

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

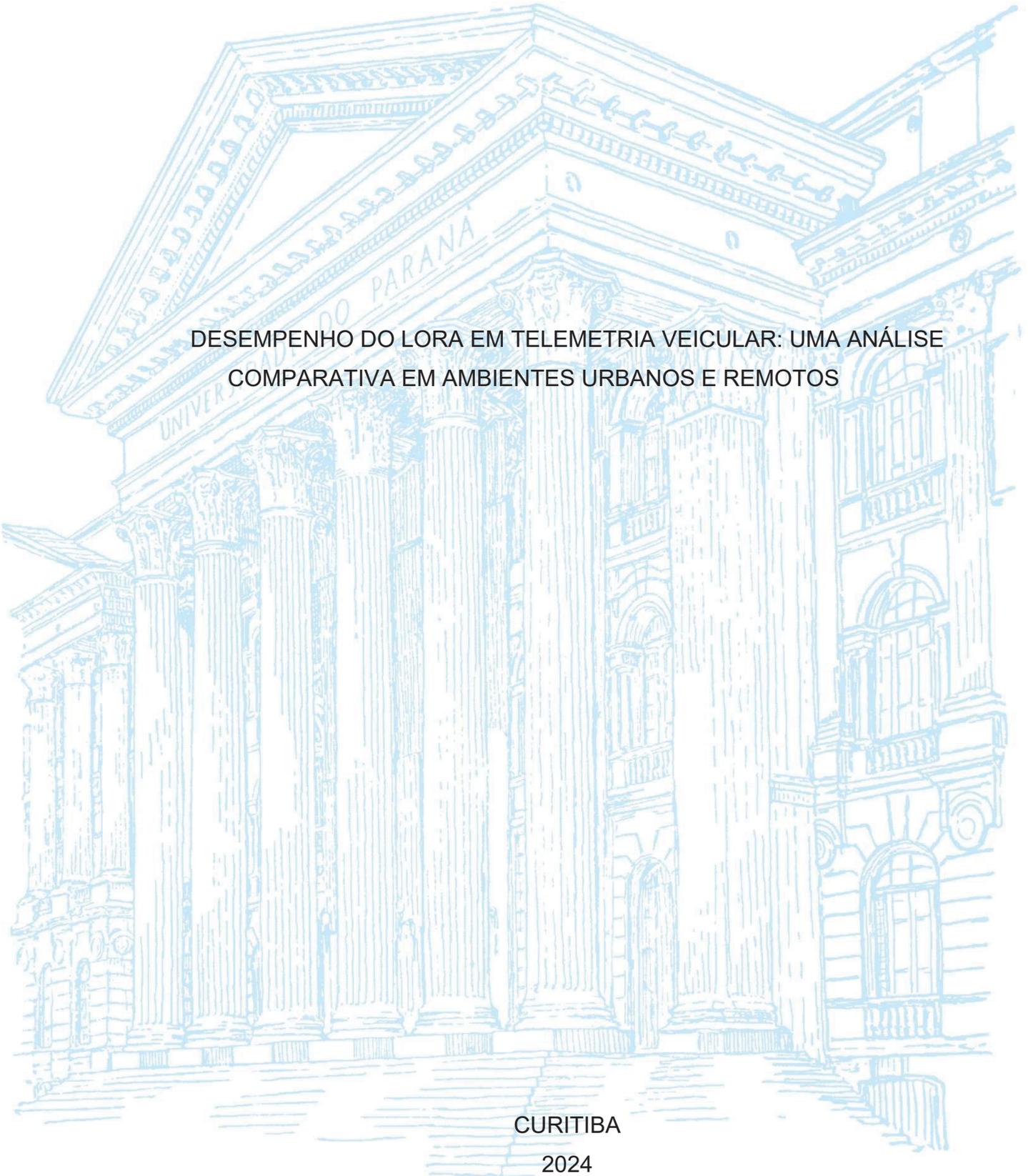
FELIPE CARDOSO ALMEIDA

KELVIN JUNIOR RONNOV

DESEMPENHO DO LORA EM TELEMETRIA VEICULAR: UMA ANÁLISE
COMPARATIVA EM AMBIENTES URBANOS E REMOTOS

CURITIBA

2024



Felipe Cardoso Almeida

Kelvin Junior Ronnov

DESEMPENHO DO LORA EM TELEMETRIA VEICULAR: UMA ANÁLISE
COMPARATIVA EM AMBIENTES URBANOS E REMOTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Assumpção Lolis

CURITIBA

2024

Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram ao longo desta jornada acadêmica. À minha família, pelo amor incondicional e pelo constante encorajamento. Aos meus amigos e colegas, pelas inestimáveis trocas de ideias e pelo suporte mútuo. Aos meus professores e orientadores, pela paciência, sabedoria e orientação essenciais. Este trabalho é fruto não apenas do meu esforço, mas também do apoio de todos vocês. Muito obrigado por fazerem parte desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, cuja graça e orientação foram fundamentais em todos os momentos desta jornada acadêmica. A Ele dedico este trabalho, reconhecendo sua luz que guiou meus passos, sua força que sustentou minha perseverança e sua sabedoria que me concedeu discernimento para superar desafios e alcançar esta conquista.

À minha família, meu pilar de apoio inabalável, pelo amor incondicional, paciência e encorajamento ao longo de todos esses anos.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelas discussões enriquecedoras, momentos de descontração e apoio mútuo que foram fundamentais para minha jornada acadêmica.

Aos meus professores e orientadores, pela orientação, conhecimento compartilhado, feedback construtivo e por dedicarem seu tempo e expertise para me ajudar a crescer academicamente.

Aos autores cujas obras foram fundamentais para o embasamento teórico deste trabalho, meu profundo agradecimento pela contribuição valiosa para o meu aprendizado.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para este projeto. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e encorajamento de vocês. Muito obrigado por fazerem parte desta jornada.

*"If I have seen further it is by
standing on the shoulders of giants".*

Sir Isaac Newton.

RESUMO

O presente trabalho investiga a aplicação da tecnologia LoRa e do protocolo LoRaWAN em sistemas de telemetria veicular, focando em sua eficácia em diferentes tipos de ambientes, como urbanos e remotos. A telemetria veicular é crucial para a coleta e transmissão de dados de sensores instalados em veículos, permitindo monitoramento em tempo real e análise de desempenho. A tecnologia LoRa é reconhecida por seu alcance prolongado e baixo consumo de energia, características essenciais para dispositivos que operam em locais com infraestrutura de energia limitada ou de difícil acesso. Em ambientes urbanos, o LoRaWAN pode oferecer uma solução eficiente, aproveitando a infraestrutura de comunicação existente para estabelecer conexões robustas entre os veículos e os sistemas de monitoramento. A capacidade do LoRa de operar com baixo consumo de energia é particularmente vantajosa para prolongar a vida útil das baterias dos sensores, reduzindo a necessidade de manutenção e substituição frequente. Por outro lado, em áreas remotas, onde a infraestrutura de comunicação pode ser escassa, o LoRa se destaca por sua habilidade em fornecer comunicação confiável mesmo em condições adversas. A tecnologia é capaz de superar desafios relacionados a obstáculos naturais e a falta de infraestrutura, estabelecendo uma rede de comunicação eficaz para dispositivos em locais isolados. A combinação do longo alcance e da eficiência energética do LoRa é ideal para garantir que os dados possam ser transmitidos de volta para os centros de controle sem a necessidade de fontes de energia adicionais. A análise do desempenho do LoRa e do LoRaWAN em diferentes cenários permite avaliar a adequação dessas tecnologias para uma ampla gama de aplicações de telemetria veicular. Em ambientes urbanos, a presença de interferências e a densidade de construções podem exigir ajustes na rede, enquanto em áreas remotas, a principal preocupação é garantir a cobertura e a robustez da comunicação. A utilização dessas tecnologias pode, portanto, otimizar o gerenciamento de frotas e melhorar a eficiência das operações de transporte, independentemente das condições ambientais.

Palavras-chave: LoRa; LoRaWAN; Mobilidade; VANETs; Telemetria.

ABSTRACT

This work investigates the application of LoRa technology and the LoRaWAN protocol in vehicular telemetry systems, focusing on their effectiveness in various environments, such as urban and remote areas. Vehicular telemetry is crucial for the collection and transmission of data from sensors installed in vehicles, enabling real-time monitoring and performance analysis. LoRa technology is recognized for its extended range and low energy consumption, essential characteristics for devices operating in locations with limited or difficult-to-access energy infrastructure. In urban environments, LoRaWAN can provide an efficient solution by leveraging existing communication infrastructure to establish robust connections between vehicles and monitoring systems. LoRa's capability to operate with low energy consumption is particularly advantageous for extending the lifespan of sensor batteries, thereby reducing the need for frequent maintenance and replacement. On the other hand, in remote areas where communication infrastructure may be scarce, LoRa stands out for its ability to provide reliable communication even under adverse conditions. The technology is capable of overcoming challenges related to natural obstacles and lack of infrastructure, establishing an effective communication network for devices in isolated locations. The combination of LoRa's long range and energy efficiency is ideal for ensuring that data can be transmitted back to control centers without the need for additional power sources. The analysis of LoRa and LoRaWAN performance in different scenarios allows for the evaluation of these technologies' suitability for a wide range of vehicular telemetry applications. In urban environments, the presence of interference and building density may require network adjustments, while in remote areas, the main concern is to ensure coverage and communication robustness. Therefore, the use of these technologies can optimize fleet management and enhance transportation operations' efficiency, regardless of environmental conditions.

Keywords: LoRa; LoRaWAN; Mobility, VANETs; Telemetry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ARQUITETURA BÁSICA DE REDE VEICULAR	21
FIGURA 2 – SISTEMA V2X	24
FIGURA 3 – TIPOS DE COMUNICAÇÃO DO SISTEMA V2X	27
FIGURA 4 – COMUNICAÇÃO V2V	27
FIGURA 5 – COMUNICAÇÃO V2I	29
FIGURA 6 – COMUNICAÇÃO V2P	31
FIGURA 7 – COMUNICAÇÃO V2N.....	32
FIGURA 8 – APLICAÇÕES LPWAN	34
FIGURA 9 – ESTRUTURA DO LoRaWAN.....	35
FIGURA 10 – ARQUITETURA DE REDE DO LoRaWAN	36
FIGURA 11 – JANELA DE RECEPÇÃO CLASSE A.....	37
FIGURA 12 – JANELA DE RECEPÇÃO CLASSE B.....	38
FIGURA 13 – JANELA DE RECEPÇÃO CLASSE C.....	38
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO CSS DO LoRa	40
FIGURA 15 – PILHA DE TECNOLOGIA LoRaWAN	41
FIGURA 16 – EXEMPLIFICAÇÃO DE SIMBOLO PARA SF7	43
FIGURA 17 – ESTRUTURA DE QUADROS LoRa	46
FIGURA 18 – PACOTE DE MODULAÇÃO LoRa E DIAGRAMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS	46
FIGURA 19 – DESEMPENHO DE DETECÇÃO DE SÍMBOLO PARA DESLOCAMENTO <i>DOPPLER</i> ESTÁTICO (SF=12, BW=125 kHz) ...	51
FIGURA 20 – VISÃO GERAL DO <i>SOFTWARE</i> RADIO MOBILE	53
FIGURA 21 – GEOMETRIA DO ENLACE NO MODELO <i>LONGLEY-RICE</i>	54
FIGURA 22 – MAPA DO PRIMEIRO CENÁRIO SIMULADO.....	58
FIGURA 23 – MAPA DO SEGUNDO CENÁRIO SIMULADO	59
FIGURA 24 – TAXA DE ERRO DE SÍMBOLO ADMISSÍVEL PARA CADA SF, COM BASE EM CADA SNR.....	62
FIGURA 25 – CURVA DA TAXA DE ERRO DE SÍMBOLO PELA VELOCIDADE COM BASE EM DIFERENTES NÍVEIS DE SNR E SF	64
FIGURA 26 – RELEVO DO PRIMEIRO CENÁRIO	69
FIGURA 27 – ZONA DE FRESNEL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	69

FIGURA 28 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	70
FIGURA 29 – ZONA DE FRESNEL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	71
FIGURA 30 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2.....	71
FIGURA 31 – RELEVO DO SEGUNDO CENÁRIO.....	72
FIGURA 32 – ZONA DE FRESNEL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	73
FIGURA 33 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	73
FIGURA 34 – ZONA DE FRESNEL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	74
FIGURA 35 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2.....	75
FIGURA 36 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	76
FIGURA 37 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 2.	76
FIGURA 38 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	77
FIGURA 39 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	77
FIGURA 40 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	78
FIGURA 41 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 1.	78
FIGURA 42 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	79
FIGURA 43 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	79
FIGURA 44 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	80

FIGURA 45 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	80
FIGURA 46 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	81
FIGURA 47 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 2.	81
FIGURA 48 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	82
FIGURA 49 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	82
FIGURA 50 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 1.	83
FIGURA 51 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS SEM FIO USADAS NO V2X.....	25
TABELA 2 – PRINCIPAIS PARÂMETROS FÍSICOS DO LoRa.....	42
TABELA 3 – EXEMPLO DE DIFERENTES SF E OS PARÂMETROS CORRESPONDENTES	44
TABELA 4 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA O DESLOCAMENTO DE FREQUÊNCIA E VELOCIDADE ($BW = 125$ kHz, $F = 868$ MHz).....	52
TABELA 5 – VALORES ESTIMADOS PARA IRREGULARIDADE DO TERRENO ..	55
TABELA 6 – REFRACTIVIDADE DA SUPERFÍCIE EM RELAÇÃO AO CLIMA	56
TABELA 7 – PERMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE DE REFERÊNCIA DO SOLO	56
TABELA 8 – LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS DO PRIMEIRO CENÁRIO SIMULADO	58
TABELA 9 – LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS DO SEGUNDO CENÁRIO SIMULADO	59
TABELA 10 – ESPECIFICAÇÕES DE SER PARA OS POSSÍVEIS SF E SNR UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	63
TABELA 11 – VELOCIDADE MÁXIMA PARA CADA SF E SNR APLICÁVEIS NAS SIMULAÇÕES DE MOBILIDADE.....	64
TABELA 12 – ESPECIFICAÇÕES DE SF E SNR APLICÁVEIS NAS SIMULAÇÕES DE MOBILIDADE	65
TABELA 13 – ESPECIFICAÇÕES DE SENSIBILIDADE DO RECEPTOR PARA CADA SF E SNR.....	66
TABELA 14 – PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE.....	68
TABELA 15 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	70
TABELA 16 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	72
TABELA 17 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1	74
TABELA 18 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2	75

