

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES



MICHEL PESSOA DA CUNHA

Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz

Niterói-RJ

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

MICHEL PESSOA DA CUNHA

Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Niterói-RJ

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C972a Cunha, Michel Pessoa da
Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz / Michel Pessoa da Cunha ; Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, orientador. Niterói, 2021.
99 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.10979429706>

1. LoRa. 2. IoT. 3. Ambientes Indoor. 4. Caracterização do Canal. 5. Produção intelectual. I. Castellanos, Pedro Vladimir Gonzalez, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

MICHEL PESSOA DA CUNHA

ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA LORA PARA AMBIENTE
INDOOR NA FREQUÊNCIA DE 915 MHZ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovado em 19 de julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Profª. Dra. Leni Joaquim de Matos
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Niterói
2021

*“Os sonhos não determinam o lugar onde iremos
chegar, mas produzem a força necessária
para tirar-nos do lugar em que estamos .”*

(Augusto Cury)

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por sempre me dar sabedoria, paciência e tranquilidade nos momentos difíceis, por me permitir subir mais um degrau na minha formação profissional e concluir com êxito este trabalho.

À minha família, que deram sempre todo o suporte e estiveram ao meu lado durante a minha singradura.

Ao meu orientador e Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, por todo apoio, atenção, orientação, motivação e a contribuição substancial na elaboração deste trabalho.

À minha Prof. Dra. Leni Joaquim de Matos, por todos os ensinamentos, experiências e disponibilidade, fatores que contribuíram sobremaneira para o meu sucesso.

Aos Professores do curso de Mestrado, por todos os conhecimentos ensinados e que tiveram grande valia para elaboração deste trabalho.

Aos amigos de mestrado Felipe Marins e Diogo Magalhães, pela amizade, parceria e incentivo durante o curso.

À Universidade Federal Fluminense pelo acolhimento e por oferecer um ensino público, gratuito e de qualidade que contribuiu para a minha evolução acadêmica.

À Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha (DCTIM) pelo suporte oferecido, desde o processo seletivo “interno” até a conclusão do curso.

Em especial à Marinha do Brasil que me proporcionou a realização do curso de mestrado.

Resumo

O desenvolvimento da economia e o aumento da produtividade e a rentabilidade dos produtores sejam eles dos setores de manufatura ou agrícola, estão diretamente ligados ao uso da tecnologia em seus processos de produção. Junto com o aparecimento da internet, o setor das telecomunicações vem se destacando e possibilitando a troca de informações de uma forma mais acessível ao público em geral. Com o rápido desenvolvimento de novas tecnologias, como as redes de comunicações em longa distância e baixa potência (LPWAN) - LoRa, a tecnologia em questão, representa uma nova tendência na evolução das telecomunicações, que vem ganhando ampla aceitação no cenário mundial, devido à grande cobertura do sinal, pequeno consumo de energia e baixo custo de implementação.

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer a caracterização da cobertura de comunicação sem fio, em ambiente *indoor*, na faixa de frequência de 915 MHz. Essa faixa de frequência foi escolhida devido a seu emprego pelos sistemas de comunicações de redes de longo alcance e baixa potência com a utilização dos protocolos LoRaWAN no Brasil.

Neste trabalho, foi montado um sistema de transmissão fixo e um sistema de recepção móvel, para realizar medições estacionárias e em mobilidade no interior das dependências do Bloco D do Prédio da Engenharia, localizado no Campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense, com o objetivo de caracterizar o ambiente de propagação no interior do prédio. A partir dos dados coletados, foi possível analisar a cobertura do sinal e determinar os coeficientes de decaimento pela distância, assim como as perdas por penetração do sinal em função da distância percorrida.

Os dados coletados foram comparados a modelos de predição de Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238-1.

Adicionalmente foram realizadas análises da cobertura do sinal rádio empregando diferentes configurações no sistema de transmissão, entre eles, os fatores de espalhamento (SF) 7, 9, 10 e 12 e as larguras de banda (BW) 125 e 250 kHz.

Palavras-chaves: LoRa, IoT, LPWAN, Propagação em 915 MHz, Cobertura, Ambientes *Indoor*, Caracterização do Canal e Sinal rádio móvel.

Abstract

The development of the economy and the increase in productivity and profitability of producers, whether in the manufacturing or agricultural sectors, are directly linked to the use of technology in their production processes. Along with the emergence of the internet, the telecommunications sector has been standing out and enabling the exchange of information in a way that is more accessible to the general public. With the rapid development of new technologies, such as long-distance and low-power communications networks (LPWAN) - LoRa, the technology in question represents a new trend in the evolution of telecommunications, which has been gaining wide acceptance in the world scenario, due to the large signal coverage, small power consumption and low implementation cost.

The present work aims to establish the characterization of wireless communication coverage, indoors, in the 915 MHz frequency band. This frequency band was chosen due to its use by communication systems of long-range and low-power networks. with the use of LoRaWAN protocols in Brazil.

In this work, a fixed transmission system and a mobile reception system were set up to perform stationary and mobile measurements inside the premises of Block D of the Engineering Building, located on the Praia Vermelha Campus of the Fluminense Federal University, with the aim of characterize the propagation environment inside the building. From the collected data, it was possible to analyze the signal coverage and determine the decay coefficients over distance, as well as the signal penetration losses as a function of the distance covered.

The collected data were compared to Friis, Log-Distance and ITU-R P.1238-1 prediction models.

Additionally, radio signal coverage analyzes were performed using different configurations in the transmission system, among them, the scattering factors (SF) 7, 9, 10 and 12 and the bandwidths (BW) 125 and 250 kHz.

Keywords: LoRa, IoT, LPWAN, Propagation at 915 MHz, Coverage, Indoor Environments, Channel Characterization and Mobile Radio Signal.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Expectativa de crescimento dos dispositivos IoT | 5 |
| Figura 2.2 – Longevidade da bateria em função do alcance do sinal | 7 |
| Figura 2.3 - Topologia de rede em estrela | 8 |
| Figura 2.4 - Emprego conjunto de UAV em empregando redes sem fio | 10 |
| Figura 3.1 - Técnica de modulação de espectro de espalhamento chirp | 13 |
| Figura 3.2 – Comparativo da escalabilidade da rede LoRaWAN em função da largura de banda, fatores de espalhamento, taxa de dados e bits, sensibilidade e consumo | 15 |
| Figura 3.3 - Estrutura em camadas da tecnologia LoRa | 16 |
| Figura 3.4: Janela de recepção para os dispositivos classe A..... | 19 |
| Figura 3.5: Janela de recepção para os dispositivos classe B..... | 19 |
| Figura 3.6: Janela de recepção para os dispositivos classe C..... | 20 |
| Figura 4.1: Propagação em espaço livre, para uma dada potência de transmissão em função da distância entre transmissor e receptor | 22 |
| Figura 5.1: Vista aérea do Prédio de Engenharia | 29 |
| Figura 5.2: Prédio de Engenharia | 30 |
| Figura 5.3: Fachada envidraçada do Prédio de Engenharia | 31 |
| Figura 5.4: Hall e corredor dos 2°, 3°, 4° e 5° andares | 31 |
| Figura 5.5: Corredor das salas de aula | 32 |
| Figura 5.6: Corredor das coordenações de cursos | 32 |
| Figura 5.7: Hall do 1° andar | 33 |
| Figura 5.8: Planta baixa do 1° andar | 33 |
| Figura 5.9: Planta baixa do 2° andar | 34 |
| Figura 5.10: Planta baixa do 3° andar | 34 |
| Figura 5.11: Planta baixa do 4° andar | 34 |
| Figura 5.12: Planta baixa do 5° andar | 35 |
| Figura 5.13: Percurso estabelecido para medições em mobilidade | 35 |
| Figura 5.14: Arquitetura do setup das medições | 36 |
| Figura 5.15: Posicionamento da Antena Transmissora | 36 |
| Figura 5.16: Posicionamento da Antena Transmissora com visada para o Bloco D | 37 |
| Figura 5.17: Placa Heltec ESP32 V2 LoRa | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.18: Diagrama de radiação para antena Whip 900 MHz | 39 |
| Figura 5.19: Antena Móvel Vertical WHIP 900 MHz | 40 |
| Figura 5.20: Sistema de recepção | 41 |
| Figura 6.1: Metodologia para medição das distâncias entre Tx-Rx com linha de visada | 44 |
| Figura 6.2: Metodologia para medição das distâncias entre Tx-Rx sem linha de visada | 44 |
| Figura 6.3: Sistemas de transmissão e recepção para as medições em mobilidade | 46 |
| Figura 6.4: Layout para os testes de referência | 47 |
| Figura 6.5: Arquivo de Dados extraídos do <i>software</i> Arduino IDE | 48 |
| Figura 6.6: Ambiente das medições em ambiente <i>outdoor</i> | 51 |
| Figura 6.7: Potências recebidas para as medições estacionárias no 1° andar | 52 |
| Figura 6.8: Potências recebidas para as medições estacionárias no 2° andar | 53 |
| Figura 6.9: Potências recebidas para as medições estacionárias no 3° andar | 53 |
| Figura 6.10: Potências recebidas para as medições estacionárias no 4° andar | 54 |
| Figura 6.11: Potências recebidas para as medições estacionárias no 5° andar | 54 |
| Figura 6.12: Perda no percurso para as medições em mobilidade na BW 125 kHz | 55 |
| Figura 6.13: Perda no percurso para as medições em mobilidade na BW 250 kHz | 55 |
| Figura 6.14: Prédio de Engenharia da UFF | 56 |
| Figura 6.15: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-7 | 57 |
| Figura 6.16: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-9 | 57 |
| Figura 6.17: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-10 | 58 |
| Figura 6.18: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-12 | 58 |
| Figura 6.19: Comportamento gráfico dos coeficientes de decaimento “N” | 61 |
| Figura 6.20: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para o 1° andar | 65 |
| Figura 6.21: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para o 2° andar | 65 |
| Figura 6.22: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para o 3° andar | 66 |
| Figura 6.23: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para o 4° andar | 66 |
| Figura 6.24: Comparativo entre dados de perdas no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para o 5° andar | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.25: Componentes de Multipercurso oriundas dos andares superiores e inferiores | 67 |
| Figura 6.26: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para BW 125 kHz . | 68 |
| Figura 6.27: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, <i>Log-Distance</i> e ITU-R P.1238 para BW 250 kHz . | 69 |
| Figura 6.28: Canalização das ondas eletromagnéticas | 69 |
| Figura 7.1: Registro dos níveis de potência recebida para SF-7 entre andares | 72 |
| Figura 7.2: Registro dos níveis de potência recebida em mobilidade para SF-7 | 72 |

Lista de Tabelas

- Tabela I – Coeficiente de perda de percurso para os diferentes ambientes de propagação.
- Tabela II – Coeficiente de decaimento com a distância.
- Tabela III – Coeficiente de perda por penetração por andares.
- Tabela IV – Lista de equipamentos de Transmissão.
- Tabela V – Lista de equipamentos de Recepção.
- Tabela VI – Especificações Técnicas do micro controlador da ESP32 LoRa.
- Tabela VII: Dados coletados e processados.
- Tabela VIII – Coeficiente de decaimento “N” no Espaço Livre.
- Tabela IX – Coeficiente de decaimento “N”.
- Tabela X – Valores médios dos coeficientes de decaimento “N”.
- Tabela XI – Coeficientes de decaimento “N” para o Tx posicionado no 2° e 4° andares.
- Tabela XII – Valores médios para o coeficiente de decaimento “N” para modelo *Log-Distance*.
- Tabela XIII – Coeficientes de decaimento “N” para *BW* 125 e 250 kHz para modelo *Log-Distance*.
- Tabela XIV – Coeficientes de decaimento “N” para *BW* 125 e 250 kHz para o modelo ITU-R P.1238.
- Tabela XV - Valores das perdas por penetração “B” por andares atravessados.
- Tabela XVI - Raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos de predição.
- Tabela XVI – Valores absolutos da raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos de predição.

Lista de Abreviaturas e Siglas

BW - *Bandwidth*

CHIRP – *Compressed High Intensity Radar Pulse*

CR – *Code Rate*

CSS - *Chirp Spread Spectrum*

EIRP – *Effective Isotropic Radiated Power*

ERP – *Effective Radiated Power*

FEC - *Forward Error Correction*

GPS – *Global Positioning System*

IBSG - *Internet Business Solutions Group*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IOT - *Internet of Things*

IP - *Internet Protocol*

ISM – *Industrial, Scientific and Medical*

LORA - *Long Range*

LOS – *Line of Sight*

LPWAN - *Low Power Wide Area Network*

MAC - *Medium Access Control*

M2M - *Machine to Machine*

NLOS – *Non Line of Sight*

PPGEET - Programação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações

RFID – *Radio Frequency Identification*

RIM – *Radio Irregularity Model*

RMS – *Root Mean Square*

SEDU - *Swedish Defence University*

SF – *Spreading Factor*

SNMP – *Simple Network Management Protocol*

SNR – *Signal to Noise*

ToA – *Time on Air*

UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*

UHF – *Ultra High Frequency*

UFF – Universidade Federal Fluminense

WSN – *Wireless Sensor Network*

Sumário

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|--|-----------|
| 1 – Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 2 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Organização da Dissertação | 3 |
| | |
| 2 – Estado da Arte | 4 |
| 2.1 Internet das Coisas (IoT) | 4 |
| 2.2 LPWAN | 6 |
| 2.3 Trabalhos Relacionados | 8 |
| 2.3.1 Aplicações de controle Ambiental e Oceanográfico | 8 |
| 2.3.2 Aplicações Médicas e Hospitalares | 9 |
| 2.3.3 Aplicações Industriais e na Agricultura | 9 |
| 2.3.4 Aplicações Militares | 10 |
| | |
| 3 – Tecnologia LoRa e Protocolo LoRaWAN | 11 |
| 3.1 Tecnologia LoRa® | 11 |
| 3.1.1 <i>Chirp Spread Spectrum</i> | 12 |
| 3.1.2 Taxa de Código | 13 |
| 3.1.3 Fator de Espalhamento | 13 |
| 3.2 Protocolo LoRaWAN | 15 |
| 3.2.1 <i>Netserver</i> | 16 |
| 3.2.2 <i>Gateway</i> | 16 |
| 3.2.3 <i>Beacon</i> | 17 |
| 3.2.4 Dispositivos Finais | 17 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.4.1 | Classe A | 17 |
| 3.2.4.2 | Classe B | 18 |
| 3.2.4.3 | Classe C | 20 |
| 4 | – Modelos e Fenômenos da Propagação | 21 |
| 4.1 | Modelos de Propagação | 21 |
| 4.1.1 | Modelo de Friis | 21 |
| 4.1.2 | Modelo <i>Log-Distance</i> | 23 |
| 4.1.3 | Modelo ITU-R P.1238 | 25 |
| 4.2 | Fenômenos da Propagação | 26 |
| 4.2.1 | Reflexão | 27 |
| 4.2.2 | Difração | 27 |
| 4.2.3 | Dispersão | 28 |
| 5 | – Ambiente e Setup das Medições | 29 |
| 5.1 | Ambiente das Medições | 30 |
| 5.2 | <i>Setup</i> das Medições | 35 |
| 5.2.1 | <i>Setup</i> de Transmissão | 38 |
| 5.2.1.1 | Placa ESP32 LoRa | 38 |
| 5.2.1.2 | Antena Transmissora | 39 |
| 5.2.1.3 | Cabo Coaxial | 40 |
| 5.2.2 | Parâmetros configurados na transmissão | 40 |
| 5.2.3 | <i>Setup</i> de Recepção | 40 |
| 5.2.3.1 | Placa Heltec ESP32 V2 LoRa | 41 |
| 5.2.3.2 | Antena Receptora | 41 |
| 5.2.3.3 | Cabo Coaxial | 41 |
| 5.2.4 | Parâmetros configurados na recepção | 42 |
| 6 | – Metodologia, Processamento dos Dados e Resultados | 43 |
| 6.1 | Metodologia de Medição | 43 |
| 6.1.1 | Medições Estacionárias | 43 |
| 6.1.2 | Medições em Mobilidade | 45 |
| 6.2 | Processamento dos Dados | 46 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.2.1 | Teste de referência | 46 |
| 6.3 | Resultados | 49 |
| 6.3.1 | Medições em Espaço Livre | 50 |
| 6.3.2 | Comportamento do sinal em ambiente <i>indoor</i> | 52 |
| 6.3.3 | - Coeficientes de decaimento “N” para as medições estacionárias | 59 |
| 6.3.4 | - Coeficientes de decaimento “N” para as medições em mobilidade | 61 |
| 6.3.5 | - Coeficiente de perdas por penetração “B” entre andares | 63 |
| 6.3.6 | - Comparativos entre os gráficos das perdas durante o percurso e os ajustes dos dados para os modelos teóricos | 64 |
| 6.3.7 | - Análise de erros para os dados processados de perdas no percurso | 70 |
| 7 | – Conclusões | 71 |
| | Referências Bibliográficas | 74 |
| | APÊNDICE A – Código Fonte | 78 |

Capítulo 1

Introdução

Na atualidade, observamos um mundo cada vez mais tecnológico em que a capacidade de monitorização da informação tornou-se relevante. Nas últimas décadas, houve um crescimento exponencial no número de dispositivos conectados à rede mundial de computadores.

A Internet das Coisas (IoT) possibilita que objetos físicos como, por exemplo, eletrodomésticos, carros e equipamentos industriais sejam conectados a centrais específicas de processamento, com isso possibilitando a coleta e transmissão de informações. A IoT é um novo paradigma tecnológico em que dispositivos eletrônicos inteligentes possuem a capacidade de processamento computacional, além de conexão à rede de dados. Conforme as estimativas, este mercado apresenta um gigantesco potencial econômico que pode atingir cerca de 50 bilhões de sensores conectados e cerca de 3,0 a 11,1 trilhões de dólares futuramente [1] [2].

O crescimento exponencial dos dispositivos IoT nos últimos anos fez com que o consumo de energia dos sistemas passasse a ser considerado. No mundo atual, o padrão de conectividade em IoT esperado é aquele que consegue unir velocidade na transmissão de dados, elevados padrões de segurança, baixo custo de implementação e eficiência energética, com isso permitindo aplicações que demandam dispositivos com baixo consumo de energia e possibilitando a obtenção de dados em lugares de difícil acesso.

Importante salientar que as tecnologias de redes sem fio tradicionais não atendem a esses requisitos específicos supracitados.

Pensando na demanda emergente de infraestrutura que possibilite suprir as necessidades para a transmissão de dados nos diversos ambientes de propagação, surgiu uma nova categoria de rede, as Redes de Longo Alcance e Baixa Potência – LPWAN. Esta rede consegue atender a demanda emergente e vem apresentando algumas vantagens em relação às redes tradicionais, pois a mesma apresenta uma cobertura do sinal relativamente grande, podendo ser operada em ambientes com ruídos e interferências e usando pouca energia para

a transmissão dos dados, assim aumentando a vida útil de baterias dos dispositivos, sem a necessidade ou dependência do uso de energia elétrica.

1.1 Motivação

O estudo das redes de comunicação em rádio frequência LPWAN tem ganhado cada vez mais notoriedade com a chegada da quarta revolução industrial e o 5G, contribuindo na automatização e monitoramento remoto industrial, na produção agrícola, no setor militar e na sociedade em geral.

No âmbito da Marinha do Brasil (MB) e considerando sua missão constitucional, bem como suas atribuições constantes na Estratégia Nacional de Defesa (END) e a defesa da Amazônia Azul, extensa área oceânica que totaliza cerca de 5,7 milhões de km², a tecnologia de comunicação de baixa frequência de baixo custo de implementação, pode contribuir para o aprimoramento da capacidade de monitoramento de grandes extensões territoriais com um custo inferior às demais tecnologias empregadas.

É indispensável a busca constante no desenvolvimento e estudo de novas tecnologias que possam contribuir para que o Brasil alcance um patamar de destaque dentre os países de maior projeção no cenário mundial, quando se tratando das capacidades de suas Forças Armadas.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa a verificação do desempenho de um sistema de comunicação móvel baseado em rede de sensores sem fio, mais especificamente à tecnologia emergente denominada de LPWAN.

Esta verificação consiste no estabelecimento de um enlace entre dois dispositivos móveis de comunicação, com tecnologia de radiofrequência LoRa, assim permitindo a transmissão de dados oriunda de um transmissor externo, e entregues à unidade receptora localizada no interior das dependências de um edifício de cinco andares.

A infraestrutura de comunicação foi estabelecida em ambiente *indoor*, nas dependências do Prédio da Engenharia da Universidade Federal Fluminense. O sistema de comunicação foi realizado com o uso de dois micro-controladores, um deles atuando como transmissor e

o outro como receptor. A partir do enlace criado pelos dispositivos, foi possível a aquisição dos dados de potência média do sinal transmitido.

Com o objetivo de verificar o desempenho do sistema, este estudo foi dividido em duas etapas distintas. Na primeira etapa, foi estabelecido um enlace de comunicação entre dois dispositivos móveis de comunicação, realizadas as medições estacionárias e, na segunda etapa, medições em mobilidade. O intuito das medições é estudar o comportamento do sinal propagado, observando os fundamentos teóricos de desvanecimento.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos, considerando o presente capítulo introdutório.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão teórica sobre IoT e a tecnologia LPWAN e algumas aplicações do sistema em lide.

No capítulo 3, são apresentados a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN, sua estrutura e a funcionalidade das camadas físicas e as propriedades da rede.

No capítulo 4, é apresentada a descrição do ambiente de medição e o setup de transmissão e recepção.

No capítulo 5, é apresentado a descrição e as peculiaridades do ambiente de medição, a configuração dos equipamentos empregados e a metodologia utilizada.

O capítulo 6 contempla o ponto principal dessa dissertação, a metodologia das medições, a análise dos dados coletados nas diferentes configurações do sistema e os resultados após o processamento dos dados.

No capítulo 7, é apresentada a conclusão desse trabalho baseada nos resultados obtidos durante a campanha de medições e a sua fundamentação na teoria, bem como sugestões de trabalhos futuros, de modo a incrementar o estudo aqui apresentados.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Internet das Coisas (IoT)

O IoT é um conceito que caracteriza a conexão entre objetos físicos com o usuário e a internet. Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos, definições e a arquitetura IoT, bem como o impacto desta tecnologia no cenário atual e futuro.

Em 1989, John Romkey utilizou um protocolo simples de gerenciamento de redes (SNMP), ligando-o remotamente a um eletrodoméstico, ou seja, foi o primeiro objeto na história a ser integrado em rede. No entanto, a autoria do termo *Internet of Things* é atribuída a Kevin Ashton [3], quando o mesmo realizou uma palestra sobre potencialidades da tecnologia de identificação por radiofrequência (RFID). Somente a partir de 2005, entretanto, em virtude da relação IoT e as redes de sensores sem fio (WSN), o termo passou a ser mais conhecido, porém o mesmo possui um sinônimo mais abrangente, apresentando diversas definições como publicado pela IEEE em 2015 [4], cujo periódico relata que o termo está ligado a diferentes áreas de aplicação.

Atualmente, a internet vem possibilitando a interconectividade universal, entre serviços e negócios, ocasionando uma revolução na rede mundial de computadores. No cenário acadêmico e industrial, a IoT vem ganhando relevância, fruto do crescimento exponencial da internet. Segundo a Cisco IBSG (2011), em 2003, a população mundial era de 6,3 bilhões de pessoas e, aproximadamente, 500 milhões de dispositivos estavam conectados à internet, ou seja, um percentual 0,08 dispositivos conectados à internet por pessoa. Em 2010, em face do crescimento dos dispositivos *smartphones* e *tablets*, o número de dispositivos conectados à internet atingiu 12,5 bilhões. Em paralelo, a população mundial chegou a 6,8 bilhões, ou seja, um aumento no percentual para 1,84 dispositivos conectados à internet por pessoa.

A Cisco IBSG, analisando as expectativas de crescimento populacional do mundo e o crescimento e evolução dos dispositivos móveis, estimou que, entre os anos de 2020 a 2021, haverão 50 bilhões de dispositivos conectados à internet [5] aproximadamente. Na Figura

2.1, podemos observar a expectativa gráfica de crescimento para os dispositivos IoT conectados à internet.

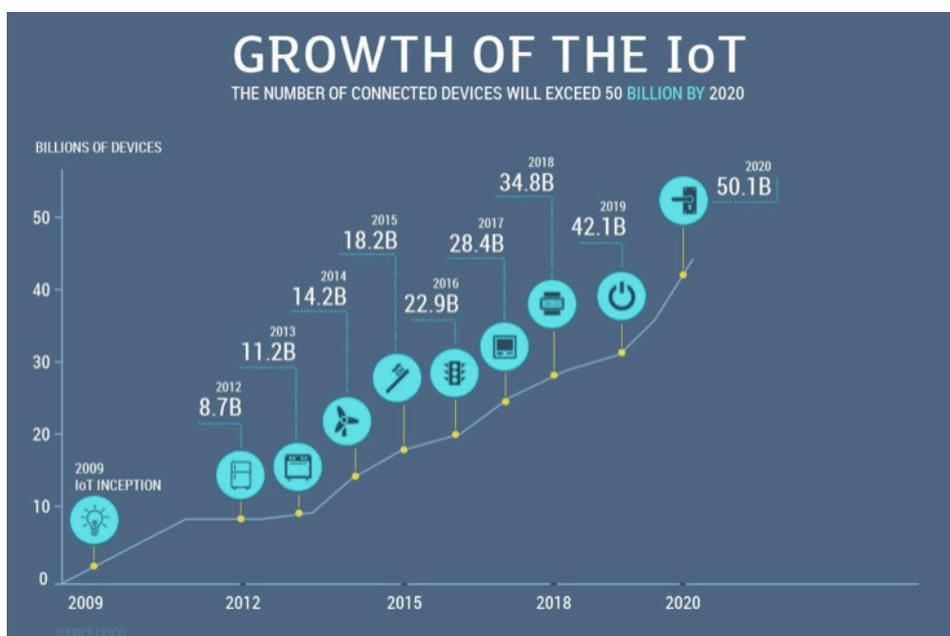


Figura 2.1: Expectativa de crescimento dos dispositivos IoT.

