; MISHRA; JANA, 2018). No entanto, na comunicação de sistemas enterrados no solo, o sinal de transmissão sofre várias interferências subterrâneas.

Uma topologia apropriada é fundamental para a confiabilidade, conectividade e eficiência energética das RSSFS. A topologia híbrida (mistura de dispositivos sensores acima do solo e subterrâneos) é preferida à topologia totalmente subterrânea (com todos os dispositivos sensores implantados abaixo do solo) (AKYILDIZ; STUNTEBECK, 2006). Em geral, em comparação com as RSSF convencionais, a comunicação subterrânea ocorre através do solo e do ar, e a qualidade do link é influenciada por diversos fatores externos (SILVA; VURAN, 2010).

Para aumentar a qualidade das comunicações subterrâneas, podem ser utilizados cabos, como cabos de fibra ótica, e assim realizar a transferência dos dados através de um sistema cabeado. Essas soluções com fio fornecem altas taxas de recebimento de pacote e elevada

robustez, especialmente para o monitoramento subterrâneo em níveis mais profundos. Portanto, tecnologias com fio são usadas em muitos trabalhos, como em (SCHROEDER, 2002) e em (ALGEROY et al., 2010). Embora as soluções com fio tenham as vantagens citadas, elas possuem alta complexidade, principalmente se houver a necessidade de ampliação da rede. Portanto, as soluções sem fio são estudadas para fornecer soluções escalonáveis, de baixa complexidade e alta taxa de transmissão de dados.

Essas soluções sem fio incluem ondas acústicas, ondas eletromagnéticas e por indução magnética. Considerando as ondas acústicas, por exemplo, em Sharma e Gupta (2010), é realizada a propagação de uma onda acústica contínua com frequências abaixo de 900 Hz através do solo. A velocidade dessas ondas acústicas permite estimar o teor de água e o grau de saturação no solo agrícola. Em Yang et al. (2018), os autores propuseram um sistema de transmissão de dados sem fio baseado em ondas acústicas que foi capaz de transmitir a mais de 30 m de distância através do solo. As soluções baseadas em ondas acústicas são boas para fins de detecção, como detecção de umidade do solo ou para localização de objetos subterrâneos. No entanto, elas fornecem comunicação de baixa taxa de dados e também sofrem com o ruído e atenuação do sinal acústico (SAEED; ALOUINI; AL-NAFFOURI, 2019).

Embora a comunicação por indução magnética seja mais robusta para o ambiente subterrâneo, ela apresenta um baixo alcance de transmissão e requer uma orientação perfeita das bobinas transmissora e receptora, o que pode ser um desafio nesse tipo de ambiente. Em Kisseleff, Akyildiz e Gerstacker (2018), os autores fornecem uma visão geral das redes de sensores sem fio subterrâneas baseadas em indução magnética e apresentam seus desafios e aplicações.

Ainda de acordo com Saeed, Alouini e Al-Naffouri (2019), para investigar o uso de ondas EM para comunicações subterrâneas, várias frequências do espectro EM foram examinadas no passado, começando em algumas centenas de kHz e atingindo a ordem de THz. Dependendo da frequência das ondas EM, a faixa de transmissão do sinal varia seu alcance de alguns metros a poucos centímetros. Por exemplo, a qualidade da comunicação foi usada como um indicador das mudanças na umidade do solo para detectar o vazamento da tubulação subterrânea (TARIQ; ZIYAD; ABDULLAH, 2013). Em Conceição et al. (2016), também foi apresentado um sistema de localização de vazamento baseado na qualidade do link, onde os resultados da simulação mostram que a precisão média de identificação do posicionamento é de cerca de 7,4 m.

Dentre as várias tecnologias de redes de longo alcance e baixa potência (LPWANs), as vantagens distintas de LoRa a tornam atraente para diversos novos cenários de aplicação, como monitoramento subterrâneo de sistemas de distribuição e monitoramento de integridade estrutural (TOKOIGNON et al., 2017), aplicações que exigem baixa taxa de transmissão de dados, longas distâncias e baixo consumo de energia. Portanto, ao utilizar essa tecnologia, é possível aumentar a vida útil dos dispositivos subterrâneos e melhorar efetivamente a qualidade da propagação do sinal no solo. No entanto, análises experimentais detalhadas da viabilidade de RSSFS baseadas em LoRa ainda são escassas e muito necessárias, bem como as características de qualidade da

comunicação LoRa para monitoramento subterrâneo de redes de abastecimento de água (LIN; HAO, 2020).

A implantação de redes de sensores subterrâneos sem fio para monitoramento de dutos para transporte de água é geralmente focada na implementação de nós de sensores subterrâneos instalados na superfície externa dos dutos. Um link de dados confiável entre os gateways/estações base acima do solo e os nós sensores subterrâneos é essencial, o que permite a coleta, retransmissão e gerenciamento de dados. Consequentemente, a qualidade do link do canal subterrâneo para a superfície é fundamental para o desenvolvimento de protocolos de RSSFS eficientes para aplicações no contexto de cidades inteligentes (ZANELLA et al., 2014) (LIN; HAO, 2020).

A Tabela 3 compara várias tecnologias de comunicação para aplicações em redes de sensores sem fio subterrâneas.

Tabela 3 – Comparação de algumas das principais tecnologias de comunicação em ambiente subterrâneo.

| Parâmetro              | EM             | Ondas acústicas    | Indução Magnética | Com fio            |
|------------------------|----------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Alcance de Transmissão | Poucos metros  | Centenas de metros | Dezenas de metros | Centenas de metros |
| Atenuação              | Alta           | Alta               | Baixa             | Baixa              |
| Custo de instalação    | Médio          | Médio              | Médio             | Alto               |
| Taxa de transmissão    | Dezenas de bps | Dezenas de bps     | Milhares de bps   | Milhões de bps     |
| Consumo de energia     | Médio          | Baixo              | Baixo             | Alto               |

Fonte: Adaptado de (SAEED; ALOUINI; AL-NAFFOURI, 2019)

As redes de sensores sem fio em ambientes subterrâneos operam em condições drasticamente diferentes das RSSF terrestres comuns devido aos limites no roteamento e às grandes perdas de dados pelo caminho (AKYILDIZ; STUNTEBECK, 2006). Os sistemas subterrâneos também podem ser classificados, de acordo com a localização de seus dispositivos para transmissão de dados, em duas categorias: subterrâneo para subterrâneo (*Underground to Underground* - UG2UG) e subterrâneo para acima do solo (*Underground to Aboveground* - UG2AG ou AG2UG) (SADEGHIOON et al., 2017). O estudo desenvolvido neste trabalho se classifica na segunda categoria. A topologia híbrida, que utiliza a comunicação UG2AG ou AG2UG com sensores abaixo e acima do solo, é preferível ao uso da topologia com comunicação exclusivamente subterrânea UG2UG (LIN; HAO, 2020).

Além da classificação com relação à transmissão, há também a classificação de acordo com a profundidade da posição dos dispositivos, podendo ser considerados de superfície (0 a 30 cm de profundidade) e comunicações no subsolo (>30 cm de profundidade), como os encanamentos dos sistemas de distribuição de água (SADEGHIOON et al., 2017).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ETAPAS DO PROJETO

Visando cumprir o proposto nos objetivos desse trabalho, as seguintes etapas foram seguidas para o desenvolvimento desse projeto de pesquisa:

A primeira etapa dos trabalhos a serem executados neste projeto de tese será o estudo e o levantamento bibliográfico sobre Rede de Sensores sem Fio, com as respectivas áreas de inovação a serem exploradas no projeto, e avaliação das principais características envolvidas em sua aplicação em sistemas subterrâneos. Também será realizado o estudo e levantamento bibliográfico de perdas em sistemas de abastecimento de água e os principais problemas enfrentados pelas empresas de distribuição.

A segunda etapa será o estudo da tecnologia já utilizada pela empresa, que possui um protótipo de rede de sensores sem fio em determinados pontos de uma cidade. Esse protótipo servirá como base para desenvolvimento do modelo a ser projetado.

A terceira etapa será o estudo da comunicação sem fio que será utilizado na RSSF a ser desenvolvida. Nessa etapa, serão utilizados microcontroladores *Feather M0* desenvolvidos pela *Adafruit Industries* para testar o protocolo de comunicação escolhido e analisar seu comportamento em ambientes subterrâneos.

A quarta etapa consistirá no desenvolvimento do nó sensor com capacidade de comunicação sem fio à longa distância e com baixo consumo de energia. Também será desenvolvida a estrutura responsável por possibilitar a implementação desse dispositivo em ambiente subterrâneo.

A quinta etapa será composta de testes físicos da comunicação entre dispositivos da Rede de Sensores Sem Fio Subterrânea para coletar os dados necessários para análise.

A sexta etapa consistirá no desenvolvimento de um estudo comparativo a partir das informações obtidas para determinar os limites atingidos pela comunicação subterrânea sob diferentes condições e em diferentes cenários e assim avaliar a aplicabilidade da tecnologia de comunicação estudada para diferentes situações, em especial, para monitoramento de sistemas de abastecimento de água.

O último momento do projeto será destinado à elaboração de artigos científicos e escrita do relatório técnico final.

#### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um estudo sobre a comunicação entre sensores que constituem uma rede de sensores sem fio subterrânea para

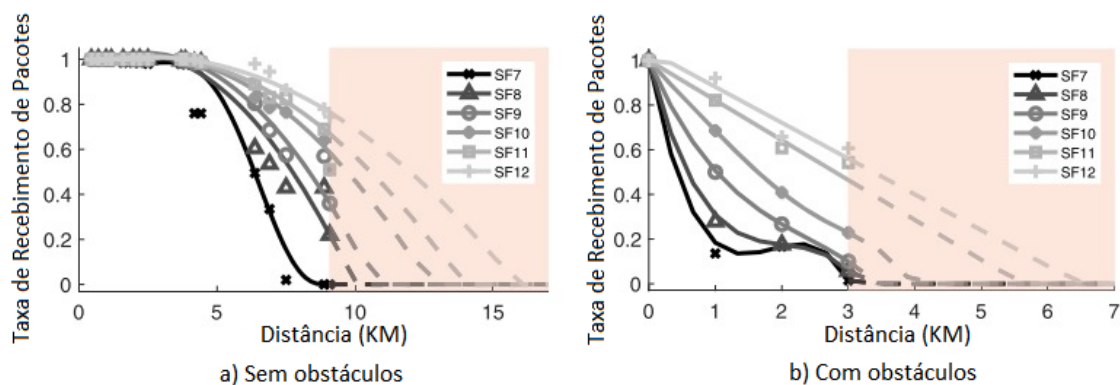
avaliar a performance da conexão estabelecida entre os dispositivos e determinar a influência do ambiente subterrâneo na comunicação.

Os dispositivos devem monitorar redes subterrâneas e enviar as informações para que sejam recebidas por operadores do sistema acima do solo. O estudo visa analisar a viabilidade da utilização dessa comunicação de baixo consumo e longo alcance em redes subterrâneas, avaliando a profundidade de cada aplicação e determinando os limites da comunicação em cada cenário para embasar o desenvolvimento da rede. O objetivo principal visa avaliar a utilização dessa comunicação para o monitoramento de variáveis em redes de distribuição de água, que apresentam seus dutos localizados geralmente abaixo do solo.

Essa rede de monitoramento é baseada nos conceitos de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), utilizando nós sensores para realizar o sensoriamento e envio dos dados. Um dos principais fatores a ser avaliado no desenvolvimento de RSSF é o tipo de comunicação que irá ser utilizada entre os dispositivos. Foi realizado um estudo bibliográfico de diversas técnicas de comunicação, como foi detalhado na Seção 2, e, a partir daí, foi definida a tecnologia LoRa para ser utilizada como método de comunicação entre os nós sensores que constituem a rede.

De acordo com Liando et al. (2019), dois dispositivos utilizando a tecnologia LoRa conseguem estabelecer uma comunicação a distâncias maiores que 15 km em ambientes com linha de visada direta e utilizando o *spreading factor* igual a 12 e alcança distâncias pouco inferiores a 10 km no mesmo ambiente com  $SF = 7$ . Já em ambiente com obstáculos, esses valores de distância alcançada caem para, aproximadamente, 7 e 3 km, respectivamente. Esses resultados podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 – Experimento realizado para testes da tecnologia de comunicação LoRa em ambientes com e sem obstáculos.



Fonte: Adaptado de Liando et al. (2019)

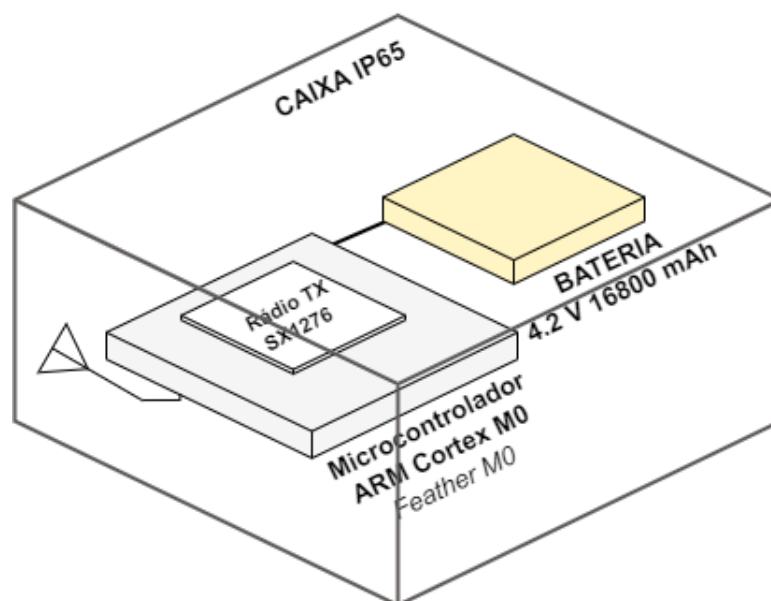
É importante ressaltar que esses dados foram obtidos considerando os dois sensores situados sobre a superfície do solo, mas levando em consideração que este projeto visa avaliar a aplicabilidade de uma rede para monitoramento de sistemas de distribuição de água, foi realizado

o estudo para avaliar a possibilidade de alocar os sensores ao longo da tubulação subterrânea da rede de distribuição.

Para a distribuição dos dispositivos de forma subterrânea ser possível, foi realizado um estudo em campo do comportamento da comunicação via LoRa entre dois dispositivos, posicionando um deles sob a superfície do solo e outro acima dela. O experimento foi realizado utilizando os microcontroladores Feather M0, desenvolvidos pela fabricante Adafruit. Esses dispositivos contêm um processador ARM Cortex M0, que é o processador ARM que apresenta maior eficiência energética e um módulo de rádio LoRa RFM95, que pode operar nas frequências de 915MHz, frequência que se encontra na banda ISM (*Industrial, Sientific and Medical* - banda de frequência reservada para fins industriais, científicos e médicos) do Brasil e dos Estados Unidos da América, ou na frequência de 868MHz, que corresponde a banda ISM da Europa. Esses rádios não são indicados para transmissões de áudio ou vídeo, mas são apropriados para transmissões de pequenos pacotes de dados. Apresentam consumo de corrente de aproximadamente  $300\mu\text{A}$  em repouso e picos de 120mA durante as transmissões de dados de 20dBm para transmissões ao ar livre (INDUSTRIES, 2021).

O microcontrolador foi alimentado por uma bateria Li-ion (4,2 V/16800 mAh) e conectado a uma antena com frequência na faixa de 915 MHz e ganho 2dBi. Esses componentes foram inseridos em uma caixa plástica com nível de proteção IP65, que garante que o seu interior esteja selado contra poeiras e protegido contra jatos de água. Essa estrutura, apresentada na Figura 15, foi desenvolvida para que os dispositivos possam ser posicionados em ambiente subterrâneo, sendo completamente enterrados, sem prejuízo ao material interno e, conseqüentemente, aos resultados obtidos.

Figura 15 – Protótipo desenvolvido para testes de transmissão via LoRa em ambiente subterrâneo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Para realização do experimento, essa estrutura desenvolvida foi completamente enterrada em uma profundidade variável e esse procedimento pode ser observado na Figura 16. Outro microcontrolador foi utilizado para receber os dados do que estava inserido na estrutura subterrânea através da tecnologia LoRa.