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACK	<i>bit</i> de Reconhecimento
ADAS	Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor
ADR	Taxa de Dados Adaptativa
AES	Padrão de Criptografia Avançado
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	Ruído Branco Gaussiano Aditivo
BW	Largura de Banda
CCA	Prevenção Cooperativa de Colisões
C-ITS	Sistemas de Transporte Inteligentes Cooperativos
CR	Taxas de Codificação
CRC	Campo de Redundância Cíclica
CSS	Espectro de Espalhamento por <i>Chirp</i>
DR	Taxa de Dados
DSRC	Comunicações Dedicadas de Curto Alcance
EIRP	Potência Isotrópica Radiada Equivalente
ETSI	Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações
FCC	Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos
IoT	Internet das Coisas
IoV	Internet dos Veículos
IP	Protocolo de Internet
ISM	Industrial, Científico e Médico
ITS	Sistemas de Transporte Inteligentes
LoRa	Longo Alcance
LoRaWAN	Rede de Área Ampla de Longo Alcance
LPWAN	Rede de Área Ampla de Baixo Consumo de Energia
MAC	Controle de Acesso ao Meio
MANETs	Redes Móveis <i>Ad Hoc</i>
OBU	Unidades Embarcadas
OSI	Interconexão de Sistemas Abertos
PER	Taxa de Erro de Pacotes
PRR	Taxa de Recepção de Pacote

RF	Radiofrequência
RSSI	Indicador de Intensidade do Sinal Recebido
RSUs	Unidades de Infraestrutura Rodoviária
SDN	Redes Definidas por Software
SER	Taxa de Erro de Símbolo
SF	Fator de Espalhamento
SNR	Razão Sinal-Ruído
TI	Tecnologia da Informação
ToA	Tempo no Ar
TP	Potência de Transmissão
V2I	Veículo para Infraestrutura
V2N	Veículo para Rede
V2P	Veículo para Pedestre
V2V	Veículo para Veículo
V2X	Veículo para Tudo
VANETs	Redes Veiculares <i>Ad Hoc</i>
WLAN	Rede de Área Local Sem Fio

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Bit</i>	Dígito binário
<i>Byte</i>	Conjunto de 8 <i>bits</i>
dB	Decibéis
dBi	Decibéis sobre uma antena isotrópica
dBm	Decibéis para um miliwatt
F/m	Farad por metro
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
Kbps	Quilobits por segundo
kHz	Quilohertz
Km	Quilometro
km/h	Quilometro por hora
M	Metro
m/s	Metro por segundo
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Megahertz
Ms	Milissegundo
mW	Miliwatt
N-unidade	Índice de refração
S	Segundo
S/m	Siemens por metro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 REDES VEICULARES	20
2.1.1 Arquitetura das Redes Veiculares	23
2.1.2 Tipos de Comunicação V2X.....	26
2.1.2.1 Comunicação Veículo para Veículo (V2V).....	27
2.1.2.2 Comunicação Veículo para Infraestrutura (V2I).....	29
2.1.2.3 Comunicação Veículo para Pedestre (V2P)	31
2.1.2.4 Comunicação Veículo para Rede (V2N).....	32
2.2 LORA E LORAWAN	33
2.2.1 Estrutura e Funcionamento do Protocolo LoRaWAN	34
2.2.1.1 Camada de Rede e Enlace do Protocolo LoRaWAN.....	35
2.2.1.2 Camada Física Protocolo LoRaWAN.....	39
3 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 MÉTODO ABORDADO PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	50
3.1.1 ANÁLISE DO EFEITO <i>DOPPLER</i> EM APLICAÇÕES COM LORA.....	50
3.1.1.1 Extração e Conversão dos Gráficos	52
3.1.2 SIMULADOR DE TRANSMISSÃO	52
3.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	57
3.2.1 Cenário 1: Área Urbana Densa	57
3.2.2 Cenário 2: Área Aberta.....	59
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	61
4.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	62
4.1.1 Definição da Sensibilidade do Receptor.....	62
4.1.2 Definição dos Parâmetros Aplicados ao Radio Mobile.....	66
4.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	68
4.2.1 Resultados do Primeiro Cenário.....	68
4.2.2 Resultados do Segundo Cenário.....	72

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A telemetria é uma técnica amplamente utilizada para a coleta e transmissão de dados de sensores remotos para um centro de controle, onde as informações são analisadas e utilizadas para tomar decisões informadas. Com a crescente demanda por soluções de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, a tecnologia LoRa (Longo Alcance) tem emergido como uma opção promissora para aplicações de telemetria. No entanto, a implementação do LoRa em sistemas de telemetria enfrenta vários desafios técnicos e operacionais que devem ser considerados para garantir uma integração eficaz e eficiente.

Uma das principais vantagens do LoRa é sua capacidade de oferecer comunicação de longo alcance, que pode atingir até 15 km em ambientes rurais e 2 a 5 km em áreas urbanas densamente povoadas (Pieri, 2023). No entanto, a cobertura efetiva pode ser influenciada por fatores como obstáculos físicos e interferências eletromagnéticas. O desafio é garantir que a tecnologia LoRa possa fornecer cobertura suficiente para as aplicações de telemetria, especialmente em áreas remotas ou com condições ambientais adversas (El Rachkidy; Guitton; Kaneko, 2019).

Embora o LoRa seja eficiente em termos de consumo de energia, a largura de banda disponível para transmissão é limitada, o que pode impactar a taxa de dados transmitidos. O LoRa opera em diferentes bandas de frequência e oferece várias opções de largura de banda e taxas de dados, mas a escolha entre essas opções pode comprometer a capacidade de transmissão ou a distância alcançada (Marini et al., 2021). Para aplicações de telemetria que requerem alta frequência de dados ou grandes volumes de informações, a limitação na taxa de dados pode ser um desafio significativo.

Um dos principais benefícios do LoRa é seu baixo consumo de energia, o que permite a operação de dispositivos por longos períodos com baterias pequenas. No entanto, o tempo de vida da bateria é diretamente afetado pela frequência de transmissão e pelo consumo de energia dos sensores utilizados (Bocci, 2020). Para aplicações de telemetria que requerem transmissões frequentes, é necessário

otimizar o consumo de energia dos módulos LoRa e dos sensores para prolongar a vida útil da bateria e reduzir a necessidade de manutenção (Silva, 2023).

A comunicação em redes LoRa pode ser suscetível a interferências, especialmente em ambientes urbanos densos onde múltiplos dispositivos podem operar simultaneamente na mesma faixa de frequência. Além disso, a segurança da transmissão de dados é uma preocupação importante. Embora o LoRa utilize criptografia para proteger os dados, a implementação adequada das medidas de segurança é crucial para evitar a interceptação e a falsificação de informações (Semtech Corporation, 2015). A robustez das medidas de segurança deve ser avaliada e aprimorada para garantir a integridade dos dados transmitidos.

A integração dos sistemas LoRa com a infraestrutura de rede existente, como *gateways* e plataformas de gerenciamento de dados, é fundamental para o sucesso das aplicações de telemetria. A compatibilidade entre diferentes componentes e a eficiência na transmissão de dados são essenciais para garantir uma operação fluida e confiável (Pieri, 2023). A configuração e manutenção adequadas da infraestrutura de rede são necessárias para suportar a operação contínua e eficaz dos sistemas de telemetria baseados em LoRa.

Ao considerar a implementação de LoRa em sistemas de telemetria, é essencial balancear as vantagens de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia com os desafios de cobertura, interferências e segurança de dados. Com o avanço contínuo das tecnologias de comunicação e a otimização dos dispositivos, o LoRa continuará a se destacar como uma solução viável para diversas aplicações de telemetria, desde que os desafios operacionais sejam adequadamente mitigados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é simular o desempenho de um *transceiver* LoRa na transmissão de dados em diferentes ambientes, especificamente em áreas

urbanas e remotas, para avaliar a eficiência da tecnologia em termos de cobertura, taxa de transmissão, e consumo de energia.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos desta proposta, pode-se destacar:

- Investigar como as redes veiculares funcionam, incluindo os diferentes tipos de redes veiculares (VANETs), suas topologias e aplicações típicas.
- Estudar os requisitos técnicos do LoRa e do LoRaWAN, incluindo as especificações de transmissão, largura de banda, e consumo de energia, para aplicar a tecnologia de forma eficaz em sistemas de telemetria.
- Modelar e simular a comunicação de um *transceiver* LoRa em um ambiente urbano, considerando fatores como obstruções e interferências e colisão de pacotes.
- Modelar e simular a comunicação de um *transceiver* LoRa em um ambiente remoto, com foco na cobertura de longo alcance e redução de interferências e colisão de pacotes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha do LoRa se justifica pela crescente demanda por soluções de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, características essenciais para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Essas tecnologias permitem a transmissão de dados em grandes distâncias com um consumo mínimo de energia, o que é crucial para dispositivos que operam em locais de difícil acesso ou onde a infraestrutura de energia é limitada. Além disso, o LoRa é capaz de manter uma comunicação estável e eficiente em diferentes tipos de ambientes, como áreas urbanas densamente povoadas e áreas remotas, o que torna essa tecnologia especialmente adequada para a telemetria veicular.

Dada a necessidade de comunicação estável e eficiente em diversos ambientes, a implementação do LoRa em sistemas de telemetria oferece várias vantagens. Ela pode melhorar significativamente a cobertura e a confiabilidade da transmissão de dados, garantindo que informações críticas sobre o estado e desempenho dos veículos sejam coletadas e analisadas em tempo real. Isso é particularmente relevante para a manutenção preditiva e a gestão de frotas, onde a detecção precoce de problemas e a tomada de decisões informadas podem resultar em reduções significativas de custos operacionais e melhorias na segurança.

Além disso, o uso do LoRa pode contribuir para uma maior eficiência operacional, minimizando o tempo de inatividade dos veículos e otimizando o uso dos recursos da frota. Ao fornecer dados em tempo real, os operadores podem reagir rapidamente a quaisquer problemas, melhorar a logística e planejar a manutenção de forma mais eficaz. Essa abordagem proativa não apenas economiza recursos financeiros, mas também aumenta a segurança, ao evitar falhas inesperadas que poderiam comprometer a operação segura dos veículos.

Em resumo, a adoção do LoRa para aplicações de telemetria veicular apresenta uma solução eficiente e de baixo custo para a coleta de dados em tempo real. Com a capacidade de operar em diferentes ambientes e proporcionar uma comunicação estável, o LoRa tem o potencial de transformar a gestão de frotas e a manutenção preditiva, promovendo uma operação mais segura e econômica. No entanto, para maximizar esses benefícios, é fundamental que as organizações considerem cuidadosamente os desafios técnicos e operacionais associados à implementação dessa tecnologia, como a necessidade de infraestrutura adequada e a garantia de segurança na transmissão de dados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A evolução das tecnologias de comunicação tem impulsionado avanços significativos em diversas áreas, e a telemetria veicular emerge como um campo de crescente relevância na era digital.

A pesquisa inicia com funcionamento das redes veiculares, que são projetadas para facilitar a comunicação entre veículos e entre veículos e a infraestrutura. O estudo dessas redes é essencial para entender como a comunicação veicular pode ser otimizada em cenários de via pública, garantindo a troca eficiente de dados em condições de tráfego dinâmicas e variáveis.

Em seguida, o trabalho explora as especificações do LoRaWAN (Rede de Área Ampla de Longo Alcance) e LoRa. O LoRa é uma tecnologia de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, ideal para aplicações de IoT e telemetria em áreas extensas. O LoRaWAN é um protocolo de rede que define o padrão para a comunicação em redes LoRa, oferecendo funcionalidades adicionais como segurança e gerenciamento de redes. A análise detalhada dessas especificações permitirá entender como essa tecnologia pode ser aplicada à telemetria veicular, especialmente em contextos em que a comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia são cruciais.