Fonte: Mobidev [6].

Segundo Nolan [7], o emprego desta tecnologia abrangerá diversas camadas da sociedade e, com isso, impulsionando a difusão generalizada da IoT e a inclusão digital da população, logo contribuindo inestimavelmente para o desenvolvimento econômico.

No cenário mundial, inúmeros países estão criando regulamentações e estimulando o emprego da tecnologia, devido às diversas aplicabilidades, desde o emprego no setor aeronáutico, petróleo e gás, prevenção de acidentes, domiciliar e outras mais.

Em 25 de junho de 2019, o Brasil instituiu o Plano Nacional de Internet das Coisas por meio do decreto nº 9.854, o referido plano, um dos pilares da Estratégia Brasileira de Transformação Digital (E-Digital). Este decreto tem a finalidade de implementar e incentivar o desenvolvimento da internet das coisas no Brasil, criando mecanismos que incentive o ambiente de inovação nacional para novos empreendimentos com base na livre concorrência, livre circulação de dados e com a observância nas regras de segurança da informação e de proteção de dados pessoais [8]. Tal decreto institui a Câmara de Gestão e Acompanhamento do Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas (Câmara IoT), o setor responsável por acompanhar a implementação do plano.

Em 2019, foram inauguradas as Câmaras de Indústria 4.0 e do Agro 4.0. Futuramente, serão implementadas as Câmaras de Saúde 4.0 e Cidades 4.0 [9].

Apesar de cada vez mais popular, a IoT sofre algumas resistências por parte de uma parcela da população, e este desconforto está relacionado aos problemas da segurança da informação, porque as informações adquiridas e armazenadas, tornam-se vulneráveis a ataques ou roubo. As pesquisas de satisfação mostram que mais de 70% dos europeus se manifestam preocupados com o que acontece com os dados disponíveis na Internet [10].

2.2 LPWAN

Na década dos anos 2000, a rede de comunicação Sigfox deu popularidade a tecnologia *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), sendo a mesma uma tecnologia emergente desenvolvida para aperfeiçoar a conectividade dos dispositivos que empregavam os conceitos de IoT.

A LPWAN é uma tecnologia de redes de baixa potência, desenvolvida para operar em redes *machine to machine* (M2M), conectando os dispositivos e realizando o envio de dados por grandes distâncias e baixo consumo energético, possibilitando a alimentação do sistema por um longo período.

Uma das principais características das redes LPWAN's é sua faixa de operação em bandas de frequência não licenciadas, principalmente nas larguras de bandas ISM em 169 MHz, 433 MHz, 868/915 MHz e 2,4 GHz, sendo que as bandas de frequências não licenciadas definidas no Brasil, pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), estão entre 902 a 907,5 MHz, 915 a 928 MHz, 2,4 a 2,48 GHz, 5,72 a 5,85 GHz.

Uma das características principais da tecnologia LPWAN é o seu funcionamento com baixos níveis de sensibilidade no receptor, em torno de -148 dBm, se comparada a outras tecnologias de rede sem fio que operam entre -90 até -110 dBm. A alta sensibilidade permite uma cobertura do sinal de, aproximadamente, 10 km em áreas urbanas e suburbanas e 30 km em áreas rurais [11][12].

Em função da simplicidade e eficiência energética, o sistema utiliza a topologia de rede em estrela [11]. Importante frisar que a topologia em estrela contribui para a melhoria das comunicações entre os dispositivos e elimina a implementação de protocolos de roteamento [13]. Desta forma a tecnologia LPWAN possui várias vantagens. Entre elas, está seu menor

custo de implementação, grande alcance do sinal, baixo consumo energético e a grande longevidade das baterias. Em contrapartida, para manter a sua característica de baixo consumo de energia, a tecnologia LPWAN realiza as transmissões em períodos pré-determinados e permanecendo inativo no restante do tempo.

Na Figura 2.2, é ressaltada a comparação do tempo de vida útil das baterias em função do alcance do sinal para as tecnologias em rede sem fio.

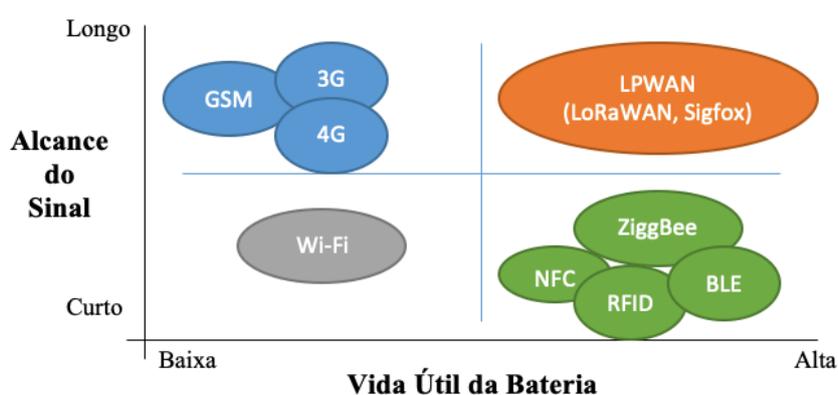


Figura 2.2: Longevidade das baterias em função do alcance do sinal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que diz respeito à topologia, a topologia em estrela [12], consiste em que cada nó estabelece uma interconexão direta com o *gateway*, sem a necessidade de inter-comunicação entre os nós, ou seja, um *multi-hop*. Na figura 2.3, é apresentado o *layout* da topologia de rede em estrela.

A topologia em redes estrela é de fácil implementação e reduz a quantidade de tráfego de dados. Contendo apenas enlace sem fio, a intercomunicação entre dispositivos para troca de mensagem segue o fluxo nó, *gateway*, servidor, entretanto, a comunicação entre *gateway* e servidor utiliza a tecnologia de conexão IP.

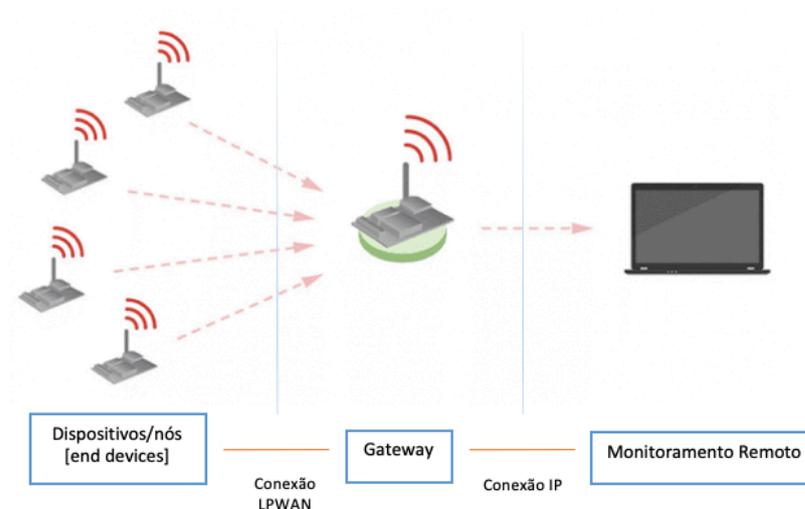


Figura 2.3 – Topologia de rede em estrela

Fonte: Elaborado pelo autor

A grande vantagem da topologia em estrela é a centralização da rede e, com isso, facilitando a inspeção do tráfego da rede em um único ponto. Contudo, a grande desvantagem é que uma falha no *gateway* pode desabilitar uma rede inteira [14]. Este problema, contudo, pode ser facilmente contornado com o uso de *gateways* redundantes.

2.3 Trabalhos Relacionados

Neste tópico são apresentados alguns trabalhos relacionados à tecnologia LPWAN, encontrados na literatura. Os trabalhos estão divididos em grupos específicos como estudos científicos, como esta dissertação que analisará o desempenho do sistema de uma rede LPWAN empregando protocolo LoRaWAN e outros estudos que visam analisar a tecnologia em lide.

2.3.1 Aplicações de controle Ambiental e Oceanográfico

O protótipo desenvolvido por Helal [15], denominado EstAcqua, visa a integração de *hardwares*, *softwares* e sensores de superfície e submersos, sendo os componentes utilizados

de baixo custo e que objetivaram o monitoramento das informações da pressão atmosférica, umidade, temperatura externa e subaquática para estações ambientais e oceanográficas [16].

2.3.2 Aplicações Médicas e Hospitalares

Em virtude das inúmeras doenças infectocontagiosas, cada vez mais pessoas estão realizando o tratamento de enfermidades remotamente.

O “iHome Health-IoT” é um serviço de saúde domiciliar de telemedicina inteligente, que usa tecnologia IoT e LPWAN [17]. Tal sistema tem a finalidade de cuidar dos pacientes em todos os aspectos, abrangendo medicação personalizada, monitoramento de sinais vitais, diagnósticos *in loco* e a interação com médicos remotamente [18].

O "iMeBox" é uma caixa de medicamentos inteligentes, integrada no sistema iHome Health-IoT, sendo a porta de entrada para o tratamento de saúde domiciliar e possui conectividade a serviços como o "iMedPack" e o "Bio-Patch" [18][19].

O “iMedPack” são dispositivos IoT integrados a embalagens de medicamentos inteligentes que são conectados ao “iMeBox” através de um *link* RFID para auxiliar os pacientes com a medicação prescrita. Os “Bio-Patch” são sensores fixados ao corpo do paciente que coletam e transmitem os sinais vitais para o “iMeBox” em tempo real. As informações coletadas são armazenadas e encaminhadas para a rede “iHome Health-IoT” para um diagnóstico clínico [18].

2.3.3 Aplicações Industriais e na Agricultura

Em relação ao agronegócio, nos deparamos com as inúmeras empregabilidades de sensores inteligentes no mercado, podendo os mesmos ser empregados na monitorização de animais e automação de máquinas agrícolas de precisão, permitindo assim otimizar e melhorar o processo produtivo [20].

As novas e proeminentes soluções de rádio comunicações máquina-máquina (M2M) [21] [22] aplicadas na indústria, têm como objetivo a integração e interconectividade de sistemas, sensores, atuadores e medidores inteligentes, com a capacidade de trocar informações entre si através de sensores embarcados, logo transformando informação em dados e facilitando a tomada de decisão.

2.3.4 Aplicações Militares

Atualmente, empresas e governos estão financiando pesquisas em novas tecnologias para serem empregadas no setor militar, e em relação às tecnologias de rede sem fio, as mesmas estão em foco desde a década de 50.

Com o foco nos estudos das LPWAN's, empregados no setor militar, podemos citar a aplicabilidade das redes sem fio no monitoramento de paraquedistas [23], cujo objetivo é realizar a transmissão dos sinais biométricos, ambientais e de geolocalização em tempo real de militares envolvidos em operações militares.

O relatório do Seminário da Divisão de Tecnologia Militar, da Universidade Sueca de Defesa (SEDU) [24], em relação à tecnologia IoT-LPWAN, apresentam estudos em andamento sobre *displays* transparentes com grafeno, câmeras de imagem térmica para veículos aéreos não tripulados (UAV), câmeras com bandas de comprimento de onda muito ampla para emprego militar e sensores que podem ser usados para multiemprego em veículos de combate integrados à rede. Na figura 2.4, é apresentado o *layout* de emprego conjunto de UAV, através de uma intercomunicação empregando redes sem fio [25].

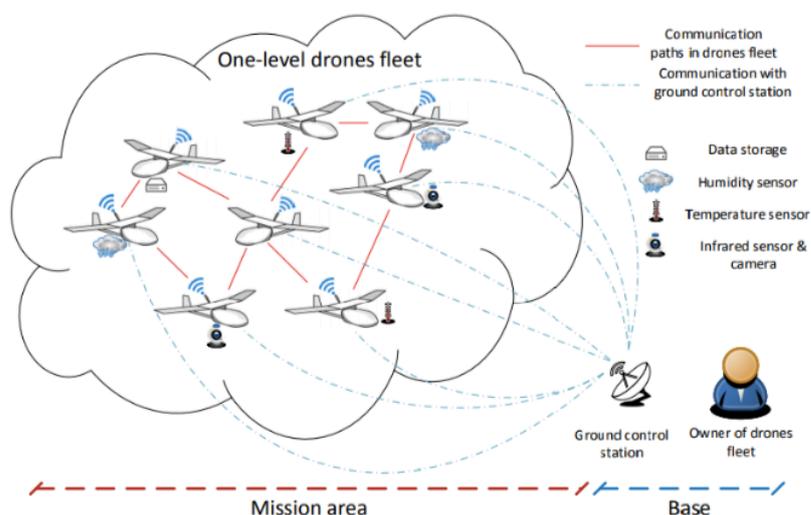


Figura 2.4 – Emprego conjunto de UAV empregando redes sem fio [25].

Capítulo 3

Tecnologia LoRa e Protocolo LoRaWAN

3.1 Tecnologia LoRa®

LoRa® (*Long Range*) é uma tecnologia de rede de comunicação sem fio desenvolvida e patenteada pela empresa *Semtech*, a mesma é promovida através de uma associação aberta e sem fins lucrativos denominada *LoRa® Alliance*. Esta associação reuni um conglomerado de grandes empresas que possuem o interesse em comum no desenvolvimento e na aplicação da rede LoRa® na Internet das Coisas [26].

A rede LoRa® é uma camada física ou modulação própria do sinal, integrada a um protocolo aberto de comunicação LoRaWAN® para aplicação exclusiva na rede LoRa®.

A modulação que baseia no método de espalhamento espectral *Chirp Spread Spectrum* (CSS), desenvolvida originalmente para aplicações de radar e utilizada em aplicações militares e espaciais. É uma técnica de codificação para transmissão digital de sinais, que usa uma tecnologia de espalhamento do sinal a ser transmitido no espectro de frequência gerando um sinal de portadora *chirp*.

A modulação CSS realiza a variação de taxa de transmissão em função da sensibilidade nos receptores, ou seja, a utilização de uma mesma largura de banda por canal, a partir dos três parâmetros chave da modulação. É importante, contudo, ressaltar que a modulação do espectro de propagação *chirp* mantém as características que as empregadas na modulação de chaveamento de frequência *Frequency Shifting Keying* (FSK), pois é uma modulação muito eficiente para alcançar baixas potências e também aumentando significativamente o alcance do sinal propagado.

A variabilidade do fator de propagação é uma característica responsável pela adaptação do sistema em busca de uma taxa de transferência ideal para a aplicabilidade específica, entretanto, a alteração dessas características, causam algumas alterações nas taxas de dados transmitidos [27].

Importante ressaltar que outros parâmetros são customizáveis na modulação LoRa, influenciando diretamente na taxa de bits efetiva da modulação, na resistência ao ruído e sua

facilidade de decodificação. A seguir, serão abordados os princípios de funcionamento e a funcionalidade dos parâmetros da tecnologia LoRa.

3.1.1 *Chirp Spread Spectrum (CSS)*

É uma técnica de espalhamento espectral que transforma o sinal gerado em uma determinada banda e espalha este sinal no domínio da frequência. O sinal passa a ter uma largura de banda maior do que a original e possui uma baixa densidade de potência, apresentando uma relação sinal ruído baixa que, para alguns receptores, é quase imperceptível [28]. O espalhamento espectral codifica os bits em símbolos, sendo que cada símbolo é representado por múltiplos “chips”, ou seja, o espalhamento espectral modula os pulsos de *chirps* (tempo por símbolo) [29], logo variando a frequência sem alterar a fase do sinal [30].

Os *chirps* são sinais ou pulsos de radar comprimidos de alta intensidade que possuem amplitude constante e varrem toda a largura de banda, variando a frequência de maneira linear em um determinado espaço de tempo.

As transmissões dos símbolos ocorrem através da variação da frequência do sinal senoidal em relação a uma frequência base. Esta variação é denominada *up-chirp* (aumento da frequência) e *down-chirp* (diminuição da frequência). Na Figura 3.1 é apresentado os símbolos LoRa sendo modulados sobre um *up-chirp* de uma largura de banda de 125 kHz.

Os *chirps* são deslocados ciclicamente. Num movimento de *up-chirp*, durante o processo de codificação do sinal, ocorre um aumento da frequência a partir da frequência base (F_{base}) até a frequência máxima ($F_{máx}$) e, ao atingi-la, ocorre novamente um salto para a frequência mínima ($F_{mín}$), até voltar para a F_{base} . A frequência base é descrita na literatura como a frequência da portadora e sua faixa de operação é definida de acordo com a região de operação do equipamento.

A largura de banda (BW) é dada pela expressão 3.1.

$$BW = F(máx) - F(mín) \quad (3.1)$$

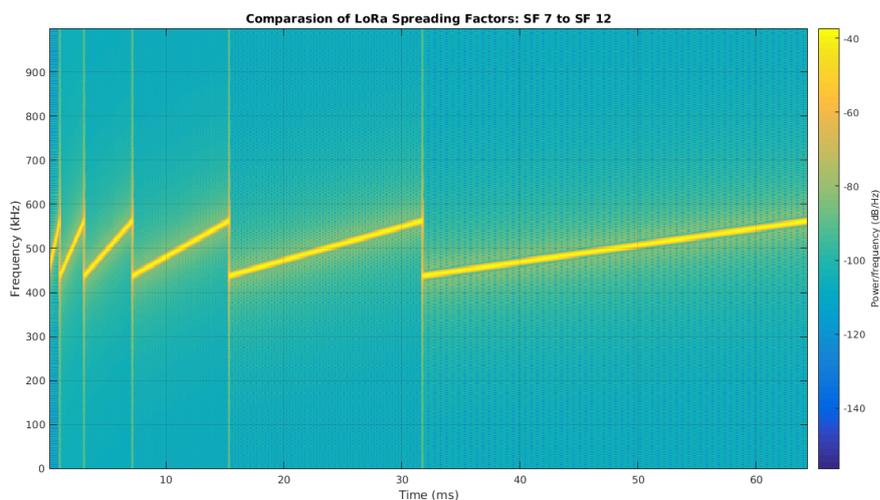


Figura 3.1 – Técnica de modulação de espectro de espalhamento *chirp* [31].

Para a tecnologia LoRa, a largura de banda possui três valores programáveis de utilização que são 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz, sendo que a mesma se baseia em relação à frequência base ou frequência central.

3.1.2 Taxa de código

A taxa de código ou *Code Rate* (CR) é um parâmetro que define a quantidade de bits que serão acrescentados para os dados de redundância na mensagem, cujo objetivo é realizar a recuperação de erros.

As especificações técnicas da tecnologia LoRa definem quatro valores a serem empregados serem 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8, sendo que quanto maior o valor do CR , maior proteção contra a perda de dados. A expressão 3.2 define a taxa de codificação T_c [14].

$$T_c = \frac{4}{4 + CR}, \quad \text{com } CR \in \{1, 2, 3 \text{ e } 4\}. \quad (3.2)$$

3.1.3 Fator de Espalhamento

O fator de espalhamento espectral ou *Spreading Factor* (SF) é o parâmetro responsável por definir a quantidade de *chirps* que o portador dos dados enviará por segundo, ou seja, é a representação do número de bits de informação codificados em um único símbolo, com isso reduzindo a relação sinal ruído (*Signal to Noise* – SNR) [11].

As especificações técnicas da tecnologia LoRa, definem seis valores diferentes como parâmetros selecionáveis de fator de espalhamento que são SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12 [14], permitindo assim a formação de canais ortogonais, logo garantindo que *links* de comunicação entre fatores de espalhamento diferentes não tenham interferências entre si.

O número de chips por símbolo é dado pela expressão (3.3):

$$M = 2^{SF} \quad (3.3)$$

O aumento do SF, ocasiona um aumento na sensibilidade do limiar de recepção em termos de potência, com isso aumentando o tempo de duração de símbolos, o alcance do sinal e a diminuição da taxa de transmissão do enlace, entretanto, em contrapartida, aumenta-se a SNR [27]. A expressão 3.4, define a taxa de transmissão R_b teórica, representando a taxa de bits efetiva. Entretanto, a modulação e o fator de espalhamento influenciam diretamente no tempo necessário de uma transmissão de um símbolo, esta relação é definida conforme a equação 3.5.

$$R_b = SF * \frac{T_c * BW}{2^{SF}} \quad \text{com } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}. \quad (3.4)$$

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad \text{com } BW \in \{125 \text{ kHz}, 250 \text{ kHz e } 500 \text{ kHz}\}. \quad (3.5)$$

Logo o ritmo de símbolo é determinado pela equação 3.6.

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad \left[\frac{\text{símbolo}}{s} \right] \quad (3.6)$$

Na Figura 3.2, são apresentados os parâmetros variáveis da camada física para rede LoRa [32].



Figura 3.2 – Comparativo da escalabilidade da rede LoRaWAN em função da largura de banda, fatores de espalhamento, taxa de dados e bits, sensibilidade e consumo.

Fonte: LoRa® Alliance [32].

3.2 Protocolo LoRaWAN

O Protocolo LoRaWAN estabelece as regras e parâmetros de comunicação entre os componentes da arquitetura e de acesso ao meio através do *Medium Access Control* – MAC, desta forma, permitindo a troca de informações entre os dispositivos periféricos e o *gateway* [26].

A arquitetura do sistema LoRa consiste em *end-devices* ou dispositivos finais que se comunicam com um ou mais *gateways* através de uma rede em topologia estrela, atuando como um enlace que retransmite os dados entre os *end-devices* e uma central inteligente centralizada, denominada *NetServer*, responsável pelo gerenciamento da rede, envio de dados, verificação de segurança e a infraestrutura da camada LoRaWAN. Na Figura 3.3, é apresentada a composição estrutural da tecnologia LoRa.

No que tange à especificação da camada LoRaWAN, a transmissão de dados é executada em canais diferentes, logo os dispositivos finais são pré-configurados conforme as classes de dispositivos (Classes A, B e C).

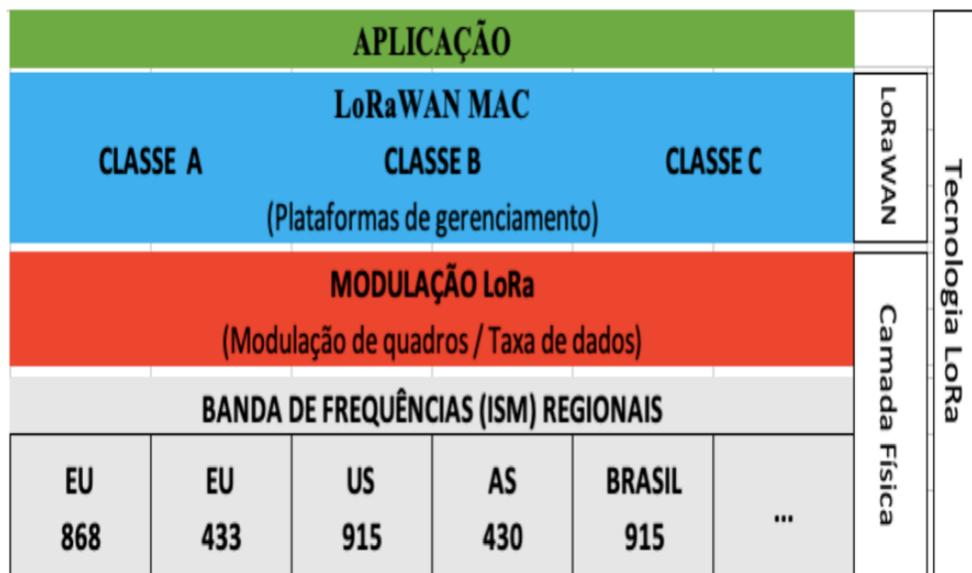


Figura 3.3: Estrutura em camadas da tecnologia LoRa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 *NetServer*

É uma estrutura simples de recepção do servidor, que basicamente recebe mensagens originadas do *gateway*, a partir de mensagens criptografadas entre os nós e o servidor e, por fim, sendo descriptografadas pelo mesmo.

As mensagens são validadas a partir da verificação da integridade do pacote recebido e se o mesmo foi transmitido por um dispositivo cadastrado na rede. Esta estrutura de recepção também é responsável por gerar pacotes que serão enviados aos *end-devices*, contendo os dados para configuração do sistema e/ou a confirmação do recebimento dos dados [26].

A comunicação entre *Netserver* e *end-devices* é estabelecida através de três canais obrigatórios durante o procedimento de junção ou associação [26]. O *NetServer* é potencialmente capaz de realizar o procedimento de junção e também atualizar a lista de canais de dados pré-configurados não obrigatórios, então não ocorrendo a diferenciação de como os dispositivos finais enviam suas mensagens, independentemente da classe.

3.2.2 *Gateway*

No sistema de comunicação LoRa o *gateway* é responsável por receber, armazenar e encaminhar os dados oriundos dos sensores ou nós, repassando-os para a *network server*.

Desta forma, o mesmo é o elemento central da rede, realizando a conexão entre os dispositivos finais e o servidor da rede LoRa.

Um único *gateway* pode receber os dados de milhares de dispositivos e retransmiti-los para o servidor de rede e, com isso, centralizando os dados do sistema.