Figura 16 – Procedimento realizado em experimento subterrâneo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A utilização da tecnologia LoRa para comunicação torna necessária a definição de parâmetros relacionados a essa tecnologia. Os valores escolhidos para os parâmetros detalhados na subseção 2.5.1 estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no experimento para configurar a modulação LoRa

| Parâmetros                 | Valores |
|----------------------------|---------|
| Frequência (f)             | 915 MHz |
| Fator de espalhamento (SF) | 7 ou 12 |
| Largura de banda (BW)      | 250 kHz |
| Taxa de Código (CR)        | 4/5     |

Nos experimentos realizados, o transmissor (TX) foi alimentado por bateria e foi posicionado sob o solo, sendo responsável por realizar a transmissão em ambiente subterrâneo, enquanto

o receptor (RX) estava conectado a um computador via cabo USB, por onde era alimentado energeticamente e tornava possível uma análise imediata dos resultados obtidos. Os testes foram realizados em ambiente com visada direta, urbano e florestal para avaliar a transmissão em três diferentes cenários, como detalhado na Tabela 5.

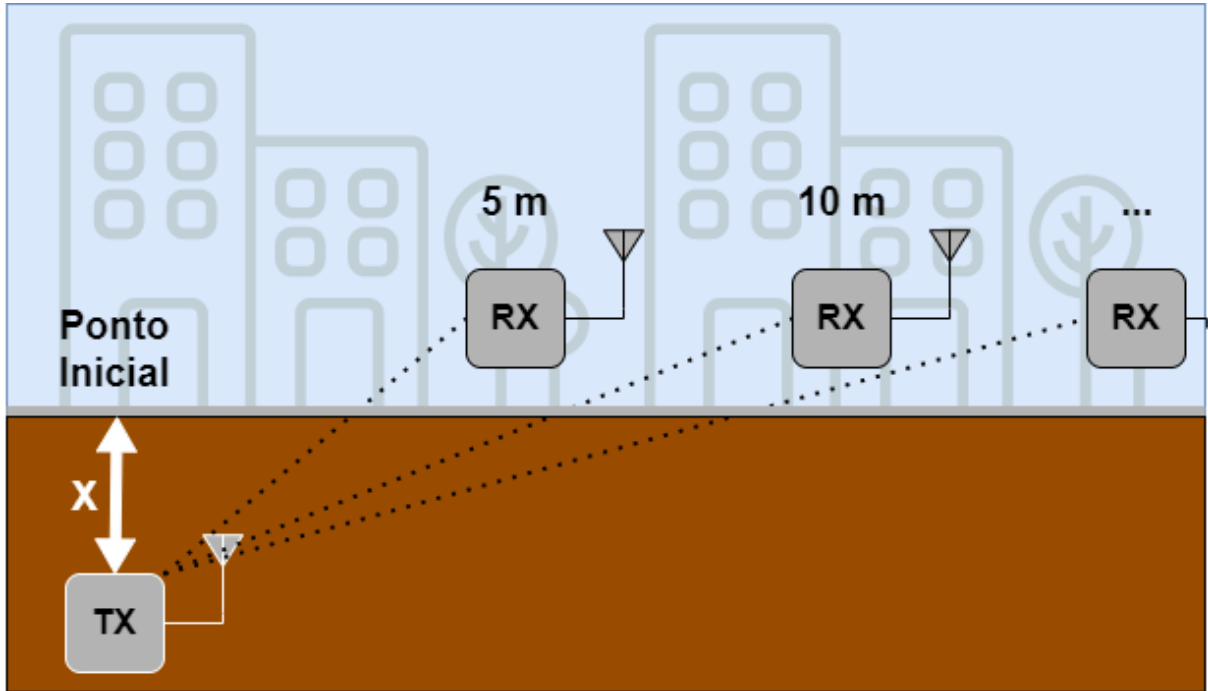
Tabela 5 – Cenários considerados para avaliar a comunicação subterrânea via comunicação LoRa.

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| <b>Cenário 1</b> | Ambiente Florestal                   |
| <b>Cenário 2</b> | Ambiente com linha de visada direta  |
| <b>Cenário 3</b> | Ambiente urbano denso com obstáculos |

A metodologia do experimento consiste em posicionar a estrutura que contém o transmissor inicialmente em uma profundidade de 50 cm e o receptor a uma distância de 5m do ponto denominado "Ponto Inicial". O transmissor deve enviar uma quantidade específica de mensagens por minuto e foi determinado um período de 5 minutos para o recebimento de mensagens em cada posição do receptor. Após esse período, há um afastamento de 5 m na posição do receptor com relação a sua localização anterior. Esse procedimento se repete, incrementando essa variação de 5 m até que a qualidade da comunicação não possa mais ser estabelecida ou de acordo com as limitações do ambiente.

Após esse procedimento, foi acrescentada uma profundidade de mais 50 cm ao transmissor, resultando então em uma posição de 1 m sob a superfície. O procedimento descrito anteriormente se repete para essa profundidade, com o receptor inicialmente posicionado no "Ponto Inicial" e incrementando sua distância em relação ao transmissor a cada ponto de medição. Esse procedimento, ilustrado na Figura 17, é realizado até que o transmissor atinja 2 m de profundidade, valor no qual a comunicação não conseguiu ser estabelecida em nenhuma das configurações propostas. As etapas descritas foram realizadas para verificar a influência da profundidade na comunicação via LoRa.

Figura 17 – Experimento realizado para testes da tecnologia de comunicação LoRa em ambientes subterrâneos.



Fonte: Elaborado pela Autora.

O experimento realizado seguiu o processo apresentado pelo fluxograma ilustrado na Figura 18.

Estes testes foram utilizados para verificar a influência da profundidade em que está situado o sensor subterrâneo na transmissão, avaliando assim diversos parâmetros a partir dos dados transmitidos e recebidos, que estão descritos e detalhados a seguir:

- Taxa de entrega de pacotes (*Packet Delivery Ratio - PDR*): esse valor representa a relação entre o número total de pacotes enviados pelo transmissor e o número de pacotes recebidos pelo receptor (SHARMA; BATRA; ZAFAR, 2020). Dessa forma, é possível saber quantos pacotes foram entregues corretamente ao destino esperado. O cálculo desse parâmetro é realizado de acordo com a Equação 3.1.

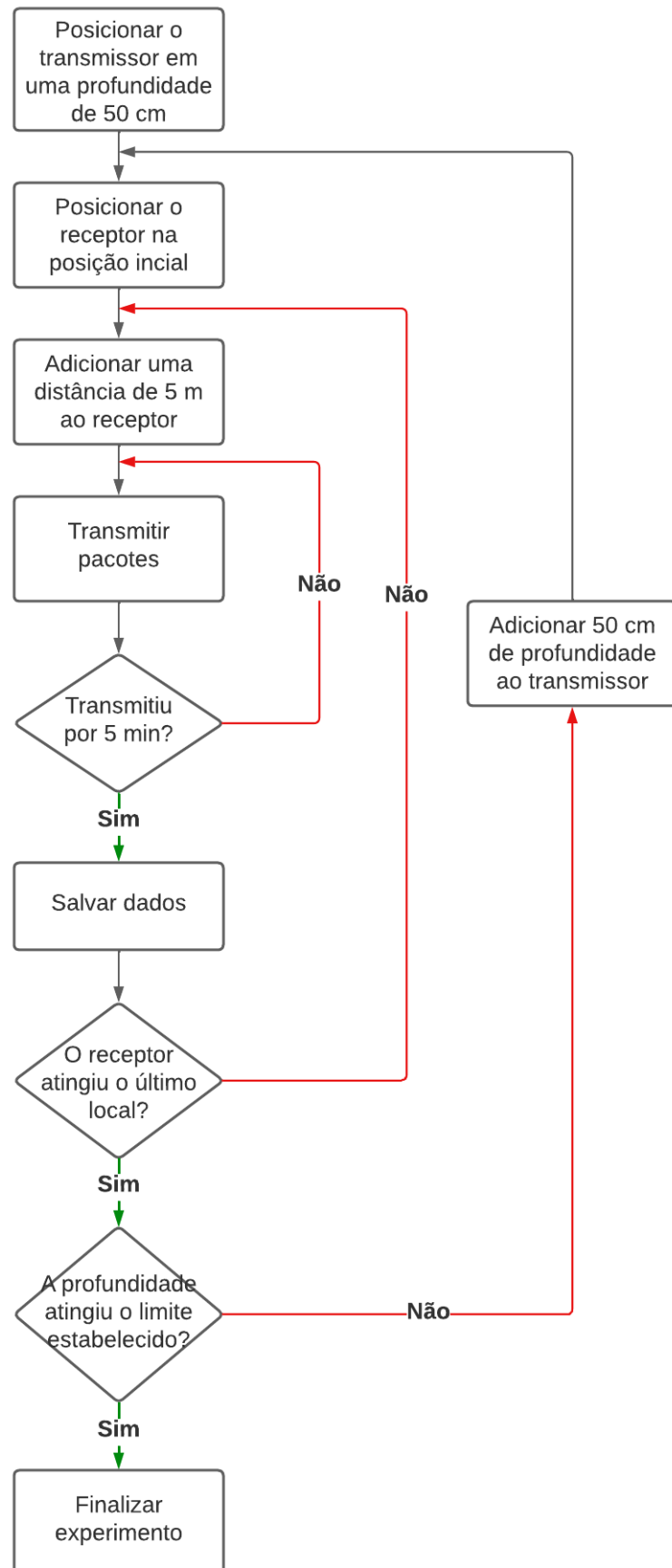
$$PDR = \frac{N_{RX}}{N_{TX}} * 100 \quad (3.1)$$

Onde  $N_{TX}$  representa o número total de pacotes transmitidos e  $N_{RX}$  o número total de pacotes recebidos. Esse parâmetro também pode ser denominado Taxa de Pacotes Recebidos.

- Taxa de perda de pacotes (*Packet Loss Ratio - PLR*): esse valor representa o complemento da taxa de entrega de pacotes (PDR), como é possível observar pela Equação 3.2.

$$PLR = 1 - PDR \quad (3.2)$$

Figura 18 – Fluxograma que apresenta a metodologia do experimento realizado.



Ou seja, representa quantos pacotes não foram recebidos pelo receptor em relação ao número total de pacotes enviados e também pode ser calculado pela Equação 3.3 (LEE; LOO; CHUAH, 2015).

$$PLR = \frac{N_{TX} - N_{RX}}{N_{TX}} * 100 \quad (3.3)$$

Onde  $N_{TX}$  representa o número total de pacotes transmitidos e  $N_{RX}$  o número de pacotes recebidos pelo receptor.

- Indicador de intensidade do sinal recebido (*Received Signal Strength Indicator - RSSI*): esse parâmetro indica a qualidade da comunicação entre dois ou mais dispositivos. O RSSI representa o nível de potência do sinal recebido após possíveis perdas no percurso e é medido em decibéis. Esse parâmetro considera a relação entre a potência do sinal recebido com a potência do sinal transmitido, a distância de transmissão e o ambiente de propagação (XU et al., 2010). Quanto maior seu valor mais forte pode ser considerado o sinal.

Além disso, o procedimento desenvolvido para realização do experimento foi executado para diferentes valores de fator de espalhamento. Foi realizada a comunicação via LoRa utilizando tanto o menor valor de SF disponível quanto o maior, ou seja, usando os valores SF=7 e SF=12, respectivamente. Com isso, é possível avaliar a influência desse parâmetro na transmissão. Por fim, variáveis como distância entre os dispositivos e ambiente de transmissão também foram analisadas de acordo com sua influência na qualidade da comunicação.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

Foi analisado, de acordo com a metodologia descrita, o desempenho da tecnologia LoRa e a relação da qualidade da comunicação estabelecida entre um sensor subterrâneo e um sobre a superfície e a interferência de variáveis como a distância, profundidade, fator de espalhamento (*spreading factor* - SF) e características do ambiente no qual estão inseridos.

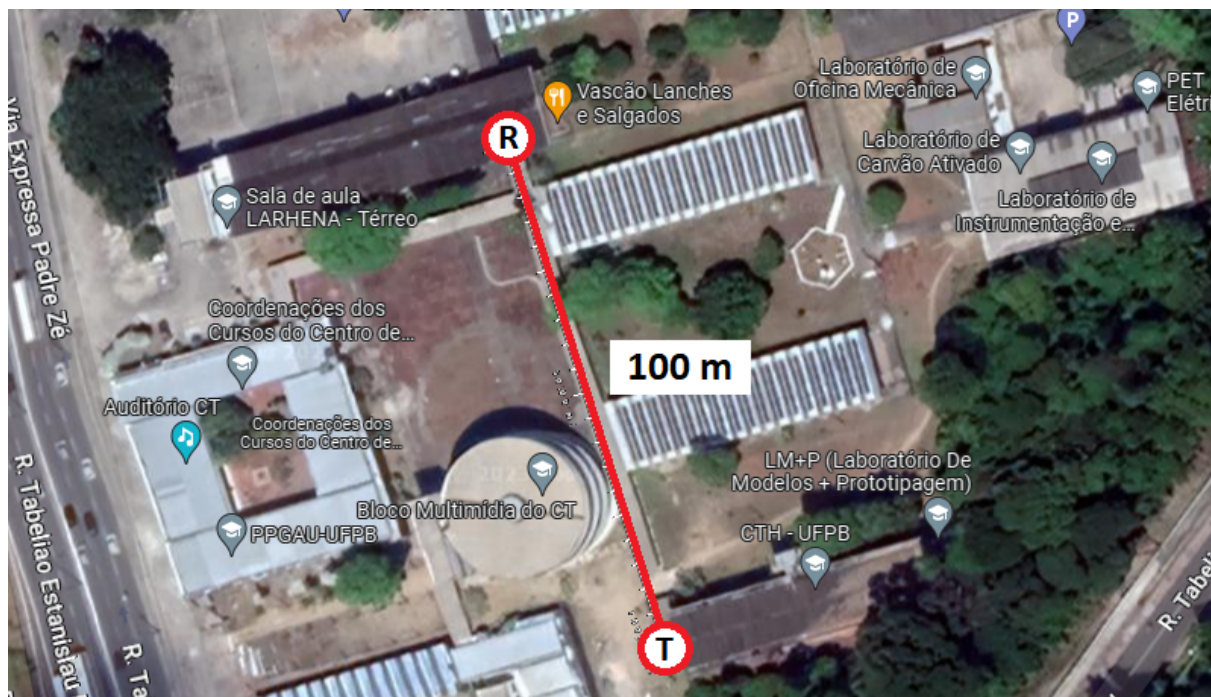
### 4.1 AMBIENTE COM VISADA DIRETA

A visada direta (do inglês, line of sight) é um termo utilizado, nesse caso, para se referir a distância entre o local no qual foi enterrado o transmissor e os locais nos quais foi posicionado o receptor. Ou seja, a visada direta não se estabelece de fato entre os dois dispositivos, pois um está enterrado no solo, mas o termo é usado para caracterizar o espaço de transmissão, em geral sem obstáculos, quando observado sobre o solo.

Em ambientes com visada direta e transmissão entre dois sensores sobre a superfície, a tecnologia LoRa alcança quilômetros de distância, como apresentado em diversos estudos, como em Liando et al. (2019) citado na seção 3.2. Porém, com um sensor enterrado a uma profundidade variável e um sensor receptor a uma altura de 1,5 m sobre o solo, foi verificado que o alcance de transmissão é reduzido de forma considerável, sendo influenciado pela profundidade do transmissor.

Os primeiros experimentos para analisar a influência da profundidade e demais parâmetros citados na comunicação subterrânea via Lora foram realizados em ambiente com linha de visada direta. Os testes foram executados em uma área aberta da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)/Brasil. Essa área disponibilizou uma distância de 100 m de comprimento para os testes em visada direta, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente com linha de visada direta.