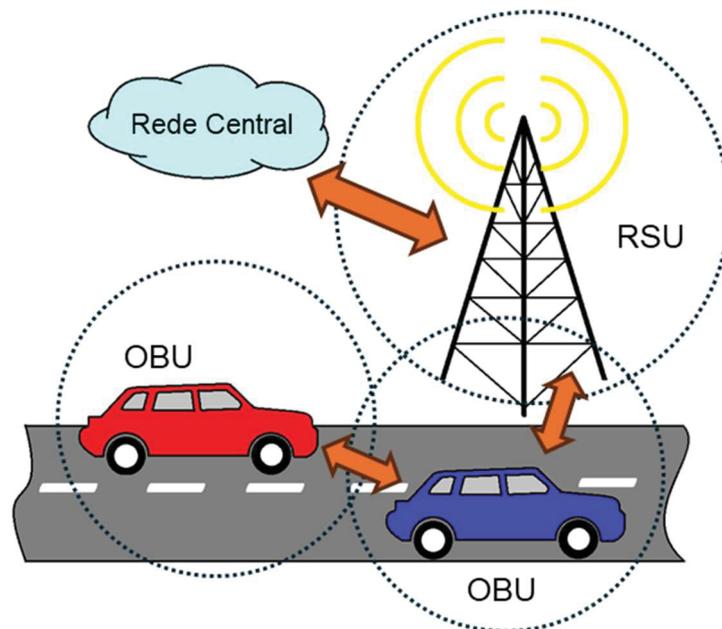
2.1 REDES VEICULARES

Redes Veiculares *Ad Hoc*¹ (VANETs) surgiram como uma tecnologia promissora para melhorar a segurança e a eficiência no trânsito, além de oferecer um sistema de comunicação de emergência alternativo em caso de desastres naturais (Abdelgader; Lenan, 2014). As VANETs aplicam os princípios das Redes Móveis *Ad Hoc* (MANETs) ao domínio dos veículos, enfrentando desafios como desconexões frequentes e conectividade intermitente devido à natureza altamente dinâmica dessas

¹ *Ad Hoc* significa "para isso" em latim e refere-se a algo criado para um propósito específico. Uma rede *Ad Hoc* é temporária e descentralizada, permitindo a comunicação direta entre dispositivos sem infraestrutura fixa.

redes (Gulia, 2020). Essas redes são compostas por três componentes principais: Unidades Embarcadas (OBUs), Unidades de Infraestrutura Rodoviária (RSUs) e Servidores de Gerenciamento, FIGURA 1. As OBUs atuam como nós móveis na rede, comunicando-se uns com os outros e com as RSUs, que são instaladas ao longo das estradas e facilitam a disseminação de informações e a comunicação com servidores centrais responsáveis pelo gerenciamento da rede e pelo suporte a serviços avançados (Almeida, 2021).

FIGURA 1 – ARQUITETURA BÁSICA DE REDE VEICULAR



FONTE: O autor (2024).

Um dos principais desafios enfrentados pelas VANETs é a necessidade de garantir a comunicação eficiente e em tempo real, especialmente em aplicações sensíveis ao tempo, como a Prevenção Cooperativa de Colisões (CCA). Os protocolos reativos convencionais não são adequados para essas aplicações devido à latência na descoberta de rotas e à necessidade de transmissão excessiva (Dixit; Kumar, 2022). Para mitigar esses problemas, o planejamento cooperativo de movimento tem sido sugerido como uma abordagem eficaz. Esta abordagem considera o planejamento de movimento como um processo de tomada de decisão, permitindo que os veículos ajustem seus movimentos para evitar colisões e retornem à rota original quando o risco for reduzido (Dixit; Kumar, 2022).

Além de abordar os desafios de conectividade, a colaboração entre as indústrias de Tecnologia da Informação (TI) e automotiva está acelerando o desenvolvimento de Sistemas de Transporte Inteligentes Cooperativos (C-ITS). Esses sistemas oferecem benefícios significativos, como segurança rodoviária melhorada e maior eficiência no transporte, dependendo de uma infraestrutura de comunicação segura e de baixa latência para atender aos rigorosos requisitos de desempenho de aplicações veiculares críticas para a segurança (Gulia, 2020). No entanto, a heterogeneidade das diversas tecnologias de acesso por rádio e a inflexibilidade em sua implantação resultam em fragmentação de rede e utilização ineficiente dos recursos, representando um obstáculo para a realização de uma arquitetura de rede veicular altamente eficiente (Mahmood; Zhang; Sheng, 2019).

As VANETs operam em diferentes ambientes e tipos de canais, sendo capazes de transmitir dados de vídeo, áudio, internet e imagens (Abdelgader; Lenan, 2014). No entanto, questões como efeitos de propagação multipercurso e deslocamento *Doppler*, comuns em comunicações celulares, ainda representam desafios para essas redes. É crucial determinar se as soluções propostas para comunicações celulares são aplicáveis a redes veiculares. Além disso, congestionamentos ocorrem quando a demanda de viagens excede a capacidade das vias, e soluções baseadas em Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) surgem como uma opção viável para minimizar problemas relacionados ao trânsito, aumentando a segurança e a eficiência nas vias (Almeida, 2021).

A segurança é outra preocupação crítica em ambientes de redes veiculares. As soluções de segurança para VANETs tradicionalmente se baseiam em esquemas criptográficos convencionais, que podem ser vulneráveis a ataques internos e nem sempre são viáveis devido à natureza altamente dinâmica dessas redes (Mahmood; Zhang; Sheng, 2019). Como alternativa, esquemas baseados em confiança foram introduzidos, onde a comunicação e disseminação de mensagens de segurança entre veículos se baseiam na confiança mútua. Nessas abordagens, a confiança direta é baseada na observação de um veículo sobre outro, enquanto a confiança indireta é computada por meio de recomendações de veículos vizinhos de um salto.

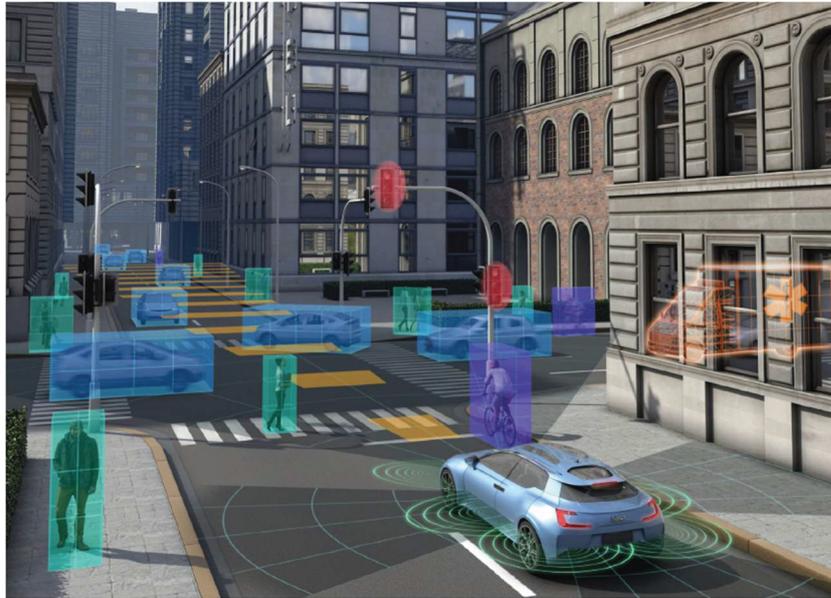
As VANETs também têm implicações significativas para a segurança pública. A comunicação em tempo real entre veículos pode ser utilizada para criar Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (ADAS), que alertam os motoristas sobre condições perigosas da estrada, presença de obstáculos e mudanças repentinas no tráfego. Esses sistemas aumentam a segurança não apenas dos ocupantes dos veículos, mas também de pedestres e ciclistas (Almeida, 2021). As redes veiculares têm o potencial de reduzir congestionamentos e aumentar a segurança nas vias, além de operarem em diferentes tipos de ambientes e canais para transportar os diversos tipos de dados necessários para a Internet dos Veículos (IoV). Com a implementação de tecnologias como Redes Definidas por *Software* (SDN) e computação em nuvem, é possível otimizar a utilização dos recursos de rede, facilitando uma comunicação eficiente entre veículos e infraestrutura (Mahmood; Zhang; Sheng, 2019).

Em última análise, os avanços tecnológicos contínuos e a integração de novas abordagens, como computação em nuvem e SDN, estão moldando o futuro das redes veiculares. A colaboração entre diferentes setores e a superação de desafios técnicos serão fundamentais para alcançar uma infraestrutura de comunicação veicular eficiente, segura e confiável, capaz de transformar a mobilidade urbana e aumentar significativamente a segurança no trânsito. A comunicação entre veículos e a implementação de soluções ITS são passos cruciais nessa direção, proporcionando benefícios substanciais para a sociedade (Almeida, 2021).

2.1.1 Arquitetura das Redes Veiculares

A comunicação Veículo para Tudo (V2X) representa uma evolução significativa na segurança e eficiência dos sistemas de transporte modernos, desempenhando um papel fundamental na criação de um ecossistema de transporte conectado e inteligente. V2X refere-se à troca de informações entre um veículo e qualquer entidade que possa afetar o veículo, como outros veículos, infraestrutura rodoviária, pedestres e redes de comunicação, FIGURA 2. Esta tecnologia visa melhorar a segurança no trânsito, a eficiência e a experiência do usuário, facilitando uma troca contínua de dados em tempo real. De acordo com Dixit e Kumar (2022), a V2X é essencial para criar ambientes de transporte mais seguros e eficientes, permitindo a transmissão de dados críticos em tempo real.

FIGURA 2 – SISTEMA V2X



FONTE: Filippi et al. (2017).

Os Sistemas ADAS permitem o controle parcialmente autônomo dos veículos em determinadas situações, aumentando a segurança e o conforto dos passageiros. Integrados ao V2X, esses sistemas funcionam como sensores adicionais, fornecendo dados sobre obstáculos e perigos invisíveis, como cruzamentos ferroviários e obras na estrada. Além de melhorar a segurança, a comunicação V2X facilita a busca por vagas de estacionamento e otimiza as rotas para evitar congestionamentos e áreas com baixa qualidade do ar.

A latência é um fator crítico para aplicações como a detecção de pré-colisão, exigindo tempos de resposta extremamente baixos. A latência, definida como o tempo necessário para receber corretamente um pacote de dados, é influenciada pelo acesso aos recursos da camada física e pelo tempo de recepção dos pacotes. Em um ambiente dinâmico como o das comunicações V2X, manter a latência baixa é essencial para garantir a eficácia das aplicações de segurança (Mannoni et al., 2019).

Wang, Nganso e Schotten (2023) destacam que as comunicações V2X têm o potencial de reduzir drasticamente o número de colisões e mortes no trânsito. Desde 1999, a Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos (FCC) alocou 75 MHz de espectro na banda de 5,9 GHz para Serviços de ITS, promovendo pesquisas intensivas em tecnologias V2X e resultando em padrões como as Comunicações

Dedicadas de Curto Alcance (DSRC), baseadas no IEEE 802.11p. Esses padrões permitem uma comunicação segura e rápida entre veículos e infraestrutura, sendo essenciais para o desenvolvimento de aplicações V2X. A V2X pode ser categorizada principalmente em duas tecnologias: baseada em Rede de Área Local Sem Fio (WLAN) e baseada em Celular. A TABELA 1 apresenta uma visão geral dessas tecnologias.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS SEM FIO USADAS NO V2X

Tecnologia Sem Fio	Tipo de Rede	Espectro	Alcance de Transmissão	Taxa de Transmissão	Apoio à Mobilidade
LoRa	WAN	433, 868, 915 (MHz)	2 a 5 km (Urbano) 15 km (Suburbano)	27 kbps	Sim
DSRC	<i>Wireless Ad hoc</i>	5,8 a 5,9 GHz	1 km	2,5 Mbps	Sim
Celular-V2X	Banda Larga Sem Fio Celular	5,9 GHz	> DSRC e LoRa	> DSRC e LoRa	Sim

FONTE: Adaptado de Haque et al. (2020).

Embora o DSRC seja simples e eficiente, sua performance pode ser comprometida em cenários de alta densidade de veículos. A variabilidade dos padrões e frequências propostos para redes em malha torna a criação de um design global desafiadora, especialmente diante do ambiente elétrico ruidoso dos veículos modernos, como os elétricos, que possuem altos níveis de tensão e corrente (Gulia, 2020).

Haque et al. (2020) enfatizam a importância de uma arquitetura de comunicação robusta e da escolha correta da tecnologia para assegurar a confiabilidade e eficácia da comunicação V2X, especialmente em sistemas autônomos e cidades inteligentes. Veículos e infraestrutura equipados com OBUs e RSUs podem comunicar-se eficientemente, compartilhando dados em tempo real sobre velocidade, localização e aceleração, o que é vital para evitar acidentes e sugerir rotas alternativas.

A comunicação V2X melhora a segurança do tráfego e aumenta a eficiência dos sistemas de transporte. A troca de dados entre veículos e infraestrutura permite a

implementação de sistemas de ITS, otimizando o fluxo de tráfego e a operação de sinais inteligentes. Além disso, pode informar sobre a presença de pedestres e ciclistas, melhorando ainda mais a segurança nas vias urbanas (Saponara; Gagliardi, 2018). Almeida (2021) complementa que a comunicação V2X fornece informações valiosas para motoristas, pedestres e agências de transporte, contribuindo para um ambiente de trânsito mais seguro e eficiente. Molina-Masegosa, Gozávez e Sepulcre (2020) ressaltam que as comunicações V2X são fundamentais para aplicações de segurança ativa e gestão de tráfego. As tecnologias IEEE 802.11p e DSRC, amplamente testadas e avaliadas, são cruciais para a implementação bem-sucedida de sistemas V2X. Contudo, a interoperabilidade entre diferentes tecnologias é essencial para garantir a eficiência e segurança das comunicações V2X. Avaliações rigorosas sob condições realistas são necessárias para apoiar decisões regulatórias e de negócios no interesse público.