A cobertura do *gateway* estará diretamente relacionada à antena transmissora e os parâmetros de configuração da rede, sendo que um único *gateway* pode estabelecer um raio de cobertura de 2 até 15 quilômetros.

3.2.3 Beacon

Os *beacons* são sinais periódicos enviados pelo *gateway* com o objetivo de realizar a sincronização e o monitoramento das células dos dispositivos da classe B, contudo, antes da troca do modo de funcionamento das classes A para B, o dispositivo precisa receber, no mínimo, um sinal *beacon* da rede. Para a realização do alinhamento de sua referência interna temporal com a rede, e caso o não recebimento do sinal *beacon*, o dispositivo pode se manter em funcionamento na classe B por até duas horas e, com isso, garantir a recepção de sinal sem o ajuste de sincronismo. Informações específicas sobre o funcionamento da classe B podem ser encontradas em *LoRa-Alliance Class B – Beacon* [33].

3.2.4 Dispositivos Finais

Os dispositivos finais, também conhecidos como *end-nodes* ou *end-devices*, são dispositivos responsáveis pelo envio de dados e, também, pelo estabelecimento da comunicação entre o *gateway* e o nó.

Existem inúmeras aplicações e diferentes requisitos em que os dispositivos finais atendem, podendo os mesmos serem classificados por diferentes classes (do tipo A, B e/ou C) para cada nó.

Para o protocolo LoRaWAN, as classes dos dispositivos são classificadas principalmente em função do consumo energético e sua latência nas comunicações de *downlink* da rede [26]. A seguir serão apresentados as diferentes categorias de dispositivos:

3.2.4.1 Classe A

A Classe A é básica, sendo a mesma implementada cada dispositivo final LoRa, sendo caracterizada por estabelecer uma comunicação bidirecional entre *end devices* e o servidor. Os dispositivos desta categoria somente podem receber dados do servidor após as informações terem sido enviadas. Este *layout* de transmissão garante uma maior eficiência energética dentre às três classes de dispositivos, fruto da aplicação do sistema com dados de *downlink* de baixa taxa de potência.

Quando o dispositivo final necessita enviar uma mensagem ao *NetServer*, é escolhido aleatoriamente um canal, entre os configurados durante o procedimento de ativação, visto que a transmissão *uplink* é concluída, o dispositivo final abre duas janelas curtas de recepção denominadas RX_1 e RX_2, sendo que a janela RX_2 tem como objetivo ouvir a transmissão de *downlink* do *NetServer*.

A cada transmissão, o dispositivo final escolhe aleatoriamente um novo canal e a partir da abertura da janela de recepção RX_1 e também aberto “Tempo de atraso RX_1”, sendo após o final da transmissão é aberta uma janela RX_2 [26][34].

Na Figura 3.4, é ilustrada a distribuição de quadros de recepção para os dispositivos da classe A.

3.2.4.2 Classe B

A Classe B é uma classe opcional útil para dispositivos finais alimentados por bateria, que necessitem de trocas regulares de *downlink* como, por exemplo, os atuadores. Os dispositivos desta categoria abrem múltiplas janelas de recepção e em tempos determinados para as comunicações *downlink*, sem alterar o gerenciamento da comunicação *uplink*, e também suportando um maior consumo de energia em comparação aos dispositivos finais que implementam apenas a classe A.

Nos dispositivos classe B, o processo é similar aos da classe A, com a abertura de quadros de recepção em tempos programados, configurados através de mensagens de *beacon* emitidas pelo *gateway*. Os *beacons* realizam o sincronismo entre os *end devices* e os dispositivos *gateway*.

A transmissão de difusão de mensagens *beacon* pelo *gateway* é dividido em períodos que se iniciam, primeiramente, com a transmissão de uma mensagem *beacon*, sendo que cada período de *beacon* é dividido em um conjunto de *slots*.



Figura 3.4: Janela de recepção para os dispositivos Classe A.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, os dispositivos e o servidor passam a funcionar em sincronia. O número de janelas abertas entre um período de *beacon* é definido a partir do tempo de duração de uma janela, correlacionando ao tempo de um período de *beacon*.

Por esses motivos, essa classe permite uma latência controlada à conexão, enquanto mantém níveis reduzidos de consumo de energia [26][34].

A Figura 3.5, ilustra a distribuição de quadros de recepção para os dispositivos classe B.

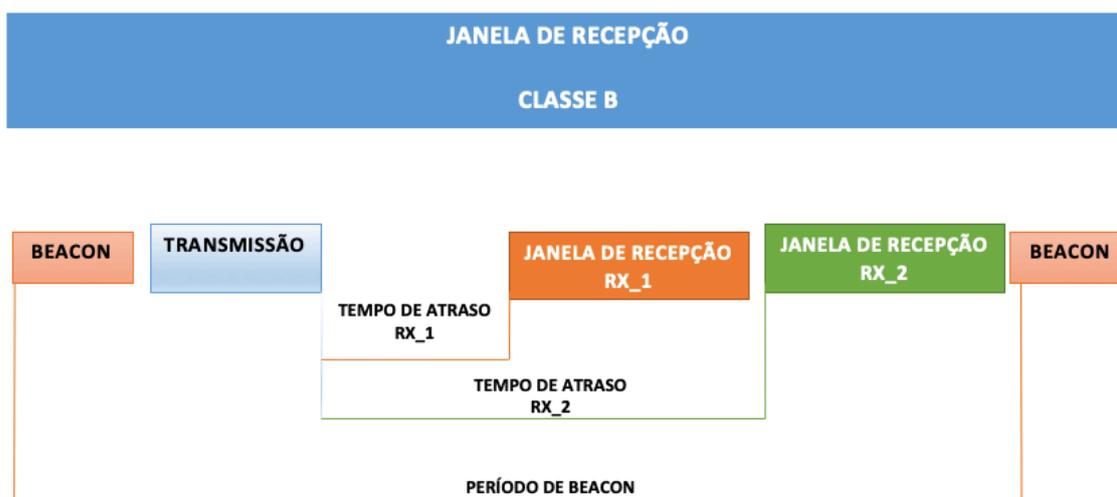


Figura 3.5: Janela de recepção para os dispositivos Classe B.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4.3 Classe C

Dispositivos bidirecionais, denominados Classe C, são opcionais e dedicados a dispositivos finais totalmente energizados. Os dispositivos desta classe permanecem em escuta contínua do meio para receber dados de *downlink*, ou seja, os dispositivos estão sempre disponíveis para a recepção de mensagens.

A classe C implementa as mesmas janelas de recepção da classe A, no entanto, os dispositivos finais dão prioridade à escuta contínua da segunda janela de recepção RX_2 e após uma transmissão *uplink*. Basicamente, a grande diferença é que a janela RX_2 só fecha quando o dispositivo for enviar pacotes através de seu *uplink*, então isso quer dizer que ele está sempre aberto para receber pacotes oriundos do *gateway* e reduzindo a latência para a transmissão de dados [26][34].

Na Figura 3.6, é ilustrada a distribuição de quadros de recepção para os dispositivos da classe C.

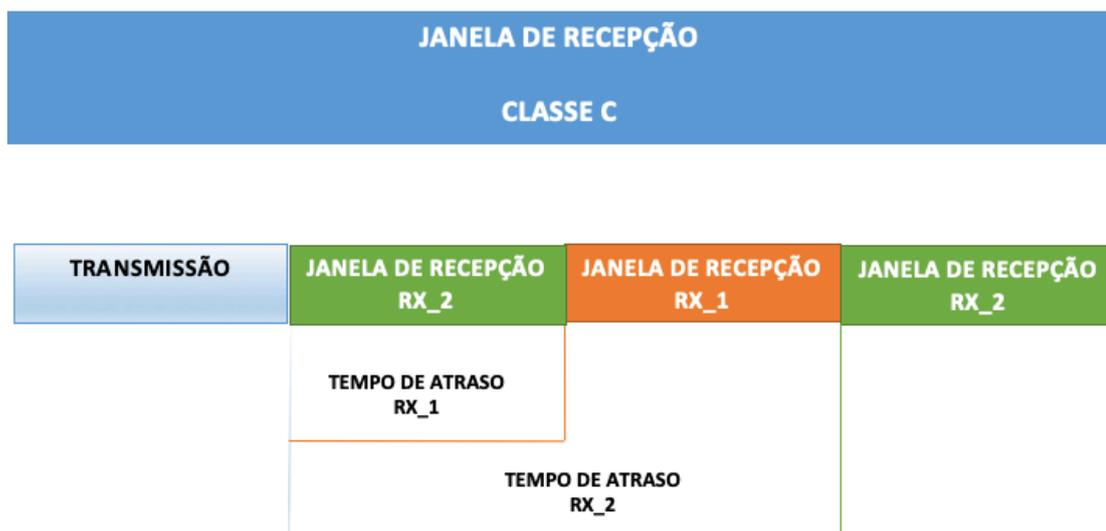


Figura 3.6: Janela de recepção para os dispositivos da classe C.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Capítulo 4

Modelos e Fenômenos da Propagação

4.1 Modelos de Propagação

O conhecimento do canal de propagação é indispensável para se determinar a melhor predição e, assim, realizar um bom planejamento da cobertura do sinal radio móvel. Quando a intensidade do nível do sinal não pode ser medida com equipamentos próprios integrados no receptor, o mesmo pode ser predito através de modelos de predição. Existem várias categorias de modelos de predição, uma delas é a predição baseada em dados coletados através de medições (empíricas). A predição da potência recebida ou da perda que o sinal experimenta em um determinado ambiente consiste em analisar os dados experimentais e, assim, desenvolver uma ou um conjunto de equações para determinar a predição do sinal.

A caracterização do canal em banda estreita tem como objetivo a modelagem do canal rádio móvel a partir da análise do valor médio da perda no percurso e os desvanecimentos de pequena e larga escala [35].

A seguir, serão apresentados alguns modelos de propagação existentes na literatura técnica para propagação de sinais na faixa de 915 MHz em ambientes fechados.

4.1.1 Modelo de Friis

Este modelo é extremamente simplista e considera o canal de propagação entre receptor e transmissor completamente desobstruído, sendo este um cenário ideal de propagação.

O modelo em questão é empregado para mensurar a perda de potência média do sinal recebido com a distância. Leva em consideração uma fonte pontual isolada e sem a presença de qualquer corpo ou meio que afete a onda propagante [36].

A potência média recebida por uma antena no espaço livre pode expressa pela Equação 4.1.

$$Pr(d) = \frac{Pt Gt Gr \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (4.1)$$

onde são definidos:

P_t – Potência fornecida pelos terminais da antena transmissora;

P_r – Potência recebida nos terminais da antena receptora;

G_t – Ganho da antena transmissora;

G_r – Ganho da antena receptora;

λ – Comprimento de onda do sinal transmitido; e

d – Distância de separação entre as antenas.

A Equação 4.1 foi publicada por Harald T. Friis [37], sendo estabelecido em seus embasamentos que não há absorção ou reflexão de energia em regiões próximas da antena, com isso a densidade de potência irradiada será uniforme em todas as direções. Na Equação 4.2 é suposto que a antena isotrópica de área efetiva “A” é imersa em uma região com uma densidade de potência e , na Figura 4.1, é apresentado o enlace entre transmissor e receptor em relação à densidade de potência.

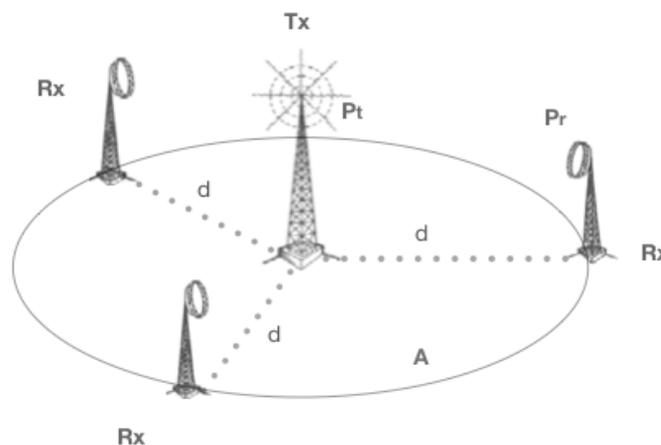


Figura 4.1: Propagação em espaço livre, para uma dada potência de transmissão, em função da distância entre transmissor e receptor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$P_r(d) = \frac{P_t}{4\pi d^2} * A \quad (4.2)$$

Sendo que:

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (4.3)$$

Logo:

$$\Pr(d) = \frac{P_t}{4\pi d^2} * A = \frac{P_t}{4\pi d^2} * \frac{\lambda^2}{4\pi} = P_t * \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (4.4)$$

No entanto, se houver ganhos na recepção e na transmissão, bem como perdas (L), empregamos a Equação 4.5.

$$\Pr(d) = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \frac{G_t G_r}{L}, \quad (4.5)$$

Sendo que a perda L , em decibéis (dB), é definida como:

$$L = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r}\right) \quad (4.6)$$

Mas, da relação de Friis, temos:

$$\frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (4.7)$$

Substituindo a Equação 4.6 na 4.7, tem-se que:

$$L = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 20 \log(4\pi) + 20 \log \left(\frac{d}{\lambda}\right) = 21,98 + 20 \log \left(\frac{d}{\lambda}\right) \quad (4.8)$$

Importante ressaltar que a perda no espaço livre pode ser empregada para o cálculo da atenuação do sinal em enlace ponto a ponto.

4.1.2 Modelo *Log-Distance*

O *Log-Distance* é um modelo empírico que foi desenvolvido para mensurar a perda de percurso mediana em grande escala, sendo o cálculo da atenuação do sinal estabelecida em função da distância entre transmissor e receptor e o coeficiente de decaimento “n”. O parâmetro “n” é o expoente de perda de percurso e também indica a velocidade de crescimento da atenuação do sinal [36]. A formulação empírica para o modelo *log-distance* é dada pela Equação 4.9.

$$Pr(d) = Pr(d_0) - 10 n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.9)$$

d_0 – Distância de referência;

n – coeficiente de decaimento; e

d – Distância entre transmissor e receptor.

O valor de “n” é dependente do ambiente de propagação. Na Tabela I, podemos observar os valores para “n” [36].

| Tipo de Ambiente | Valor do Coeficiente "n" |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Espaço Livre | 2 |
| Área Urbana | 2,7 a 3,5 |
| Área Urbana pouco obstruída | 3 a 5 |
| Indoor com linha de visada | 1,6 a 1,8 |
| Indoor com obstrução | 4 a 6 |

Tabela I – Coeficiente de perda de percurso para os diferentes ambientes de propagação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A existência de grandes obstáculos como edifícios, morros e outras obstruções, situadas entre transmissor e receptor, geram desvanecimentos em grande escala (sombreamento), provocando assim consideráveis variações na potência recebida e interrompendo instantaneamente a comunicação.

A variabilidade do sombreamento segue uma distribuição gaussiana em escala logarítmica, ou seja, segue uma distribuição log-normal, sendo que a potência média recebida em um ponto qualquer, deve-se ser acrescida de uma variável aleatória com distribuição log-normal (em dB) $X\sigma$, que representa quanto o sombreamento está variando

em torno do valor médio da potência recebida, representada pelo desvio padrão desta variável. Esse desvio padrão se situa, normalmente, na faixa de 7 a 15 dB. Vale observar que o valor da potência recebida não considera as variações causadas pelos multipercursos.

4.1.3 Modelo ITU-R P.1238-1

O modelo descrito a seguir foi desenvolvido pelo ITU-R, para predição de sinais na faixa de frequência entre 900 MHz e 100 GHz em ambientes fechados com presença de obstáculos, pisos e outras obstruções [38].

O modelo considera os efeitos de propagação de reflexão e difração em objetos, transmissão através de paredes e pisos, confinamento da energia em corredores e pessoas ou objetos em mobilidade no ambiente [38].

A atenuação é dada pela expressão 4.10:

$$L = 20 \cdot \log(f) + n \cdot \log(d) + L_f(K_f) - 28 \quad (4.10)$$

onde:

f – frequência de operação em MHz;

n – coeficiente de decaimento em função com a distância;

d – distância percorrida em metros;

K_f – número de andares que a onda eletromagnética atravessou; e

L_f – coeficiente de perda por penetração por andares ou pisos atravessados em dB.

O modelo fornece os valores de coeficiente de decaimento com a distância para os variados tipos de ambientes e faixas de frequência. Nas tabelas II e III, são apresentados os dados de “ n ” e L_f para a faixa de frequência utilizada neste trabalho.

O modelo da ITU representa a perda média do sinal propagado, não cobrindo as variações em larga e pequena escala do sinal, devido aos efeitos de sombreamento e multipercurso, respectivamente.

| Coefficiente de decaimento "n" com a distância | | | |
|---|--------------------|-------------------|------------------|
| Frequência | Residencial | Escritório | Comercial |
| 900 MHz | - | 33 | 20 |
| 1.2 - 1.3 GHz | - | 32 | 22 |
| 1.8 - 2.0 GHz | 28 | 30 | 22 |
| 4 GHz | - | 28 | 22 |
| 5 GHz | - | 31 | - |

Tabela II – Coeficiente de decaimento com a distância [38].

Fonte: Elaborado pelo autor.

| Coefficiente de perdas por penetração por andar | | | |
|--|---------------------------|--|---------------------------------------|
| Frequência | Residencial | Escritório | Comercial |
| 900 MHz | - | 9 (1 andar) | - |
| | | 19 (2 andar) | - |
| | | 24 (3 andar) | - |
| 1.8 - 2.0 GHz | 4 K_f | 15 + 4 ($K_f - 1$) | 6 + 3 ($K_f - 1$) |
| 5.2 GHz | - | 16 (1 andar) | - |

Tabela III – Coeficiente de perda por penetração por andares [38].

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Fenômenos da Propagação

Neste tópico, serão apresentados os fenômenos físicos básicos associados à propagação de uma onda eletromagnéticas. São eles: a reflexão, difração e a dispersão, cujos os mesmos estão diretamente relacionados ao comportamento do sinal.

Segundo Rappaport *et al.* (1996) e Andersen *et al* (1995), o meio impõe limitações no desempenho dos sistemas de comunicações móveis, diferentemente dos outros meios de propagação, sendo que o sinal propagado está diretamente associado aos fenômenos físicos supracitados.

As irregularidades do ambiente como a presença de obstáculos, a mobilidade dos dispositivos do sistema e as condições atmosféricas são fatores que influenciam a propagação do sinal, também influenciando a atenuação parcial e/ou total da potência do sinal incidente na antena receptora. A seguir, serão abordados os fenômenos físicos que podem provocar atenuação do sinal transmitido.

4.2.1 Reflexão

O fenômeno da reflexão de uma onda eletromagnética incidente, em um meio com propriedades elétricas diferentes, pode ser parcial ou total.

A natureza da reflexão da onda, está relacionada a direção de polarização do campo elétrico e, também, ao coeficiente de reflexão da onda incidente. Importante salientar que o coeficiente de reflexão varia em função do ângulo de incidência e da frequência de propagação da onda.

4.2.2 Difração

O fenômeno físico da difração de uma onda eletromagnética se baseia no princípio de Huygens. O fenômeno ocorre quando uma onda eletromagnética encontra uma fenda ou um obstáculo, assim realizando o contorno pelas frentes de onda, logo proporcionando que as ondas propagadas atinjam regiões de sombra.

O fenômeno físico da difração se deve ao comportamento das fontes serem consideradas como fontes pontuais para produção de ondas secundárias, ou seja, as mesmas se combinam e produzem novas frentes de onda se propagando com a mesma frequência, velocidade e na mesma direção das ondas originais.

A difração é um fenômeno fundamental para a solidificação das tecnologias de redes sem fio, pois a mesma assegura a possibilidade de recepção do sinal mesmo que não exista linha de visada entre o transmissor e o receptor.

4.2.3 Dispersão

O fenômeno da dispersão de uma onda eletromagnética está associado a uma perturbação periódica, em função da frequência, comprimento e velocidade da onda propagante. Tal fenômeno ocorre em função da presença de elementos de dimensões inferiores no canal de propagação [36].

O fenômeno da dispersão pode ocorrer devido à presença de obstruções como chuva, vegetação, edificações, entre outros. Isso porque, quando a onda eletromagnética se choca com uma superfície, a energia refletida é difundida em todas as direções.

A potência efetiva recebida pela antena receptora apresenta, em sua grande maioria, uma intensidade de sinal recebido maior do que o previsto pelos modelos de propagação baseados nos mecanismos de reflexão e difração. Este fenômeno dar-se-á pela difusão da onda transmitida em superfícies irregulares e/ou rugosas, sendo a onda espalhada e redirecionando outras frentes de onda para o receptor.

Capítulo 5

Ambiente e *Setup* das Medições

Para possibilitar a caracterização e análise da cobertura do sinal em ambiente *indoor*, bem como o seu desempenho em diferentes situações (com e sem visada), foram realizadas medições da taxa de perda de potência do sinal em função das diferentes configurações de fator de espalhamento e largura de banda utilizados na modulação LoRa.

Para a realização dos experimentos, foram montados dois micro-controladores “ESP 32 LoRa”, sendo um transmissor e outro um receptor, levando-se em consideração algumas características peculiares de propagação do sistema, tais como: as distâncias entre dispositivos, a presença ou ausência de visada, a altura e polarização das antenas, dentre outros.

Os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos a partir de medições realizadas nos corredores e *halls* do Bloco D do Prédio de Engenharia do Campus Praia Vermelha, da Universidade Federal Fluminense (UFF), na cidade de Niterói - RJ. Nas Figuras 5.1 e 5.2, podemos observar o Prédio de Engenharia.

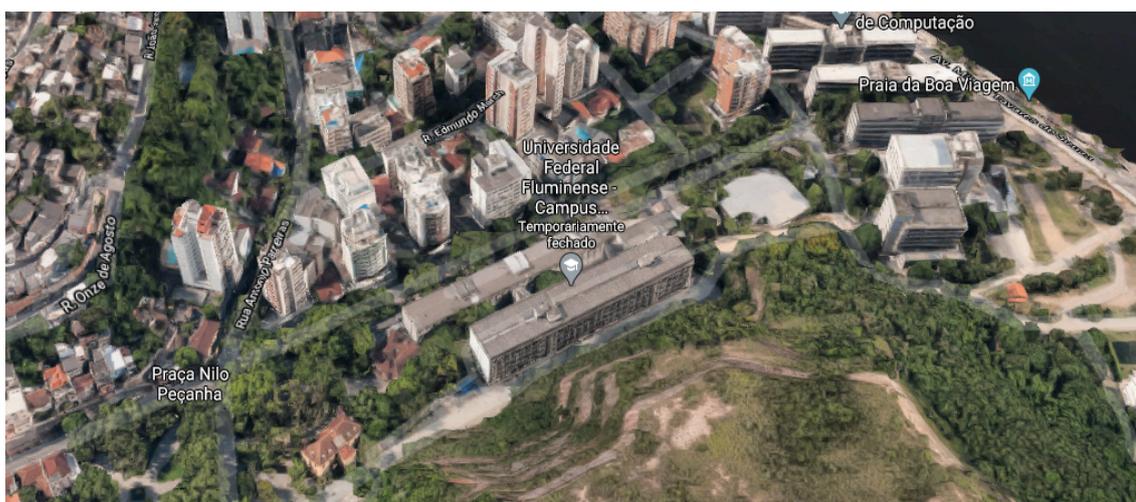


Figura 5.1: Vista aérea do Prédio de Engenharia.

Fonte: GoogleMaps, 2021.



Figura 5.2: Prédio de Engenharia.

Neste capítulo, serão apresentados os ambientes e os setups utilizados para as campanhas de medições.

5.1 Ambiente de Medições

As campanhas de medições foram realizadas no interior do Bloco D do prédio de Engenharia, sendo o mesmo um edifício de alvenaria da década de 70, que possui 5 andares e fachada envidraçada. Os andares apresentam separações internas com paredes de concreto, janelas de vidro e portas de *drywall* por toda a extensão dos corredores e *halls*, como podemos observar nas Figuras 5.3 a 5.7.



Figura 5.3: Fachada envidraçada do Prédio de Engenharia.

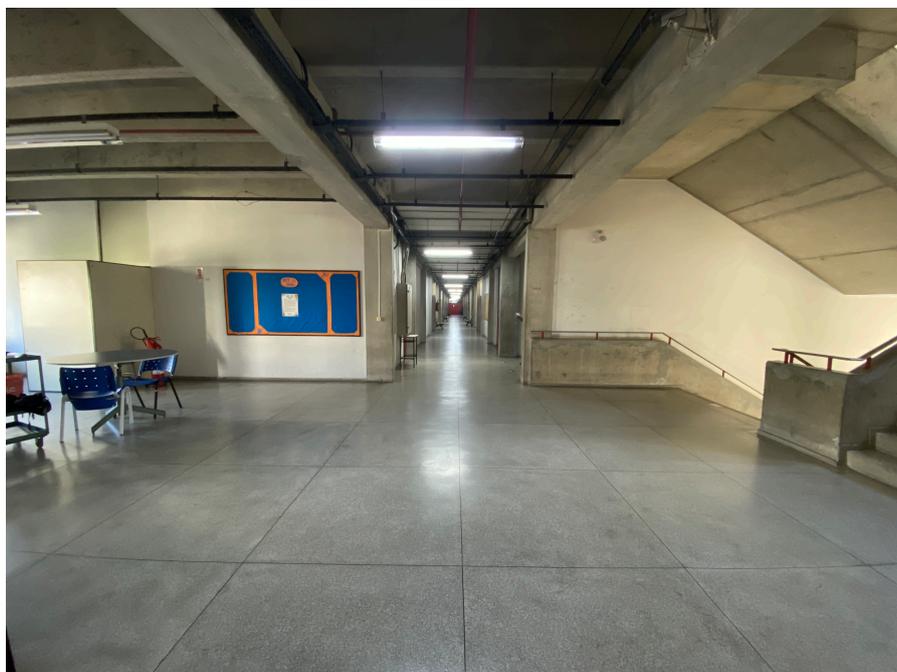


Figura 5.4: *Hall* e corredor dos 2°, 3°, 4° e 5° andares.