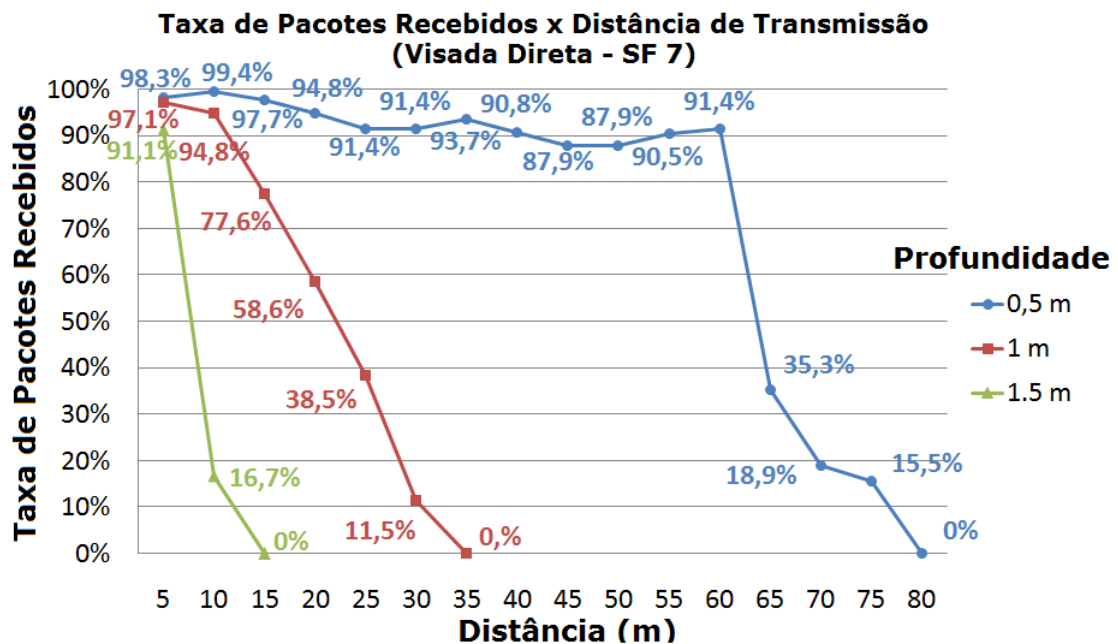
Fonte: Elaborado pela Autora.

Na Figura 20, é ilustrada a relação entre o PDR com a distância entre os dispositivos e a profundidade do transmissor, considerando o SF igual a 7, ou seja, o menor valor que poderia ser utilizado.

O experimento foi realizado aumentando a distância entre os sensores até a taxa de pacotes recebidos ser nula, significando a impossibilidade de estabelecer uma comunicação entre os dispositivos. Considerando inicialmente o SF igual a 7, é possível observar a influência da profundidade de transmissão na qualidade e alcance da comunicação. Ao analisar o transmissor em uma profundidade de 50 cm e SF igual a 7, como apresentado na Figura 20, a comunicação consegue se manter com alto desempenho, atingindo taxas de recebimento de pacotes superiores a 85% em todos os pontos de medição até atingir uma distância de 60 m, quando ocorre uma queda significativa no recebimento de dados. A influência da profundidade na comunicação de dispositivos via LoRa fica evidente ao comparar esses resultados com os obtidos para o transmissor em maiores profundidades.

Considerando o transmissor 1 m abaixo do solo, os dispositivos só conseguem manter uma conexão com taxas semelhantes às observadas anteriormente até uma distância de 10 m entre os dispositivos e, para uma profundidade de 1,5 m, os valores de PDR são semelhantes apenas no ponto de medição inicial. Após isso, as taxas de pacotes recebidos caem até que a comunicação não possa mais ser estabelecida em distâncias máximas que diminuem à medida que a profundidade aumenta. Para o transmissor em uma profundidade de 2 m, a conexão entre os dispositivos não foi obtida em nenhum ponto de medição.

Figura 20 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente com visada direta e SF = 7.



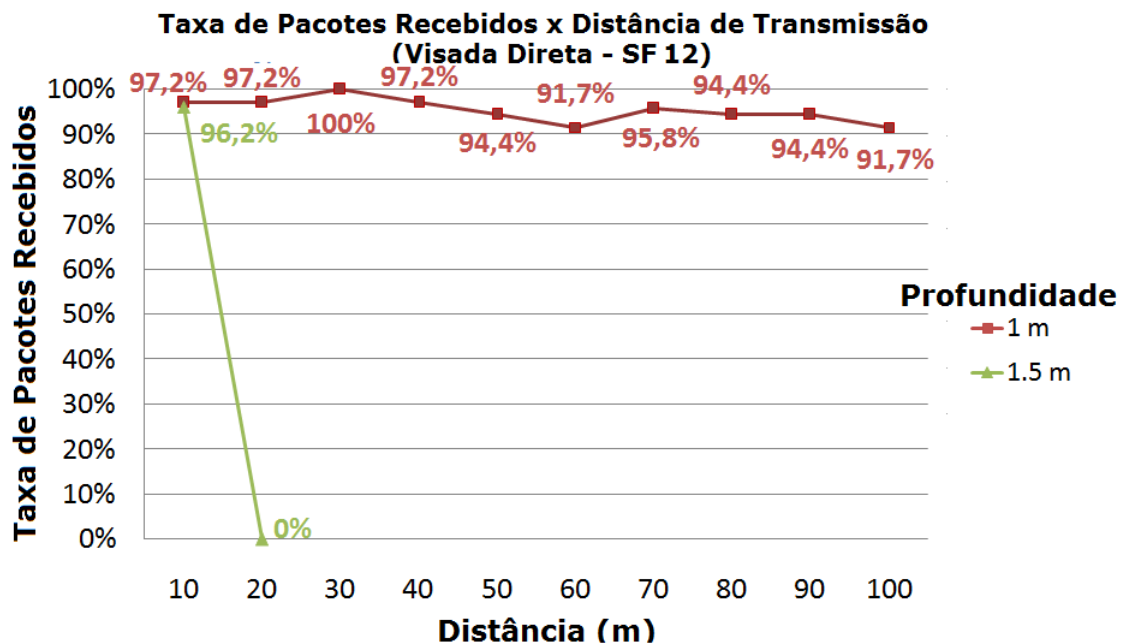
Fonte: Elaborado pela Autora.

Em seguida, foi analisado o comportamento da comunicação nesse mesmo ambiente e utilizando os mesmos parâmetros de transmissão, modificando apenas o valor do fator de espalhamento, nesse caso, definindo SF igual a 12. Ou seja, foi alterado do menor valor possível de SF para o maior valor que pode ser utilizado. Logo, será possível verificar o quanto o valor dessa variável pode influenciar na transmissão LoRa de forma subterrânea.

A Figura 21 ilustra essa situação, onde a taxa de pacotes recebidos foi analisada para o transmissor situado a, no mínimo, 1m de profundidade, pois a transmissão apresentou taxas de pacotes recebidos superiores a 90% em todos os pontos medidos até 100 m, que era a distância limite no cenário disponibilizado. Nesse caso, não há necessidade de apresentar os dados para profundidade de 50 cm, pois se apresentaram na mesma faixa de valores. Além disso, os dados foram apresentados a partir de uma variação de 10 m de distância pela clareza visual do gráfico, já que os resultados estão na mesma faixa de valores (acima de 90%).

Porém, ao aumentar a profundidade para 1,5 m, a comunicação é bastante prejudicada, sendo um exemplo explícito da influência da profundidade na comunicação. Com o transmissor em uma profundidade de 1,5 m abaixo do solo, a qualidade da comunicação caiu de forma abrupta após o primeiro ponto de medição, não conseguindo alcançar os 20 m de distância. Ao aumentar a profundidade em mais 50 cm, a comunicação não conseguiu ser estabelecida em nenhum ponto.

Figura 21 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente com visada direta e SF = 12.



Fonte: Elaborado pela Autora.

## 4.2 AMBIENTE FLORESTAL

Os experimentos em ambiente florestal foram realizados no bosque da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), no qual a mata é fechada e as árvores se encontram na parte superior, impedindo a visão do céu e dos arredores devido à sua densidade, como mostrado na Figura 22.

A tecnologia LoRa em ambiente florestal com um sensor posicionado de forma subterrânea e outro sobre a superfície apresentou resultados distintos dos apresentados em ambiente de visada direta. Os resultados para ambiente florestal, comparando a taxa de pacotes recebidos de acordo com a distância entre os dispositivos e a profundidade do transmissor para o menor fator de espalhamento, podem ser observados na Figura 23.

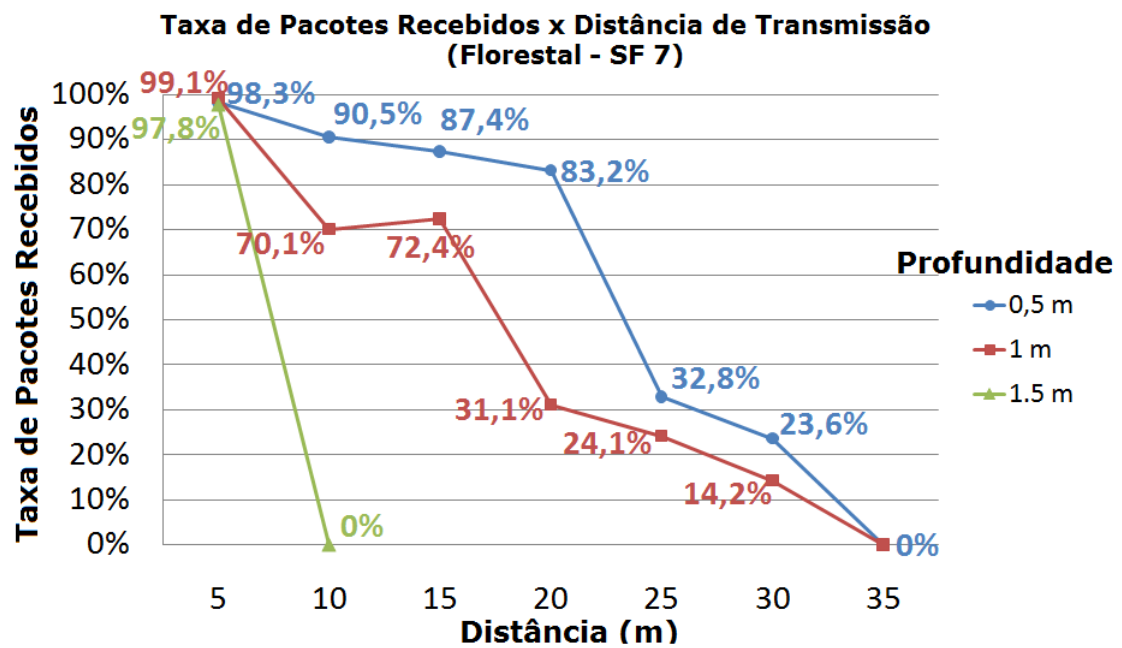
Ao analisar o gráfico, é possível observar que para uma profundidade de 50 cm e considerando SF igual a 7, o desempenho da comunicação apresenta variações de acordo com o ambiente de transmissão. No cenário florestal, a comunicação mantém valores de PDR acima dos 80% apenas até a distância de 20 m entre os dispositivos, decrescendo a partir desse ponto, de forma gradativa, até perder completamente a conexão entre os dois dispositivos a 35 m de distância, diferente do que ocorre em visada direta, que manteve a comunicação entre os dispositivos por uma distância aproximadamente 130% maior.

Figura 22 – Ambiente florestal com mata fechada.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 23 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente florestal e SF = 7.



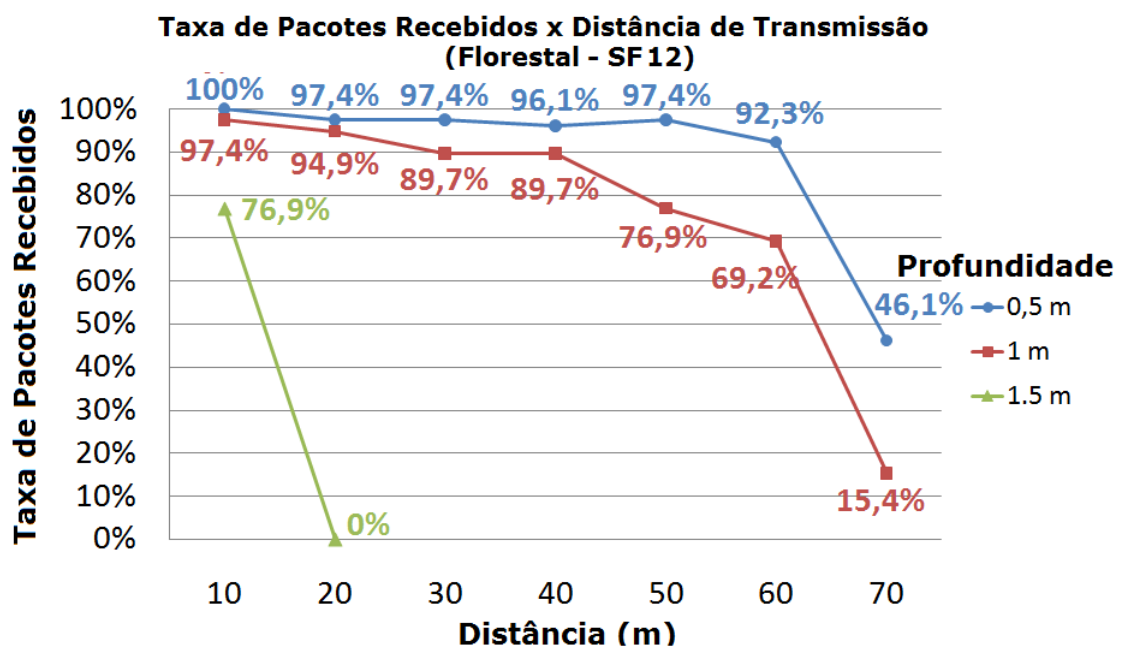
Fonte: Elaborado pela Autora.

Para uma profundidade de 1 m, o desempenho em ambiente florestal se assemelha ao comportamento em visada direta, mas apresentando menores taxas de pacotes recebidos na maior parte dos pontos de medição. Porém, os resultados nessas condições apresentaram um alcance similar quando analisada a distância de comunicação que os dois dispositivos conseguiam atingir e ainda estabelecer uma conexão de envio e recebimento de mensagens.

Ao aumentar a profundidade, é possível verificar uma maior similaridade em diferentes cenários. Analisando os dados com o transmissor em 1,5 m de profundidade, a comunicação apresenta uma qualidade considerável apenas no primeiro ponto de medição e, em 2 m de profundidade, a conexão não consegue ser estabelecida.

Após obtidos os dados referentes aos resultados descritos anteriormente, foi novamente incrementado o valor do fator de espalhamento para 12. Essa alteração proporciona um aumento do alcance da comunicação e os resultados de taxa de pacotes recebidos podem ser observados na Figura 24. Ao analisar o gráfico ilustrado, é possível observar um aumento na distância alcançada mantendo uma boa qualidade de comunicação nas duas primeiras profundidades analisadas. Devido a esse fator, nesse gráfico as distâncias são apresentadas com uma variação de 10 m pela clareza visual das informações e os dados só foram analisados até a distância de 70 m pela limitação da área do ambiente no qual foram realizados os experimentos, como ilustrado na Figura 25.

Figura 24 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente florestal e SF = 12.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Considerando a profundidade de 1 m, o aumento da qualidade da transmissão nesse ambiente ao modificar o fator de espalhamento é considerável e pode ser observada em diferentes

Figura 25 – Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente florestal.



Fonte: Elaborado pela Autora.

pontos ao longo do gráfico, como, por exemplo, analisando a distância de 30 m é possível observar um aumento de 75,52% na taxa de pacotes recebidos. Considerando uma profundidade de 50 cm para o transmissor, também é notável um aumento na qualidade de comunicação quando utilizado o SF igual a 12, atingindo uma distância, nesse caso, de 60 m com uma taxa de pacotes recebidos superior a 90%, enquanto a comunicação com o menor valor de SF sequer conseguiu alcançar essa distância.

Porém, ao atingir maiores profundidades, o aumento do fator de espalhamento interfere cada vez menos na qualidade da comunicação. Mesmo com o maior valor desse parâmetro, ou seja, SF igual a 12, o desempenho da comunicação em ambiente florestal para a profundidade de 1,5 m foi pouco superior ao observado com menor valor de SF e semelhante ao observado em visada direta nas mesmas condições de comunicação. Como ocorreu nos cenários analisados anteriormente, a comunicação para maiores profundidades não conseguiu ser estabelecida nessas condições.

Ao comparar esse desempenho com o obtido em visada direta com mesmas condições de transmissão e recepção, é possível observar uma redução na distância alcançada, com uma queda na taxa de pacotes recebidos a partir de 60 m de transmissão, nas menores profundidades. À medida que o valor desse último parâmetro é incrementado, o comportamento nos diferentes ambientes se assemelha ainda mais.