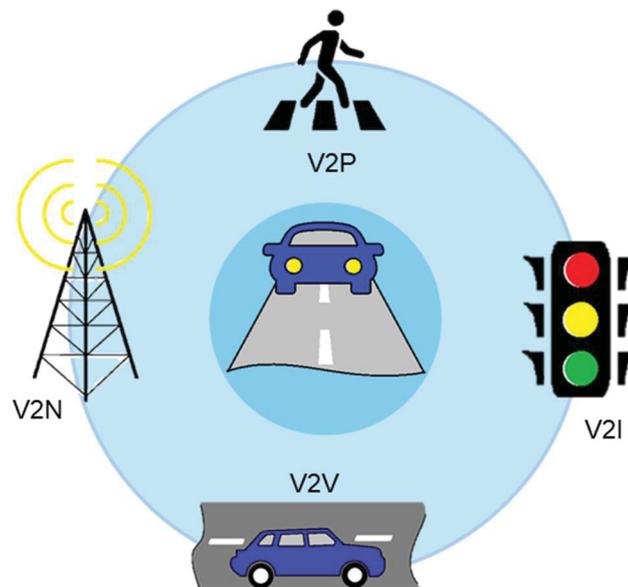
A tecnologia V2X deve operar de maneira robusta em ambientes dinâmicos, com altas velocidades relativas entre transmissores e receptores, suportando a baixa latência necessária para aplicações de segurança em rodovias e interseções urbanas congestionadas. Em cenários de alta densidade de tráfego, a capacidade de comunicação deve ser suficiente para evitar a degradação da comunicação e o aumento da latência, fatores críticos para a segurança e eficiência do sistema (Filippi et al., 2017). Finalmente, Dixit e Kumar (2022) destacam que a formação de redes em malha entre objetos móveis e estacionários é crucial para fornecer a cobertura necessária sem a necessidade de instalar transmissores caros dedicados ao sistema. Superar desafios técnicos, como a criação de transmissores e receptores de rádio confiáveis e garantir a segurança contra interferências maliciosas, é essencial para o sucesso das comunicações V2X. Gulia (2020) também ressalta que a comunicação V2X baseada em WLAN deve ser resistente à interferência eletromagnética e capaz de transmitir mensagens de segurança de forma eficiente.

2.1.2 Tipos de Comunicação V2X

Como já mencionado anteriormente, a comunicação V2X representa um avanço significativo na interação entre veículos, infraestruturas, redes e até mesmo pedestres dentro do ecossistema de transporte inteligente. Este sistema permite uma

troca de informações em tempo real que melhora a segurança, eficiência e conveniência nas estradas modernas. A seguir, exploraremos os principais tipos de comunicação V2X: Veículo para Veículo (V2V), Veículo para Infraestrutura (V2I), Veículo para Pedestre (V2P), Veículo para Rede (V2N), FIGURA 3, destacando como cada um desempenha um papel crucial na transformação digital do transporte.

FIGURA 3 – TIPOS DE COMUNICAÇÃO DO SISTEMA V2X

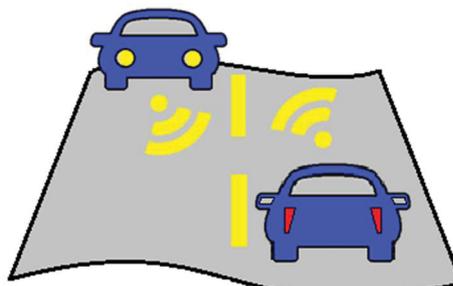


FONTE: Adaptado de Gulia (2020).

2.1.2.1 Comunicação Veículo para Veículo (V2V)

A comunicação veicular, conhecida como V2V, é um componente crucial da tecnologia V2X. A V2V permite que veículos se comuniquem diretamente entre si, compartilhando informações essenciais para aumentar a segurança nas estradas, melhorar a eficiência do tráfego e reduzir acidentes, FIGURA 4.

FIGURA 4 – COMUNICAÇÃO V2V



FONTE: O autor (2024).

Sua principal vantagem é a capacidade de comunicação sem utilizar redes externas, como redes celulares, o que possibilita uma comunicação *Ad Hoc* com um alcance de 1 km e uma visão de 360° dos veículos ao redor. No entanto, essa tecnologia ainda enfrenta muitos desafios de implementação, apesar de suas inúmeras vantagens (Dixit; Kumar, 2022).

De acordo com Mahmood, Zhang e Sheng (2019), os veículos disseminam informações críticas de segurança para outros veículos nas proximidades imediatas através de comunicação V2V *multi-hop*² ou retransmitindo mensagens por meio de RSUs, cada uma utilizando uma tecnologia de acesso de rádio diferente. Contudo, essas mensagens podem se perder se a tecnologia de acesso de rádio falhar ou se o próximo salto se tornar indisponível, especialmente em condições de tráfego esparso, o que pode resultar em uma quebra de comunicação e desperdício de recursos da rede.

A comunicação V2V tem como objetivo evitar colisões, reduzir o tempo de viagem e promover a direção autônoma (Haque et al., 2020). Essa tecnologia permite que os motoristas tenham uma visão global do tráfego ao seu redor, que não seria possível apenas com a visão direta. Por exemplo, a troca de informações como posição e velocidade permite que um motorista visualize todos os veículos ao redor em uma tela em seu carro, o que é extremamente útil em condições de baixa visibilidade, como neblina ou chuva, e em curvas ou interseções (Kharate; Dhagdi, 2013).

Conforme Saponara e Gagliardi (2018), a comunicação V2V é uma parte integral do ITS e será uma tecnologia central para alcançar altos níveis de condução autônoma. À medida que os veículos se tornam cada vez mais inteligentes, eles poderão detectar perigos potenciais, como risco de colisão, ultrapassagens inseguras e obstáculos, melhorando a prevenção de colisões e reduzindo fatalidades. A V2V caracteriza-se pela comunicação direta entre veículos, sem a necessidade de uma infraestrutura como uma RSU. Essa comunicação envolve a transmissão de dados

² *Multi-hop* é um método de comunicação em redes onde dados são transmitidos através de múltiplos nós intermediários até o destino, melhorando a cobertura e a resiliência da rede.

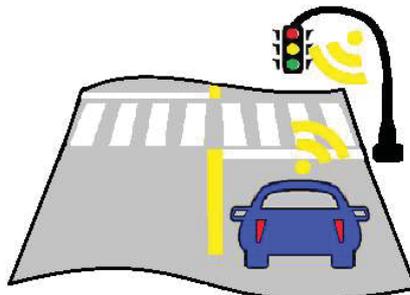
coletados e processados por sensores embarcados no veículo, enviados como mensagens utilizando os recursos de comunicação das OBU's (Almeida, 2021).

Portanto, a comunicação V2V oferece vantagens significativas para a segurança e eficiência do transporte, mas ainda há desafios substanciais a serem superados para sua plena implementação e padronização. A colaboração entre diferentes tecnologias de acesso de rádio e a criação de protocolos mais robustos são cruciais para garantir a confiabilidade e a eficácia dessa tecnologia emergente. Avaliações rigorosas e o desenvolvimento contínuo de soluções tecnológicas são essenciais para enfrentar os desafios e maximizar o potencial da comunicação V2V.

2.1.2.2 Comunicação Veículo para Infraestrutura (V2I)

A comunicação V2I é uma componente crucial para a implementação de ITS, onde a interação ocorre entre veículos e infraestrutura rodoviária, como semáforos e sinais de trânsito, FIGURA 5. A comunicação V2I envolve a troca de dados entre veículos e infraestruturas rodoviárias para diversas aplicações, como prevenção de colisões, controle de sinais de tráfego e prevenção de congestionamentos. Haque et al. (2020) afirmam que, em cenários suburbanos com diferentes obstáculos, a cobertura obtida é significativamente maior do que a alcançada por tecnologias de alta largura de banda. Essa extensão de cobertura é crucial para a eficiência da comunicação V2I.

FIGURA 5 – COMUNICAÇÃO V2I



FONTE: O autor (2024).

Além disso, a comunicação V2I pode ser utilizada para permitir que veículos de emergência antecipem sinais vermelhos, garantindo luz verde ao longo de seu

trajeto. Isso é possível graças à comunicação dos semáforos com os veículos dentro do seu escopo de comunicação, proporcionando aos motoristas uma melhor compreensão das condições dos cruzamentos e ajudando a evitar colisões no tráfego (Kharate; Dhagdi, 2013). No entanto, a comunicação V2I enfrenta desafios significativos devido à rápida atenuação do sinal, maior dispersão da frequência *Doppler* e maior dispersão do atraso de múltiplos caminhos em comparação com outros sistemas sem fio. Essa robustez é essencial em situações anormais, pois colisões e acidentes raramente ocorrem em condições normais (Abdelgader; Lenan, 2014). Essa robustez adicional é um requisito fundamental para garantir a segurança em cenários reais de trânsito.

Almeida (2021) destaca que essa tecnologia visa promover a conectividade em condições de baixa densidade de veículos, oferecendo acesso à Internet para as OBUs e outras aplicações que necessitam de comunicação com a infraestrutura da via, como semáforos inteligentes. Dessa forma, a comunicação V2I pode ser vista como uma solução promissora para melhorar a conectividade e a segurança no trânsito.

Conforme Haque et al. (2020), em cenários V2I, é essencial que uma OBU alcance a RSU com a melhor qualidade de *link* em vez de transmitir os dados do veículo para todas as RSUs próximas. Isso não apenas torna a comunicação mais eficiente, mas também reduz a sobrecarga de dados. A robustez da comunicação V2I é especialmente crítica em condições anormais de tráfego. Abdelgader e Lenan (2014) afirmam que, devido à rápida atenuação do sinal e à maior dispersão do atraso, a comunicação V2I deve ser extremamente robusta para evitar colisões e acidentes. Isso sublinha a importância de desenvolver tecnologias que possam suportar as condições desafiadoras encontradas nas vias urbanas e suburbanas.

Finalmente, Almeida (2021) sugere que a V2I pode promover a conectividade em áreas de baixa densidade de veículos, proporcionando acesso à Internet e suportando aplicações como semáforos inteligentes. Essa conectividade aprimorada pode ser uma chave para o desenvolvimento de cidades inteligentes, onde a infraestrutura de transporte é integrada de maneira eficiente e segura com os veículos em circulação.

2.1.2.3 Comunicação Veículo para Pedestre (V2P)

A comunicação V2P é focada em aumentar a segurança dos pedestres nas vias urbanas, permitindo que veículos se comuniquem diretamente com dispositivos móveis ou *wearables*³ carregados por pedestres, FIGURA 6.

FIGURA 6 – COMUNICAÇÃO V2P



FONTE: O autor (2024).

Haque et al. (2020) destacam que as tecnologias subjacentes dos *smartphones* podem desempenhar um papel crucial na implementação da comunicação V2P, ajudando a criar um ambiente mais seguro para pedestres e veículos. Além disso, Almeida (2021) observa que, em aplicações de segurança V2P baseadas em *smartphones* e *Wi-Fi*, o alcance normalmente varia entre 100 e 150 m. Esse alcance é considerado adequado para áreas urbanas, onde os veículos podem estar se movendo a velocidades de até 50 km/h. A capacidade de transmitir mensagens de segurança entre pedestres e veículos pode ser fundamental para evitar acidentes em ambientes urbanos congestionados.

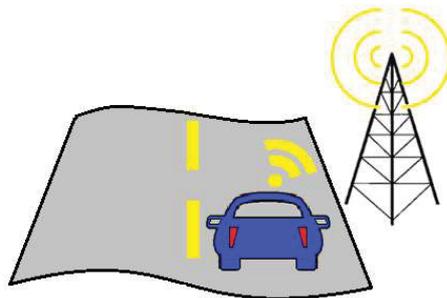
Conforme Haque et al. (2020), a integração de *smartphones* na comunicação V2P pode melhorar a detecção de pedestres e a resposta dos veículos a esses pedestres, aumentando a segurança nas ruas. No entanto, Almeida (2021) ressalta que o alcance limitado das tecnologias *Wi-Fi* e de *smartphones* pode representar um desafio, especialmente em situações em que veículos e pedestres estão se movendo rapidamente.

³ Dispositivos eletrônicos que podem ser usados como acessórios ou roupas, projetados para serem integrados ao corpo do usuário.

2.1.2.4 Comunicação Veículo para Rede (V2N)

A comunicação V2N permite que os veículos se conectem a redes de comunicação mais amplas, FIGURA 7. Essa forma de comunicação é crucial para serviços de *infotainment*⁴, navegação em tempo real e atualizações remotas de *software*.

FIGURA 7 – COMUNICAÇÃO V2N



FONTE: O autor (2024).

Esse tipo de comunicação é uma das partes menos exploradas da comunicação V2X (Haque et al., 2020). A V2N permite que os veículos recebam informações sobre as condições da estrada e o tráfego na área, além do campo de visão do motorista, utilizando tecnologias de comunicação de longa distância (Gulia, 2020). Dixit e Kumar (2022) ressaltam a importância de integrar tecnologias de comunicação celular para melhorar a eficiência e a abrangência das comunicações V2N. Essa integração permite uma troca mais robusta de dados, beneficiando a segurança e a gestão do tráfego.

Conforme Gulia (2020), a V2N é essencial para fornecer aos motoristas informações em tempo real sobre o trânsito e as condições das estradas, permitindo uma melhor tomada de decisão. No entanto, Haque et al. (2020) destacam que a comunicação V2N ainda é uma área pouco explorada, sugerindo que há um vasto potencial a ser desenvolvido e pesquisado para otimizar sua aplicação. Adicionalmente, Dixit e Kumar (2022) sugerem que a utilização de rádios convencionais em veículos pode complementar a comunicação V2N, especialmente

⁴ São serviços que combinam informações (*info*) e entretenimento (*entertainment*), geralmente fornecidos em sistemas integrados em veículos, dispositivos móveis ou em outras plataformas.

em áreas onde a cobertura celular é limitada. Essa abordagem híbrida pode ajudar a superar algumas das limitações atuais da infraestrutura de comunicação, oferecendo uma rede mais resiliente e confiável para os veículos.

2.2 LORA E LORAWAN

A comunicação para a IoT se beneficia significativamente das tecnologias LoRa e LoRaWAN, que desempenham papéis distintos, mas complementares. Enquanto o LoRa se refere à camada física de transmissão, com modulação proprietária, o LoRaWAN é responsável pelas camadas de protocolos, facilitando a conexão de dispositivos como sensores e atuadores aos *gateways* através de modulação em Radiofrequência (RF). Essa diferenciação é crucial para entender como cada componente contribui para a comunicação eficiente e de baixo consumo de energia em redes IoT.