Figura 5.5: Corredor das salas de aula.



Figura 5.6: Corredor das coordenações de cursos.



Figura 5.7: *Hall* do 1° andar.

Os andares do Bloco D apresentam diferentes configurações nos compartimentos internos, no que tange à disposição das salas de aulas, auditórios, escritórios e outras dependências. As dimensões de cada andar são de 125 m (comprimento) x 20 m (largura), sendo que o edifício possui uma particularidade, o primeiro andar apresenta um layout diferente dos demais andares. Nas Figuras 5.8 a 5.13, são apresentadas as plantas baixas dos onde foram realizadas as campanhas de medições estacionárias e em mobilidade.

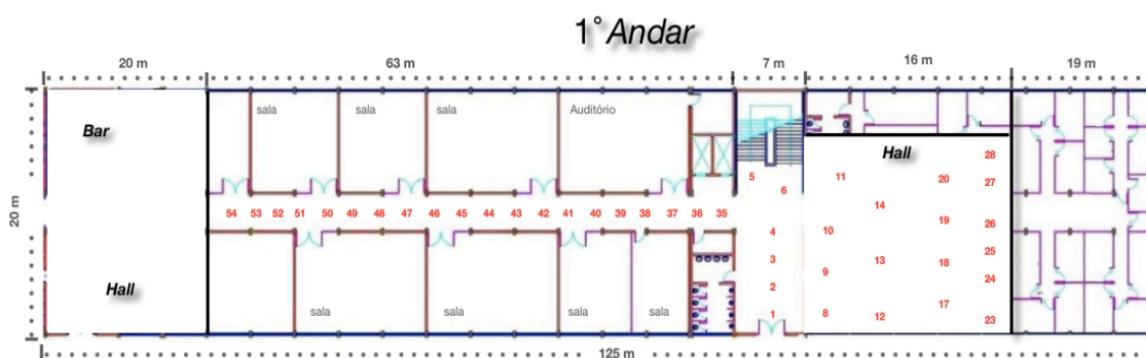


Figura 5.8: Planta baixa do 1° andar.

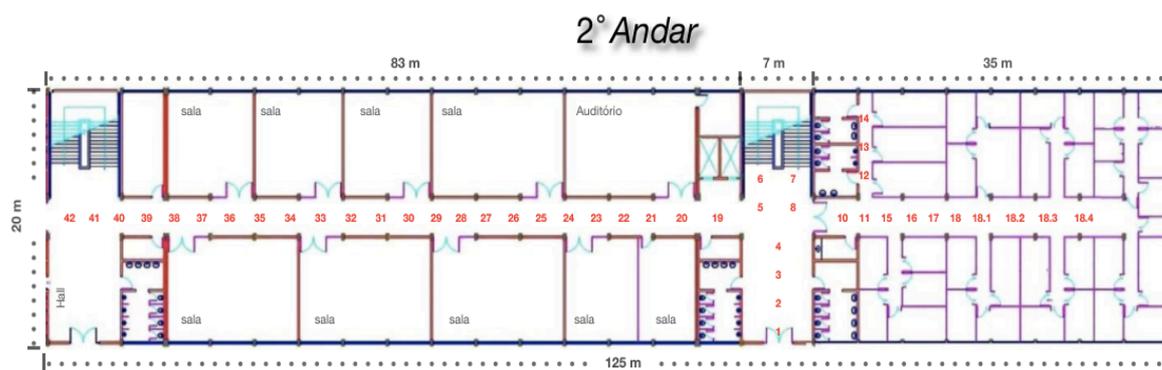


Figura 5.9: Planta baixa do 2° andar.

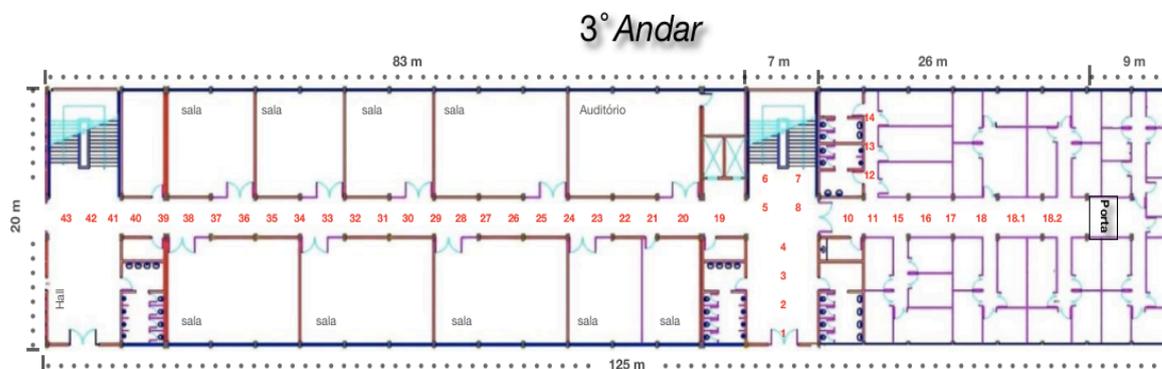


Figura 5.10: Planta baixa do 3° andar.

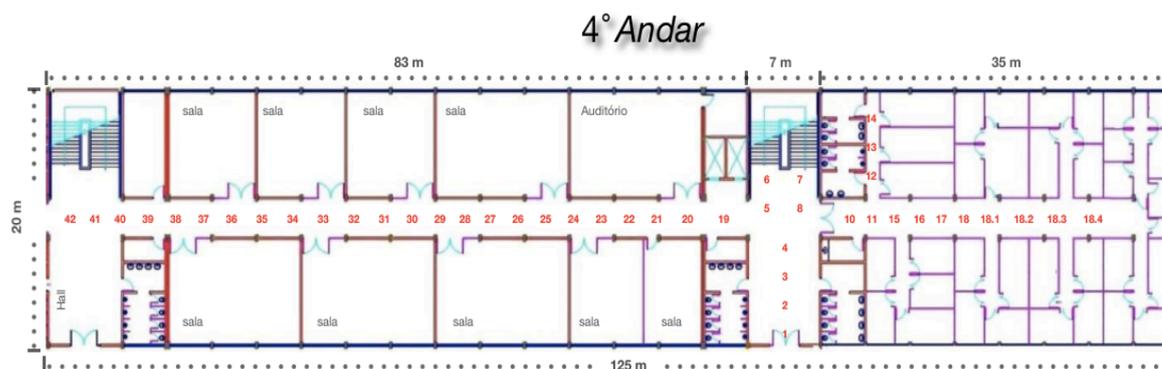


Figura 5.11: Planta baixa do 4° andar.

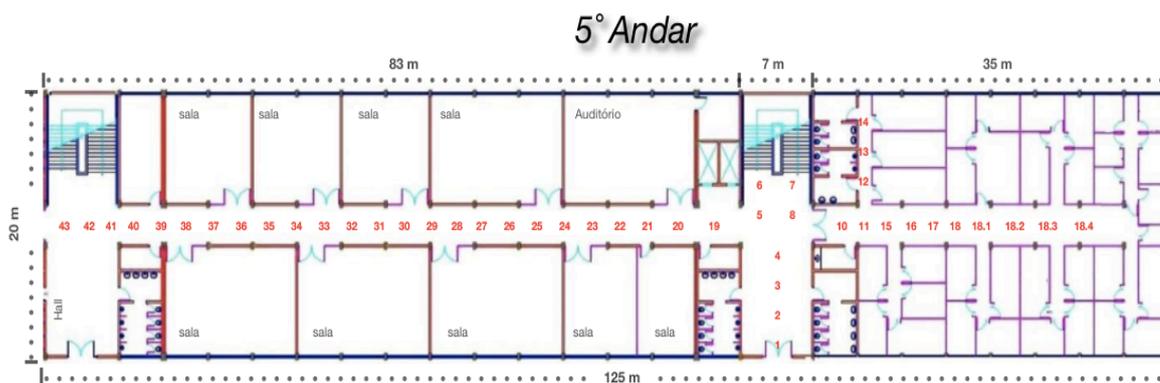


Figura 5.12: Planta baixa do 5º andar.

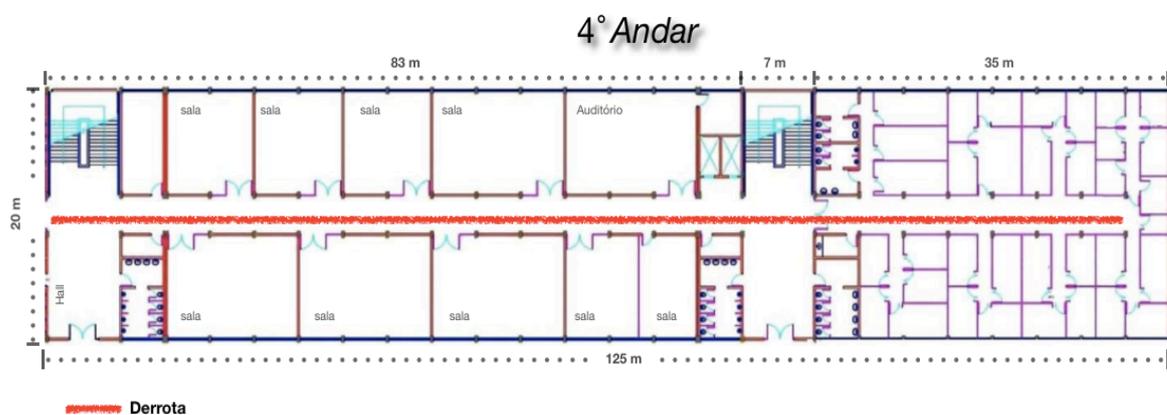


Figura 5.13: Percurso estabelecido para medições em mobilidade.

5.2 *Setup* das Medições

A arquitetura do sistema empregado durante as campanhas de medições é ilustrada na Fig. 5.14. Tal sistema foi estabelecido por dois micro-controladores ESP32 LoRa (*Datasheet* SX1276), duas antenas móveis verticais, cabos coaxiais e conectores.

O sistema de transmissão foi fixo na parte externa do Prédio de Engenharia, em uma região fora do ambiente onde ocorreram as medições estacionárias. Na Figura 5.15, é ilustrado o posicionamento da antena transmissora.

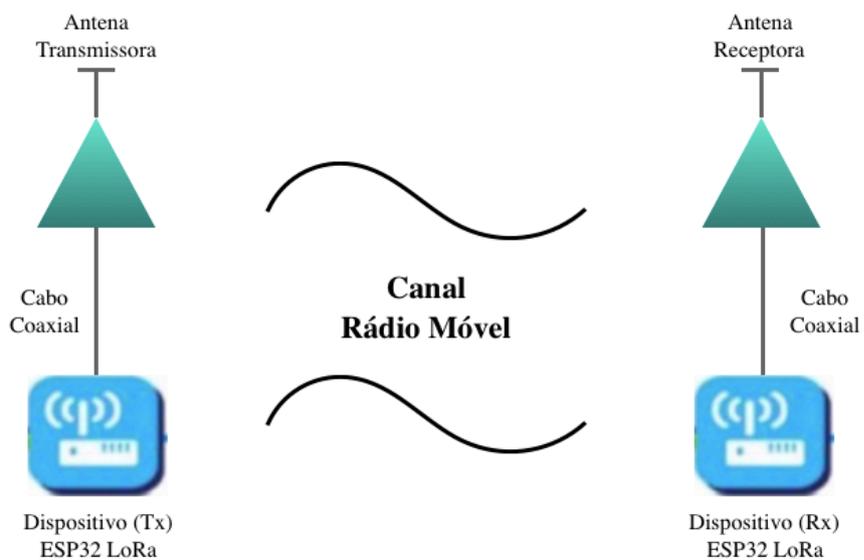


Figura 5.14: Arquitetura do *setup* das medições.

Fonte: Elaborado pelo autor.

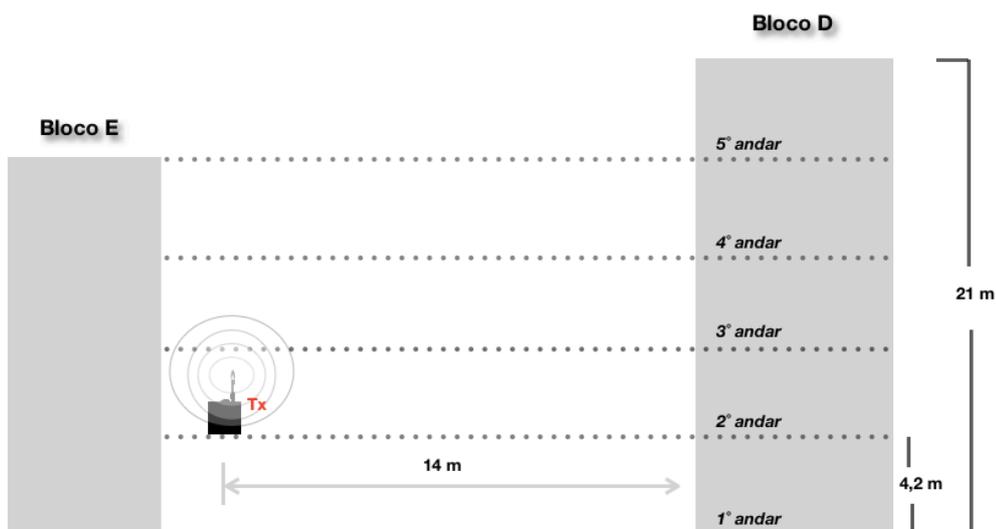


Figura 5.15: Posicionamento da Antena Transmissora.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.16, podemos observar o posicionamento do transmissor, com a linha de visada para o Bloco D do Prédio de Engenharia.

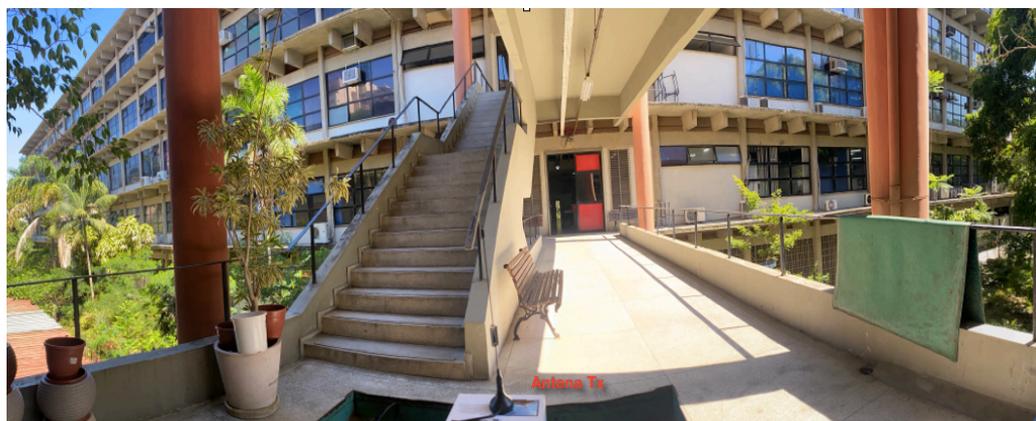


Figura 5.16: Posicionamento da Antena Transmissora com visada para o Bloco D.

Por ocasião das medições em mobilidade, a unidade transmissora foi posicionada no interior do corredor do 4° andar do Bloco D, conforme ilustrado na Figura 5.13, planta baixa do andar supracitado.

Na Tabela IV e na Tabela V estão listados os equipamentos, dispositivos e acessórios usados no sistema de transmissão e recepção, respectivamente.

| Sistema de Transmissão | |
|------------------------------------|-----------------------|
| Equipamentos/ Dispositivos | Especificações |
| Placa Heltec ESP 32 LoRa | 868 a 915 MHz |
| Antena UHF WHIP | Ganho 5 dBi |
| Cabo Coaxial, de 2,7 metros | 50 ohms |

Tabela IV – Lista de equipamentos de Transmissão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

| Sistema de Recepção | |
|------------------------------------|-----------------------|
| Equipamentos/ Dispositivos | Especificações |
| Placa Heltec ESP 32 LoRa | 868 a 915 MHz |
| Antena UHF WHIP | Ganho 5 dBi |
| Cabo Coaxial, de 2,7 metros | 50 ohms |

Tabela V – Lista de equipamentos de Recepção.
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 *Setup* de Transmissão

O sistema de transmissão é composto por um micro controlador ESP32 LoRa, antena monopolo *Whip* e cabo coaxial interligando o dispositivo à antena.

O sistema de transmissão foi posicionado na área externa entre os blocos D e E, conforme observado na Figura 5.16, sendo o sistema montado em um carrinho, onde a antena transmissora é posicionada a 1 metro de altura em relação ao piso.

Nós tópicos seguintes serão descritos, de forma detalhada, os equipamentos utilizados na transmissão do sinal LoRa.

5.2.1.1 Placa ESP32 LoRa

A Placa *Heltec ESP 32 V2 LoRa* é um micro controlador, desenvolvido pela empresa *Heltec Automation*, contendo um *chip* SX1276 e *display* Oled. Este dispositivo é capaz de realizar transmissões sem fio na faixa de frequência 868 a 915 MHz, com um baixo consumo de energia, longo alcance e grande capacidade anti-interferência. Na Tabela VI e Figura 5.17, são apresentadas as especificações técnicas [26][34] e o dispositivo transmissor ESP 32 respectivamente.

| Placa Heltec ESP 32 LoRa | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Especificações Técnicas | |
| Faixa de Suporte | 868 a 915 MHz |
| Faixa Principal | 240 MHz |
| Chip LoRa | SX 1276 |
| Potência Máxima Tx. | 20 dBm |
| Fatores de Espalhamento | 6 a 12 |
| Sensibilidade | (-136 dBm) |
| Taxa de Transferência | 0,018 a 37,5 Kbps |
| Tensão de Alimentação | 2,7 a 3,6 VDC |

Tabela VI – Especificações técnicas do micro controlador ESP 32 LoRa.
 Fonte: Elaborado pelo autor

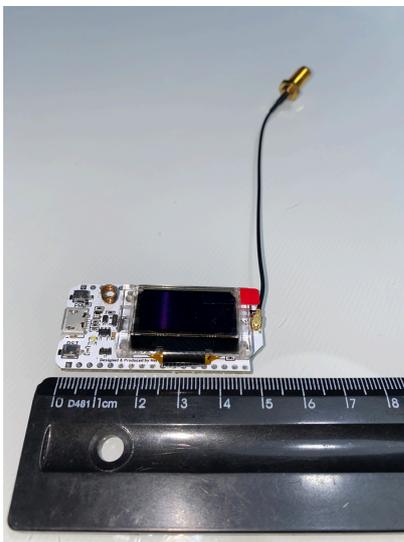


Figura 5.17: Placa *Heltec ESP32 V2 LoRa*.

5.2.1.2 Antena Transmissora

A antena Vertical *WHIP* é omnidirecional e monopolo, projetada especificamente para operar em UHF, conforme a tabela de corte [40] apresentada na Figura 5.18.

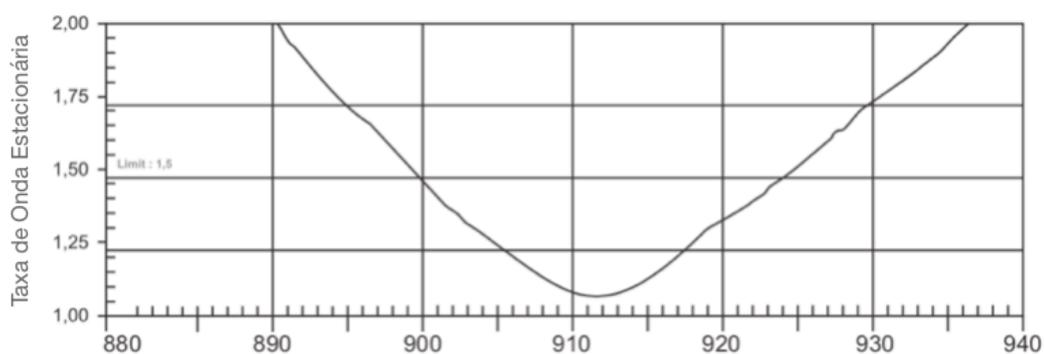


Figura 5.18: Diagrama de radiação da antena *WHIP* 900 MHz.

A antena *Whip* é construída com materiais leves, operando na faixa de frequência de 900 MHz, e fornecendo um ganho máximo de 5 dBi, impedância 50 Ohms e potência de 100 Watts. Na Figura 5.19, é apresentada a antena utilizada durante as medições.

5.2.1.3 Cabo Coaxial

Para realizar as medições, foram necessários o uso de cabo coaxial para ligação do dispositivo ESP32 LoRa à antena de transmissão, sendo o mesmo de 2,7 metros de comprimento e atenuação de 0,5 dB, para a frequência da portadora utilizada.



Figura 5.19: Antena Móvel Vertical WHIP 900 MHz.

5.2.2 Parâmetros de configuração do sistema de transmissão

Os parâmetros configurados no *setup* de transmissão são os seguintes:

- Frequência da portadora: 915 MHz;
- Modulação: *Chirp Spread Spectrum*;
- Potência de Transmissão: 14 dBm;
- Largura de Banda: 125 kHz e 250 kHz, porém a BW de 250 kHz, foi empregada somente para as medições em mobilidade no Andar 4;
- Fatores de Espalhamento (SF): 7, 9, 10 e 12;
- Ganho da antena Tx: 5 dBi; e
- Perda no cabo e conectores: 0,5 dB;

5.2.3 Setup de Recepção

O sistema de recepção também é composto por um micro controlador ESP32 LoRa e todos os dispositivos, semelhantemente ao sistema de transmissão.

O sistema de recepção permaneceu no interior das dependências do Bloco D do Prédio de Engenharia, sendo o mesmo montado sobre um carrinho, pois facilita o deslocamento do sistema de recepção durante as medições e, também com sua antena de recepção posicionada a 1 metro de altura em relação ao piso. Na Figura 5.20, é apresentado os componentes do sistema de recepção.



Figura 5.20: Sistema de recepção.

5.2.3.1 Placa Heltec ESP 32 V2 LoRa

O dispositivo receptor utilizado é similar ao descrito no item 5.2.1.1 deste capítulo.

5.2.3.2 Antena Receptora

A antena WHIP utilizada é similar à descrita no item 5.2.1.2 deste capítulo.

5.2.3.3 Cabo Coaxial

O cabo coaxial utilizado é similar ao descrito no item 5.2.1.3.

5.2.4 Parâmetros configurados na recepção

Os parâmetros configurados no *setup* de recepção são os seguintes:

- Frequência da portadora: 915 MHz;
- Fatores de Espalhamento (SF): 7, 9,10 e 12;
- Ganho da antena Rx: 5 dBi; e
- Perda no cabo e conectores: 0,5 dB;

Capítulo 6

Metodologia, Processamento dos Dados e Resultados

6.1 Metodologia de medição

Primeiramente, para a realização das medições, foi necessário fazer um estudo prévio dos equipamentos e do ambiente onde as medições foram conduzidas, sendo realizadas algumas visitas ao local, com o objetivo de conhecer o ambiente e selecionar as melhores rotas para as campanhas.

O objetivo das campanhas de medições foi a obtenção de dados, com a finalidade de verificar o comportamento do sinal propagado pela tecnologia LoRa, a partir da variabilidade da potência recebida e as perdas de potência durante o percurso causadas pelos fenômenos de propagação.

Na fase de obtenção dos dados, foram empregados dois micro-controladores Heltec ESP 32 V2 LoRa.

A campanha de medições, para as coletas dos dados, consistiu em duas etapas:

- Medições estacionárias; e
- Medições em mobilidade.

6.1.1 Medições estacionárias

Na primeira etapa, o transmissor foi colocado em posição fixa no corredor entre os Blocos D e E do prédio de Engenharia, conforme apresentado na Figura 5.15 e 5.16. A unidade receptora foi posicionada segundo as localizações pontuais explicitadas nas plantas baixas apresentadas nas Figuras 5.8 a 5.13 e, assim, coletar os dados de RSSI em função dos fatores de espalhamento.

Para mensurar as distâncias pontuais entre Tx e Rx, foram realizadas medições com auxílio de uma fita métrica, quando há linha de visada (LOS), porém para as situações que

não há linha de visada (NLOS), as medidas foram obtidas a partir do teorema de Pitágoras, conforme são apresentados nas Figuras 6.1 e 6.2 respectivamente.

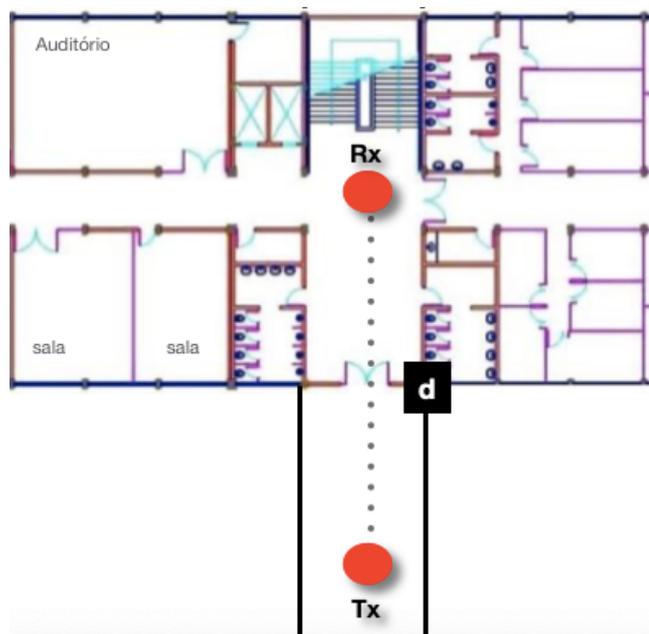


Figura 6.1: Metodologia para medição das distâncias entre Tx-Rx com linha de visada.