### 4.3 AMBIENTE URBANO DENSO

O último ambiente no qual foram realizados os experimentos foi um ambiente urbano denso com muitos obstáculos físicos, como edifícios, casas, dentre outros. O solo utilizado para testes nesse ambiente se assemelha ao utilizado nos demais cenários, sendo um solo arenoso, ou seja, majoritariamente composto por areia. Nesse cenário, a comunicação via LoRa apresentou o pior desempenho dentre os ambientes avaliados. Os testes nesse ambiente alcançaram uma distância máxima de 25 m e foram realizados em um espaço urbano denso, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente urbano denso.



Fonte: Elaborado pela Autora.

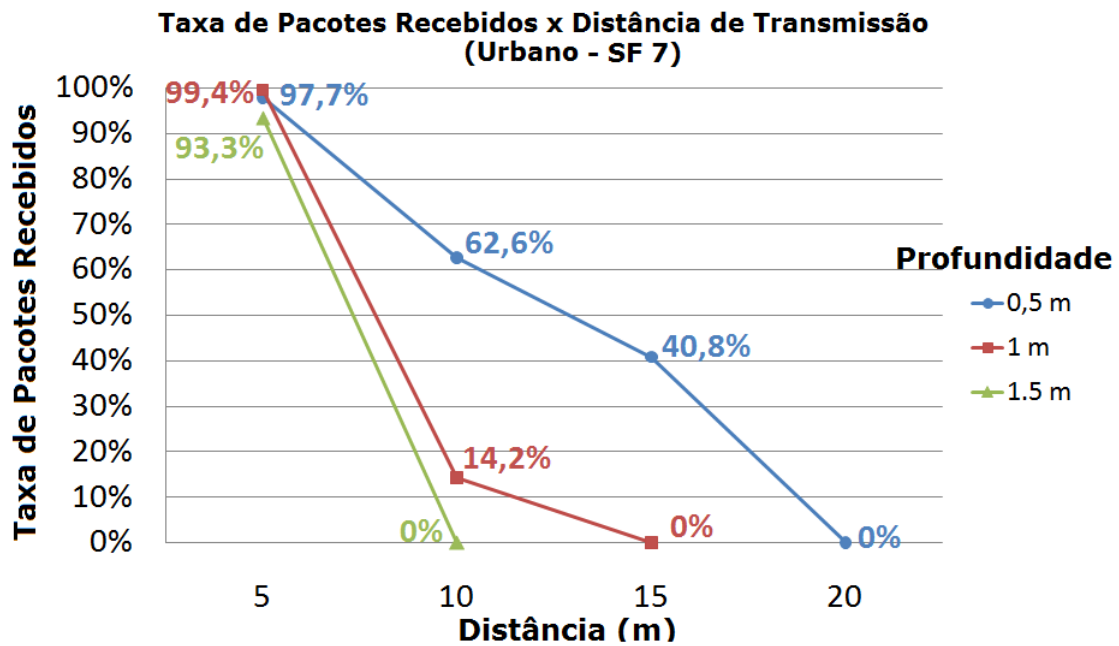
Inicialmente, foi realizado o experimento com o SF igual a 7 e os resultados podem ser observados na Figura 27. Considerando o transmissor em uma profundidade de 50 cm, a comunicação só conseguiu ser estabelecida até uma distância de 15 m entre os dispositivos. Considerando esse ponto de medição nos outros cenários analisados, a taxa de pacotes recebidos se manteve superior a 85%, logo o ambiente com obstáculos apresentou grande influência na comunicação subterrânea, limitando ainda mais a transmissão de dados estabelecida entre os dispositivos.

Para uma profundidade de 1 m, é possível analisar que, em um ambiente urbano denso, o alcance de comunicação entre os dispositivos também apresentou um desempenho bem abaixo dos demais ambientes com as mesmas configurações de transmissão e recepção. No ambiente em que foram realizados os experimentos, entre o ponto de medição referente a 5 m de distância entre os dispositivos e o ponto referente a 10 m de distância, haviam obstáculos e nesse intervalo

é possível observar uma queda considerável na quantidade de pacotes recebidos corretamente. Após esse ponto, o receptor não recebeu mais nenhum pacote enviado.

Já para maiores profundidades, o comportamento da comunicação subterrânea via LoRa em ambiente urbano se manteve similar ao observado nos cenários anteriores.

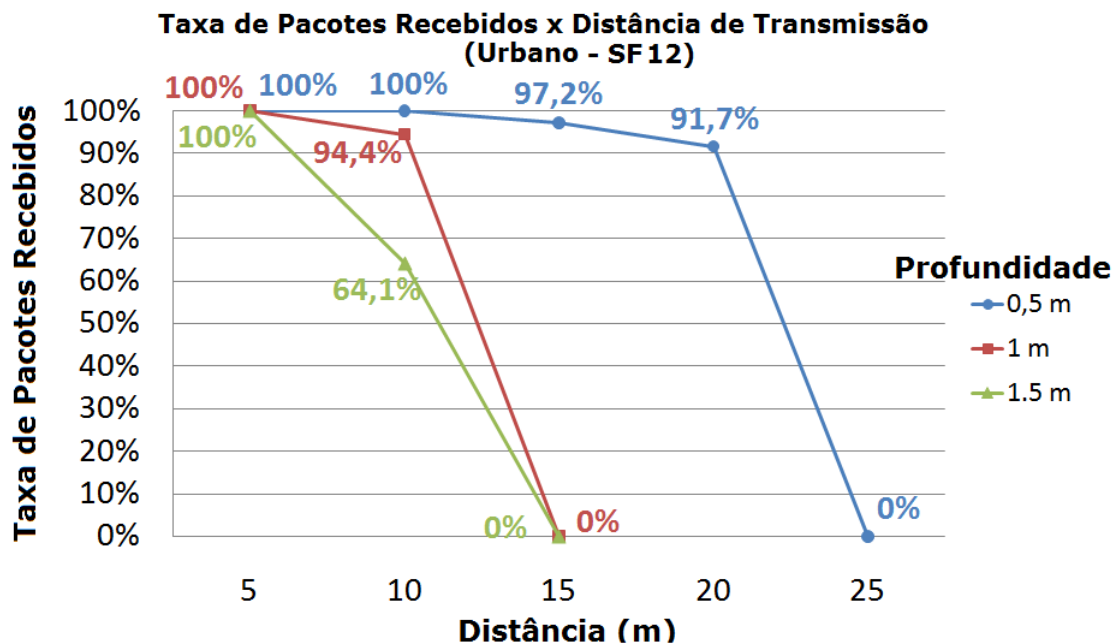
Figura 27 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente urbano denso e SF = 7.



Fonte: Elaborado pela Autora.

No ambiente urbano denso com valor de fator de espalhamento igual a 12, a comunicação apresentou melhores resultados, mas pouco influenciou na comunicação subterrânea nesse cenário, a interferência do solo e dos obstáculos fez com que a comunicação não apresentasse alta qualidade mesmo com o aumento do fator de espalhamento. Com essas características de transmissão, a comunicação apresentou desempenho semelhante ao obtido com SF igual a 7, alcançando distâncias máximas similares, com diferença de no máximo 5 m para as profundidades analisadas, mas com maiores taxas de pacotes recebidos. Esses resultados podem ser observados na Figura 28.

Figura 28 – Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente urbano denso e SF = 12.



Fonte: Elaborado pela Autora.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE TAXA DE PACOTES RECEBIDOS

Ao analisar os resultados obtidos nos experimentos realizados, é possível verificar a influência de diversos fatores na transmissão entre dispositivos que utilizam a tecnologia de comunicação LoRa, considerando que um desses dispositivos está posicionado sob a superfície do solo. Inicialmente, pode-se observar a influência direta da distância entre os dispositivos na qualidade da comunicação estabelecida.

Considerando a análise da distância, a taxa de recebimento de pacotes é prejudicada à medida que a distância entre os dispositivos aumenta, mas não de forma proporcional. A comunicação pode se manter estável com o aumento da distância até atingir um limiar, onde a partir desse ponto a recepção de pacotes, em geral, começa a ser reduzida com o aumento da distância. Esse limiar pode ser dado pelo limite de alcance dos dispositivos em determinado cenário ou por algum obstáculo no caminho.

É possível comprovar também a influência da profundidade do transmissor em relação à qualidade da comunicação, considerando tanto a quantidade de pacotes recebidos quanto a distância. Em geral, analisando uma mesma distância e diferentes profundidades, o experimento que considera o transmissor em um maior nível de profundidade apresenta uma taxa de pacotes recebidos menor, atingindo uma diferença de mais de 90% em alguns casos, como em ambiente urbano por exemplo. Além disso, na maior parte dos casos, os experimentos com os transmissores em maiores níveis de profundidade conseguiram estabelecer uma comunicação por uma menor

distância entre os dispositivos.

À medida que a profundidade aumenta, os demais parâmetros se tornam menos relevantes na comunicação. Em maiores profundidades, a comunicação subterrânea começa a se assemelhar nos diversos cenários considerando diferentes parâmetros, apresentando uma queda na qualidade da comunicação cada vez maior, até que a mesma não possa mais ser estabelecida.

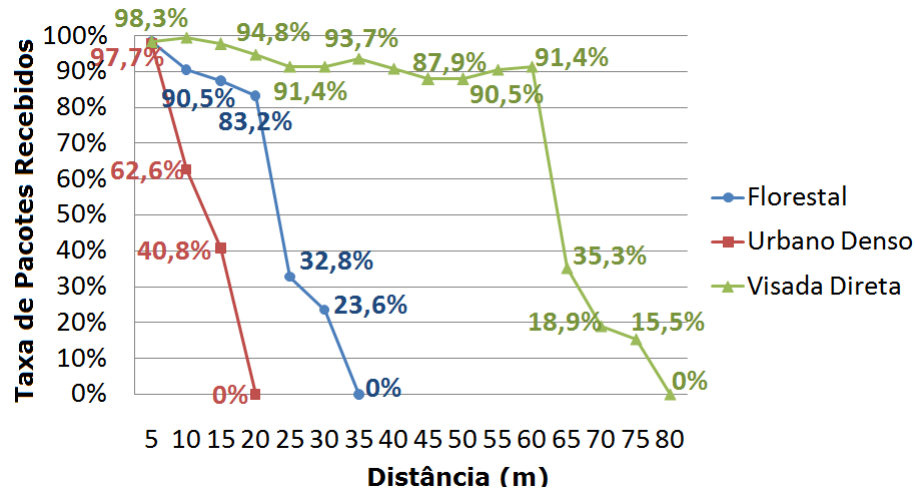
Além disso, também foi verificada a interferência do valor definido para o fator de espalhamento, já que o experimento foi realizado considerando tanto o menor quanto o maior valor possível para esse parâmetro. Comparando os resultados obtidos, foi observado que para o SF igual a 12 os dispositivos conseguiram estabelecer uma comunicação de maior qualidade, quando consideradas questões como taxa de pacotes recebidos e alcance de transmissão.

Ou seja, em geral, a comunicação conseguiu ser estabelecida por maiores distâncias quando definido o valor de SF igual a 12 e, comparando a quantidade de pacotes recebidos no mesmo ponto, para esse valor de fator de espalhamento, a taxa de pacotes recebidos foi maior, apresentando uma resposta de acordo com o esperado e revisado anteriormente sobre o fator de espalhamento na modulação LoRa.

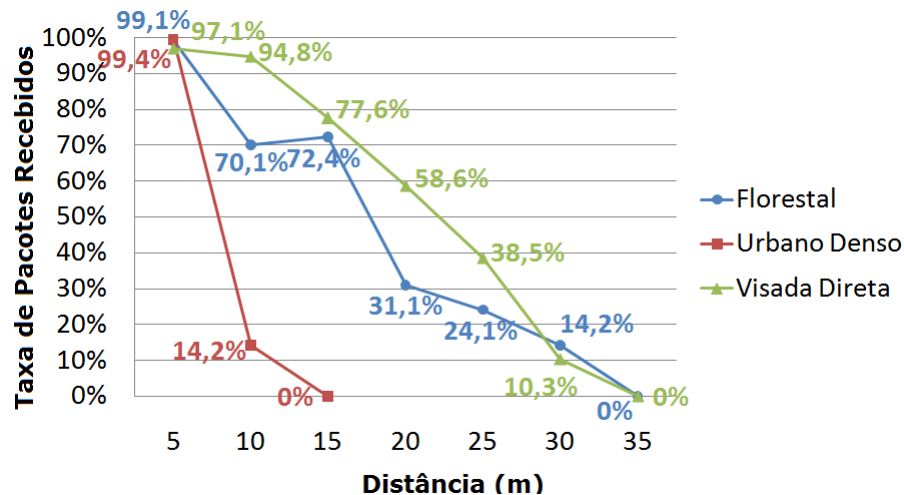
Por fim, outro parâmetro avaliado foi o ambiente no qual foram realizadas as transmissões. Foram analisados três cenários distintos: ambiente com visada direta, ou seja, sem obstáculos, ambiente florestal e ambiente urbano denso, que é um ambiente com muitos obstáculos. O ambiente com visada direta apresentou o melhor desempenho, alcançando maiores distâncias quando comparadas situações de mesmo valor de SF. Já o ambiente urbano denso, devido aos obstáculos, apresentou o pior desempenho, perdendo a qualidade da transmissão à medida que aumentava a distância ou encontrava algum obstáculo entre os dispositivos. O melhor desempenho entre todos os cenários comparados foi obtido em um ambiente com visada direta considerando o fator de espalhamento igual a 12, já o que apresentou os piores resultados foi o ambiente urbano denso com SF igual a 7.

A comparação da transmissão em diferentes ambientes, utilizando como exemplo o SF igual a 7, para as profundidades analisadas pode ser observada na Figura 29, onde a taxa de pacotes recebidos é maior de acordo com o ambiente em questão e a diminuição da profundidade, conforme analisado anteriormente. Foi utilizado esse valor de fator de espalhamento como exemplo, pois a comparação entre diferentes valores desse parâmetro já foi realizada anteriormente.

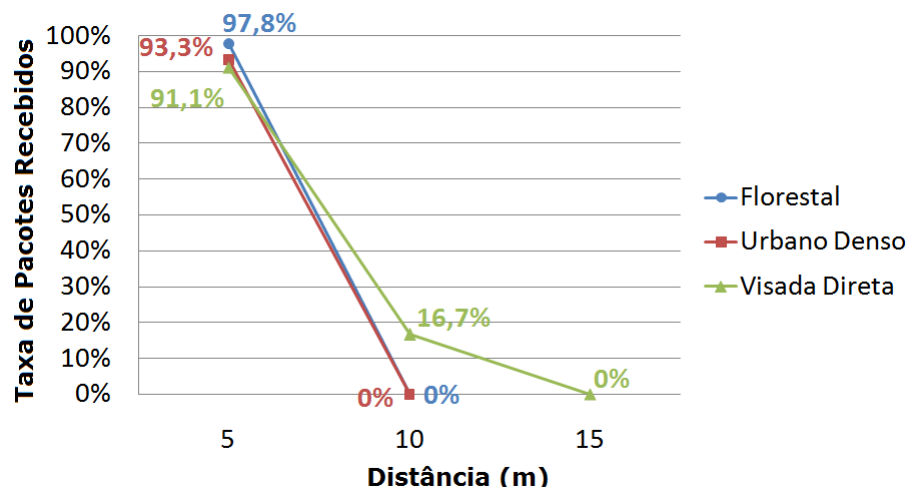
Figura 29 – Análise da Taxa de Pacotes Recebidos em função da distância entre os dispositivos comparando os diferentes ambientes de transmissão utilizando SF = 7, de acordo com a profundidade do transmissor, sendo (a) Profundidade de 50 cm, (b) Profundidade de 1 m e (c) Profundidade de 1,5 m



(a) Profundidade = 50 cm



(b) Profundidade = 1 m



(c) Profundidade = 1,5 m

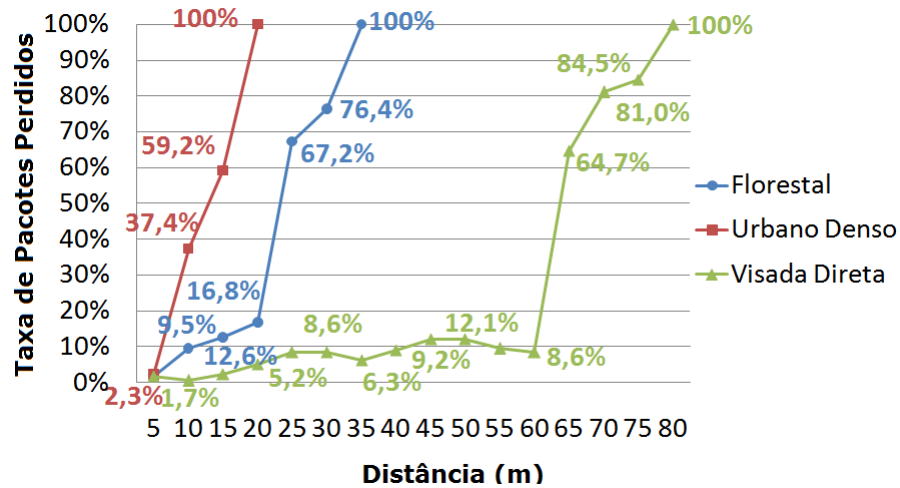
Fonte: Elaborado pela Autora

Outro parâmetro que pode ser analisado para avaliar a influência de determinadas variáveis na qualidade da transmissão é a taxa de pacotes perdidos, também chamada de taxa de perda de pacotes (do inglês, *Packet Loss Ratio* - PLR), que indica a quantidade de pacotes que foram perdidos na transmissão. Ou seja, o valor da taxa de pacotes perdidos é complementar ao valor da taxa de pacotes recebidos e, nesse caso, quanto maior for o valor da taxa de pacotes perdidos, pior será a qualidade da comunicação. Logo, esse parâmetro apresenta um comportamento contrário ao analisado anteriormente com a taxa de pacotes recebidos.