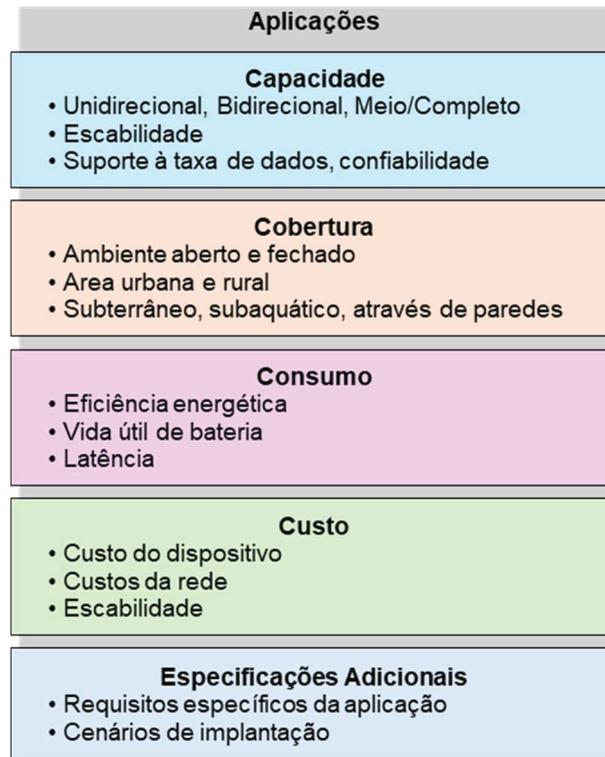
Segundo Haque et al. (2020), o LoRa é projetado para equilibrar o alcance e a taxa de transmissão de dados, alcançando distâncias de até 15 km em áreas suburbanas com linha de visão direta, e mantendo uma taxa de transmissão entre 0,3 kbps e 37,5 kbps. Essa configuração é ideal para operar em faixas de frequência Industrial, Científico e Médico (ISM), adaptando-se às regulamentações regionais.

Pieri (2023) detalha que o LoRaWAN, utilizando o LoRa como camada física, é o protocolo responsável pelas camadas de enlace e rede. Ele organiza a comunicação e assegura a integridade dos dados transmitidos dentro da rede, essencial para a eficiência e robustez da comunicação IoT.

Boquet et al. (2020) destacam que a tecnologia de Rede de Área Ampla de Baixo Consumo de Energia (LPWAN), da qual o LoRaWAN é um exemplo proeminente, oferece uma arquitetura de rede simplificada adequada para aplicações de longo alcance e baixo consumo de energia, FIGURA 8. Contudo, o desempenho do LoRaWAN pode ser comprometido em cenários de alta densidade devido a regulamentações de ciclo de trabalho e ao uso de protocolos simples de Controle de Acesso ao Meio (MAC). Essas limitações têm motivado pesquisas para melhorar a

operação do LoRaWAN, abordando questões de escalabilidade e confiabilidade, e buscando otimizar o uso do canal e o agendamento de transmissões.

FIGURA 8 – APLICAÇÕES LPWAN



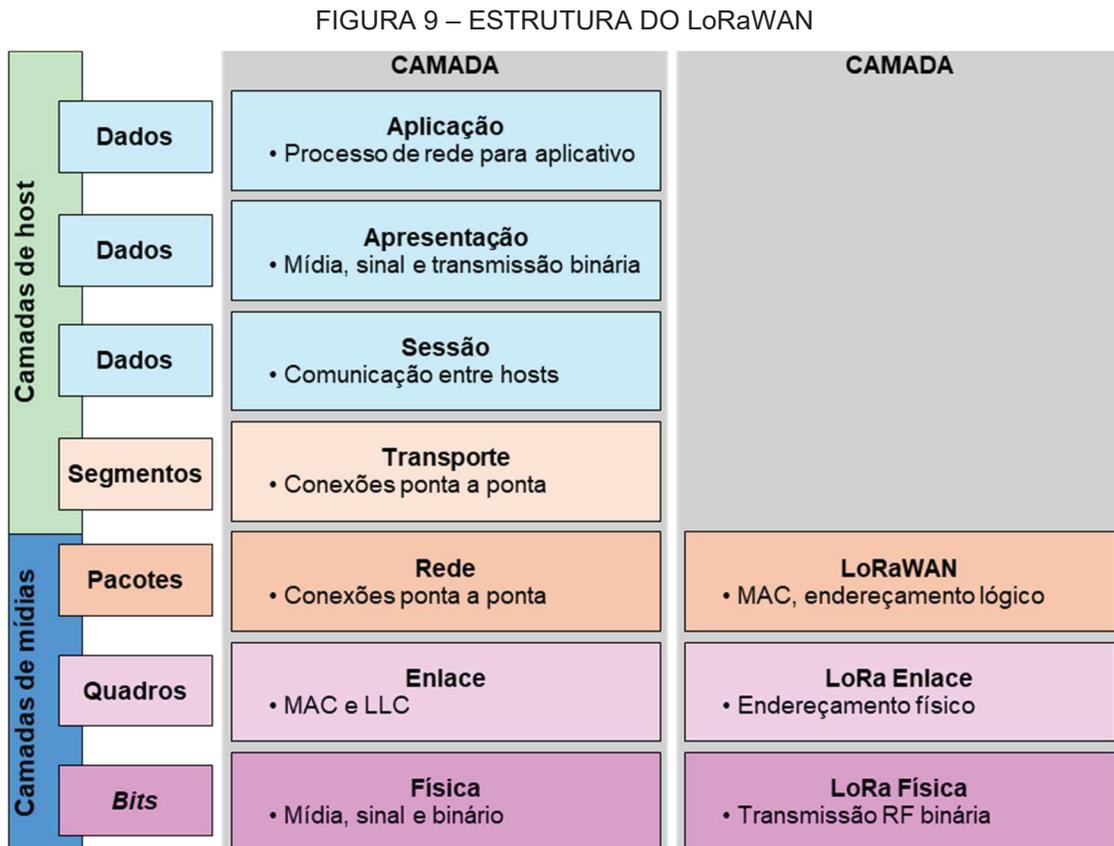
FONTE: Adaptado de Pieri (2023).

A LoRa *Alliance*, fundada em 2015, é uma organização global sem fins lucrativos dedicada a promover e padronizar a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN. Conforme Bocci (2020), a LoRa Alliance visa assegurar a interoperabilidade entre diferentes redes e otimizar a tecnologia para sensores de baixo custo e operados por bateria. A padronização inclui a definição de várias classes de nós, equilibrando a latência da rede com a vida útil da bateria. Esses esforços são cruciais para a criação de redes massivas em áreas urbanas, garantindo que o protocolo seja resistente a ruídos e sinais com frequências próximas, e que complemente redes móveis e outras tecnologias sem fio.

2.2.1 Estrutura e Funcionamento do Protocolo LoRaWAN

O protocolo LoRaWAN utiliza sua camada física para modular sinais em sub bandas específicas e aplica as camadas de enlace e rede do modelo de Interconexão

de Sistemas Abertos (OSI) para assegurar a detecção e correção de erros, bem como a autenticidade dos nós na rede. Esta estrutura é fundamental para evitar congestionamentos e otimizar a eficiência da comunicação dentro da rede LoRaWAN, assegurando uma comunicação robusta e confiável, mesmo em ambientes desafiadores, FIGURA 9.

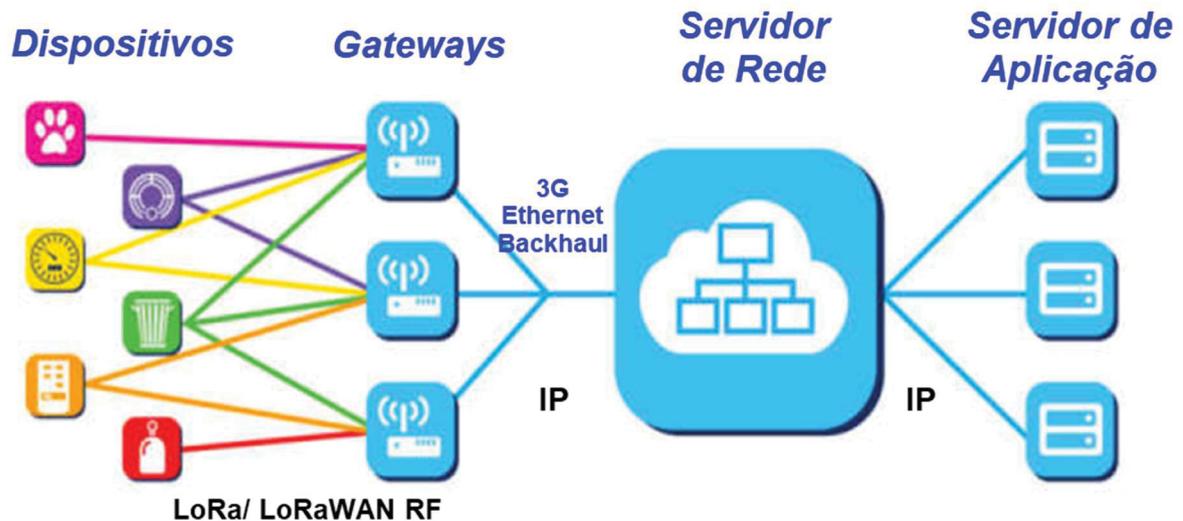


FONTE: Adaptado de Semtech Corporation (2019).

2.2.1.1 Camada de Rede e Enlace do Protocolo LoRaWAN

A arquitetura da rede LoRaWAN, ilustrada na FIGURA 10, segue uma topologia em estrela e inclui dispositivos finais, *gateways*, servidores de rede e servidores de aplicação (Jiang et al., 2019). No modelo LoRaWAN, dispositivos finais comunicam-se diretamente com os *gateways* usando modulação LoRa, enquanto os *gateways* retransmitem essas mensagens para o servidor de rede através de uma conexão de Protocolo de Internet (IP) padrão (Pieri, 2023). O servidor de rede gerencia a rede, realiza a autenticação de pacotes e assegura a integridade dos dados antes de encaminhá-los ao servidor de aplicação (Magrin, Capuzzo, Zanella, 2019).

FIGURA 10 – ARQUITETURA DE REDE DO LoRaWAN



FONTE: Adaptado de Sant'Ana (2017).

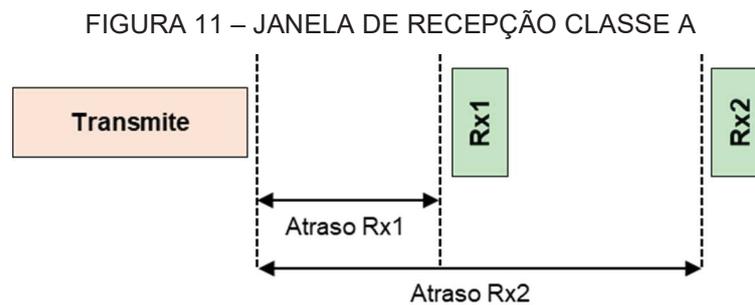
Os *gateways* mediam a troca de mensagens entre os nós e o servidor de rede, transmitindo mensagens decodificadas e informações adicionais como Razão Sinal-Ruído (SNR) e Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI). Eles também podem processar mensagens em até nove canais simultaneamente, enquanto cada nó utiliza um canal combinado com espalhamento espectral (Sant'Ana, 2017). A rede LoRaWAN adota um modelo de *duty cycle*⁵, em que os dispositivos ficam em modo de espera por mais tempo do que transmitindo, o que é crucial para a eficiência energética dos nós autônomos alimentados por bateria (Sant'Ana, 2017).

Em relação à segurança, Haque et al. (2020) observam que o LoRaWAN utiliza o Padrão de Criptografia Avançado (AES) de 128 *bits*, assim, conforme Jiang et al. (2019) e Pieri (2023) protegendo os dados transmitidos e mantendo a integridade das mensagens sem acesso aos dados da aplicação. No entanto, (Ferré (2017) e Chinchilla-Romero et al. (2021) apontam que o LoRaWAN enfrenta desafios como a modelagem de colisões baseada em ALOHA, que pode não ser precisa em cenários de alta densidade de dispositivos, aumentando a Taxa de Erro de Pacotes (PER) e degradando o desempenho da rede.

⁵ Medida do tempo durante o qual um sistema, dispositivo ou circuito está ativo em relação ao tempo total. É comumente expresso em porcentagem e é usado para descrever a relação entre o tempo em que um sinal ou um dispositivo está ligado e o tempo total do ciclo.

De acordo com Magrin, Capuzzo e Zanella (2019), o protocolo LoRaWAN define três classes de dispositivos: Classe A, Classe B e Classe C. Cada classe oferece diferentes características de comunicação e consumo de energia, adaptando-se a diversas necessidades de aplicação.

Os dispositivos da Classe A, FIGURA 11, são a base do protocolo LoRaWAN e são conhecidos por seu consumo eficiente de energia, tornando-os adequados para aplicações que exigem comunicação ocasional. Na Classe A, a comunicação bidirecional é possível, mas os dispositivos permanecem na maior parte do tempo em modo de *sleep*, ativando-se apenas para transmitir dados quando necessário. Após uma transmissão *uplink*, o dispositivo abre duas janelas curtas para recepção de *downlink*: Rx1 e Rx2, com intervalos de atraso entre a transmissão e a abertura das janelas de recepção (Pieri, 2023).