Fonte: Elaborado pelo autor

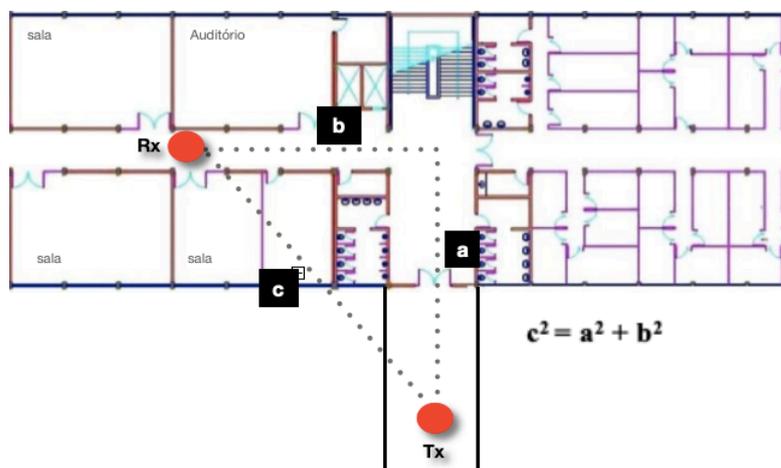


Figura 6.2: Metodologia para medição das distâncias entre Tx-Rx sem linha de visada.

Fonte: Elaborado pelo autor

Para configuração da unidade transmissora, foi implementado um algoritmo utilizando a plataforma Arduino, em linguagem C++, para a realização de envio de pacotes de dados, com a cinemática do envio de 1 pacote em intervalos de tempo de 2 segundos, com a potência

de transmissão de 14 dBm, sendo a unidade em questão configurada conforme especificações descritas no item 5.2.2 deste trabalho.

Ao término de cada campanha de medições, o Tx e o Rx são reconfigurados, sofrendo alteração no fator de espalhamento utilizado.

A unidade receptora foi configurada por um algoritmo, utilizando a plataforma Arduino, em linguagem C++, com o objetivo de receber os pacotes enviados e contabiliza-los, e paralelamente mensurando o nível de RSSI e a relação Sinal Ruído no enlace de comunicação, para cada pacote de dados recebidos. A mesma foi posicionada em posições pré-estabelecidas, conforme apresentados nas Figuras 5.8 a 5.13. As coletas de dados pontuais deram-se por um período de 30 segundos ininterruptos. Neste período, foi possível registrar 15 amostras pontuais para os níveis de RSSI e, com isso, possibilitando o cálculo da média.

6.1.2 Medições em mobilidade

Na segunda etapa, a unidade transmissora foi posicionada na extremidade direita do corredor do 4° andar do Bloco D do prédio de Engenharia e a receptora a uma distância de 1 metro entre antenas, conforme é apresentado na Figura 6.3.

Os sistemas de transmissão e recepção apresentaram configurações similares às estabelecidas para as medições estacionárias, conforme descrito 6.1.1 deste trabalho, entretanto, a diferença para as medições estacionárias foi o de largura de banda de 250 kHz.

As campanhas de medições deram-se através do deslocamento do receptor a uma velocidade média de 1,2 m/s, percorrendo uma distância de 125 metros, ou seja, de um extremo ao outro do corredor, conforme é apresentado na Figura 5.13 deste trabalho.

As medidas dos níveis de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) foram armazenadas e, posteriormente, extraídas através da própria plataforma do *software* Arduino.

Em face das medidas restritivas estabelecidas por ocasião da pandemia causada pelo Covid-19, nos entornos e interior do prédio de Engenharia, ocorreram baixíssimo fluxos de pessoas durante toda a campanha de medições.

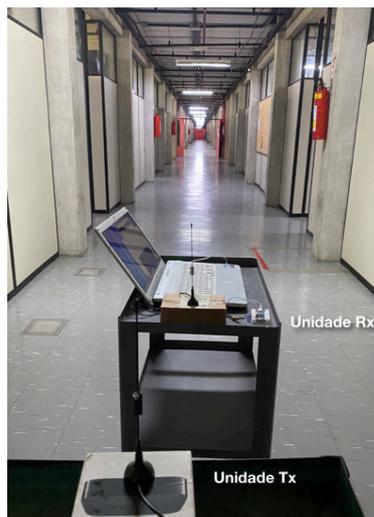


Figura 6.3: Sistemas de transmissão e recepção para as medições em mobilidade.

6.2 Processamento dos Dados

Anteriormente aos dias destinados à realização das campanhas de medições, foram realizadas medições de teste, no intuito de verificar as calibrações dos códigos fontes, equipamentos de testes, também observar o comportamento do sinal na frequência de 915 MHz, conforme os objetivos desejados, sendo considerados os ganhos das antenas, como apresentado nas instruções de seus *datasheets*.

Os dados de indicação da intensidade do sinal recebido (RSSI), fornecidas pelo receptor são medidas fornecidas sem referência conhecida.

Para análise os dados coletados, foram necessários à realização de uma etapa de calibração dos dispositivos.

6.2.1 Teste de referência

Primeiramente, foram realizados testes de referência, com o objetivo de verificar se os níveis de potência recebidos durante o percurso estão condizentes com os dados literais esperados para as medidas no Espaço Livre.

A metodologia para os testes iniciou-se com a separação de 1 metro entre as unidades transmissoras e receptoras e, após o estabelecimento do enlace de comunicação, a unidade transmissora realizou a transmissão de pacotes de dados em um período de 60 segundos.

Após transcorrido o tempo de transmissão, os dispositivos e as distâncias foram aumentados para 2, 3 e 5 metros. Durante a fase da coleta de dados, o *software* Arduino IDE registra as informações da quantidade de pacote de dados enviados, intensidade do sinal recebido (RSSI) e a relação sinal-ruído (*SNR*) no canal rádio móvel.

A partir dos dados de RSSI coletados, foram realizadas simulações experimentais a partir de comparações entre os dados das intensidades do sinal recebido e as medidas de potência para o Espaço Livre.

Na figura 6.4 e 6.5, são apresentados o *layout* dos dispositivos para os testes de referência e o arquivo extraído do *software* Arduino IDE, respectivamente.

O processamento dos dados iniciou-se pelo cálculo das médias de RSSI coletadas durante as medições estacionárias e em mobilidade, as potências recebidas e as perdas durante o percurso.

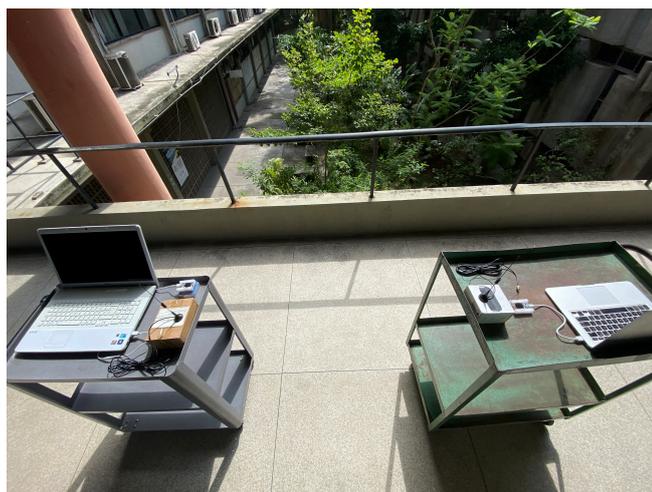


Figura 6.4: *Layout* para os testes de referência.

O cálculo da potência média recebida, em dBm, foi realizado subtraindo o ganho do receptor e somando o fator de correção calculado a partir do teste de referência, ou seja:

$$Pr(dBm) = RSSI(dBm) - Ganho (Rx) + fator\ de\ correção \quad (6.3)$$

Para o cálculo das perdas de potência do sinal durante o percurso ou *path loss* (PL), temos:

$$PL(dB) = EIRP - Pr(dBm) \quad (6.4)$$

Sendo a potência efetiva calculada:

$$EIRP = Pot.(Tx) + Ganho (Tx)$$

$$EIRP = 14 \text{ dBm} + 5 \text{ dBi} \quad (6.5)$$

```

30:55.366 -> Received packet 'Pa ket76' with RSSI: -65' with SNR: 9.50
30:55.506 -> 8
30:57.428 -> Received packet 'Pa ket77' with RSSI: -64' with SNR: 10.00
30:57.569 -> 8
30:59.514 -> Received packet 'Pa ket78' with RSSI: -64' with SNR: 9.25
30:59.655 -> 8
31:01.530 -> Received packet 'Pa ket79' with RSSI: -65' with SNR: 9.50
31:01.670 -> 8
31:03.592 -> Received packet 'Pa ket80' with RSSI: -65' with SNR: 9.25
31:03.733 -> 8
31:05.655 -> Received packet 'Pa ket81' with RSSI: -64' with SNR: 9.50
31:05.795 -> 8
31:07.717 -> Received packet 'Pa ket82' with RSSI: -65' with SNR: 9.50
31:07.858 -> 8
31:09.780 -> Received packet 'Pa ket83' with RSSI: -65' with SNR: 9.25
31:09.920 -> 8
31:11.842 -> Received packet 'Pa ket84' with RSSI: -65' with SNR: 10.00
31:11.983 -> 8
31:13.904 -> Received packet 'Pa ket85' with RSSI: -65' with SNR: 9.50
31:13.998 -> 8
31:15.920 -> Received packet 'Pa ket86' with RSSI: -67' with SNR: 9.50
31:16.061 -> 8
31:17.963 -> Received packet 'Pa ket87' with RSSI: -65' with SNR: 9.75
31:18.123 -> 8
31:20.034 -> Received packet 'Pa ket88' with RSSI: -64' with SNR: 9.25
31:20.174 -> 8
31:22.101 -> Received packet 'Pa ket89' with RSSI: -63' with SNR: 9.25
31:22.241 -> 8
31:24.163 -> Received packet 'Pa ket90' with RSSI: -63' with SNR: 12.00
31:24.304 -> 8
31:26.226 -> Received packet 'Pa ket91' with RSSI: -64' with SNR: 9.25
31:26.366 -> 8

```

Figura 6.5: Arquivo de Dados extraídos do *software* Arduino IDE.

Para a determinação do fator de correção ou *offset*, foram realizadas simulações experimentais a partir de comparações dos dados coletados de potência recebida e, posteriormente, os valores de perda no percurso obtidos do enlace entre dispositivos LoRa e os valores teóricos no Espaço Livre para as distâncias de separação de 1, 2, 3 e 5 metros.

O cálculo do fator de correção foi estabelecido a partir da Equação 6.6.

$$Fator \ de \ correção \ (dB) = PL \ (dB) - PL \ (Espaço \ Livre) \quad (6.6)$$

Após simulações experimentais, foi estabelecido o valor do fator de correção ou *offset* de 46. Este valor estabelece uma compensação a ser acrescida aos valores de RSSI coletados para obter o valor da potência recebida em dBm. Importante salientar que valores de compensação para o RSSI encontrados é bem condizente com valores de RSSI(*offset*) encontrados na literatura [41].

Verificou-se que para o valor de *offset* = 46, apresenta que a potência de transmissão irradiada para SF 7 é igual a 19 dBm, coincidindo com os valores *EIRP*. Os mesmos testes foram realizados para os SF 9, 10 e 12, verificou-se que o equipamento altera automaticamente a potência de transmissão de acordo com o SF (15, 15 e 12 dBm respectivamente).

De acordo com a tecnologia LoRa e a técnica de modulação de espalhamento espectral, a diminuição da potência de transmissão pode ser explicada, pois o aumento do SF influencia em uma diminuição da densidade espectral de potência [28][42].

Os processamentos dos dados foram registrados em planilhas que contém os dados de RSSI, potência recebida, perda no percurso e os valores de ajuste empregando os modelos de predição apresentados no capítulo 4 desse trabalho. Na Tabela VII são apresentados os dados processados para o 2° andar.

| 2° ANDAR | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|-------|-------------------|-------------------------|--------|---------|---------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------|---------------------|-------------------|
| Médias de RSSI em função dos Fatores de Espalhamento | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RSSI (dBm) | | | | DISTÂNCIA (Tx-Rx) | Potência Recebida (dBm) | | | | DISTÂNCIA (Tx-Rx) | Perdas de Potência (dB) | | | | Modelo FRIIS | Modelo LOG DISTANCE | Modelo ITU R.1238 |
| SF 7 | SF 9 | SF 10 | SF 12 | | SF - 7 | SF - 9 | SF - 10 | SF - 12 | | Path Loss - SF7 | Path Loss - SF9 | Path Loss - SF10 | Path Loss - SF12 | | | |
| 53 | 70 | 60 | 66 | 1,5 | -12 | -29 | -19 | -25 | 1,5 | 31 | 44 | 34 | 35,19024706 | 41,28782216 | 35,51624404 | |
| 59 | 67 | 67 | 72 | 4,5 | -18 | -26 | -26 | -31 | 4,5 | 37 | 41 | 41 | 43 | 44,73267216 | 52,90572471 | 47,13414659 |
| 55 | 70 | 72 | 69 | 7,4 | -14 | -29 | -31 | -28 | 7,4 | 33 | 44 | 46 | 40 | 49,05305628 | 58,16579238 | 52,39421426 |
| 58 | 73 | 74 | 84 | 10,5 | -17 | -32 | -33 | -43 | 10,5 | 36 | 47 | 48 | 55 | 52,09220786 | 61,86595943 | 56,09438131 |
| 59 | 74 | 72 | 77 | 14,1 | -18 | -33 | -31 | -36 | 14,1 | 37 | 48 | 46 | 48 | 54,65280413 | 64,98348539 | 59,21190727 |
| 69 | 74 | 73 | 82 | 16,5 | -28 | -33 | -32 | -41 | 16,5 | 47 | 48 | 47 | 53 | 56,01810077 | 66,64573404 | 60,87415592 |
| 79 | 80 | 79 | 83 | 19 | -38 | -39 | -38 | -42 | 19 | 57 | 54 | 53 | 54 | 57,2434939 | 68,13765018 | 62,36607206 |
| 69 | 81 | 79 | 90 | 22 | -28 | -40 | -38 | -49 | 22 | 47 | 55 | 53 | 61 | 58,5168755 | 69,68792228 | 63,91641416 |
| 75 | 88 | 86 | 85 | 24,6 | -34 | -47 | -45 | -44 | 24,6 | 53 | 62 | 60 | 56 | 59,48712402 | 70,86926986 | 65,09769174 |
| 74 | 84 | 99 | 92 | 27,3 | -33 | -43 | -58 | -51 | 27,3 | 52 | 58 | 73 | 63 | 60,39167482 | 71,97056046 | 66,19898234 |
| 75 | 87 | 87 | 91 | 30 | -34 | -46 | -46 | -50 | 30 | 53 | 61 | 61 | 62 | 61,21084698 | 72,96790255 | 67,19632443 |
| 81 | 92 | 88 | 87 | 29,8 | -40 | -51 | -47 | -46 | 29,8 | 59 | 66 | 62 | 58 | 61,15274716 | 72,89716603 | 67,12558791 |
| 78 | 86 | 82 | 94 | 27,6 | -37 | -45 | -41 | -53 | 27,6 | 56 | 60 | 56 | 65 | 60,48660352 | 72,08613615 | 66,31455803 |
| 90 | 89 | 94 | 84 | 25 | -49 | -48 | -53 | -43 | 25 | 68 | 63 | 68 | 55 | 59,62722205 | 71,03983921 | 65,26826109 |
| 87 | 92 | 95 | 93 | 27 | -46 | -51 | -54 | -52 | 27 | 65 | 66 | 69 | 64 | 60,29569716 | 71,85370766 | 66,08212954 |
| 90 | 99 | 93 | 89 | 28,1 | -49 | -58 | -52 | -48 | 28,1 | 68 | 73 | 67 | 60 | 60,64254828 | 72,27599889 | 66,50442077 |
| 94 | 101 | 95 | 93 | 31,7 | -53 | -60 | -54 | -52 | 31,7 | 72 | 75 | 69 | 64 | 61,68960713 | 73,55079304 | 67,77921492 |
| 92 | 96 | 95 | 100 | 34 | -51 | -55 | -54 | -59 | 34 | 70 | 70 | 69 | 71 | 62,29800022 | 74,29151163 | 68,51993351 |
| 94 | 102 | 98 | 104 | 36,1 | -53 | -61 | -57 | -63 | 36,1 | 72 | 76 | 72 | 75 | 62,81856592 | 74,92530037 | 69,15372225 |
| 100 | 93 | 96 | 98 | 29,7 | -59 | -52 | -55 | -57 | 29,7 | 78 | 67 | 70 | 69 | 61,12355087 | 72,86161954 | 67,09004142 |
| 86 | 94 | 97 | 94 | 31,2 | -45 | -53 | -56 | -53 | 31,2 | 64 | 68 | 71 | 65 | 61,55151376 | 73,38266436 | 67,61108625 |
| 88 | 96 | 93 | 94 | 32,3 | -47 | -55 | -52 | -53 | 32,3 | 66 | 70 | 67 | 65 | 61,85247233 | 73,74908142 | 67,9775033 |
| 86 | 98 | 94 | 94 | 34,1 | -45 | -57 | -53 | -53 | 34,1 | 64 | 72 | 68 | 65 | 62,32350946 | 74,32256913 | 68,55099101 |
| 84 | 95 | 95 | 91 | 36,1 | -43 | -54 | -54 | -50 | 36,1 | 62 | 69 | 69 | 62 | 62,81856592 | 74,92530037 | 69,15372225 |
| 90 | 100 | 94 | 98 | 37 | -49 | -59 | -53 | -57 | 37 | 68 | 74 | 68 | 69 | 63,03245636 | 75,18571198 | 69,41413386 |
| 95 | 100 | 98 | 93 | 38,2 | -54 | -59 | -57 | -52 | 38,2 | 73 | 74 | 72 | 64 | 63,30968914 | 75,52324289 | 69,75166477 |
| 99 | 94 | 97 | 101 | 40,4 | -58 | -53 | -56 | -60 | 40,4 | 77 | 68 | 71 | 72 | 63,79604918 | 76,11538624 | 70,34380812 |
| 86 | 95 | 99 | 90 | 27 | -45 | -54 | -58 | -49 | 27 | 64 | 69 | 73 | 61 | 60,29569716 | 71,85370766 | 66,08212954 |

Tabela VII: Dados coletados e processados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 Resultados

Neste tópico do trabalho, serão apresentados os resultados obtidos após o processamento dos dados durante as campanhas de medições estacionárias e em mobilidade. Foram realizadas duas campanhas de medições, a primeira num ambiente aberto com o objetivo de

calibrar os dispositivos e a segunda, visando analisar o comportamento do sinal num ambiente *indoor*.

A partir do processamento dos dados, foi possível obter conclusões parciais a respeito das questões sistêmicas do desempenho da tecnologia LoRa, no que tange à análise e caracterização da cobertura para ambientes *indoor* na frequência de 915 MHz.

Foram realizadas análises dos gráficos a partir das variações das intensidades do sinal propagado, de maneira a avaliar o comportamento das perdas de propagação durante o percurso (*path loss*). A partir dos dados coletados, foram determinados os coeficientes de decaimento em função da distância e a perda de penetração entre andares. Finalmente, é realizado o comparativo dos dados coletados com os modelos de predição de Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238.

6.3.1 Medições em Espaço Livre

O objetivo das medições foram verificar o comportamento do sinal, avaliar e calibrar o sistema de medições no Espaço Livre, com linha de visada direta entre Tx e Rx a partir da obtenção dos dados de perda média no percurso e a definição do coeficiente de decaimento.

As medições foram realizadas no estacionamento do Campus Praia Vermelha na UFF, conforme é apresentado na Figura 6.28. Inicialmente, foi estabelecido uma separação de 1 metro entre dispositivos, para coletar o valor de RSSI de referência em função da distância. Em cada ponto 60 segundos de coleta dos dados de RSSI, para posteriormente calcular o valor médio. Foram realizadas medições ao longo da rota de 100 metros para cada fator de espalhamento.

Após o processamento dos dados, a Figura 6.6 apresenta a perda no percurso para cada um dos fatores de espalhamento.

Após análise dos resultados, verificou-se que no ponto de inicial das medições se observou uma diferença entre os valores de potência recebida, que os autores acreditam tenha ocorrido pelo fato das antenas terem um diagrama de radiação muito estreito verticalmente, e o terreno onde as medições foram realizadas são bastante irregulares ocasionando, assim, um desalinhamento dos máximos das antenas. As variabilidades dos valores da perda no percurso apresentam comportamentos equivalente à curva de atenuação de perdas previstas para o modelo em Espaço Livre.

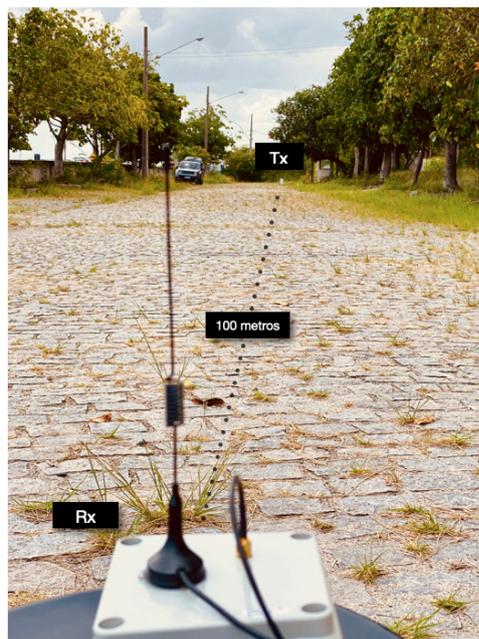


Figura 6.6: Ambiente das medições em ambiente *outdoor*.

Adicionalmente, foram calculados os valores absolutos dos coeficientes de decaimento “N” para o Espaço Livre. O intuito da determinação dos coeficientes de decaimento para ambientes *outdoor*, foi compará-los aos obtidos a partir das medições realizadas em ambiente *indoor*. Na tabela VIII, são apresentados os valores dos coeficientes de decaimento “N” no espaço livre em função da distância. Os valores apresentam valores bem próximos aos coeficientes calculados a partir dos dados coletados durante as medições em ambiente *indoor*.

| Valores dos Coeficientes de decaimento "N" no Espaço Livre | |
|---|--------------|
| SF-7 | 2,382 |
| SF-9 | 2,312 |
| SF-10 | 2,49 |
| SF-12 | 2,325 |

Tabela VIII – Coeficientes de decaimento “N” no Espaço Livre.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2 Comportamento do sinal em ambiente *indoor*

Após o processamento dos dados, foram realizadas análises gráficas da potência recebida em ambiente *indoor*.

Nas Figuras 6.6 a 6.10, são apresentados os gráficos de potência recebida, em função dos fatores de espalhamento para um único andar, e também são especificados os locais dos respectivos pontos de coleta.

Dos dados, podemos concluir que os melhores resultados de potência recebida se encontram na área do *hall*, área onde ficam localizadas as escadas de acesso aos andares. Este comportamento pode ser observado na Figura 6.7, aproximadamente na distancia de 28 metros. Para a Figura 6.8 esse comportamento pode ser observado ao redor da distância 30 cabe ressaltar que a antena transmissora foi colocada no segundo andar e o receptor foi quem se deslocou pelos andares. O reforço do sinal nesta localização pode ser atribuído as componentes de multipercurso oriundo das escadas do prédio da engenharia (Bloco D).

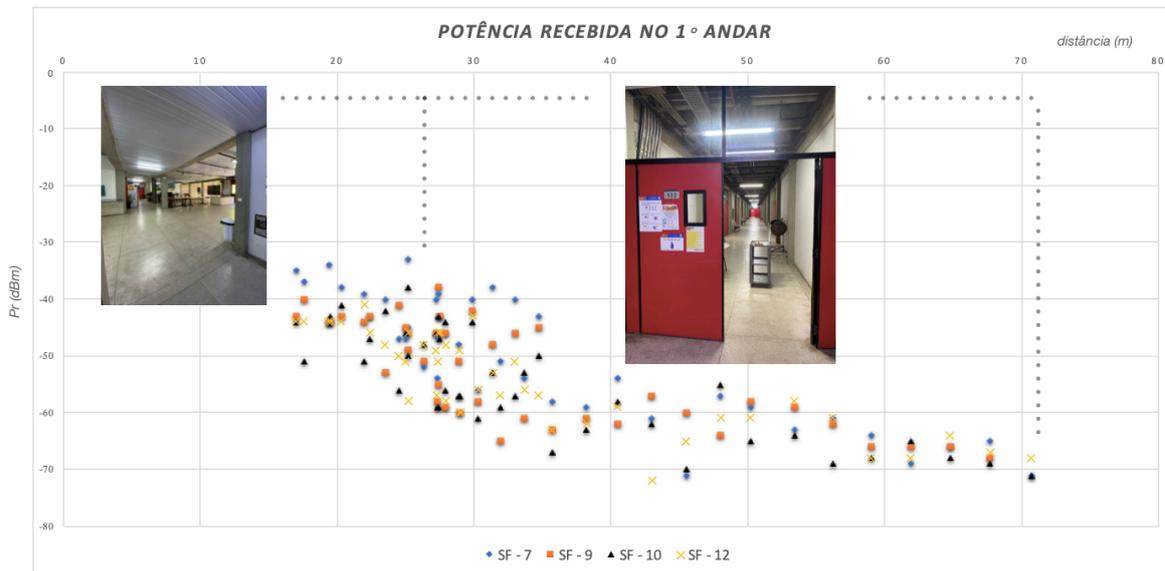


Figura 6.7: Potências recebidas para as medições estacionárias no 1º andar.