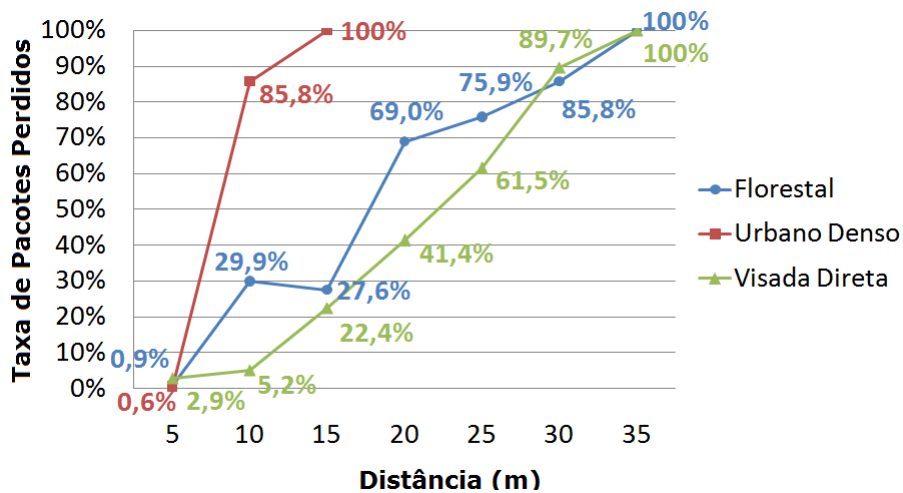
Considerando essas definições, o valor da taxa de pacotes perdidos tende, em geral, a crescer com o aumento da distância entre os dispositivos e da profundidade do transmissor, já o aumento do fator de espalhamento tende a diminuir o valor dessa taxa. Por fim, é possível concluir que esse parâmetro apresenta um comportamento inverso ao analisado quando comparados os ambientes de transmissão para a PDR.

Esse comportamento pode ser analisado na Figura 30, quando realizada a análise dos parâmetros considerando o SF igual a 7 para as diferentes profundidades e realizando a comparação da transmissão em diferentes ambientes, analisando a taxa de pacotes perdidos de acordo com o aumento da distância. Essa análise é similar a realizada na Figura 29, mas agora utilizando como base para estudo a taxa de pacotes perdidos para, dessa forma, apresentar que essa variável pode ser utilizada para análise dos parâmetros de transmissão, mas de forma inversa ao estudo realizado anteriormente.

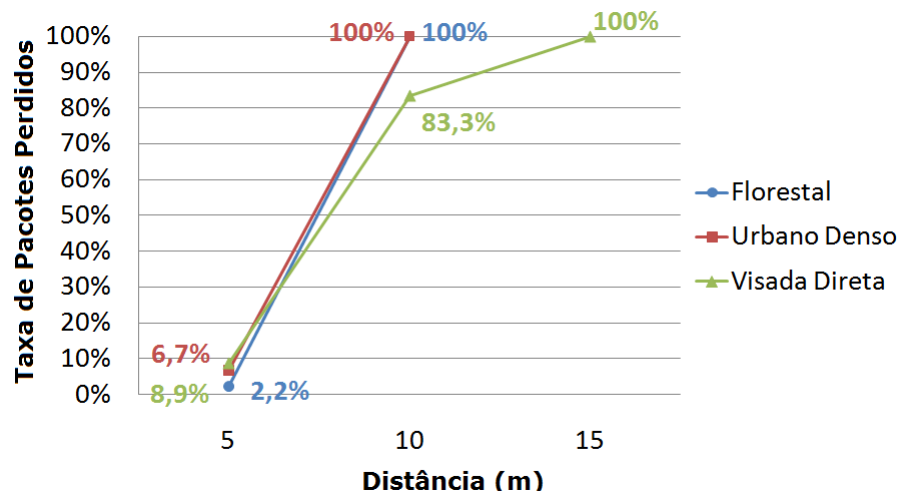
Figura 30 – Análise da Taxa de Pacotes Perdidos em função da distância entre os dispositivos comparando os diferentes ambientes de transmissão utilizando SF = 7, de acordo com a profundidade do transmissor, sendo (a) Profundidade de 50 cm, (b) Profundidade de 1 m e (c) Profundidade de 1,5 m



(a) Profundidade = 50 cm



(b) Profundidade = 1 m



(c) Profundidade = 1.5 m

Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 6 – Exemplo de distâncias máximas alcançadas para aplicação com PDR &gt; 70% para diferentes condições de transmissão.

| Ambiente de transmissão | Fator de espalhamento | Profundidade | Distância máxima |
|-------------------------|-----------------------|--------------|------------------|
| Visada Direta           | SF = 7                | 0,5 m        | 60 m             |
| Visada Direta           | SF = 7                | 1 m          | 15 m             |
| Visada Direta           | SF = 7                | 1,5 m        | 5 m              |
| Visada Direta           | SF = 12               | 0,5 m        | 100 m            |
| Visada Direta           | SF = 12               | 1 m          | 100 m            |
| Visada Direta           | SF = 12               | 1,5 m        | 10 m             |
| Florestal               | SF = 7                | 0,5 m        | 20 m             |
| Florestal               | SF = 7                | 1 m          | 15 m             |
| Florestal               | SF = 7                | 1,5 m        | 5 m              |
| Florestal               | SF = 12               | 0,5 m        | 60 m             |
| Florestal               | SF = 12               | 1 m          | 50 m             |
| Florestal               | SF = 12               | 1,5 m        | 10 m             |
| Urbano Denso            | SF = 7                | 0,5 m        | 5 m              |
| Urbano Denso            | SF = 7                | 1 m          | 5 m              |
| Urbano Denso            | SF = 7                | 1,5 m        | 5 m              |
| Urbano Denso            | SF = 12               | 0,5 m        | 20 m             |
| Urbano Denso            | SF = 12               | 1 m          | 10 m             |
| Urbano Denso            | SF = 12               | 1,5 m        | 5 m              |

O PLR e PDR devem ser levados em consideração ao definir a aplicação desejada, pois algumas aplicações que exigem um PDR acima de 90%, por exemplo, e então o estudo desenvolvido permite definir a distância máxima que os dispositivos devem ser alocados no desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio subterrânea. A título de exemplo, se o nível de recebimento de pacotes deve ser acima de 70%, com a profundidade de 50 cm podem ter até 60 m de distância entre eles, dependendo do ambiente escolhido. Já considerando uma profundidade de 1,5 m, a distância máxima entre os dispositivos deve ser de 5 m para os três ambiente com SF igual a 7, podendo alcançar até 10 m se aumentar o valor do fator de espalhamento em determinados ambientes. Esta análise da distância máxima nos diferentes cenários para uma aplicação que requer um PDR > 70% está demonstrada na Tabela 6.

#### 4.5 ANÁLISE DO RSSI EM TRANSMISSÕES SUBTERRÂNEAS

O sinal eletromagnético pode sofrer perdas ao longo do caminho por influência de diversos fatores, como obstáculos, instrumentos operando na mesma frequência, ruído ambiental e efeito de perda de caminho. O sinal transmitido pode sofrer interferência de acordo com o local de transmissão, recebendo uma influência negativa do ambiente (VILLARIM et al., 2019b). Os efeitos de perda de caminho (*path loss*) representam a atenuação da potência transmitida em relação à distância.

As redes de sensores sem fio em ambientes subterrâneos operam em condições drasti-

cammente diferentes das RSSF terrestres comuns devido aos limites no roteamento e às grandes perdas de dados pelo caminho (AKYILDIZ; STUNTEBECK, 2006).

Os modelos de perda de caminho para atenuação do sinal eletromagnético em transmissões acima da superfície já estão bem consolidados na literatura (ERCEG et al., 1999) (PHILLIPS; SICKER; GRUNWALD, 2012) (TANG et al., 2020), mas ainda há uma certa escassez quando se trata de Redes de Sensores Sem Fio Subterrâneas devido às suas propriedades, como profundidade e composição do solo, as quais são variáveis.

O protótipo desenvolvido foi enterrado em diferentes profundidades e em ambientes distintos a cada experimento. O sinal foi enviado do dispositivo subterrâneo para um localizado acima da superfície, constituindo uma rede UG2AG. Os ambientes considerados foram o florestal, urbano denso com obstáculos e ambiente com linha de visada direta. O solo é uma substância dielétrica não homogênea e deve incluir a permissividade dielétrica complexa, condutividade elétrica e permeabilidade magnética no cálculo de perda de caminho.

Estimar a atenuação do sinal no solo pode beneficiar uma variedade de áreas onde as RSSFS são utilizadas. Na literatura, existem alguns modelos empíricos e semi-empíricos, que visam prever a atenuação de sinais eletromagnéticos no solo. De acordo com Akyildiz e Stuntebeck (2006), é possível prever a potência recebida considerando a atenuação sofrida pelo sinal pelas perdas em espaço aberto e no solo a partir da Equação 4.1.

$$P_r = P_t + G_r + G_t - L_0 - L_m \quad (4.1)$$

Onde  $P_r$  e  $P_t$  são as potências recebida e transmitida, respectivamente,  $G_r$  e  $G_t$  são os ganhos das antenas de recepção e transmissão, respectivamente,  $L_0$  representa as perdas de caminho em espaço aberto e  $L_m$  quantifica as perdas de caminho no solo.

Um dos modelos principais para calcular a propagação de ondas eletromagnéticas no solo foi desenvolvido por Friis (HUANG et al., 2020). O modelo de Friis considera as perdas causadas pela mudança no comprimento de onda e a atenuação causada pela absorção do material. O modelo de Friis para materiais dielétricos é expresso pela Equação 4.2, considerando as perdas totais representadas por  $L_p$ , sendo a soma da perda de cominho em espaço aberto e no solo.

$$L_p = 6.4 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(\beta) + 8.68 \cdot \log_{10}(\alpha \cdot d) \quad (4.2)$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são definidos pela Equação 4.3 e 4.4, respectivamente, e  $d$  representa a distância entre os dispositivos.

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right]} \quad (4.3)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]} \quad (4.4)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular da onda eletromagnética ( $\omega = 2 \times \pi \times f$ ),  $\mu$  é a permeabilidade magnética relativa do solo, para a maioria dos solos que não contêm substâncias ferromagnéticas é igual à permeabilidade no espaço livre e pode ser considerada uma constante para diferentes tipos de solos,  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$  são a parte real e imaginária da permissividade complexa, estimadas pela fórmula de Peplinski para constantes dielétricas do solo. Os valores utilizados para essas variáveis estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no modelamento matemático de perda de caminho.

| Parâmetro       | Valor   | Descrição                                   |
|-----------------|---------|---------------------------------------------|
| f               | 915 MHz | Frequência de transmissão                   |
| $\mu$           | 1       | Permeabilidade magnética relativa           |
| $\varepsilon'$  | 7.14    | Parte real da permissividade complexa       |
| $\varepsilon''$ | 1.31    | Parte imaginária da permissividade complexa |

Os parâmetros foram selecionados de acordo com as características dos testes realizados. A frequência utilizada é a frequência de transmissão do projeto devido à modulação LoRa, a permeabilidade magnética do solo ( $\mu$ ) é comumente expressa como a permeabilidade magnética relativa, e pode ser calculada como a razão entre a permeabilidade magnética do solo e do espaço livre (CURIONI, 2013). Para os tipos mais comuns de solo, que não são ricos em substâncias ferromagnéticas, a permeabilidade magnética relativa do solo pode ser considerada como sendo igual a 1 (CHAAMWE; LIU; JIANG, 2010).

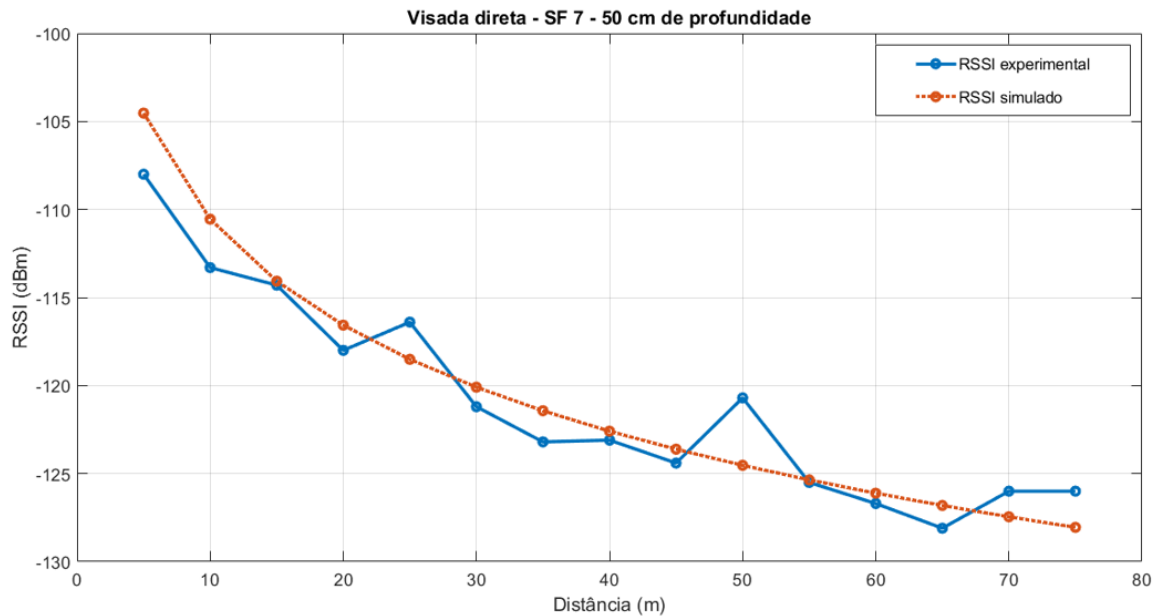
A permissividade complexa do solo pode ser afetada por muitos fatores, como o teor de água, a composição e a condutividade do solo. A permissividade do solo não pode ser facilmente medida. Porém, estimar a permissividade do solo tem sido tema de inúmeras pesquisas na literatura e, baseado nos dados obtidos através de pesquisas que caracterizam diferentes tipos de solo, foi definido o valor da permissividade complexa que pode ser aplicada ao ambiente estudado (SADEGHIOON et al., 2017).