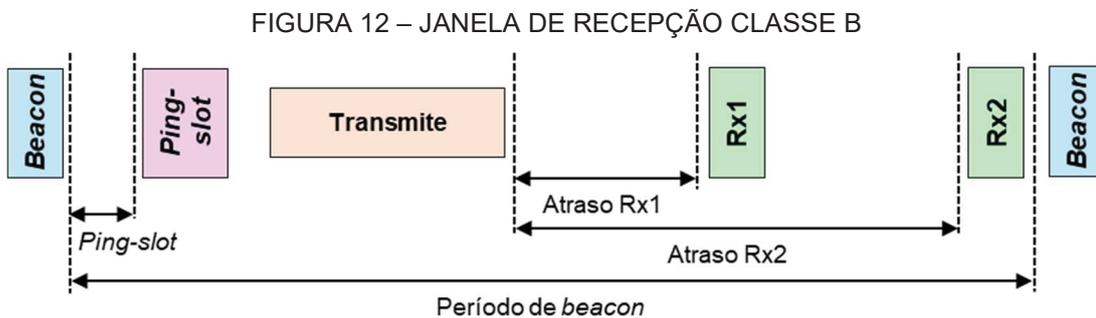


FONTE: Adaptado Sant'Ana (2017).

Conforme descrito por Ferré (2017), a Classe A opera com base no protocolo ALOHA. Isso implica que as janelas de recepção são aleatórias e o dispositivo deve esperar pela próxima oportunidade para receber uma resposta do servidor. Silva (2023) destaca que a Classe A é obrigatória para todos os dispositivos LoRaWAN e é a mais eficiente em termos de consumo de bateria, o que a torna ideal para dispositivos que realizam transmissões esporádicas e precisam de baixo consumo energético.

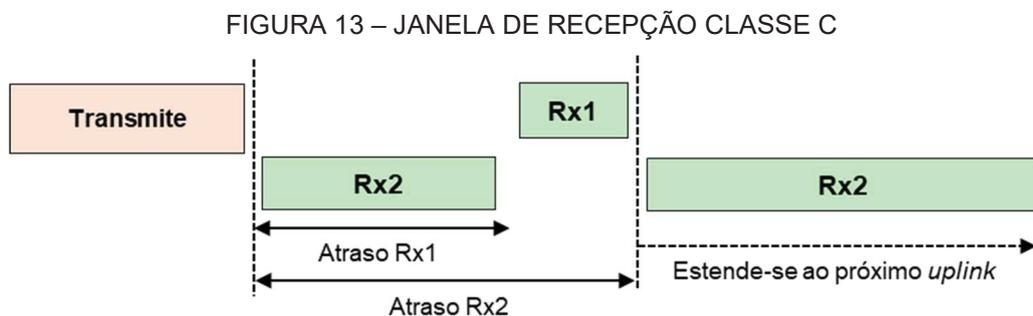
Os dispositivos da Classe B, ilustrados na FIGURA 12, oferecem maior flexibilidade na recepção de dados em comparação com a Classe A, permitindo a abertura de janelas de recepção adicionais em horários programados. Isso é possível graças à sincronização dos dispositivos com os *gateways* por meio de *beacons*

periódicos (Marini et al., 2021). De acordo com Sant’Ana (2017), a Classe B utiliza um protocolo do tipo ALOHA, no qual os dispositivos recebem uma janela extra, chamada de *ping-slot*, após a recepção de um *beacon* do *gateway*. A principal vantagem dessa classe é a capacidade de manter o dispositivo disponível para recepção em momentos mais previsíveis, proporcionando uma melhor coordenação com os *gateways*. No entanto, isso vem com um custo maior em termos de consumo de energia em comparação com a Classe A (Pieri, 2023).



FONTE: Adaptado Sant’Ana (2017).

Por outro lado, a Classe C, FIGURA 13, oferece o nível mais alto de disponibilidade de recepção e a menor latência, mantendo janelas de recepção abertas continuamente, exceto durante a transmissão de *uplink* (Sant’Ana, 2017). Segundo Ferré (2017), essa operação constante torna a Classe C ideal para aplicações que requerem uma latência mínima, embora com um custo mais elevado de consumo de energia.



FONTE: Adaptado Sant’Ana (2017).

O protocolo LoRaWAN utiliza um mecanismo denominado Taxa de Dados Adaptativa (ADR) para simplificar a configuração de nós e a integração de novos

dispositivos na rede, otimizando a operação dos dispositivos finais. Conforme descrito por Pieri (2023), a ADR facilita a adição de novos dispositivos à rede, ajustando dinamicamente a taxa de dados e a potência de transmissão para melhorar a taxa de entrega de pacotes. Como corroborado por Bor e Roedig (2017), esse ajuste pode ser feito individualmente por cada dispositivo ou controlado pelo servidor de rede.

Marini et al. (2021) destacam que o algoritmo da ADR é projetado para reduzir o consumo de energia enquanto aumenta a taxa de dados dos dispositivos finais. A decisão de ativar a ADR é feita pelo próprio dispositivo, que deve configurar o *bit* ADR no cabeçalho do pacote para informar ao servidor de rede que está pronto para receber comandos ADR. Petäjälä et al. (2017) complementam que, embora a ADR seja eficaz para dispositivos finais estáticos, dispositivos móveis devem operar com uma taxa de dados fixa devido às variações temporais nas características do canal de rádio. Rahmadhani e Kuipers (2018) discutem que a ADR pode ser ativada tanto pelo dispositivo quanto pela rede, ajustando a taxa de dados com base na proximidade do dispositivo aos *gateways*. As mensagens *uplink* com o *bit* ADR ativado são coletadas pela rede e processadas com base em algoritmos não especificados, permitindo ajustes dinâmicos na taxa de dados e na potência de transmissão.

Além disso, a comunicação sem fio de baixa potência, como a utilizada em redes LoRaWAN, depende criticamente da qualidade do *link* e das sobrecargas de dados. Haque et al. (2020) destacam que a qualidade do *link* é frequentemente medida pela RSSI e pelas taxas de erro. A RSSI estima o nível de potência dos dados recebidos, fornecendo uma indicação crucial da qualidade do *link*. O rendimento da transmissão também é uma métrica essencial para avaliar a confiabilidade da comunicação.

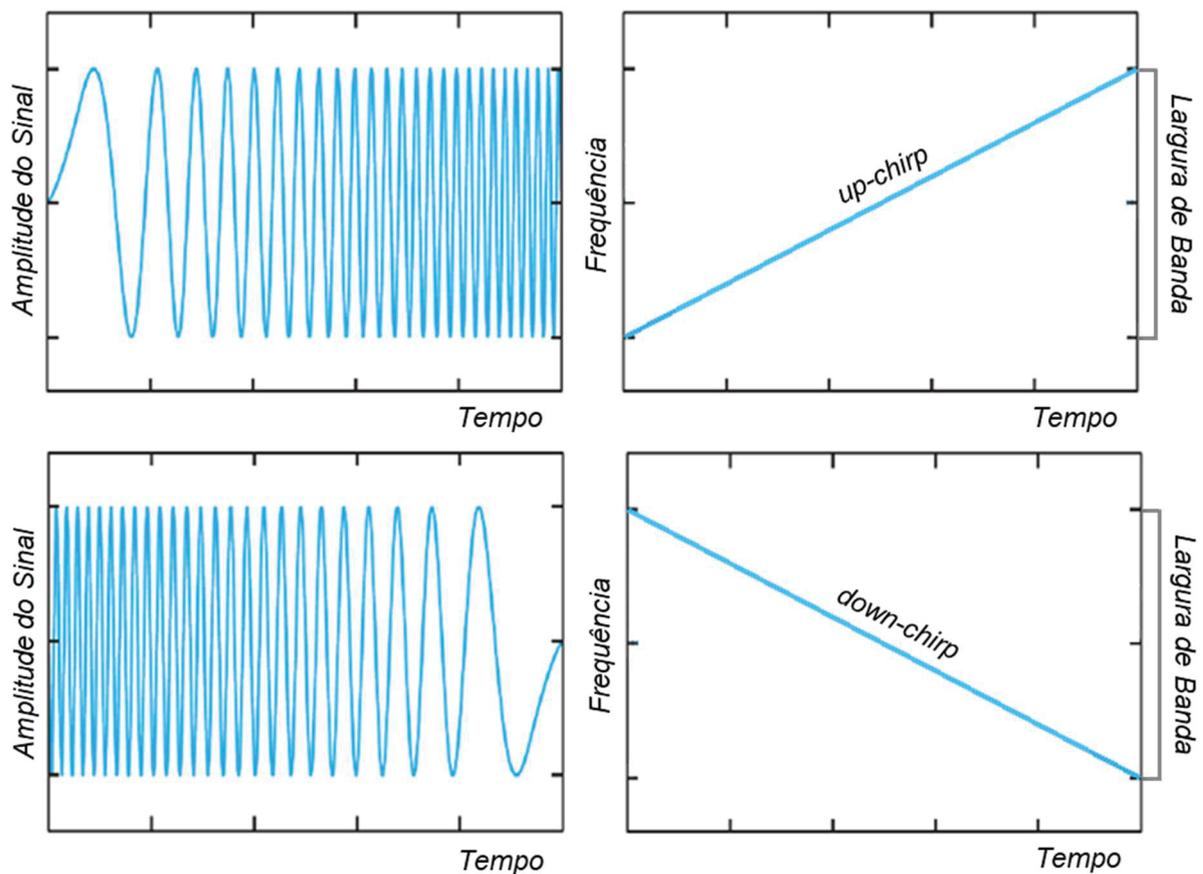
2.2.1.2 Camada Física Protocolo LoRaWAN

A tecnologia LoRa, uma técnica de modulação proprietária da Semtech, é um dos principais componentes das redes LPWAN. De acordo com Magrin, Capuzzo e Zanella (2019), o LoRa utiliza um esquema de modulação baseado no Espectro de Espalhamento por *Chirp* (CSS), que permite a comunicação em longas distâncias: até 15 km em áreas rurais e 1,5 km em cenários urbanos externos. Esse alcance é obtido

ajustando o Fator de Espalhamento (SF), que afeta tanto a taxa de transmissão quanto a sensibilidade do sinal.

Jiang et al. (2019) explicam que o esquema de modulação LoRa utiliza pulsos de *chirp*, que são sinais de modulação de frequência linear com amplitude constante que varrem toda a largura de banda de maneira linear durante um período determinado, FIGURA 14. A implementação desse esquema é fundamental para codificar informações de maneira eficiente e robusta. De acordo com El Rachkidy, Guitton e Kaneko (2019), a varredura desses pulsos é definida pela duração do símbolo, ajustada com base no SF e na Largura de Banda (BW). Essa varredura pode ser tanto *up-chirp*, onde a frequência aumenta, quanto *down-chirp*, onde a frequência diminui, proporcionando uma robustez significativa contra interferências e possibilitando ajustes finos nas comunicações para diferentes condições operacionais.

FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO CSS DO LoRa

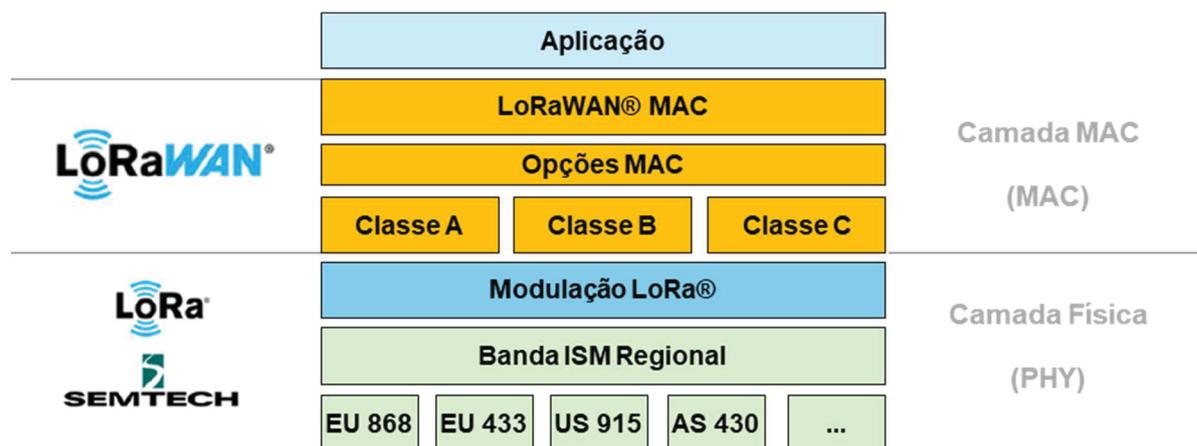


FONTE: Adaptado de Semtech Corporation (2019).

A modulação LoRa oferece um equilíbrio entre sensibilidade e taxa de dados, operando em canais de largura de banda fixa de 125 kHz ou 500 kHz (para canais de *uplink*) e 500 kHz (para canais de *downlink*) (Semtech Corporation, 2019). A escolha dos valores de largura de banda e dos fatores de espalhamento proporciona um balanço entre consumo de energia e taxa de transferência de dados, tornando o LoRa eficiente para uma variedade de aplicações em LPWAN (Silva, 2023).

Conforme Taha, Feteiha e Abdul (2019), o protocolo LoRaWAN, que é a camada MAC associada ao LoRa, FIGURA 15, opera em topologias de rede em estrela simples e é compatível com bandas de frequência específicas, conforme regulamentações regionais. Na Europa, por exemplo, o LoRaWAN especifica 16 canais, incluindo canais de alta taxa de dados e múltiplos canais para diferentes taxas de dados, variando de 0,25 a 11 kbps, com limitações de potência e *duty cycle* definidas pelo Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (ETSI). Na América do Norte, o LoRaWAN utiliza a banda ISM de 902 a 928 MHz, com diferentes canais *uplink* e *downlink*, permitindo uma potência máxima de saída de até +30 dBm (Taha; Feteiha; Abdul, 2019).

FIGURA 15 – PILHA DE TECNOLOGIA LoRaWAN



FONTE: Semtech Corporation (2019).

Conforme apontado por Bocci (2020) e Silva (2023), no Brasil, a faixa de frequências regulamentada para o protocolo LoRaWAN é de 915 a 928 MHz, além de 433 MHz para redes com poucos dispositivos. Essa regulamentação permite a implementação de redes de longa distância com baixo consumo de energia,

semelhantes às especificações encontradas na Europa e América do Norte, conforme apresentado na TABELA 2. Assim, as características gerais do LoRa e LoRaWAN mostram uma adaptação eficiente às diversas regulamentações regionais, aproveitando a robustez e alcance da tecnologia para aplicações variadas em diferentes contextos geográficos.