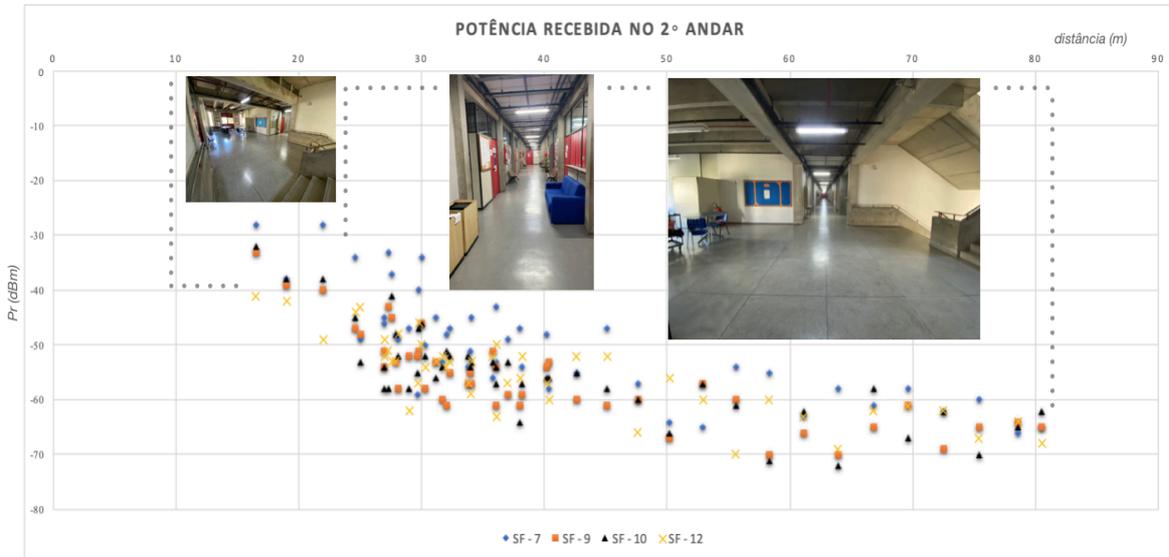


Figura 6.8: Potências recebidas para as medições estacionárias no 2º andar.

A respeito das análises iniciais, conclui-se que a cobertura do sinal pode atingir maiores áreas ou andares em espaços fechados, pois considerando o enlace de comunicação em condições LOS e NLOS, foram explorados ao máximo os espaços físicos do ambiente das medições e não foi possível explorar a máxima sensibilidade de recepção de acordo com as especificações técnicas para a tecnologia LoRa, que são na ordem de -136 dBm [14][26].

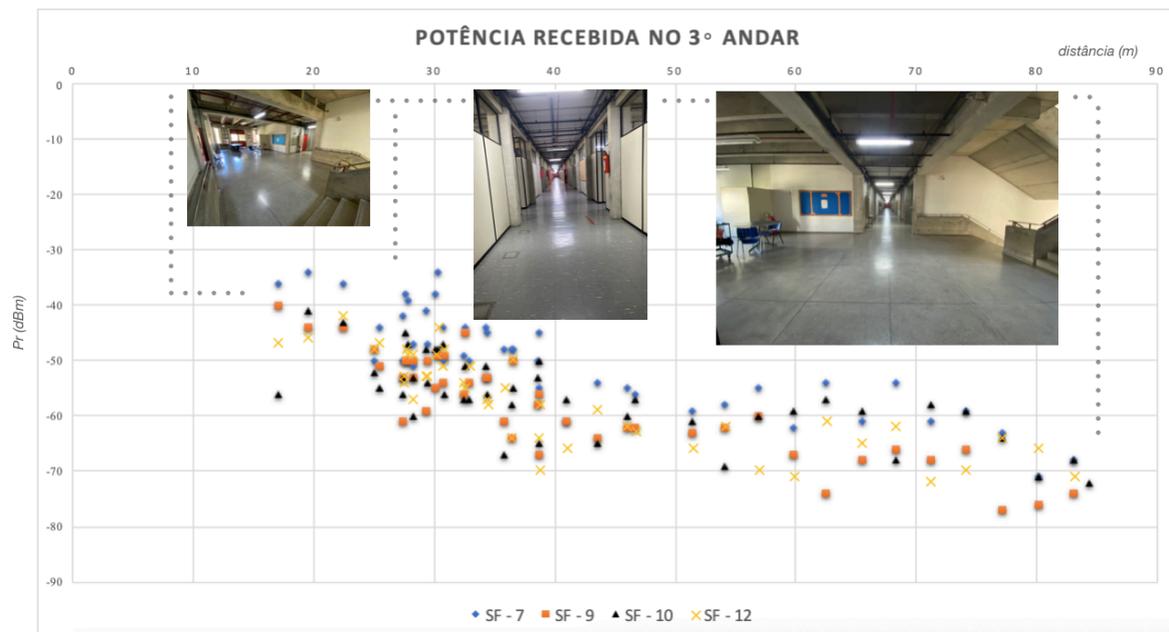


Figura 6.9: Potências recebidas para as medições estacionárias no 3º andar.

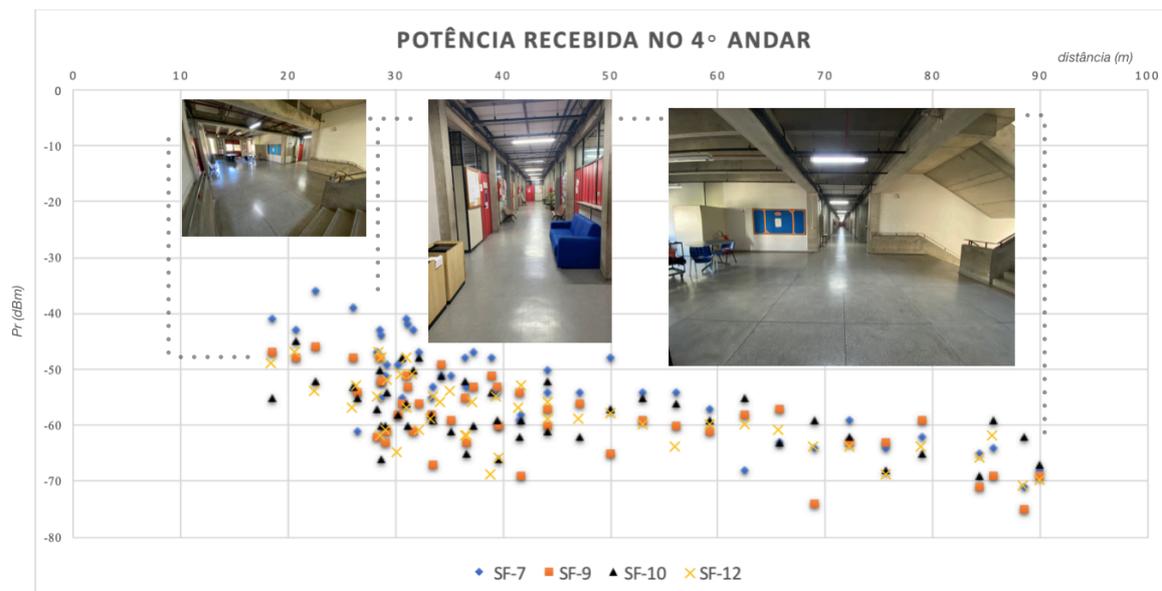


Figura 6.10: Potências recebidas para as medições estacionárias no 4º andar.



Figura 6.11: Potências recebidas para as medições estacionárias no 5º andar.

Nas Figura 6.12 e 6.13, são apresentados os gráficos de perdas potência recebida durante o percurso para as medições em mobilidade em função dos SF's e das larguras de banda (BW) de 125 a 250 kHz. É perceptível que os níveis de atenuação do sinal, no enlace de comunicação, apresentam perdas iniciais por propagação considerável entre os SF 7 e 12. As variações do sinal são justificadas porque o sinal transmitido para o SF 12 permanece mais tempo no ar (ToA) em relação ao SF 7, logo proporcionando maiores atenuações do sinal. Entretanto, os níveis de perda no percurso apresentam menores atenuações em comparação aos dados obtidos às medições estacionárias, fato esse justificado pois o canal

de propagação age como um canalizador do sinal propagado e, conseqüentemente, reforça o sinal recebido.

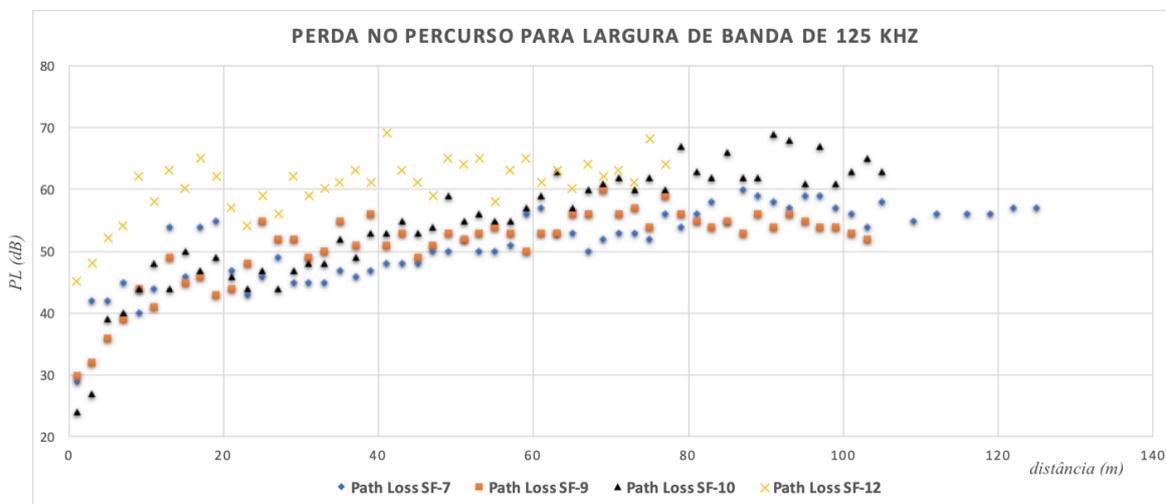


Figura 6.12: Perda no percurso para as medições em mobilidade na BW 125 kHz.

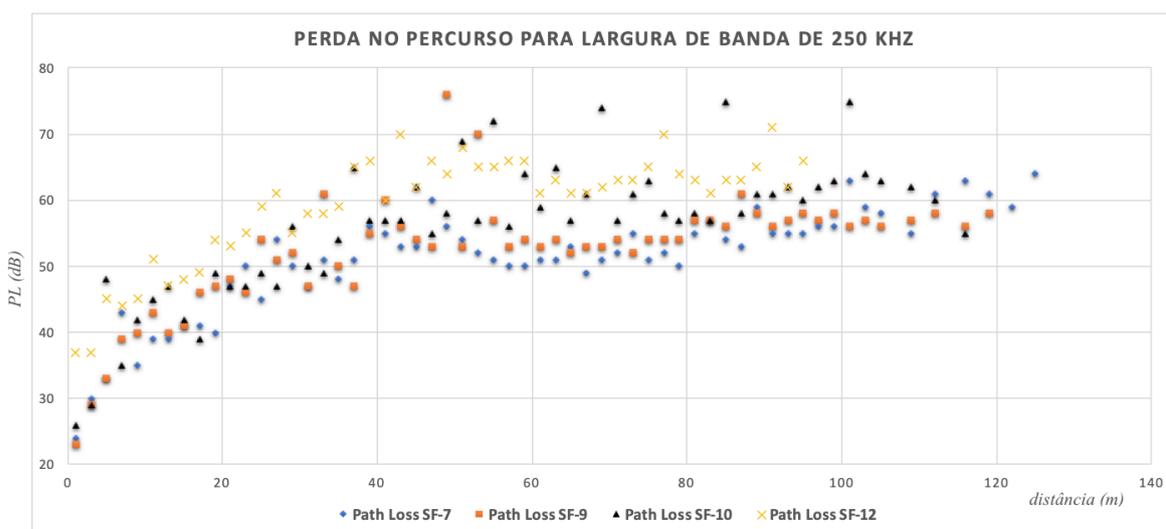


Figura 6.13: Perda no percurso para as medições em mobilidade na BW 250 kHz.

A partir da análise dos resultados, são observadas atenuações dos níveis de potência, de uma forma geral, com a variação do SF, ou seja, quanto maior o SF empregado, maior as atenuações dos níveis de potência.

Em face da diferença de *layout* do 1° andar, conforme apresentado na Figura 5.8 – Planta baixa do 1° andar, inicialmente as potências recebidas não sofrem atenuações como foi verificado para os demais andares, fato justificado pela configuração do *hall* e a disposição da parede do mesmo e uma maior influência das componentes de multipercurso. Na Figura

6.14, pode ser observado o prédio de Engenharia. Por fim, excluindo algumas peculiaridades observadas no 1° andar, as variações dos níveis de potência recebida apresentam comportamentos bem similares de atenuação.



Figura 6.14: Prédio de Engenharia da UFF.

A partir do cálculo da potência recebida e o emprego dos conceitos teóricos apresentados nas equações 6.3 a 6.6 deste trabalho, foram calculadas as perdas da potência do sinal durante o percurso (Perda no Percurso – *PL*).

O conceito teórico para a análise e a geração das curvas de atenuação, foram baseados na equação 4.9 deste trabalho, também utilizando as configurações empregadas nos sistemas de transmissão e recepção.

Nas Figuras 6.15 a 6.18, são apresentados os gráficos comparativos de perda no percurso em função do SF e das perdas para o espaço livre.

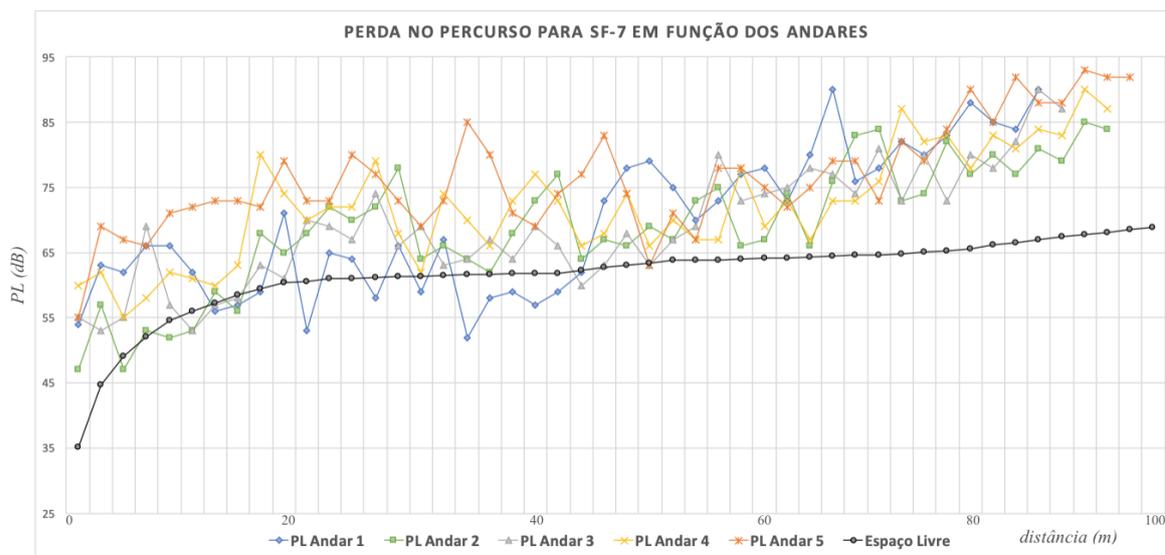


Figura 6.15: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-7.

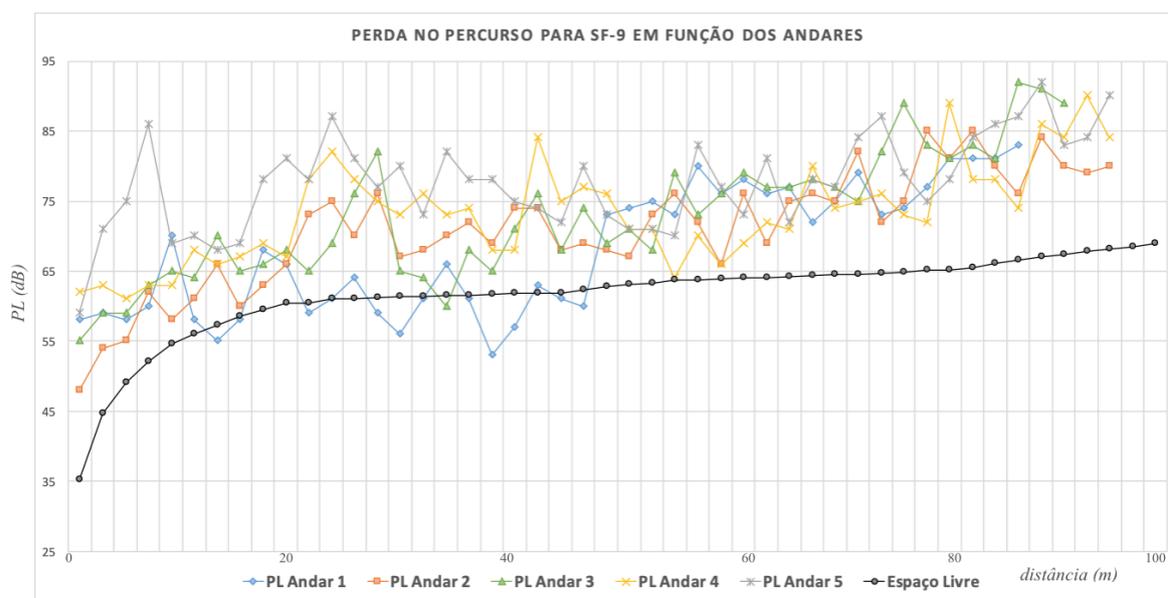


Figura 6.16: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-9.

Para os andares 2, 3, 4 e 5, as curvas de perda no percurso apresentaram comportamentos similares para as perdas de potência e seguindo a mesma tendência da curva de perdas previstas para o Espaço Livre.

Para o 1º andar, os pontos de medição do 11 a 20 apresentaram níveis de perda inferiores em relação à perda de potência prevista para o Espaço Livre. Tal fato deu-se porque nestes pontos de medição, localizados no *hall* do andar em questão, concluindo haver um reforço do sinal oriundo do vão das escadas no bloco D. Em distâncias posteriores, este fenômeno se deve porque o sinal propagado incide no receptor a partir da lateral do prédio, onde as

janelas são amplas e com pouca obstrução. Nas Figuras 5.16 e 6.17, são apresentados o posicionamento da unidade transmissora em relação ao Bloco D do prédio de Engenharia e a diferença entre as paredes de concreto do 1º andar em relação aos demais andares.

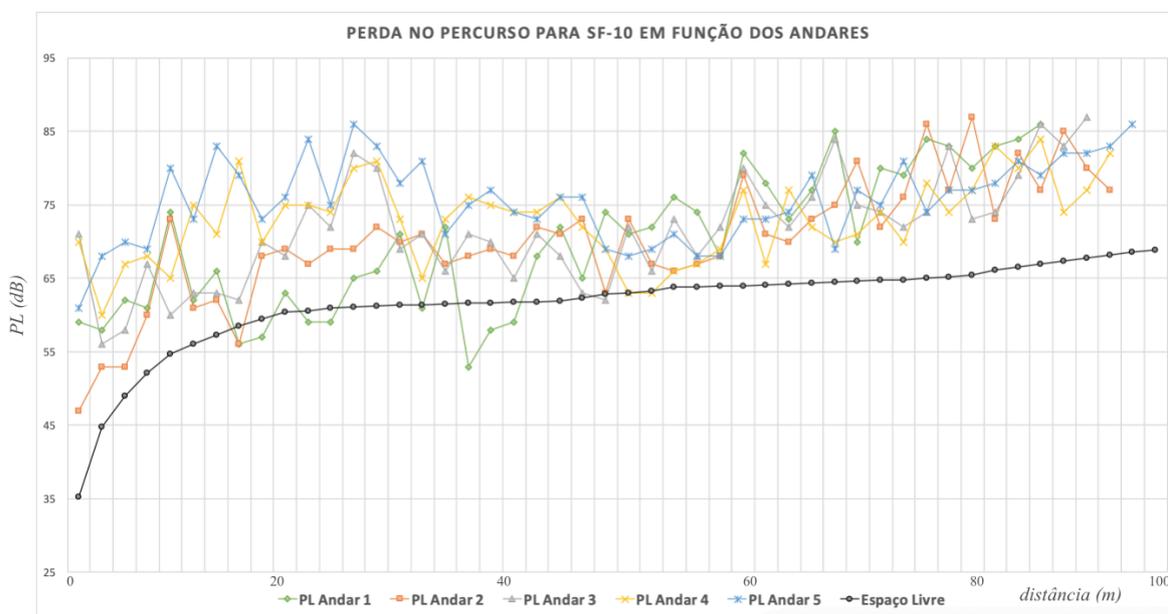


Figura 6.17: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-10.

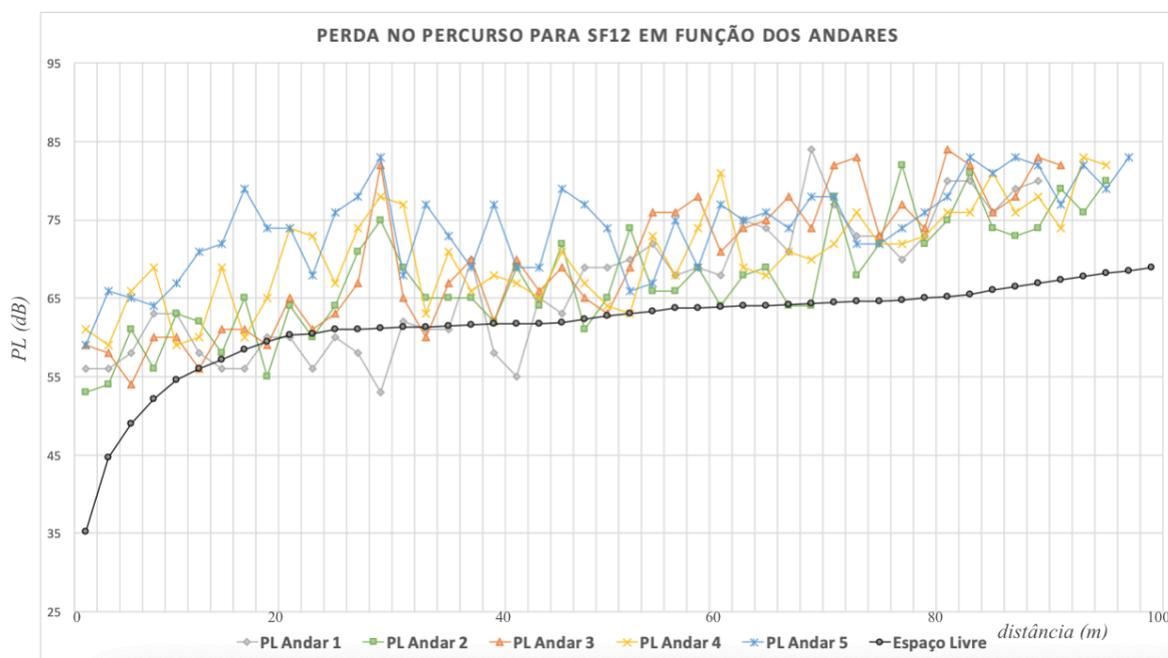


Figura 6.18: Perdas de potência do sinal durante o percurso para o SF-12.

6.3.3 Coeficientes de decaimento “N” para as medições estacionárias

Após a determinação dos dados de perda no percurso, os mesmos foram inseridos na ferramenta *Curve Fitting Tools (CF Tools)* do *software Matlab*, então possibilitando a extração dos valores dos coeficientes de decaimento “N” em função da distância para o ambiente *indoor*.

A Tabela IX apresenta os valores dos coeficientes de decaimento “N” em função dos SF’s e o respectivo posicionamento da unidade receptora em relação ao transmissor.

| Valores dos Coeficientes de Decaimento "N" para Andares (Modelo de Predição Log-Distance) | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Andar 1 | Andar 2 | Andar 3 | Andar 4 | Andar 5 |
| SF-7 | 2,54 | 2,4 | 2,38 | 2,53 | 2,77 |
| SF-9 | 2,43 | 2,52 | 2,63 | 2,59 | 2,83 |
| SF-10 | 2,56 | 2,47 | 2,51 | 2,55 | 2,68 |
| SF-12 | 2,33 | 2,29 | 2,46 | 2,41 | 2,6 |

Tabela IX – Coeficientes de decaimento “N”.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos no 5° andar para o SF 7, apresentam um aumento de 13% no coeficiente “N” em comparação aos valores medidos no 2° andar para o mesmo SF. O aumento considerável pode ser explicado devido à presença das mais obstruções como paredes, portas, janelas e pavimentos, e a distância de separação entre Tx-Rx, entretanto, os valores dos coeficientes “N” apresentaram uma variação de aproximadamente (– 0,8 até 13%), valores esses registrados para o SF-7 no 5° andar e SF-9 no 5° andar respectivamente. Assim, a partir dos valores relativos do coeficiente “N” apresentados na Tabela IX, foram calculados os valores médios dos coeficientes de decaimento “N” para perdas no percurso entre andares.