A Equação 4.5 foi desenvolvida com base nas equações anteriores para representar a potência do sinal eletromagnético considerando os parâmetros citados anteriormente e o decaimento do sinal pela análise tradicional em espaço livre e no solo. Porém, o novo modelo acrescenta a variação na profundidade, representada pela letra  $p$ , para a análise da perda de sinal em ambientes subterrâneos considerando as condições determinadas.

$$RSSI_s = -190 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(\beta) + 8.68 \cdot \log_{10}(\alpha \cdot p) \quad (4.5)$$

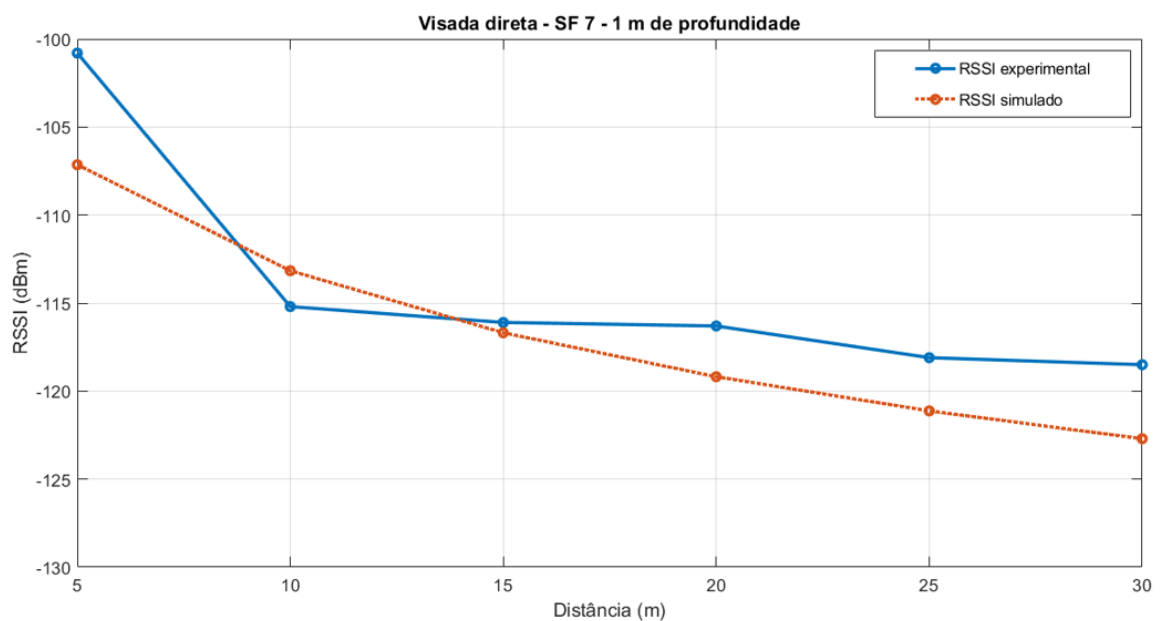
A equação modificada foi comparada com o resultado experimental para as profundidades de 50 cm e 1 m, considerando o SF igual a 7 nos três ambientes possíveis, como pode ser observado da Figura 31 até a Figura 36.

Figura 31 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente com visada direta e profundidade igual a 50 cm.



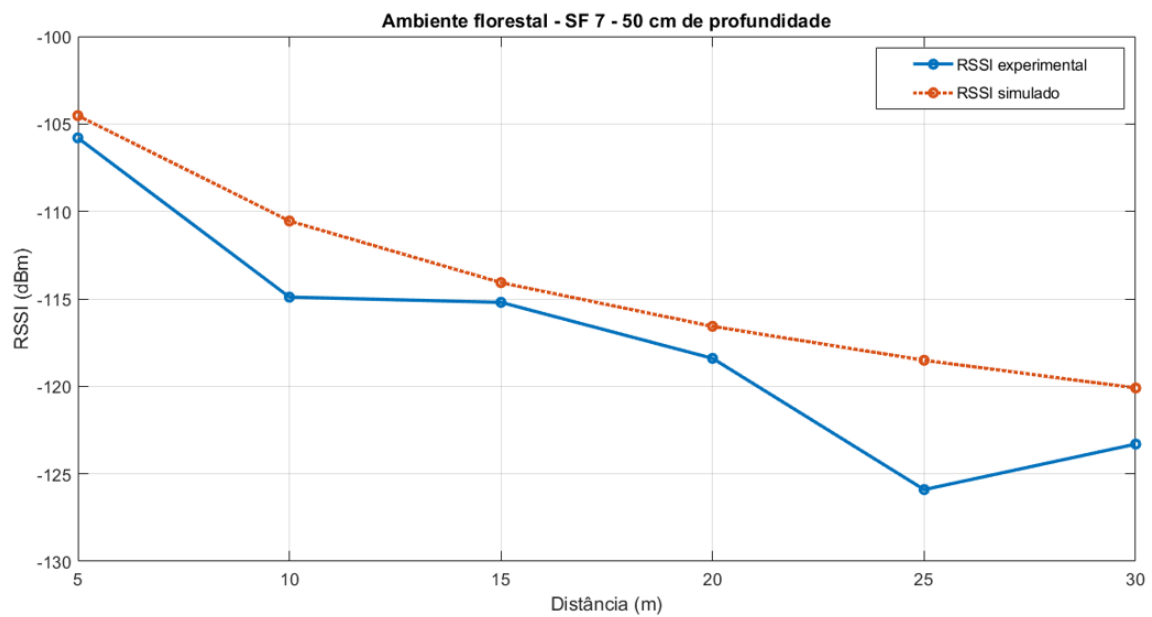
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 32 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente com visada direta e profundidade igual a 1 m.



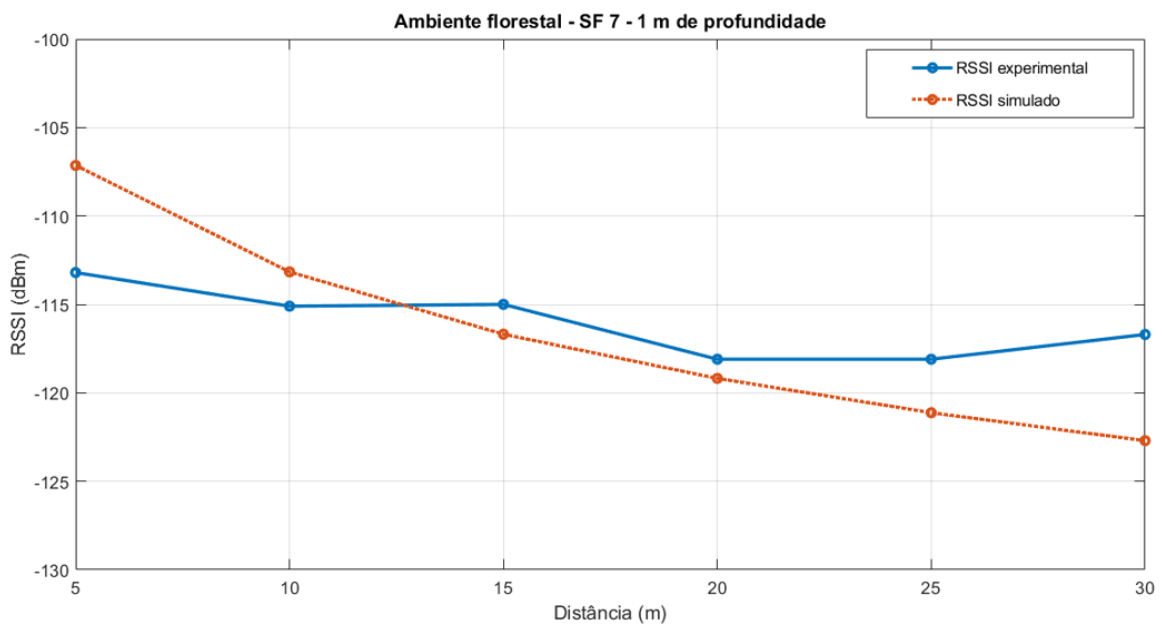
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 33 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente florestal e profundidade igual a 50 cm.



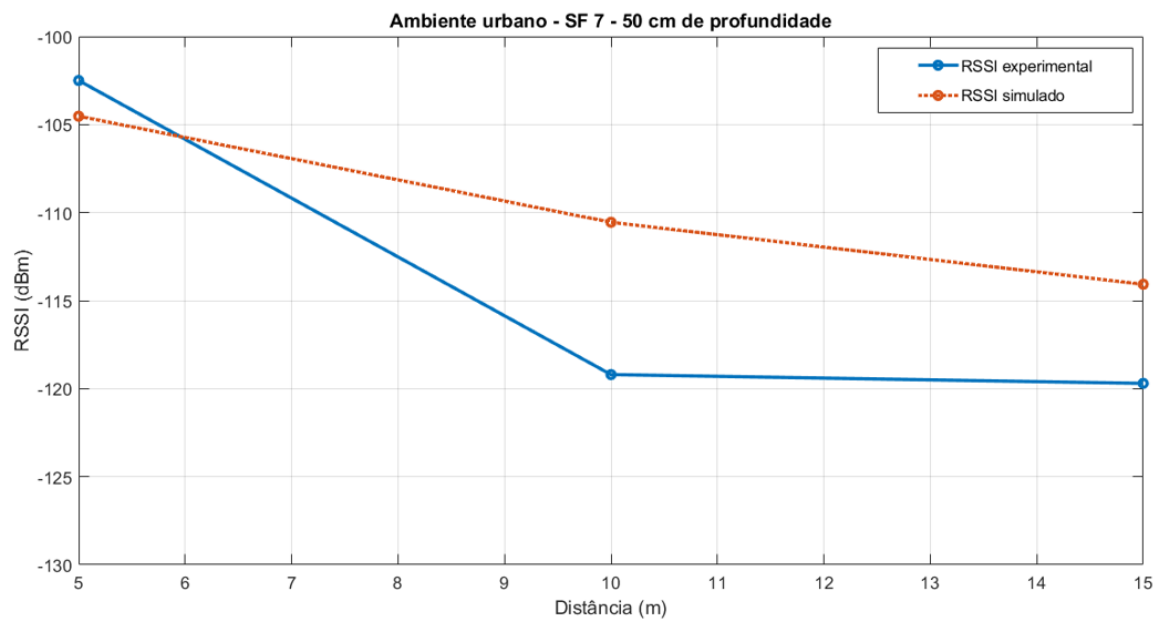
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 34 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente florestal e profundidade igual a 1 m.



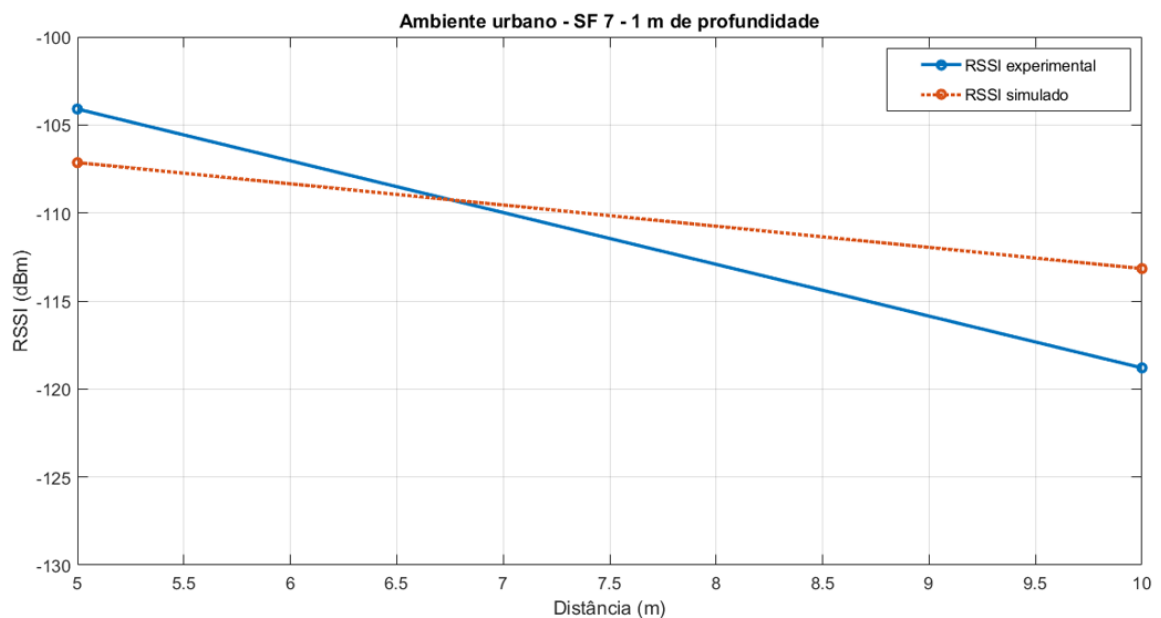
Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 35 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente urbano denso e profundidade igual a 50 cm.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 36 – Relação entre RSSI e a distância comparando valor experimental com resultado simulado para ambiente urbano denso e profundidade igual a 1 m.



Fonte: Elaborado pela Autora.

O ambiente urbano perdeu a comunicação com apenas alguns metros de distância entre o transmissor e receptor, por isso a curva apresentou apenas alguns pontos para comparação com o RSSI simulado.

A curva de calibração foi levantada para todos os casos expostos acima e, a partir dela, foi possível encontrar o valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE - *Root Mean Squared Error*) e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre os modelos proposto simulacional e o experimental.

A correlação linear é um índice que varia de -1 a 1 para verificar a associação entre variáveis e, quanto mais próximo de -1 ou 1, uma variável irá diminuir ou aumentar enquanto a outra variável de análise aumenta, respectivamente. Se for igual a 0 significa que as duas variáveis não possuem associação (TAYLOR, 1990). A Tabela 8 resume os resultados obtidos de raiz do erro médio quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error*) e  $R^2$  para os ambientes estudados em diferentes profundidades ao considerar SF igual a 7.

Tabela 8 – Valores de coeficiente de correlação linear e erro médio quadrático para os diferentes cenários considerando SF = 7 para o modelo proposto.

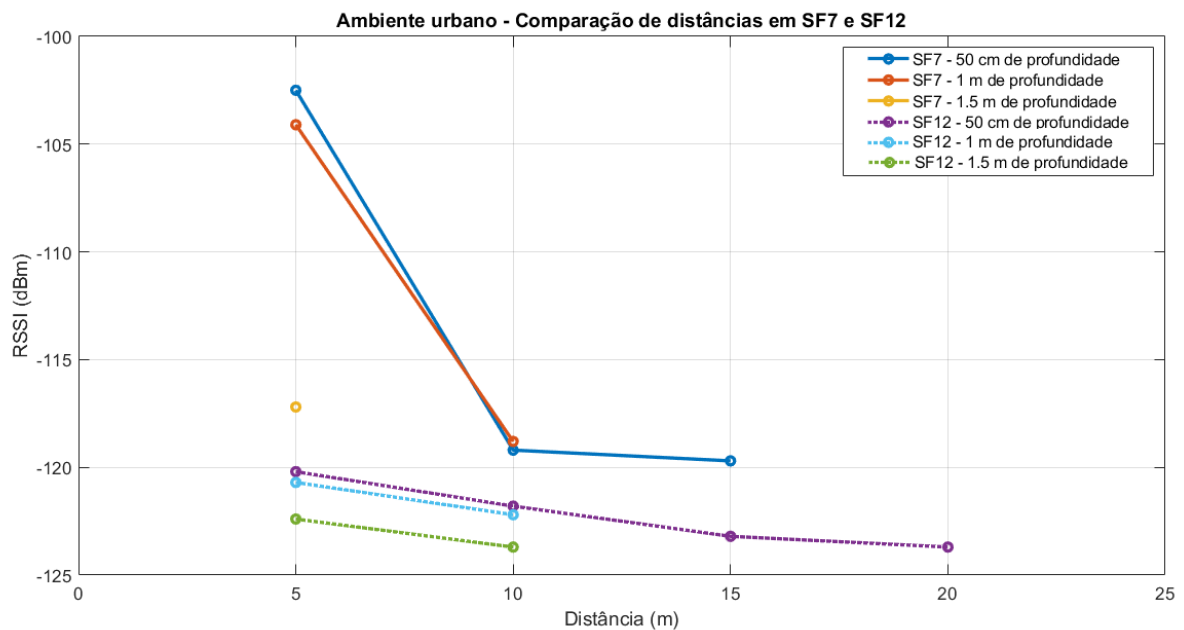
| Ambiente/Profundidade | 50 cm                          | 1 m                                        |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Visada Direta</b>  | $R^2 = 0,9288$<br>RMSE = 1,881 | $R^2 = 0,8109$<br>RMSE = 2,798             |
| <b>Florestal</b>      | $R^2 = 0,9073$<br>RMSE = 1,959 | $R^2 = 0,7546$<br>RMSE = 3,188             |
| <b>Urbano</b>         | $R^2 = 0,8837$<br>RMSE = 2,327 | Dados insuficientes pela perda de pacotes. |

Fonte: Elaborado pela Autora.