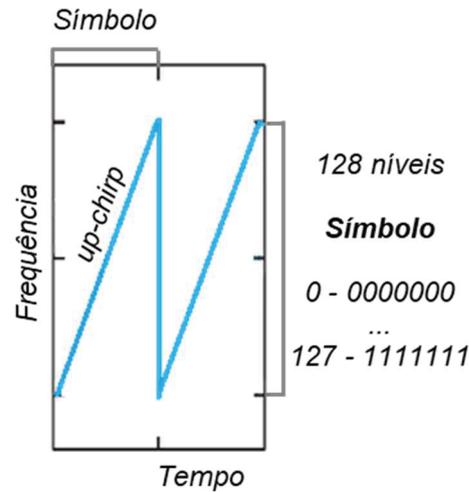
TABELA 2 – PRINCIPAIS PARÂMETROS FÍSICOS DO LoRa

Parâmetro	Europa	América do Norte	Brasil
Plano de frequência	EU863-870	US902-928	AU915-928
Banda de frequência	863 a 870 MHz	902 a 928 MHz	915 a 928 MHz
Canais	16	64+8+8	64+8+8
BW do canal <i>uplink</i>	125/ 250 kHz	125/ 500 kHz	125/ 500 kHz
BW do canal <i>downlink</i>	125 kHz	500 kHz	500 kHz
Potência de transmissão máxima	+ 16 dBm	+30 dBm	+30 dBm
Fator de espalhamento <i>uplink</i>	7 a 12	7 a 10	7 a 12
Taxa de dados	0,25 a 11 kbps	0,98 a 21,9 kbps	0,25 a 21,9 kbps
<i>Duty cycle</i> máximo	1%	-	-

FONTE: Adaptado de Jendal (2020).

Segundo Xuan-Chien et al. (2018) e El Rachkidy, Guitton e Kaneko (2019), o fator de espalhamento é um parâmetro crucial na modulação LoRa, definido como o logaritmo na base 2 do número de *chirps* por símbolo (2^{SF}), com valores variando entre 7 e 12. Esse parâmetro influencia diretamente a razão entre a largura de banda do sinal e a taxa de símbolos, afetando aspectos como a taxa de dados, o alcance de transmissão, a latência e o consumo de energia (Haque et al., 2020). A operação do LoRa é realizada em três larguras de banda distintas: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. Cada símbolo LoRa é composto por 2^{SF} *chirps* que abrangem toda a largura de banda disponível, FIGURA 16. Esses *chirps*, que podem ser ascendentes ou descendentes, iniciam a partir de uma frequência inicial e continuam até alcançar o limite máximo ou mínimo da largura de banda, retornando então à frequência mínima (ou máxima no caso de *chirps* descendentes). Além disso, conforme destacado por Marini et al. (2021), o SF controla a relação entre a largura de banda e a taxa de símbolos. Este controle é fundamental para ajustar o desempenho da comunicação de acordo com os requisitos específicos da aplicação, como o alcance e o consumo de energia.

FIGURA 16 – EXEMPLIFICAÇÃO DE SIMBOLO PARA SF7



FONTE: O autor (2024).

A relação entre o SF, a largura de banda e a taxa de símbolos é descrita matematicamente pela EQUAÇÃO 1.

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (1)$$

Onde R_s é a taxa de Símbolos, em símbolos/s; BW é a largura da banda, em kHz; e SF sendo o fator de espalhamento com valor adimensional.

O fator de espalhamento é um parâmetro chave na comunicação LoRa, que pode ser ajustado para aumentar a sensibilidade do receptor e, conseqüentemente, a distância máxima de comunicação. No entanto, um aumento no SF também resulta em um aumento no Tempo no Ar (ToA) da transmissão de um pacote, o que impacta o consumo de energia. Conforme Pieri (2023), o SF é definido pela razão entre a taxa de símbolos e a taxa de chips, e valores mais altos de SF estão associados a taxas de dados menores. Isso leva a uma maior distância de comunicação e melhora a Razão Sinal-Ruído SNR, mas ao custo de um maior ToA e maior consumo de energia (Marini et al., 2021). Como exemplificado na TABELA 3, um fator de espalhamento mais alto proporciona maior sensibilidade e alcance, mas também aumenta o tempo de transmissão e o consumo de energia. Além disso, a escolha do SF pode influenciar a capacidade de receber sinais simultaneamente de diferentes transmissores, o que

é particularmente útil em cenários com múltiplos sinais, permitindo uma comunicação eficiente (Bor e Roedig, 2017).

TABELA 3 – EXEMPLO DE DIFERENTES SF E OS PARÂMETROS CORRESPONDENTES

SF	Taxa de Dados [kbps]	Tempo no Ar [ms]	Sensibilidade do Receptor [dBm]	SNR [dB]
7	5,47	36	-123	-6
8	3,13	64	-126	-9
9	1,76	113	-129	-12
10	0,98	204	-132	-15
11	0,54	365	-134,5	-17,5
12	0,29	682	-137	-20

FONTE: Adaptado Haque et al. (2020).

A Potência Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP) é uma medida essencial na engenharia de telecomunicações, especialmente no contexto de redes de longa distância e baixa potência, como as redes LoRa. O EIRP refere-se à quantidade de potência que uma antena radia em direção ao ponto de recepção, considerando tanto a potência transmitida quanto o ganho da antena. Em termos técnicos, o EIRP é calculado como a soma da potência de saída do transmissor (em dBm) e o ganho da antena (em dBi), subtraindo-se quaisquer perdas do sistema.

Pastório et al. (2021) comenta que No Brasil, a regulamentação das redes LoRa é definida pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), que estabelece limites específicos para o EIRP a fim de assegurar a compatibilidade entre diferentes serviços de comunicação e minimizar interferências. Para redes operando na faixa de frequência de 915 MHz, define o limite máximo de EIRP de 30 dBm, o que equivale a 1 watt de potência irradiada efetiva (Jendal, 2020). Este limite é essencial para garantir que as redes LoRa operem de forma eficiente, proporcionando cobertura ampla e boa penetração de sinal, sem exceder os níveis de interferência permitidos.

Pieri (2023) define a Potência de Transmissão (TP) como ajustável entre -4 dBm e 20 dBm. Esse ajuste permite flexibilidade no planejamento e operação das redes, adaptando-se às condições e regulamentações regionais. No entanto, Bor e Roedig (2017) observam que, devido às limitações de *hardware*, o intervalo efetivo é

frequentemente restrito de 2 dBm a 20 dBm, com potências superiores a 17 dBm apenas permitidas com um *duty cycle* reduzido a 1%. Isso implica em uma redução significativa na frequência de transmissão para evitar interferências e assegurar o cumprimento das regulamentações de uso do espectro. De acordo com Rahmadhani e Kuipers (2018), essa restrição é importante para a manutenção da integridade do sistema e para a otimização do desempenho em cenários onde a potência de transmissão mais alta é necessária. A combinação dos aspectos técnicos de potência de transmissão e configuração do quadro demonstra a complexidade e a flexibilidade do protocolo LoRaWAN. Conforme Pieri (2023), os ajustes na potência e as configurações do quadro são interdependentes e devem ser geridos cuidadosamente para maximizar a eficiência da comunicação e atender às regulamentações impostas.

A Taxa de Codificação (CR) é uma taxa de correção de erros configurável, que pode variar entre 4/8 e 4/5, proporcionando proteção contra interferências. Essa configuração afeta diretamente o tempo de transmissão, pois uma taxa de codificação mais alta oferece maior proteção, mas também aumenta o tempo no ar (Pieri, 2023).

De acordo com Marini et al. (2021), a taxa de *bits* da camada física é influenciada diretamente pelo fator de espalhamento, a largura de banda, a taxa de correção e do mecanismo de correção de erros. Este mecanismo codifica 4 *bits* de dados em palavras de código que variam de 5 a 8 *bits*, dependendo do CR selecionado (variando de 1 a 4), EQUAÇÃO 2. Essa taxa de *bits* tem um impacto significativo no tempo no ar das transmissões.

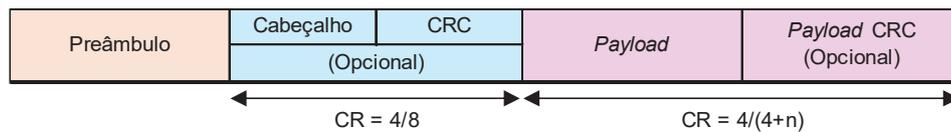
$$R_b = SF \times \left[\frac{4}{\frac{4 + CR}{2^{SF}}} \right] \frac{1}{BW} \quad (2)$$

Onde R_b é a taxa de *bits*, em *bit/s*; BW é a largura da banda, em kHz; SF sendo o fator de espalhamento e CR sendo a taxa de codificação, ambos com valor adimensional.

A estrutura de pacotes do LoRa, como descrito por Pieri (2023), começa com um preâmbulo programável, que pode variar de 6 a 65535 símbolos, e um adicional

de 4.25. Além disso, o pacote pode incluir um cabeçalho opcional que especifica o tamanho e a taxa de codificação de correção de erros do *payload*. O *payload*, que pode ter de 1 a 255 *bytes*, segue o cabeçalho opcional, enquanto o cabeçalho fixo, sempre presente, utiliza uma taxa de correção de erros de 4/8 e inclui seu próprio Campo de Redundância Cíclica (CRC), FIGURA 17.

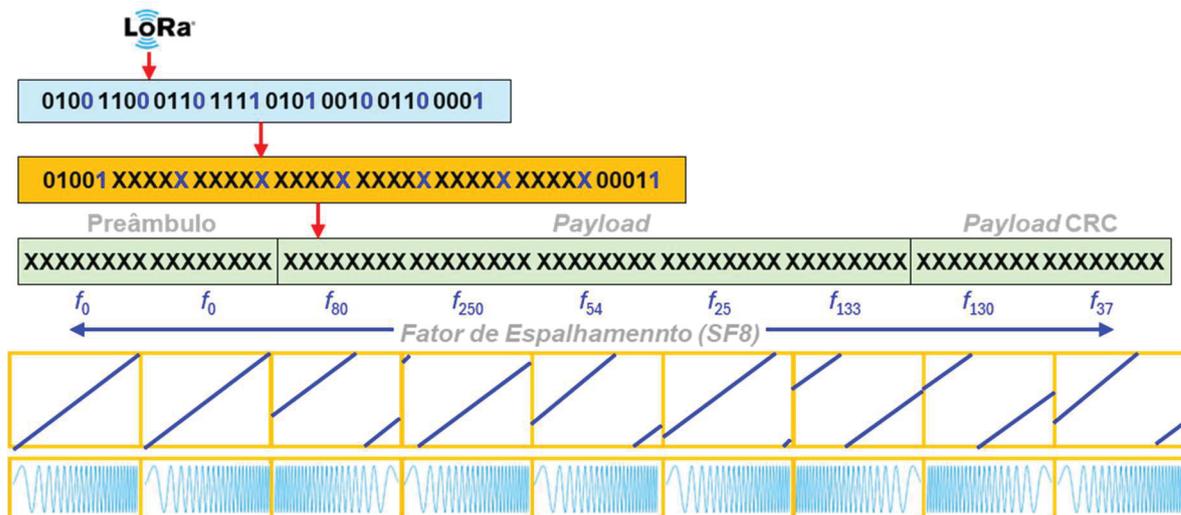
FIGURA 17 – ESTRUTURA DE QUADROS LoRa



FONTE: Adaptado de Pieri (2023).

De acordo com El Rachkidy, Guitton e Kaneko (2019), o *payload* e o CRC são codificados usando *up-chirps*, e LoRa permite um modo de cabeçalho explícito que insere um cabeçalho entre o pré-âmbulo e o *payload*. Esse cabeçalho contém informações cruciais como o comprimento do *payload*, a CR e um CRC opcional (Silva, 2023). Pieri (2023) detalha que a estrutura do pacote e as características do cabeçalho e do *payload* são essenciais para a eficiência da comunicação. Entretanto, conforme Marini et al. (2021), a taxa de *bits* R_b desempenha um papel crucial no tempo necessário para a transmissão do pacote, afetando diretamente a capacidade de transmissão e a eficiência do canal, FIGURA 18.

FIGURA 18 – PACOTE DE MODULAÇÃO LoRa E DIAGRAMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS



FONTE: Adaptado de DFRobot ([20--]).

De acordo com Marini et al. (2021), o LoRaWAN define dois modos de transmissão por pacote: no Modo Confirmado, o dispositivo final envia um pacote *uplink* e aguarda um *bit* de Reconhecimento (ACK) do servidor de rede via *gateway*. Se o *bit* de reconhecimento ACK não for recebido, o dispositivo pode retransmitir a mensagem. Já no Modo Não Confirmado, o servidor de rede não envia um *bit* de reconhecimento ACK, e o dispositivo não tem confirmação sobre a recepção do pacote.

A comunicação LoRa é complexa e envolve diversos aspectos técnicos cruciais para o entendimento de seu funcionamento e desempenho. Pieri (2023) destaca a importância da gestão de colisões em transmissões simultâneas, ressaltando que a capacidade do receptor de decodificar pacotes sobrepostos depende de fatores como a frequência portadora, o fator de espalhamento e a potência de transmissão. A colisão é determinada pela diferença entre os pontos médios das transmissões e a soma dos comprimentos dos intervalos de recepção dos pacotes. Quando a diferença é menor do que a soma, ocorre uma colisão, o que pode levar à perda de pacotes ou falhas na decodificação. Marini et al. (2021) complementa essa visão, indicando que o servidor de rede coleta informações das transmissões *uplink*, incluindo SNR e o número de *gateways* que receberam cada pacote. A partir dessas informações, o algoritmo ajusta o fator de espalhamento e a potência de transmissão para otimizar a comunicação.