Na Tabela X, são apresentados os valores médios dos coeficientes “N” para cada andar.

Adicionalmente, foram calculados os coeficientes de decaimento “N” para o transmissor posicionado na área externa do 4° andar. Essas medições tiveram o intuito de comparar a variação do valor absoluto do coeficiente “N” para a unidade transmissora posicionada no 2° e 4° andares.

| Valores médios dos Coeficientes de Decaimento "N" para Andares | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Andar 1 | Andar 2 | Andar 3 | Andar 4 | Andar 5 |
| SF-7 | 2,485 | 2,435 | 2,485 | 2,54 | 2,725 |
| SF-9 | | | | | |
| SF-10 | | | | | |
| SF-12 | | | | | |

Tabela X – Valores médios dos coeficientes de decaimento “N”.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as análises dos valores do coeficiente “N”, extraídos a partir de simulações experimentais realizadas no *Matlab*, os resultados apresentaram uma variação no valor absoluto de 0,01% entre coeficientes.

Na Tabela XI, são apresentados os valores médios do coeficiente “N” no andar 4.

| Valores dos Coeficiente de Decaimento "N" no 4° Andar | | |
|--|----------------------|----------------------|
| | Tx no Andar 2 | Tx no Andar 4 |
| SF-7 | 2,53 | 2,62 |
| SF-9 | 2,59 | 2,39 |
| SF-10 | 2,55 | 2,42 |
| SF-12 | 2,41 | 2,77 |
| VALOR MÉDIO | 2,54 | 2,52 |

Tabela XI – Coeficientes de decaimento “N” para o Tx posicionado no 2° e 4° andares.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Importante ressaltar que os valores dos coeficientes de decaimento “N” são equivalentes aos encontrado na literatura [36], conforme apresentados na Tabela I desse trabalho.

Complementarmente, na Figura 6.19, são apresentados os comportamentos gráficos dos valores dos coeficientes de decaimento “N” em função dos conceitos teóricos para o modelo de predição *Log-Distance*.

Após os cálculos dos valores dos coeficientes “N”, foram calculados os valores dos coeficientes de decaimento “N” para perda no percurso em função das formulações teóricas para o modelo de predição ITU-R P.1238.

Os resultados obtidos são equivalentes aos encontrados na literatura [38], conforme apresentados na Tabela II desse trabalho.

Na Tabela XII, são apresentados os valores absolutos para os coeficientes “N” entre andares.

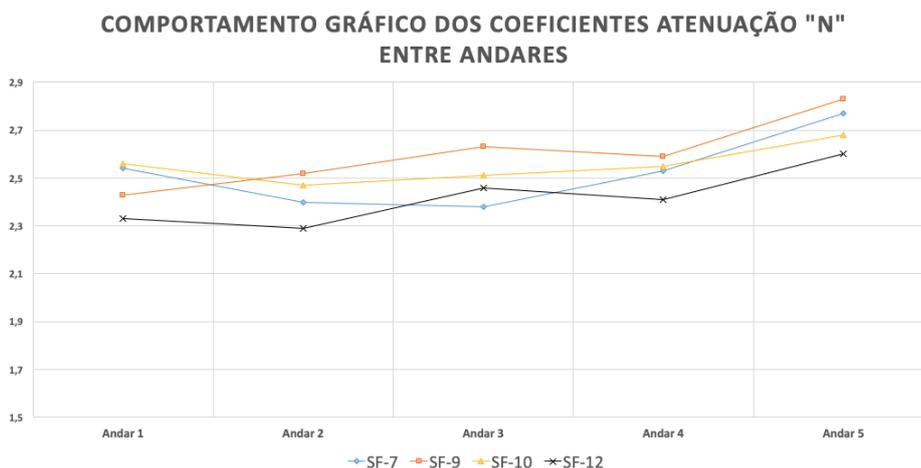


Figura 6.19: Comportamento gráfico dos coeficientes de decaimento “N”.

| Valores médios dos Coeficientes de Decaimento "N" (Modelo de Predição da ITU-R P. 1238) | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Andar 1 | Andar 2 | Andar 3 | Andar 4 | Andar 5 |
| SF-7 | 24,85 | 24,35 | 24,85 | 25,4 | 27,25 |
| SF-9 | | | | | |
| SF-10 | | | | | |
| SF-12 | | | | | |

Tabela XII – Valores médios para o coeficiente de decaimento “N” para modelo ITU-R P.1238.

6.3.4 Coeficientes de decaimento “N” para as medições em mobilidade

Neste tópico, após o processamento dos dados, foram obtidos os coeficientes de decaimento “N” para perdas no percurso provenientes das medições em mobilidade nas larguras de banda (BW) de 125 e 250 kHz. As medições foram realizadas nas dependências internas do corredor 4º andar do prédio de Engenharia, conforme apresentado no capítulo 5 desse trabalho.

A metodologia para cálculo dos coeficientes segue as mesmas diretrizes observadas à obtenção dos coeficientes de decaimento para as medições estacionárias. Adicionalmente, em posse dos resultados dos coeficientes de decaimento “N” para perda durante o percurso para as medições em mobilidade, os mesmos foram empregados e, posteriormente, utilizados nos ajustes gráficos para os modelos de predição *Log-Distance* e ITU-R P.1238.

Após análise dos resultados, verificou-se que:

Os valores registrados nas Tabelas XIII e XIV são condizentes aos encontrados na literatura [36][38], apresentando uma variação na ordem de 1,6 a 1,8 e 9 a 11 em ambientes *indoor* com linha de visada entre Tx e Rx para os modelos de predição *Log-Distance* e ITU-R P.1238, respectivamente.

Os coeficientes de decaimento “N” apresentam variações em função do emprego de largura de banda diferentes. O emprego da *BW* de 250 kHz apresentou maiores valores de coeficientes “N”.

Nas Tabelas XIII e XIV, são apresentados os valores dos coeficientes de decaimento “N” para as medições em mobilidade.

| Valores médios dos Coeficientes de Decaimento "N" (Modelo de Predição Log-Distance) | | |
|--|----------------|----------------|
| Largura de Banda | 125 kHz | 250 kHz |
| SF-7 | 1,197 | 1,214 |
| SF-9 | 1,223 | 1,298 |
| SF-10 | 1,475 | 1,538 |
| SF-12 | 1,891 | 1,779 |
| Valor Médio | 1,349 | 1,418 |

Tabela XIII – Coeficientes de decaimento “N” para *BW* 125 e 250 kHz para modelo *Log-Distance*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

| Valores médios dos Coeficientes de Decaimento "N" (Modelo de Predição ITU-R P.1238) | | |
|--|----------------|----------------|
| Largura de Banda | 125 kHz | 250 kHz |
| SF-7 | 11,97 | 12,14 |
| SF-9 | 12,23 | 12,98 |
| SF-10 | 14,75 | 15,38 |
| SF-12 | 18,91 | 17,79 |
| Valor Médio | 13,49 | 14,18 |

Tabela XIV – Coeficientes de decaimento “N” para BW 250 para modelo ITU-R P.1238.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.5 Coeficiente de perdas por penetração “B” entre andares

Nesta seção, será apresentado o cálculo da perda por penetração entre andares.

O cálculo, em função dos andares, foi denominado com a nomenclatura B . Para tal, foi utilizado o modelo ITU-R P.1238 (equação 6.6), onde o parâmetro B foi ajustado a partir das medições. O valor de N na equação foi obtido dos valores ajustados nas medições no segundo andar, onde as antenas transmissora e receptora se encontram no mesmo andar, conforme apresentado na Tabela VIII.

Na equação 6.6, é apresentada a expressão matemática que balizou os cálculos das perdas por penetração.

$$L_{total} (dB) = L_o + 10 * N * \log(d) + (B, 2B, 3B, \dots, nB)[38] \quad (6.6)$$

L_{total} – Perdas de propagação em dB;

L_o – perda de propagação a um metro da antena irradiante em dB;

N – Coeficiente de decaimento;

d – Distância entre Tx e Rx; e

B – Coeficiente de perda por penetração.

Os resultados obtidos foram provenientes de simulação experimental utilizando a ferramenta *CFTools* do *software MatLab*. No mesmo, foram inseridos os dados de perda no

percurso para todos os fatores de espalhamento utilizados, sendo observados os princípios contidos no modelo da recomendação da ITU-R P.1238.

Na Tabela XV, são apresentados os valores médios, máximos e mínimos do coeficiente de perdas por andares atravessados “B”. Os valores registrados na mesma são coerentes aos encontrados na literatura [38] para coeficientes de penetração para perda por andares atravessados.

| Perda de Penetração por Andar | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------|---------|--------|-----------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|-------|--------|
| Valor | Andar 1 | | | Andar 3 | | | Andar 4 | | | Andar 5 | | |
| | Coeficiente "B" | | | Coeficiente "B" | | | Coeficiente "2B" | | | Coeficiente "3B" | | |
| | Mínimo | Médio | Máximo | Mínimo | Médio | Máximo | Mínimo | Médio | Máximo | Mínimo | Médio | Máximo |
| SF -7 | -8,634 | 15,57 | 39,78 | -24,96 | -7,307 | 10,35 | 1,283 | 17,66 | 34,04 | 13,96 | 19,32 | 24,68 |
| SF -9 | -3,658 | -16,83 | 29,27 | -3,774 | 13 | 29,78 | -4,441 | 10,72 | 25,89 | 11,77 | 17,02 | 22,28 |
| SF -10 | -10,77 | 9,189 | 29,15 | -9,532 | 5,958 | 21,45 | 4,181 | 14,65 | 28,88 | 7,09 | 12,04 | 16,98 |
| SF -12 | -14,88 | 21,81 | 19,24 | 12,82 | 26,25 | 39,68 | 6,021 | 19,07 | 32,12 | 12,88 | 16,94 | 21 |
| MÉDIO | -9,702 | 12,3795 | 29,21 | -6,653 | 9,479 | 25,615 | 2,732 | 16,155 | 30,5 | 12,325 | 16,98 | 21,64 |

Tabela XV – Valores das perdas por penetração “B” por andares atravessados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.6 Comparativos entre os gráficos das perdas durante o percurso e os ajustes dos dados para os modelos teóricos

Nesse tópico do trabalho, serão apresentados os gráficos com os dados de perda no percurso medidos e os ajustados utilizando os modelos de predição de Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238.

Para todos os andares, de uma forma geral, o modelo que mais se aproximou dos dados foi o modelo *Log-Distance*, como são apresentados nas Figura 6.20 a 6.24. O modelo de Friis apresentou a segunda melhor adequação aos dados registrados e, por último, o modelo da ITU-R P.1238. Para o 2° andar, entretanto, o modelo da ITU-R P.1238 apresentou a segunda melhor adequação aos dados registrados e seguido pelo modelo de Friis.

As maiores perdas de potência durante o percurso foram registradas no 5° andar, o fato pode ser justificado, primeiramente, pela existência de uma maior quantidade de pontos de obstruções (andares, pisos, paredes e janelas) e, também, uma maior distância entre os dispositivos transmissor e receptor, entretanto, é importante ressaltar a influência do fator de espalhamento na variação das perdas no percurso, fato justificado por que o aumento do SF

ocasiona no aumento do tempo que o sinal transmitido permanece no ar (ToA) [27][43][44], ou seja, um maior espalhamento do sinal.

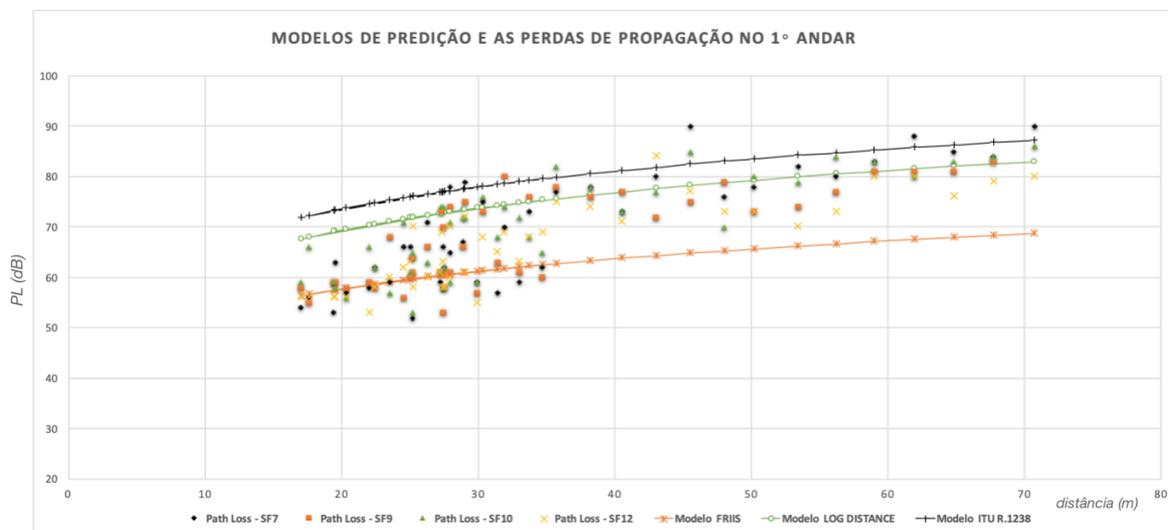


Figura 6.20: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para o 1º andar.

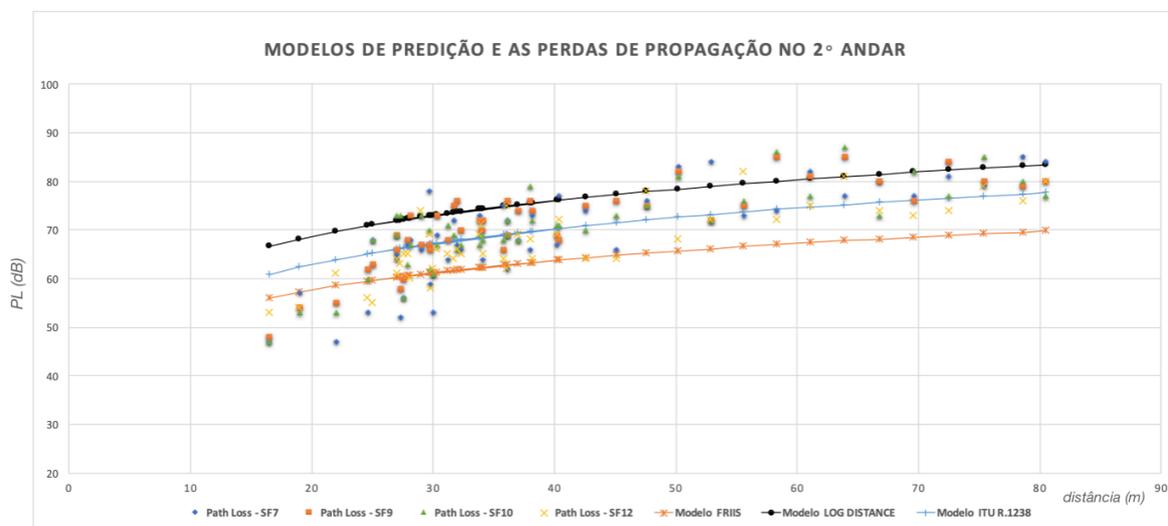


Figura 6.21: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para o 2º andar.

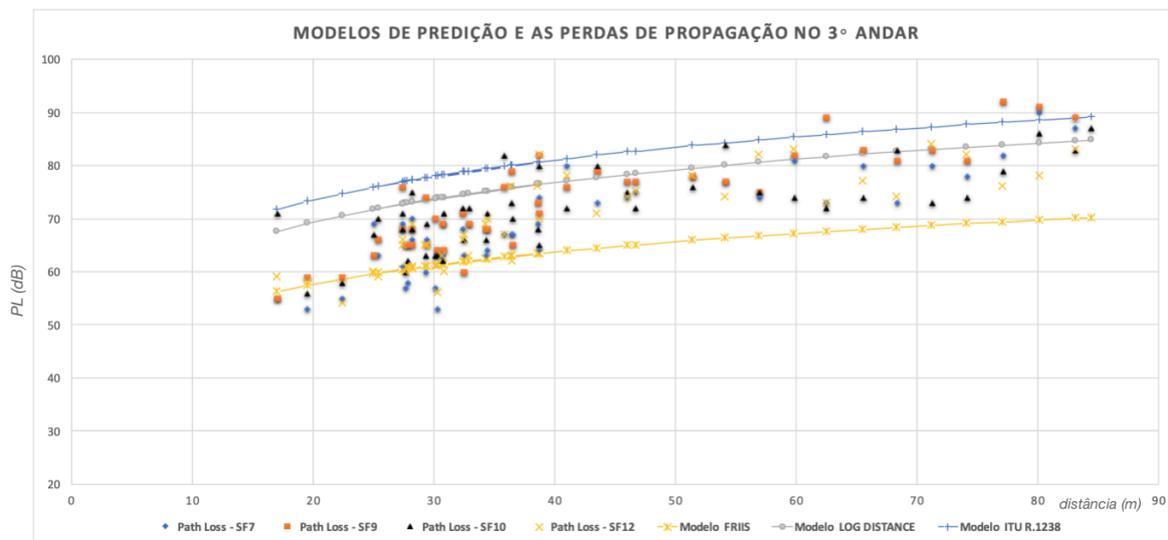


Figura 6.22: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para o 3º andar.

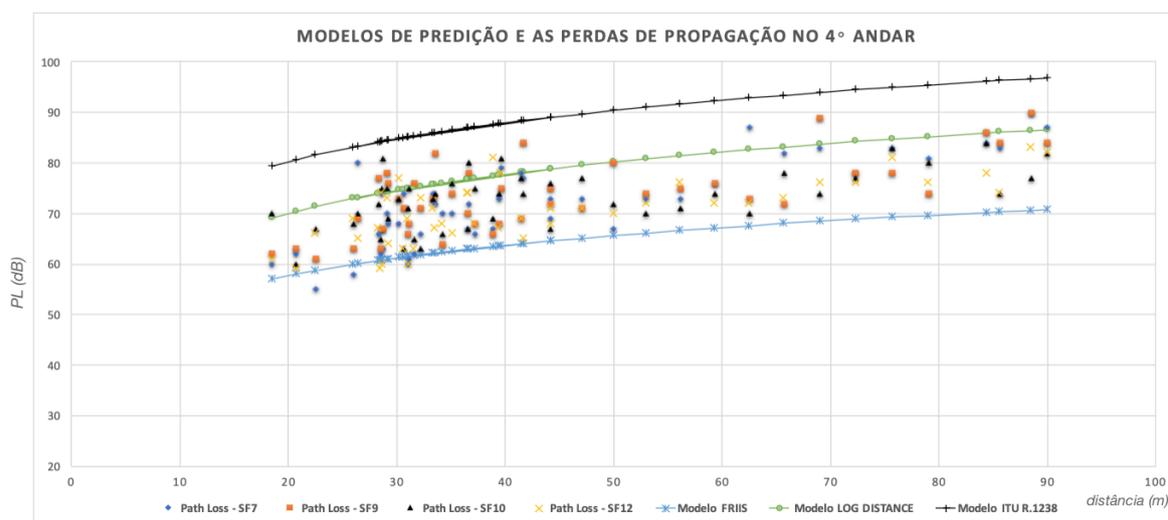


Figura 6.23: Comparativo entre dados de perdas no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para o 4º andar.

Dos gráficos comparativos entre os dados de *perda no percurso* é possível observar que há pontos onde as perdas são menores se comparado as perdas previstas pelo modelo de espaço livre. Estas particularidades podem ter acontecido em face da influência das componentes provenientes dos andares superiores e inferiores que chegam pela escada de cada andar, conforme é apresentado na Figura 6.25. Para os andares 4 e 5, entretanto, as componentes de multipercurso não causam uma interferência significativa como observado para os andares 1, 2 e 3.

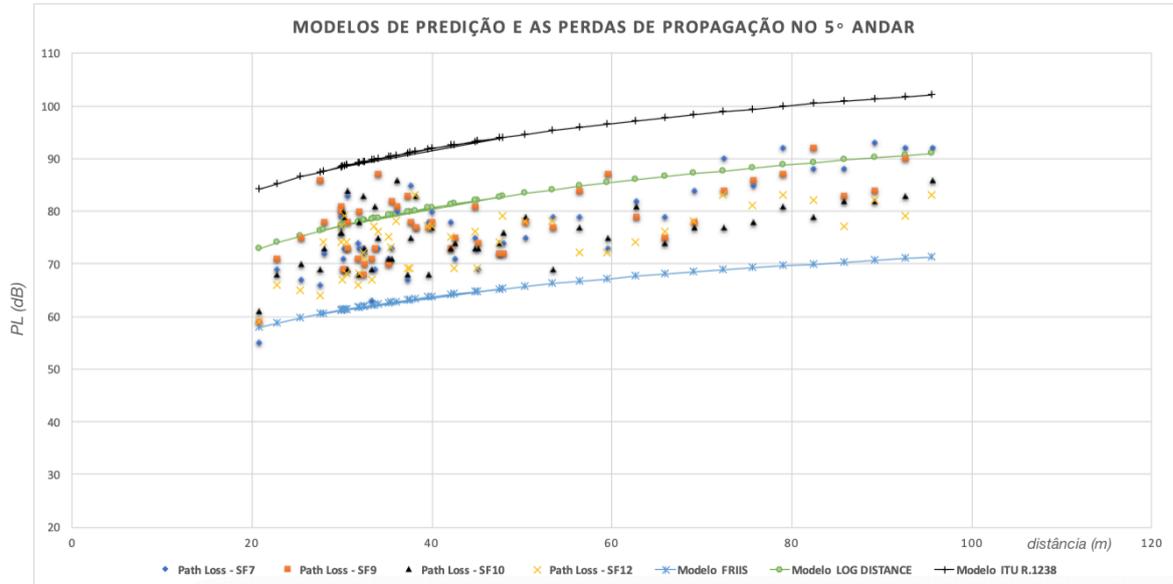


Figura 6.24: Comparativo entre dados de perdas no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para o 5º andar.

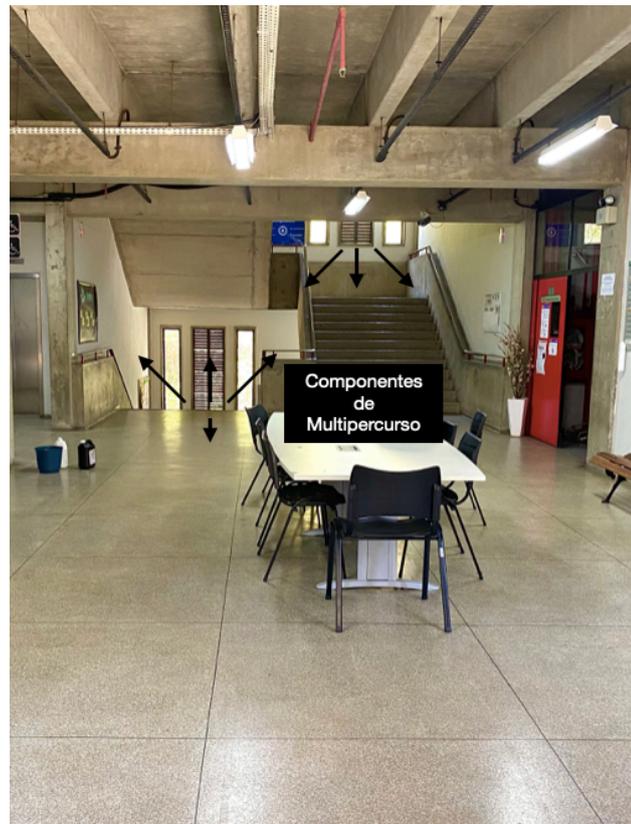


Figura 6.25: Componentes de Multipercurso oriundas dos andares superiores e inferiores.

Agora serão apresentadas as curvas de atenuação do sinal (Perdas no Percurso - *PL*) para as medições em mobilidade no corredor do 4° andar e compara-los aos ajustes realizados, observando as fundamentações teóricas para os modelos de predição de Friis, *Log-Distance* e ITU R.1238.

Após análise dos resultados durante as medições em mobilidade, verificou-se que:

Para a largura de banda de 125 kHz, o modelo que mais se aproximou dos dados registrados para os SF 7 e 9, o modelo que mais se aproximou dos dados foi o da ITU R.1238, entretanto, para os SF 10 e 12, o modelo que mais se aproximou dos dados foi o *Log-Distance*, conforme apresentado na Figura 6.26. O modelo de Friis apresentou a segunda melhor adequação aos dados para os SF's 10 e 12.

Para a largura de banda de 250 kHz, o modelo que mais se aproximou dos dados foi o da ITU R.1238, conforme apresentado na Figura 6.27, entretanto, o modelo *Log-Distance* apresentou a segunda melhor adequação aos dados registrados.