O valor do coeficiente de correlação linear foi maior em ambiente de visada direta, enterrado a 50 cm do solo. Ao aumentar a profundidade e com o ambiente cada vez mais urbano, os valores de  $R^2$  e erro médio quadrático diminuíram e aumentaram, respectivamente.

Foi realizada a comparação do RSSI em função da distância também para os diferentes valores de SF de acordo com a variação na profundidade, considerando o ambiente urbano denso como exemplo, o qual apresentou o pior caso devido à perda de dados com poucos metros. A Figura 37 ilustra o valor do RSSI de acordo com a distância de transmissão comparando diferentes valores de fator de espalhamento e de profundidade para analisar a influência desses parâmetros.

Figura 37 – Relação entre RSSI e a Distância comparando diferentes valores de fator de espalhamento e de profundidade para ambiente urbano denso.

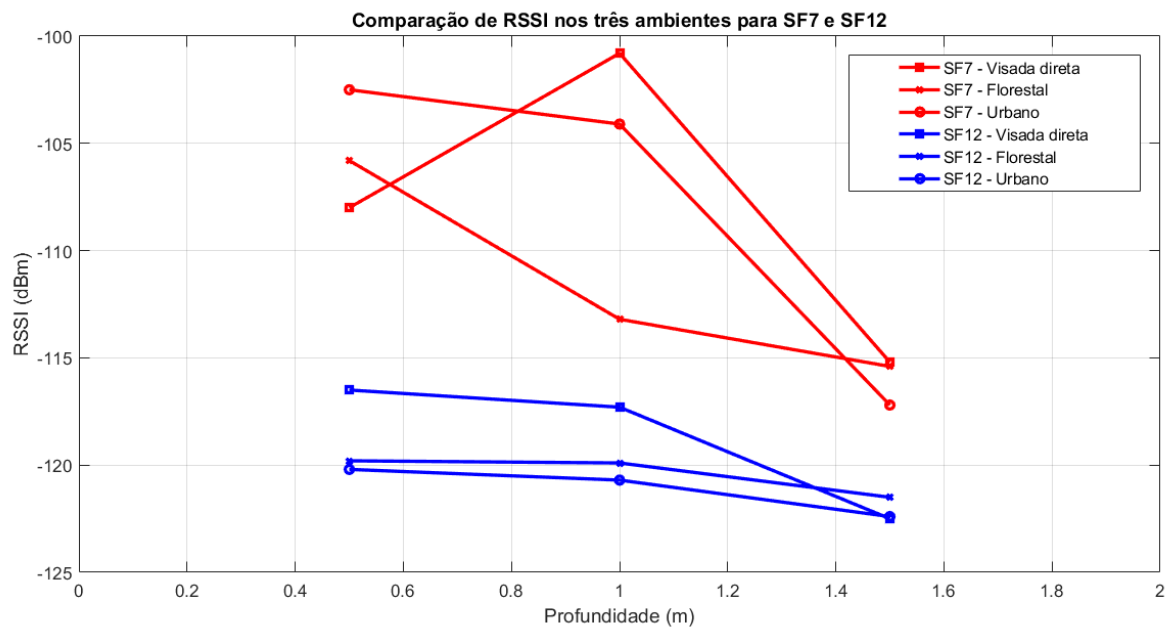


Fonte: Elaborado pela Autora.

Pelo gráfico, é possível identificar o decaimento no valor do RSSI de acordo com o aumento da profundidade e também com o aumento da distância. Além disso, os valores de RSSI em SF igual a 12 estão abaixo dos valores em SF igual a 7. O fator de espalhamento afeta a duração de cada símbolo no sinal transmitido. Um fator de espalhamento maior resulta em durações de transmissão mais longas, o que por sua vez leva a uma menor densidade de potência. Esta redução na densidade de potência contribui para o menor RSSI observado quando se utilizam fatores de espalhamento maiores.

Por fim, foi comparado o RSSI em relação à profundidade nos diferentes cenários, com o fator de espalhamento variando do valor mínimo ao máximo e com uma distância fixa entre os dispositivos transmissor e receptor. Nesse caso, foi considerada uma distância de 5 m entre os dispositivos, pois esse ponto de medição apresentou resultados para todos os cenários avaliados.

Figura 38 – Relação entre RSSI e a Profundidade comparando diferentes valores de fator de espalhamento e em diferentes cenários em uma distância de 5 metros entre os dispositivos transmissor e receptor.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Pelos dados obtidos do gráfico, os melhores valores de RSSI foram alcançados em visada direta, seguidos por ambiente florestal e, por último, ambiente urbano. A curva de SF igual a 7 para ambiente urbano denso começa com um valor abaixo dos outros dois cenários, podendo ser causado por uma falha na medição ou interferência de algum equipamento nas proximidades. É possível observar com esse gráfico a influência da profundidade no RSSI considerando os diferentes cenários e valores de SF distintos.

## 5 CONCLUSÕES

Nesta tese de doutorado, foi apresentado um estudo sobre o comportamento da tecnologia de comunicação LoRa em um ambiente de transmissão subterrânea. O estudo realizou a análise dos diversos parâmetros envolvidos na comunicação entre dispositivos inteligentes situados abaixo e acima do solo. Muitos desses parâmetros já foram bastante explorados na literatura se aplicados em uma transmissão entre dispositivos sem fio convencional. Porém, para transmissões UG2AG, especialmente explorando a influência da profundidade na comunicação sem fio, ainda existem lacunas na literatura.

Os procedimentos experimentais utilizaram duas Feather M0, uma conectada ao computador via cabo USB para recebimento e análise em tempo real dos dados e outra inserida em uma caixa com nível de proteção IP65 e uma bateria para possibilitar que o protótipo fosse inserido em um ambiente subterrâneo sem danos ao material ou aos resultados. Ao analisar os dados, foi possível verificar a influência de determinados parâmetros na qualidade da comunicação, sendo eles a distância de transmissão, o fator de espalhamento utilizado, a profundidade do transmissor e o ambiente no qual está sendo realizada a comunicação.

Os principais fatores analisados para determinar a qualidade da comunicação foram a taxa de pacotes recebidos e a intensidade do sinal. Esses dados foram analisados em diferentes situações para avaliar a aplicabilidade de se utilizar esse tipo de comunicação em cenários variados de acordo com as características da rede a se monitorar.

Para sistemas de abastecimento de água, nos quais os canos de distribuição são situados em uma profundidade média de 1 m sob o solo, com esses resultados será possível planejar a geolocalização entre nós sensores para conseguir realizar uma supervisão da área de interesse.

Por fim, também foi adicionado como contribuição o desenvolvimento de uma equação para modelar a perda de sinal em transmissões subterrâneas, que considera, além das particularidades do solo, a profundidade na qual está posicionado o dispositivo transmissor, considerando as condições específicas do estudo realizado. Assim, é possível prever uma aproximação da intensidade do sinal recebido acima do solo considerando as principais perdas no caminho de acordo com a profundidade na qual o dispositivo está posicionado e as condições do solo em questão.

Como trabalhos futuros, será realizada a análise dos resultados por métodos estatísticos para determinar a relevância da variação de cada parâmetro avaliado, considerando sua interferência na comunicação subterrânea e, posteriormente, a rede de sensores sem fio subterrânea será implementada para monitoramento de um sistema físico real utilizando, para seu desenvolvimento, os resultados obtidos em estudo.

## REFERÊNCIAS

- ABDELMEGUID, H.; SKWORCOW, P.; ULANICKI, B. Mathematical modelling of a hydraulic controller for prv flow modulation. *Journal of Hydroinformatics*, IWA Publishing, v. 13, n. 3, p. 374–389, 2011.
- ADEDEJI, K. B. et al. Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 20272–20285, 2017.
- ADHIKARY, A.; LIN, X.; WANG, Y.-P. E. Performance evaluation of nb-iot coverage. In: IEEE. *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. [S.l.], 2016. p. 1–5.
- ADI, P. D. P.; KITAGAWA, A. Performance evaluation of low power wide area (lpwa) lora 920 mhz sensor node to medical monitoring iot based. In: IEEE. *2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*. [S.l.], 2020. p. 278–283.
- ADI, P. D. P. et al. Application of iot-lora technology and design in irrigation canals to improve the quality of agricultural products in batu indonesia. In: IEEE. *2021 2nd International Conference On Smart Cities, Automation & Intelligent Computing Systems (ICON-SONICS)*. [S.l.], 2021. p. 88–94.
- ADRIANO, J. D. et al. An iot sensor mote for precision agriculture with several mac layer protocols support. In: IEEE. *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. [S.l.], 2018. p. 684–688.
- AKYILDIZ, I. F.; STUNTEBECK, E. P. Wireless underground sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 4, n. 6, p. 669–686, 2006.
- AKYILDIZ, I. F. et al. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.
- AL-KARAKI, J. N.; KAMAL, A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE wireless communications*, IEEE, v. 11, n. 6, p. 6–28, 2004.
- ALEGRE, H. et al. Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. *Série guias técnicos*, v. 3, 2005.
- ALGEROY, J. et al. Permanent monitoring: taking it to the reservoir. *Oilfield Review*, v. 22, n. 1, p. 34–41, 2010.
- ALI, A. I. et al. Zigbee and lora based wireless sensors for smart environment and iot applications. In: IEEE. *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*. [S.l.], 2019. p. 19–23.
- ALSAQHAN, M. et al. A low-complexity, power-efficient, scalable system for linear wireless sensor networks used in water pipeline monitoring applications. In: IEEE. *2017 UKSim-AMSS 19th International Conference on Computer Modelling & Simulation (UKSim)*. [S.l.], 2017. p. 201–203.
- ALSARAIRA, A. et al. Design of lora antenna for wearable medical applications. *IEEE Access*, IEEE, v. 11, p. 23886–23895, 2023.

- ANDRADE, R. d. O. Para tirar o sal da água. *Pesquisa-FAPESP*, v. 279, 2019.
- ASHOKKUMAR, S. et al. A literature survey on artificial intelligence-based smart city automation using lora and iot for street lights and air quality check. In: IEEE. 2022 *International Conference on Computer, Power and Communications (ICCCPC)*. [S.l.], 2022. p. 149–152.
- BEIER, G.; NIEHOFF, S.; XUE, B. More sustainability in industry through industrial internet of things? *Applied sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 2, p. 219, 2018.
- BELLO, O. et al. Solving management problems in water distribution networks: A survey of approaches and mathematical models. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 3, p. 562, 2019.
- BERARDI, L. et al. Relevance of hydraulic modelling in planning and operating real-time pressure control: case of oppegård municipality. *Journal of Hydroinformatics*, IWA Publishing, v. 20, n. 3, p. 535–550, 2018.
- BEZERRA, S. d. T. M.; CHEUNG, P. B. Perdas de água: tecnologias de controle. *João Pessoa: Editora da UFPB*, 2013.
- BRASIL. Constituição federal art. 196. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 1988. Disponível em: <[https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/con1988\\_06.06.2017/art\\_196\\_.asp](https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/con1988_06.06.2017/art_196_.asp)>.
- \_\_\_\_\_. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm)>.
- BRAVO-ARRABAL, J. et al. Development and implementation of a hybrid wireless sensor network of low power and long range for urban environments. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 2, p. 567, 2021.
- BRITTON, T. C.; STEWART, R. A.; O'HALLORAN, K. R. Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 54, p. 166–176, 2013.
- BUTUN, I.; ÖSTERBERG, P.; SONG, H. Security of the internet of things: Vulnerabilities, attacks, and countermeasures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 616–644, 2019.
- CAMBOIM, M. M. et al. An online remote verification system of thermal sources for energy harvesting application. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 69, n. 10, p. 7962–7973, 2020.
- CARDOSO, M. et al. Urban water infrastructure asset management-a urban water infrastructure asset management. *Water Science & Technology*, v. 66, n. 12, p. 2702–2711, 2012.
- CARVALHO, F. B. S. de et al. Aplicações ambientais de redes de sensores sem fio. *Revista de tecnologia da informação e comunicação*, v. 2, n. 1, p. 14–19, 2012.
- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.

- CHAAMWE, N.; LIU, W.; JIANG, H. Wave propagation communication models for wireless underground sensor networks. In: IEEE. *2010 IEEE 12th international conference on communication technology*. [S.l.], 2010. p. 9–12.
- CHEN, B. et al. Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. *Ieee Access*, IEEE, v. 6, p. 6505–6519, 2017.
- CHOI, S.; NG, A. Environmental and economic dimensions of sustainability and price effects on consumer responses. *Journal of business ethics*, Springer, v. 104, n. 2, p. 269–282, 2011.
- CHOU, Y.-Y. et al. Multi-input energy harvesting interface for low-power biomedical sensing system. In: IEEE. *2014 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE)*. [S.l.], 2014. p. 1–2.
- COMMISSION, E. *EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM*. 2015.
- CONCEIÇÃO, S. et al. Evaluation of medium access and a positioning system in wireless underground sensor networks. In: IEEE. *2016 Wireless Days (WD)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- CORKE, P. et al. Environmental wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 98, n. 11, p. 1903–1917, 2010.
- COSTA, M. B. D. et al. Industry 4.0 technologies basic network identification. *Scientometrics*, Springer, v. 121, n. 2, p. 977–994, 2019.
- COVAS, D.; RAMOS, H. Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 136, n. 2, p. 248–257, 2010.
- CREACO, E. et al. Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review. *Water research*, Elsevier, v. 161, p. 517–530, 2019.
- CREACO, E.; WALSKI, T. Operation and cost-effectiveness of local and remote rtc. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 144, n. 11, p. 04018068, 2018.
- CURIONI, G. *Investigating the seasonal variability of electromagnetic soil properties using field monitoring data from Time-Domain Reflectometry probes*. Tese (Doutorado) — University of Birmingham, 2013.
- DALENOGARE, L. S. et al. The expected contribution of industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 204, p. 383–394, 2018.
- DHANASEKAR, J. et al. Hazardous area monitoring system in industries using lora module. In: IEEE. *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. [S.l.], 2023. v. 1, p. 2062–2066.
- DIAS, C. *Israel busca dessalinizar toda sua água potável*. 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2114869/israel-busca-dessalinizar-toda-sua-agua-potavel>>. Acesso em: 02 de fevereiro 2021.
- ENACHE, D. et al. Residual water burst detection using wsn measurements and cloud analysis. In: IEEE. *2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. [S.l.], 2018. p. 926–931.

- ERCEG, V. et al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE Journal on selected areas in communications*, IEEE, v. 17, n. 7, p. 1205–1211, 1999.
- FAREJ, Z. K.; ABDUL-HAMEED, A. M. Performance comparison among (star, tree and mesh) topologies for large scale wsn based ieee 802.15. 4 standard. *International Journal of Computer Applications*, Citeseer, v. 124, n. 6, 2015.
- FARLEY, M.; TROW, S. *Losses in water distribution networks*. [S.l.]: IWA publishing, 2003.
- FILHO, J. T. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. *Revista Dae*, v. 64, n. 201, p. 6–20, 2016.
- FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner Production*, Elsevier, v. 137, p. 1573–1587, 2016.
- FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 210, p. 15–26, 2019.
- FRERIS, N. M.; KOWSHIK, H.; KUMAR, P. Fundamentals of large sensor networks: Connectivity, capacity, clocks, and computation. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 98, n. 11, p. 1828–1846, 2010.
- GAITAN, N. C.; HOJBOTA, P. Forest fire detection system using lora technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Science and Information (SAI) Organization Limited, v. 11, n. 5, 2020.
- GEHANI, A. et al. Application of 915 mhz band lora for agro-informatics. In: IEEE. *2021 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*. [S.l.], 2021. p. 1–4.
- GOMES, H. P. *Abastecimento de água*. [S.l.]: UFPB, 2019.
- GUTIÉRREZ, S. et al. Smart mobile lora agriculture system based on internet of things. In: IEEE. *2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.
- HAIHAHEM, R. et al. Surveying and analyzing urban environment approaches of air quality monitoring. In: SPRINGER. *Mobile, Secure, and Programmable Networking: 4th International Conference, MSPN 2018, Paris, France, June 18-20, 2018, Revised Selected Papers 4*. [S.l.], 2019. p. 1–12.
- HAN, J. et al. Lora-based smart iot application for smart city: an example of human posture detection. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Hindawi, v. 2020, 2020.
- HELLER, L.; PADUA, V. L. D. *Abastecimento de água para consumo humano*. [S.l.]: Editora UFMG, 2006.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: IEEE. *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. [S.l.], 2016. p. 3928–3937.