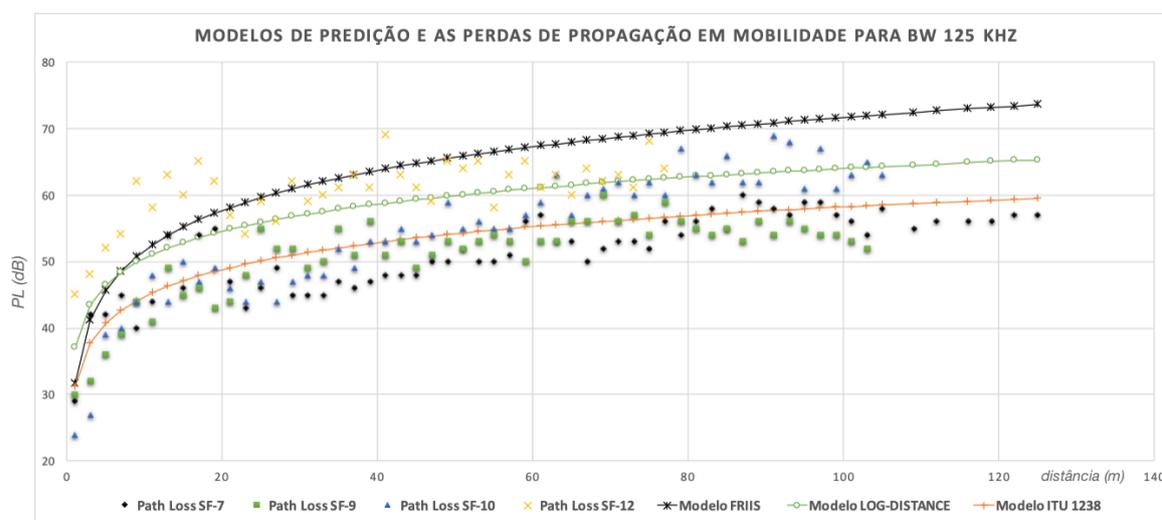


Figura 6.26: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de predição Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para BW 125 kHz.

Outro fator importantíssimo foi que o ambiente agiu como um canalizador para as ondas eletromagnéticas e as componentes oriundas dos fenômenos de multipercurso, proporcionando a redução significativa das perdas de potência durante o percurso, se compararmos aos resultados obtidos durante as medições em Espaço Livre. Na Figura 6.28,

é apresentada uma ilustração da canalização das ondas eletromagnéticas no corredor utilizado para as medições em mobilidade.

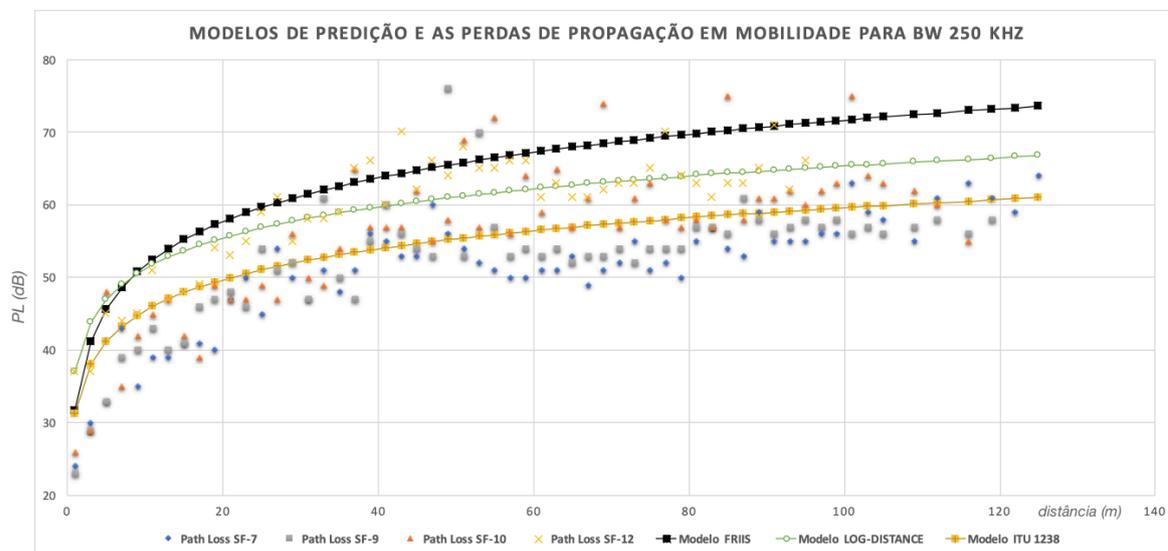


Figura 6.27: Comparativo entre dados de perda no percurso e os ajustes realizados em função dos modelos de previsão Friis, *Log-Distance* e ITU-R P.1238 para BW 250 kHz.



Figura 6.28: Canalização das ondas eletromagnéticas.

6.3.7 Análise de erros para os dados de perdas no percurso

Nesse tópico do trabalho, serão apresentadas as tabelas com as estimativas do desvio padrão das componentes aleatórias nos dados.

Nas Tabelas XVI e XVII, estão os valores das raízes de erro quadrático médio (RMSE) entre as perdas dos modelos de predição (Friis, Log-Distance e ITU-R P.1238) e as médias experimentais, obtidas a partir do processamento dos dados coletados durante as medições.

Para o todos os andares, de uma forma geral, o modelo que teve os menores mais se valores de RMSE foi o modelo *Log-Distance*, o modelo de Friis apresentou a segunda melhor adequação aos dados e, por último, o modelo da ITU-R P.1238, como são apresentados nas Tabelas XVI e XVII.

| ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (RMSE) | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| DADOS DE PERDAS NO PERCURSO | | | |
| ANDAR | MODELOS DE PREDIÇÃO | | |
| | FRIIS | LOG-DISTANCE | ITU-R P.1238 |
| 1 | 11,32 | 7,83 | 12,19 |
| 2 | 10,2 | 8,57 | 8,62 |
| 3 | 13,48 | 13,23 | 18,64 |
| 4 | 10,53 | 5,59 | 17,69 |
| 5 | 14,22 | 5,56 | 17,65 |

Tabela XVI - Raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos de predição.

| VALORES ABSOLUTOS (RMSE) | | |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| DADOS DE PERDAS NO PERCURSO | | |
| MODELOS DE PREDIÇÃO | | |
| FRIIS | LOG-DISTANCE | ITU-R P.1238 |
| 11,32 | 7,83 | 17,65 |

Tabela XVI – Valores médios da raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos de predição.

Capítulo 7

Conclusão

Para analisar a cobertura do sinal propagado por um sistema LoRa em ambientes internos e externos, foram realizadas duas campanhas de medições. O objetivo da dissertação foi analisar e caracterizar a cobertura do sinal para tecnologia LoRa na frequência de 915 MHz em ambientes internos e externos. As medições foram realizadas em condições estacionárias e em mobilidade para posterior comparação aos modelos de predição de Friis, *Log-Distance* e ITU R. 1238.

As medições internas foram realizadas no interior das dependências do Bloco D do Prédio da Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Dos dados coletados, foi possível estudar o comportamento do sinal e determinar os coeficientes de decaimento com a distância, além das perdas de propagação entre andares.

Pelo fato de serem utilizados dispositivos comerciais na análise de cobertura, foi necessário realizar a calibração dos valores coletados pelo dispositivo para calcular a potência recebida, em dBm. Após esta etapa de calibração, foi obtido um valor de *offset* de 46 dB a ser aplicado aos valores de RSSI (dB) entregue pelo dispositivo. Desta forma, através da equação de espaço livre a uma distância de 1 metro, foi possível chegar no valor de ajuste.

Ao analisar os resultados, verificou-se que todos os valores calculados e analisados foram coerentes com os valores teóricos encontrados na literatura, conforme apresentado nos capítulos 4 e 6 deste trabalho.

Sobre os resultados registrados e tendo como indicadores de desempenho uma comparação gráfica e através do erro RMS dos dados medidos e os modelos de predição, o modelo *Log-Distance*, de uma forma geral, foi o que mais se ajustou para mensurar a cobertura do sinal durante as medições estacionárias com um erro de RMS de 7,83 e o modelo da ITU-R P.1238 para as em mobilidade para a tecnologia LoRa em ambiente indoor com o erro de RMS de 17,65. Nas Figuras 7.1 e 7.2, são apresentados os registros dos níveis de potência recebida, em dBm, para o SF-7 entre andares para as medições estacionarias e

no corredor do 4° andar, em função das larguras de banda para as medições em mobilidade, respectivamente.

Sobre os resultados registrados e tendo como indicadores de desempenho as métricas do erro de RMS de cada modelo, o *Log-Distance* com erro de RMS de 7,83 foi o que melhor se ajustou a cobertura do sinal e o modelo de Friis obteve o segundo melhor ajuste com erro de RMS de 11,32 e por último foi o modelo da ITU-R P.1238 com erro de RMS de 17,65.

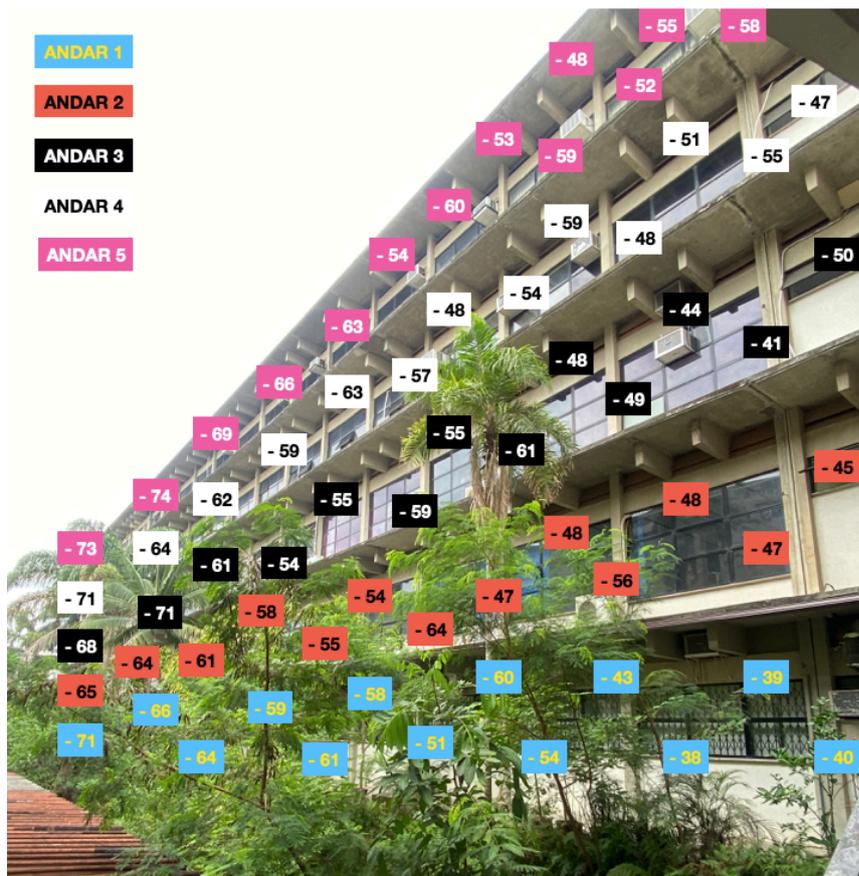


Figura 7.1: Registro dos níveis de potência recebida para SF-7 entre andares.

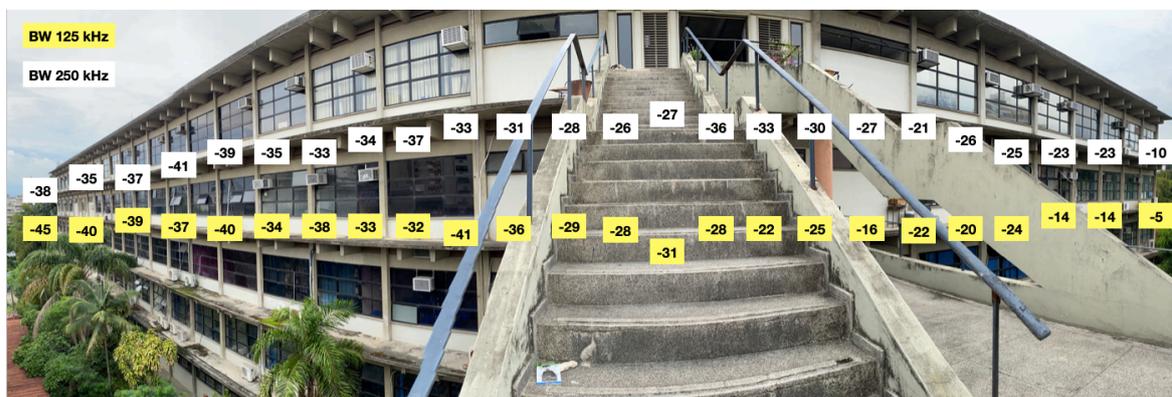


Figura 7.2: Registro dos níveis de potência recebida em mobilidade para SF-7.

É importante ressaltar que o propósito desse trabalho foi alcançado, além dos resultados obtidos, outras grandes contribuições deste trabalho foi a geração de um banco de dados com mais de 25.000 amostras coletadas e processadas e a elaboração de um *setup* para a intercomunicação em ambiente *indoor* para dispositivos que utilizam a tecnologia LoRa.

Como sugestão de continuidade para trabalhos futuros:

Realizar os mesmos estudos contidos neste trabalho, com o emprego dos modelos utilizados, para ambientes *outdoor* na faixa de frequência de 915 MHz;

Realizar a construção de um sistema maior, contemplando mais dispositivos LoRa conectados a um gateway, e enviando um maior volume de dados, logo com isso avaliar o impacto no desempenho do sistema; e

Realizar os mesmos estudos contidos neste trabalho, porém edificações com mais andares.

Referências Bibliográficas

- [1] J. Manyika et al., “The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype,” 2015.
- [2] Ericsson, “Cellular Networks for Massive IoT”, White Paper, UEN 284 23-3278, (2016) [Online], www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_iot.pdf.
- [3] K. Ashton, “That Internet of Things Thing,” 2009. [online]. Disponível: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986> (citado nas págs. 9 e 10).
- [4] R. Minerva, A. Biru, e D. Rotondi, “Towards a definition of the Internet of Things (IoT),” IEEE Internet Initiative, Relatório Técnico, 2015. [online]. Disponível: https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf (citado na pág. 9).
- [5] EVANS, D. A Internet das Coisas Como a Próxima Evolução da Internet está Mudando Tudo. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011. p. 1-13
- [6] Mobidev. IoT trends 2018 for businesses to watch. Disponível em: <https://medium.com/@mobidev.biz/iot-trends-2017-2018-fda47490a3de>.
- [7] K. E. Nolan, W. Guibene, and M. Y. Kelly, “An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things,” Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2016 International, pp. 439–444, 2016.
- [8] Presidência da República. Decreto N° 9.854. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D9854.htm, 2019.
- [9] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Plano de Ação da Câmara do Agro 4.0. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/agricultura-digital/PlanodeAodaCmaradoAgro4.0.pdf>, 2021.
- [10] Euronews, “A vida privada na internet.” online on 28/12/2017: <http://pt.euronews.com/2012/02/08/a-vida-privada-na-internet>, fev 2012.
- [11] CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. CoRR, abs/1510.00620, 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1510.00620>. 20, 21, 24, 25.
- [12] LINK LAB’S. A Comprehensive Look At Low Power, Wide Area Networks. White Paper, 2016. 17, 20, 21.

[13] MELO, Pablo. Introdução ao LPWAN (Low Power Wide Area Network). Copyright© Embarcados. Publicado em: 27 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-lpwan/>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

[14] SEMTECH. AN120.22 LoRa Modulation Basics. Available online: <https://www.semtech.com/uploads/documents/>, 2015.

[15] HELAL, A. A. et al. Estacua: Proposta de solução integrada de hardware, software e internet das coisas para monitoramento ambiental. In: Sociedade Brasileira de Computação OPEN LIB. Natal: [s.n.], 2018. ISSN 2595-6205. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/semish/article/view/3432>.

[16] D. Doolina and N. Sitar, "Wireless sensors for wildfire monitorin," White Paper: University of California.

[17] S. M. Riazul Islam, Daehan Kwak, MD. Humaun Kabir, Mahmud Hossain, Kyung-Sup Kwak, "The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey", Access IEEE, vol. 3, pp. 678-708, 2015.

[18] G. Yang et al., "A Health-IoT Platform Based on the Integration of Intelligent Packaging, Unobtrusive Bio-Sensor, and Intelligent Medicine Box," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 4, pp. 2180-2191, Nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2307795.

[19] G. Yang, L. Xie, M. Mäntysalo, X. Zhou, Z. Pang, L. Da Xu, S. Kao-Walter, Q. Chen, and L.-R. Zheng, "A health-iot platform based on the integration of intelligent packaging, unobtrusive bio-sensor, and intelligent medicine box," IEEE transactions on industrial informatics, vol. 10, no. 4, pp. 2180–2191, 2014.

[20] N. Wang, N. Zhang, and M. Wang, "Wireless sensors in agriculture and food industry, recent development and future perspective" White Paper Review: EL- SEVIER, pp. 1–14, 2006.

[21] S. Andreev et al., "Understanding the IoT connectivity landscape: A contemporary M2M radio technology roadmap", IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 9, pp. 32-40, Sep. 2015.

[22] X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang and P. Chatzimisios, "Low power wide area machine-to-machine networks: Key techniques and prototype", IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 9, pp. 64-71, Sep. 2015.

[23] MATOS, Pedro Miguel Pinheiro, PARAMONITORING - MONITORIZAÇÃO DE DADOS BIOMÉTRICOS E DE LOCALIZAÇÃO DE PARAQUEDISTAS EM

OPERAÇÃO MILITAR. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal, 2018.

[24] S. Silfverskiöld, H. Liwång, G. Hult, Å. Sivertun, P. Bull, J. Sigholm, M. Lundmark, C. von Gerber, K. Andersson, and P. Stureson, “Technology forecast 2017- military utility of future technologies: A report from seminars at the swedish defence university’s (sedu) military-technology division,” 2017.

[25] R. N. Akram, K. Markantonakis, K. Mayes, O. Habachi, D. Sauveron, A. Steyven, and S. Chaumette, “Security, privacy and safety evaluation of dynamic and static fleets of drones,” in Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017 IEEE/AIAA 36th, pp. 1–12, IEEE, 2017.

[26] LORA® ALLIANCE. A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. 2015.

[27] CENTENARO, Marco et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *Ieee Wireless Communications*, [s.l.], v. 23, n. 5, p.60-67, out. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mwc.2016.7721743>.

[28] OLIVEIRA, F. T. X.; FILHO, H. B. Spread Spectrum: O que é. 2015. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialss/pagina_1.asp>.

[29] Reynders, B. e Pollin, S. (2016). Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. Em IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT), p. 1–5. IEEE.

[30] Goursaud, C. e Gorce, J.-M. (2015). Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 1(1):1–11.

[31] Kim, D.-H.; Lee, E.-K.; Kim, J. Experiencing LoRa Network Establishment on a Smart Energy Campus Testbed. *Sustainability* 2019, 11, 1917.

[32] LoRa® Alliance. Disponível em <<https://www.LoRa®-alliance.org/What-Is-LoRa®/LoRaWAN®-White-Papers>>

[33] LORATM-ALLIANCE. “LoRaWAN Specification V1.0.2”. Available online: <https://www.lora-alliance.org/>, 2016.

[34] AUGUSTIN, Aloÿs et al. A Study of LoRa®: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, [s.l.], v. 16, n. 12, p.1466-1484, 9 set. 2016. MDPI AG.

[35] GOLDSMITH, A. Wireless communications. [S.l.]: CambridgeUniversityPress, 2005.

[36] RAPPAPORT, Theodore S. et al. *Wireless Communications: Principles and Practice*. New Jersey: prentice hall PTR, 1996.

[37] FRIIS, H. T. A note on a simple transmission formula. In: *Proc. IRE*. [S.l.: s.n.], Maio, 1946. p. 254–256.

[38] ITU-R. PROPAGATION DATA AND PREDICTION METHODS FOR THE PLANNING OF INDOOR RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS AND RADIO LOCAL AREA NETWORKS IN THE FREQUENCY RANGE 900 MHz TO 100 GHz. ITU-R. [S.l.], p. 10. 1997 - 1999.

[39] ANDERSEN, Jorgen Bach; RAPPAPORT, Theodore S.; YOSHIDA, Susumu. Propagation measurements and models for wireless communications channels. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 1, p. 42-49, 1995.

[40] STEELBRAS, ANTENA MÓVEL UHF 5/8 DE ONDA WHIP 900 MHZ. Disponível em: <https://www.steelbras.com.br/wp-content/uploads/2020/08/AP3900-julho2020.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2021.

[41] J. C. Giacomini and F. H. Vasconcelos, “Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada Física”, *INFOCOMP Journal of Computer Science*, vol. 5, no. 2, pp. 83-92, Jun. 2006.

[42] BOR, M. C., ROEDIG, U., VOIGT, T., et al. “Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?” In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '16*, pp. 59–67, New York, NY, USA, 2016. ACM. doi: 10.1145/2988287.2989163.

[43] SEMTECH: Disponível em <<http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>>.

[44] ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 9, p. 34–40, 2017. ISSN 0163-6804.

Apêndice A

Código Fonte

Para fazer as medições foram utilizados dois micros controladores ESP32 LoRa, funcionando a 915 MHz. Abaixo é apresentado os códigos fontes utilizados para programar os dispositivos transmissor e receptor.

Dispositivo Transmissor:

```
#include <U8x8lib.h>
#include <LoRa.h>

int i=0;
char contor[7];

// WIFI_LoRa_32 ports
// GPIO5 -- SX1278's SCK
// GPIO19 -- SX1278's MISO
// GPIO27 -- SX1278's MOSI
// GPIO18 -- SX1278's CS
// GPIO14 -- SX1278's RESET
// GPIO26 -- SX1278's IRQ(Interrupt Request)

#define SS    18
#define RST   14
#define DI0   26
#define BAND  915E6

// the OLED used
```

```
U8X8_SSD1306_128X64_NONAME_SW_I2C u8x8(/* clock=*/ 15, /* data=*/ 4, /*
reset=*/ 16);
```

```
void setup() {
  SPI.begin(5, 19, 27, 18);
  LoRa.setPins(SS, RST, DI0);
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial); //if just the the basic function, must connect to a computer
  delay(1000);
  u8x8.begin();
  u8x8.setFont(u8x8_font_chroma48medium8_r);
  Serial.println("LoRa Transmitter");
  u8x8.drawString(0, 1, "LoRa Tx pwr:14");
  u8x8.drawString(0, 2, "SF:12 BW:125k");
  u8x8.drawString(0, 6, "Heltec ESP32");

  u8x8.drawString(0, 7, "Michel");
  if (!LoRa.begin(BAND)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    u8x8.drawString(0, 1, "Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
  LoRa.setTxPower(14);
  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
  //7.8E3, 10.4E3, 15.6E3, 20.8E3, 31.25E3, 41.7E3, 62.5E3, 125E3, and 250E3.

  LoRa.setSpreadingFactor(12);
  //6-12
}

void loop() {
  Serial.print("sending packet: Rx Esp 32 Michel");
  itoa(i,contor,10);
  u8x8.drawString(0, 3,"pckt:");
```

```

    u8x8.drawString(5, 3, contor);
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print("Esp32 Michel");
    LoRa.print(contor);
    LoRa.endPacket();
    Serial.println(i);
    delay (30000);
    i++;
}

```

Dispositivo Receptor:

```

#include <U8x8lib.h>
#include <LoRa.h>
String receivedText;
String receivedRssi;
// WIFI_LoRa_32 ports
// GPIO5 -- SX1278's SCK
// GPIO19 -- SX1278's MISO
// GPIO27 -- SX1278's MOSI
// GPIO18 -- SX1278's CS
// GPIO14 -- SX1278's RESET
// GPIO26 -- SX1278's IRQ(Interrupt Request)
#define SS    18
#define RST   14
#define DI0   26
#define BAND  915E6
// the OLED used
U8X8_SSD1306_128X64_NONAME_SW_I2C u8x8(/* clock=*/ 15, /* data=*/ 4, /*
reset=*/ 16);
void setup() {
    SPI.begin(5, 19, 27, 18);

```

```

    pinMode(SS, OUTPUT);
pinMode(RST, OUTPUT);
pinMode(DI0, INPUT);
LoRa.setPins(SS, RST, DI0);
Serial.begin(115200);
while (!Serial); //if just the the basic function, must connect to a computer
delay(1000);
u8x8.begin();
u8x8.setFont(u8x8_font_chroma48medium8_r);
Serial.println("LoRa Receiver");
u8x8.drawString(0, 1, "LoRa Rx");
u8x8.drawString(0, 2, "SF:14 BW:125k");
u8x8.drawString(0, 7, "Michel");
if (!LoRa.begin(BAND)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    u8x8.drawString(0, 1, "Starting LoRa failed!");
    while (1);
}
LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
//7.8E3, 10.4E3, 15.6E3, 20.8E3, 31.25E3, 41.7E3, 62.5E3, 125E3, and 250E3.
LoRa.setSpreadingFactor(14);
//6-12
}
void loop() {
    // try to parse packet
    int packetSize = LoRa.parsePacket();
    char len[5];
    itoa(packetSize,len,10);
    u8x8.drawString(0, 4, len);
    if (packetSize) {
        // received a packet
        Serial.print("Received packet ");
        delay (100);
    }
}

```

```
int i=0;
// read packet
while (LoRa.available()) {
  char currenttext[64];
  receivedText =(char) LoRa.read();
  Serial.print(receivedText);
  receivedText.toCharArray(currenttext, 64);
  u8x8.drawString(i, 5, currenttext);
  i=i+1;
}
// print RSSI of packet
Serial.print(" with RSSI: ");
Serial.print(LoRa.packetRssi());
Serial.print(" with SNR: ");
Serial.println(LoRa.packetSnr());
u8x8.drawString(0, 3, "RSSI");
receivedRssi = LoRa.packetRssi();
char currentrs[64];
receivedRssi.toCharArray(currentrs, 64);
u8x8.drawString(5, 3, currentrs);
Serial.println(packetSize);
}
}
```