- HU, X. et al. Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 278, p. 123611, 2021.
- HUANG, H. et al. Theoretical and experimental studies on the signal propagation in soil for wireless underground sensor networks. *Sensors*, MDPI, v. 20, n. 9, p. 2580, 2020.
- IBRAHIM, D. S.; MAHDI, A. F.; YAS, Q. M. Challenges and issues for wireless sensor networks: A survey. *J. Glob. Sci. Res*, v. 6, n. 1, p. 1079–1097, 2021.
- INDUSTRIES, A. *Adafruit Feather M0 with RFM95 LoRa Radio - 900MHz - RadioFruit*. 2021. <<https://www.adafruit.com/product/3178>>.
- IRMAK, S. Watermark granular matrix sensor to measure soil matric potential for irrigation management. University of Nebraska–Lincoln, Extension, 2006.
- KHUTSOANE, O. et al. Watergrid-sense: A lora-based sensor node for industrial iot applications. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 20, n. 5, p. 2722–2729, 2019.
- KIM, J.-H. et al. Spamms: A sensor-based pipeline autonomous monitoring and maintenance system. In: IEEE. *2010 Second International Conference on COMMunication Systems and NETWORKS (COMSNETS 2010)*. [S.l.], 2010. p. 1–10.
- KIM, K. et al. Feasibility of lora for smart home indoor localization. *Applied Sciences*, MDPI, v. 11, n. 1, p. 415, 2021.
- KISSELEFF, S.; AKYILDIZ, I. F.; GERSTACKER, W. H. Survey on advances in magnetic induction-based wireless underground sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 6, p. 4843–4856, 2018.
- KUSTERKO, S. et al. Gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água: uma abordagem construtivista. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 23, p. 615–626, 2018.
- LABRADOR, M. A.; WIGHTMAN, P. M. *Topology Control in Wireless Sensor Networks: with a companion simulation tool for teaching and research*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- LAVRIC, A.; POPA, V. Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: a survey. In: IEEE. *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- LEE, Y. L.; LOO, J.; CHUAH, T. C. Modeling and performance evaluation of resource allocation for lte femtocell networks. In: *Modeling and Simulation of Computer Networks and Systems*. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 683–716.
- LELE, A. Industry 4.0. In: *Disruptive Technologies for the Militaries and Security*. [S.l.]: Springer, 2019. p. 205–215.
- LENTZ, J. et al. Industrial monitoring and troubleshooting based on lora communication technology. In: IEEE. *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2018. p. 3852–3857.
- LIANDO, J. C. Experience of lora low power wide area network. 2018.

- LIANDO, J. C. et al. Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM New York, NY, USA, v. 15, n. 2, p. 1–35, 2019.
- LIEPING, Z.; PENG, C.; FEI, P. Design of lijiang water environment monitoring system based on wsn. In: IEEE. *2016 Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*. [S.l.], 2016. p. 210–213.
- LIN, K.; HAO, T. Experimental link quality analysis for lora-based wireless underground sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 8, n. 8, p. 6565–6577, 2020.
- LOUSADA, S. et al. Modelação de sistemas de abastecimento de água. o caso de ilha da madeira. *Bitácora Urbano Territorial*, v. 29, n. 2, p. 89–98, 2019.
- MANOHARAN, A. M.; RATHINASABAPATHY, V. Smart water quality monitoring and metering using lora for smart villages. In: IEEE. *2018 2nd International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. [S.l.], 2018. p. 57–61.
- MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.
- MEZGHANNI, M.; KANDIL, N.; HAKEM, N. Ieee 802.15. 4 performance evaluation for the underground mine radio-channel. In: IEEE. *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*. [S.l.], 2016. p. 2057–2058.
- MISRAN, N. et al. Iot based health monitoring system with lora communication technology. In: IEEE. *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. [S.l.], 2019. p. 514–517.
- MITTAL, S. et al. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 233, n. 5, p. 1342–1361, 2019.
- MOASHERI, R.; JALILI-GHAZIZADEH, M. Identifying position and amount of two simultaneous leaks in water supply networks by two-step algorithm. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Amirkabir University of Technology, v. 52, n. 5, p. 10–10, 2018.
- MUDULI, L.; MISHRA, D. P.; JANA, P. K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 106, p. 48–67, 2018.
- MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K.-I. What drives the implementation of industry 4.0? the role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 1, p. 247, 2018.
- NARA, E. O. B. et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of brazil's plastic industry. *Sustainable Production and Consumption*, Elsevier, v. 25, p. 102–122, 2021.
- NAYAK, A.; STOJMENOVIC, I. *Wireless sensor and actuator networks: algorithms and protocols for scalable coordination and data communication*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

- NOR, R. F. A. M.; ZAMAN, F. H.; MUBDI, S. Smart traffic light for congestion monitoring using lorawan. In: IEEE. *2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*. [S.l.], 2017. p. 132–137.
- NUGRAHA, A. T.; HAYATI, N.; SURYANEGARA, M. The experimental trial of lora system for tracking and monitoring patient with mental disorder. In: IEEE. *2018 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*. [S.l.], 2018. p. 191–196.
- OJO, M. O.; ADAMI, D.; GIORDANO, S. Experimental evaluation of a lora wildlife monitoring network in a forest vegetation area. *Future Internet*, MDPI, v. 13, n. 5, p. 115, 2021.
- OLATINWO, S. O.; JOUBERT, T.-H. Enabling communication networks for water quality monitoring applications: A survey. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 100332–100362, 2019.
- PAGANO, A. et al. A survey on lora for smart agriculture: Current trends and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 10, n. 4, p. 3664–3679, 2022.
- PAGE, P. R.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; YOYO, S. Real-time adjustment of pressure to demand in water distribution systems: Parameter-less p-controller algorithm. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 154, p. 391–397, 2016.
- PARK, S. et al. Forestry monitoring system using lora and drone. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–8.
- PATEL, D.; WON, M. Experimental study on low power wide area networks (lpwan) for mobile internet of things. In: IEEE. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- PATEL, N. R.; KUMAR, S. Wireless sensor networks’ challenges and future prospects. In: IEEE. *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*. [S.l.], 2018. p. 60–65.
- PHILLIPS, C.; SICKER, D.; GRUNWALD, D. A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 255–270, 2012.
- PORTO, R. d. M. et al. Hidráulica básica. *São Carlos: Eesc-USP*, v. 4, 2006.
- QI, Z. et al. A comprehensive framework to evaluate hydraulic and water quality impacts of pipe breaks on water distribution systems. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 54, n. 10, p. 8174–8195, 2018.
- RAI, P. K.; DHANYA, C.; CHAHAR, B. A pso approach for optimum design of dynamic inversion controller in water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, IWA Publishing, v. 65, n. 7, p. 570–581, 2016.
- RAWAT, A. S. et al. Lora (long range) and lorawan technology for iot applications in covid-19 pandemic. In: IEEE. *2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*. [S.l.], 2020. p. 419–422.
- RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. de A. *Tratamento de água: tecnologia atualizada*. [S.l.]: Editora Blucher, 1991.

- RIZZI, M. et al. Using lora for industrial wireless networks. In: IEEE. *2017 IEEE 13th international workshop on factory communication systems (WFCS)*. [S.l.], 2017. p. 1–4.
- ROJKO, A. Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, v. 11, n. 5, 2017.
- ROSSIT, D. A.; TOHMÉ, F.; FRUTOS, M. Industry 4.0: smart scheduling. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 57, n. 12, p. 3802–3813, 2019.
- SADEGHIOON, A. M. et al. A new approach to estimating the path loss in underground wireless sensor networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, MDPI, v. 6, n. 3, p. 18, 2017.
- SAEED, N.; ALOUINI, M.-S.; AL-NAFFOURI, T. Y. Toward the internet of underground things: A systematic survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 3443–3466, 2019.
- SANTOS, U. J. L. dos et al. Agriprediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops. *Computers and electronics in agriculture*, Elsevier, v. 161, p. 202–213, 2019.
- SCHMIDT, R. et al. Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. In: SPRINGER. *International Conference on Business Information Systems*. [S.l.], 2015. p. 16–27.
- SCHROEDER, R. J. The present and future of fiber optic sensors for the oilfield service industry: where is there a role? In: IEEE. *2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002 (Cat. No. 02EX533)*. [S.l.], 2002. p. 39–42.
- SCHULZ, M.; SHORT, M. D.; PETERS, G. M. A streamlined sustainability assessment tool for improved decision making in the urban water industry. *Integrated Environmental Assessment and Management*, Wiley Online Library, v. 8, n. 1, p. 183–193, 2012.
- SEMTECH. *Lora Modulation Basics*. [S.l.], 2015. 26 p. Disponível em: <<https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>>.
- Semtech. *Revolutionising Smart Agriculture - Using Semtech's LoRa Technology*. 2017. Semtech White Paper. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/WP-SEMTECH-LORA-SMART-AGRICULTURE.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- SHARMA, N.; BATRA, U.; ZAFAR, S. A neoteric swarm intelligence stationed iot–iwd algorithm for revolutionizing pharmaceutical industry leading to digital health. In: *Emergence of Pharmaceutical Industry Growth with Industrial IoT Approach*. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 1–19.
- SHARMA, R.; GUPTA, A. Continuous wave acoustic method for determination of moisture content in agricultural soil. *Computers and electronics in agriculture*, Elsevier, v. 73, n. 2, p. 105–111, 2010.
- SHARMA, S.; BANSAL, R. K.; BANSAL, S. Issues and challenges in wireless sensor networks. In: IEEE. *2013 international conference on machine intelligence and research advancement*. [S.l.], 2013. p. 58–62.
- SHERIF, S. et al. Lora driven medical adherence system. *Bulletin of electrical engineering and informatics*, v. 9, n. 6, p. 2294–2301, 2020.

SHORTRIDGE, J. E.; GUIKEMA, S. D. Public health and pipe breaks in water distribution systems: analysis with internet search volume as a proxy. *Water research*, Elsevier, v. 53, p. 26–34, 2014.

SHREEPRIYA, S.; BOTTIA, A.; DU, Y. We care: Integrated helping system for people with physical limitations. In: SPRINGER. *HCI International 2018–Posters’ Extended Abstracts: 20th International Conference, HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15-20, 2018, Proceedings, Part II 20*. [S.l.], 2018. p. 89–94.

SIDOROV, M. et al. Lora-based precision wireless structural health monitoring system for bolted joints in a smart city environment. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 179235–179251, 2019.

SILVA, A. R.; VURAN, M. C. Empirical evaluation of wireless underground-to-underground communication in wireless underground sensor networks. In: SPRINGER. *International conference on distributed computing in sensor systems*. [S.l.], 2009. p. 231–244.

\_\_\_\_\_. Communication with aboveground devices in wireless underground sensor networks: An empirical study. In: IEEE. *2010 IEEE international conference on communications*. [S.l.], 2010. p. 1–6.

SILVA, B. et al. Experimental link quality characterization of wireless sensor networks for underground monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 11, n. 5, p. 1099–1110, 2015.

SINGH, A.; KUMAR, D.; HÖTZEL, J. Iot based information and communication system for enhancing underground mines safety and productivity: Genesis, taxonomy and open issues. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 78, p. 115–129, 2018.

SINGH, D. K. et al. Lora based intelligent soil and weather condition monitoring with internet of things for precision agriculture in smart cities. *IET Communications*, Wiley Online Library, v. 16, n. 5, p. 604–618, 2022.

SNIS, S. N. d. I. s. S. 25 *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto*. 2020.

SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A. Desafios em redes de sensores sem fio. *revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 1, n. 1, p. 41–47, 2011.

SOUZA, C. P. et al. On harvesting energy from tree trunks for environmental monitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 12, n. 6, p. 9383765, 2016.

SRIVATCHAN, N.; RANGARAJAN, P. A novel low-cost smart energy meter based on iot for developing countries’ micro grids. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Wiley Online Library, v. 32, n. 4, p. e5042, 2020.

SUNDARAM, J. P. S.; DU, W.; ZHAO, Z. A survey on lora networking: Research problems, current solutions, and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 371–388, 2019.

SUNITHA, M.; KARUNAVATHI, R. Localization of nodes in underwater wireless sensor networks. In: IEEE. *2019 4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT)*. [S.l.], 2019. p. 820–823.

- TADAYONI, R.; HENTEN, A.; FALCH, M. Internet of things—the battle of standards. In: IEEE. *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*. [S.l.], 2017. p. 1–7.
- TAN, W. M.; JARVIS, S. A. Energy harvesting noise pollution sensing wsn mote: Survey of capabilities and limitations. In: IEEE. *2013 IEEE Conference on Wireless Sensor (ICWISE)*. [S.l.], 2013. p. 53–60.
- TANG, W. et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 20, n. 1, p. 421–439, 2020.
- TARIQ, A.-K.; ZIYAD, A.-T.; ABDULLAH, A.-O. Wireless sensor networks for leakage detection in underground pipelines: a survey paper. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 21, p. 491–498, 2013.
- TAYLOR, R. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *Journal of diagnostic medical sonography*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 6, n. 1, p. 35–39, 1990.
- TESSARO, L. et al. Lora performance in short range industrial applications. In: IEEE. *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. [S.l.], 2018. p. 1089–1094.
- The Guardian. 2015. Acesso em: 02 mar. 2015.
- TOKOGNON, C. A. et al. Structural health monitoring framework based on internet of things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 4, n. 3, p. 619–635, 2017.
- TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of industry 4.0 and lean production in brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 56, n. 8, p. 2975–2987, 2018.
- TRANG, H. T. H.; HWANG, S. O. et al. Connectivity analysis of underground sensors in wireless underground sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 71, p. 104–116, 2018.
- TSUTIYA, M. Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2/secretaria nacional de saneamento ambiental (org.). *Salvador: ReCESA*, 2008.
- TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água*. [S.l.]: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da ... , 2006.
- VASANTRAO, K. S.; RAJBHOJ, S. Wsn based water pipeline leakage detection. In: IEEE. *2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- VILLARIM, M. R. et al. An evaluation of lora communication range in urban and forest areas: A case study in brazil and portugal. In: IEEE. *2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. [S.l.], 2019. p. 0827–0832.
- \_\_\_\_\_. Lora performance assessment in dense urban and forest areas for environmental monitoring. In: IEEE. *2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.

- \_\_\_\_\_. A calibrated intelligent sensor for monitoring of particulate matter in smart cities. *Sensors & Transducers*, IFSA Publishing, SL, v. 250, n. 3, p. 1–9, 2021.
- VISALAKSHI, P.; AARTHI, C. Textile industry waste water monitoring system using lora technology. *Artificial Intelligence for Internet of Things*, v. 12, n. 1, p. 189–196, 2019.
- VURAN, M. C. et al. Internet of underground things in precision agriculture: Architecture and technology aspects. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 81, p. 160–173, 2018.
- WANG, J.; ZHANG, Y.; LU, G. Application of wsn in mine emergency communication system. In: IEEE. *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. [S.l.], 2008. p. 1–3.
- WANG, Z. et al. Research on agricultural environment information collection system based on lora. In: IEEE. *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications*. [S.l.], 2018. p. 2441–2445.
- XU, J. et al. Distance measurement model based on rssi in wsn. *Wireless Sensor Network*, v. 2, n. 8, p. 606, 2010.
- YANG, S. et al. Soilcomm: A miniaturized through-soil wireless data transmission system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 144, n. 3, p. 1872–1872, 2018.
- YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.
- YU, S.; KIM, M.; PARK, Y. A secure biometric based user authentication protocol in wireless sensor networks. In: IEEE. *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. [S.l.], 2020. p. 0830–0834.
- ZAMAN, I. et al. Design and evaluation of molenet for wireless underground sensor networks. In: IEEE. *2016 IEEE 41st Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops)*. [S.l.], 2016. p. 145–147.
- ZANELLA, A. et al. Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, Ieee, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.
- ZGUIRA, Y.; RIVANO, H.; MEDDEB, A. Internet of bikes: A dtn protocol with data aggregation for urban data collection. *Sensors*, MDPI, v. 18, n. 9, p. 2819, 2018.
- ZHANG, X. et al. Thoreau: A fully-buried wireless underground sensor network in an urban environment. In: IEEE. *2019 11th international conference on communication systems & networks (COMSNETS)*. [S.l.], 2019. p. 239–250.
- ZHAO, W. et al. Design and implementation of smart irrigation system based on lora. In: IEEE. *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.
- ZHOU, Q. et al. Design and implementation of open lora for iot. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 100649–100657, 2019.