De acordo com El Rachkidy, Guitton e Kaneko (2019), o LoRaWAN ajusta a taxa de *bits* com base na qualidade do sinal, utilizando o fator de espalhamento para equilibrar a robustez do sinal e a taxa de transmissão. Em situações de baixa qualidade de sinal, um fator de espalhamento maior é empregado para garantir uma maior distância de transmissão, embora isso resulte em uma menor taxa de *bits*. Esse ajuste é regulado pela Taxa de Dados (DR) do LoRaWAN, que varia de DR0 a DR6. Bocci (2020) complementa essa análise ao afirmar que os *gateways* LoRa são projetados para decodificar sinais sobrepostos, desde que sejam enviados em canais ou fator de espalhamento diferentes. No entanto, a sobreposição de sinais em fator de espalhamento idênticos pode levar a colisões, onde o sinal mais forte predomina ou todos os sinais são perdidos.

Em relação à capacidade de transmissão em canais de comunicação, Semtech Corporation (2015) explica que o teorema de *Shannon-Hartley* define a taxa máxima de transmissão de dados em um canal com largura de banda específica na presença de ruído. Este teorema estabelece a capacidade teórica de um canal e é essencial para entender os limites da transmissão de dados em sistemas de comunicação, incluindo o LoRaWAN. Além disso, a ortogonalidade dos pacotes no LoRaWAN, conforme detalhado por Semtech Corporation (2019), é um aspecto importante para evitar colisões e garantir a integridade da comunicação. Pacotes que utilizam diferentes fatores de espalhamento são ortogonais, ou seja, eles não interferem entre si e aparecem como ruído uns para os outros. Dessa forma, dois pacotes com fatores de espalhamento distintos podem ser recebidos simultaneamente sem colidir. No entanto, se dois pacotes com o mesmo fator de espalhamento chegarem ao mesmo tempo, pode ocorrer uma colisão. Nesse caso, o pacote mais forte, com uma diferença de pelo menos 6 dB, tem maior probabilidade de ser recebido com sucesso.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, abordaremos a análise do efeito *Doppler* em aplicações utilizando a tecnologia LoRa, que é amplamente empregada em redes de comunicação de longa distância devido à sua eficiência energética e capacidade de operar em ambientes com alta interferência. O efeito *Doppler*, fenômeno físico caracterizado pela variação na frequência de uma onda em relação ao movimento de uma fonte emissora e um receptor, desempenha um papel crucial na performance de sistemas de comunicação LoRa, especialmente em cenários de mobilidade.

Na sequência, descrevemos o processo de extração de pontos de um gráfico de efeito *Doppler* estático normalizado, utilizando técnicas de conversão para transformar esses dados em uma escala de velocidade. Esta conversão é essencial para a avaliação quantitativa do impacto do efeito *Doppler* em diferentes condições de mobilidade, permitindo uma análise mais precisa e detalhada do desempenho do sistema LoRa em cenários reais.

Posteriormente, discutiremos o *software* de simulação de transmissão de rádio utilizado para modelar e avaliar o desempenho das comunicações em diferentes cenários. A escolha de um modelo de propagação adequado é crucial para garantir que os resultados da simulação reflitam com precisão as condições de operação do sistema. O modelo de propagação utilizado incorpora variáveis como atenuação do sinal, reflexões, e difrações, que são influenciadas pelas características do ambiente, tais como edificações, vegetação e outros obstáculos.

Por fim, descrevemos os dois cenários específicos nos quais as transmissões serão simuladas. O primeiro cenário envolve um ambiente urbano denso, caracterizado por edifícios altos e um alto nível de interferência e multipercurso, enquanto o segundo cenário é definido como uma área rural com pouca obstrução e menor densidade de dispositivos. A análise comparativa entre esses dois cenários permitirá avaliar o desempenho do sistema LoRa sob condições variadas, fornecendo compreensões valiosas para a otimização de redes de comunicação de longa distância em diferentes contextos operacionais.

3.1 MÉTODO ABORDADO PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1.1 ANÁLISE DO EFEITO *DOPPLER* EM APLICAÇÕES COM LORA

O artigo publicado por Ameloot et al. (2021) aborda as divergências nas conclusões sobre os efeitos *Doppler* em LoRa na literatura atual. O texto se concentra no impacto fundamental dos efeitos *Doppler* no detector de símbolos, implementado em *software*, assumindo detecção e sincronização perfeitas. A performance da camada física é estimada usando receptores LoRa totalmente simulados.

Conforme Renzone et al. (2024), a modulação LoRa deriva diretamente da modulação CSS, proporcionando alta sensibilidade no receptor e robustez contra interferência e desvanecimento por múltiplos caminhos. No entanto, à medida que os transceptores se movem em diferentes ambientes, ocorre o efeito *Doppler*, que pode afetar o desempenho dos *links* LoRa. Esse fenômeno se manifesta como um deslocamento de frequência no sinal recebido devido ao movimento do transmissor ou receptor. Compreender o impacto do efeito *Doppler* é crucial para garantir a confiabilidade dos *links* LoRa em contextos de dispositivos em movimento, como redes veiculares, rastreamento de ativos e redes de sensores móveis.

Ameloot et al. (2021) avaliam seus resultados em dois cenários de efeito *Doppler*, estático e dinâmico. A alteração *Doppler* estática ocorre quando o transmissor e o receptor estão se movendo a uma velocidade relativa constante. Se a variação da largura de banda for muito menor que a frequência portadora, as mudanças *Doppler* estáticas podem ser simuladas adicionando um desvio de frequência.

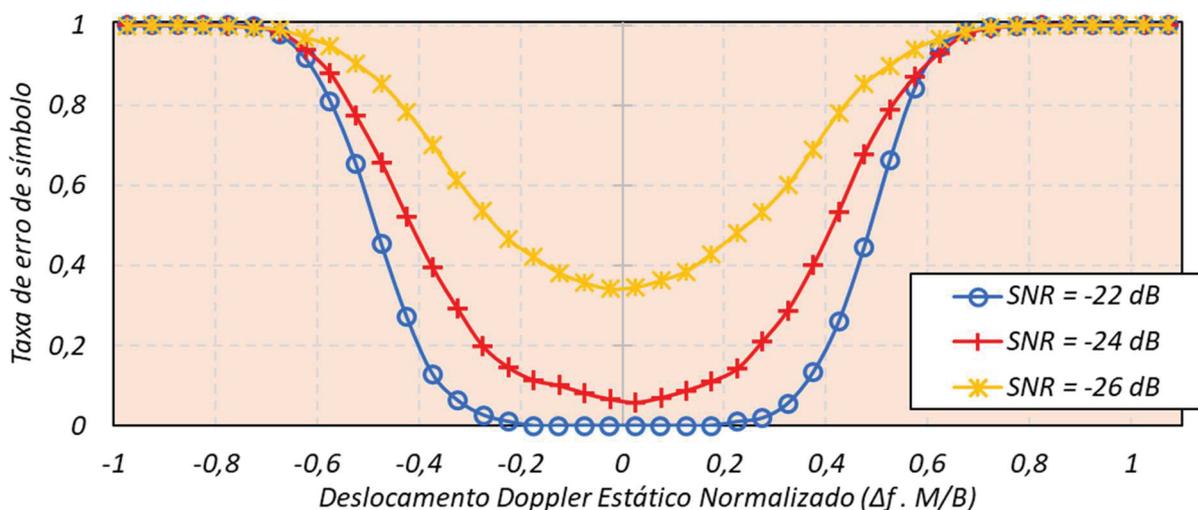
Assumindo o pior cenário em termos de ângulo de incidência, o desvio pode ser calculado com base no valor da portadora e na velocidade relativa do receptor em relação ao transmissor, conforme a EQUAÇÃO 3.

$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} \times F \quad (3)$$

Onde Δf é o desvio de frequência, em Hz; Δv é a velocidade relativa, em m/s; c sendo a velocidade da luz no vácuo, em m/s; F é a frequência portadora do sinal, em Hz.

Quando ocorre um deslocamento de frequência devido ao efeito *Doppler*, as configurações de frequência do receptor LoRa deixam de corresponder ao sinal LoRa recebido. Como o LoRa usa *chirps* lineares, isso faz com que a energia do símbolo se desloque para outras faixas de frequência. Isso foi demonstrado por experimentos de Ameloot et al. (2021) que adicionaram deslocamentos *Doppler* a um símbolo LoRa sintetizado, transmitido tanto em um canal livre de ruído quanto em um canal com Ruído Branco Gaussiano Aditivo (AWGN) sob condições de ruído adversas. Observou-se que, para cada decremento em SF há uma penalidade de desempenho de 3 dB em SNR. Os efeitos do deslocamento *Doppler* são mais graves para fatores de espalhamento mais altos, como mostrado em pesquisas anteriores, onde o tempo de coerência do canal, afetado por deslocamentos *Doppler*, é comparado à duração dos símbolos LoRa. Para valores de SF mais altos, a duração dos símbolos é significativamente maior, agravando os efeitos do *Doppler* (Ameloot et al., 2021). A FIGURA 19 explora em mais detalhes a faixa de deslocamento *Doppler* normalizados.

FIGURA 19 – DESEMPENHO DE DETECÇÃO DE SÍMBOLO PARA DESLOCAMENTO *DOPPLER* ESTÁTICO (SF=12, BW=125 kHz)



FONTE: Adaptado de Ameloot et al. (2021).

LEGENDA: Os erros de símbolo foram registrados em diferentes deslocamentos *Doppler* normalizados em relação a M/B , onde M está relacionado ao fator de espalhamento (SF) através de $M=2^{SF}$. B é a largura de banda (BW).

3.1.1.1 Extração e Conversão dos Gráficos

Primeiramente, como não foi disponibilizado os dados brutos das análises, fez-se necessário a extração das curvas do gráfico da FIGURA 19 através de pontos individuais que forneceram as coordenadas x e y do gráfico. A extração foi realizada através do *software WebPlotDigitizer* versão 4.7. Com base nos pontos extraídos e através da EQUAÇÃO 3, foi possível transformar os valores de *Doppler* normalizados em escalas de velocidade. A TABELA 4, como exemplo, apresenta os valores de velocidade para o ponto de $\Delta f.M/B=0,5$ calculado para os fatores de espalhamento de 7 a 12.

TABELA 4 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA O DESLOCAMENTO DE FREQUÊNCIA E VELOCIDADE ($BW = 125$ kHz, $F = 868$ MHz)

SF	Δf [Hz]	Δv [m/s]	Δv [km/h]
7	488,28	168,64	607,12
8	244,14	84,32	303,56
9	122,07	42,16	151,78
10	61,04	21,08	75,89
11	30,52	10,54	37,94
12	15,26	5,27	18,97

FONTE: Adaptado de Ameloot et al. (2021).

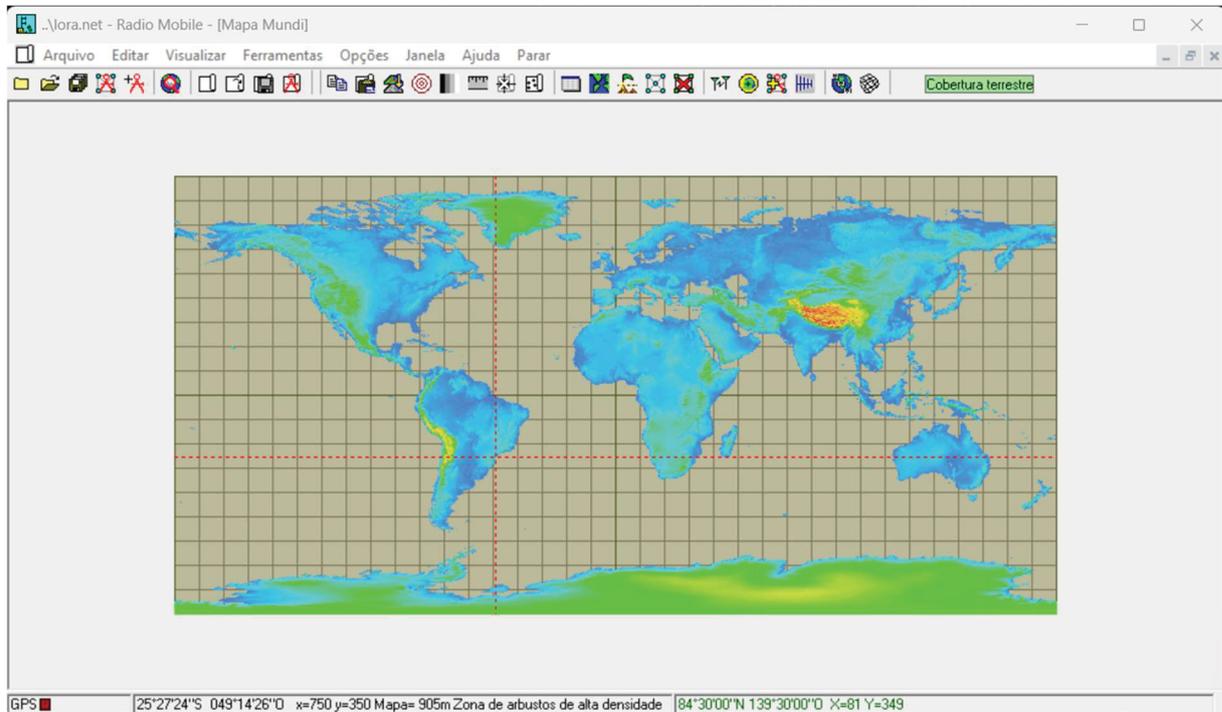
A utilização de dados já publicados não apenas legitima as simulações, como também permite um ponto de comparação entre os resultados das simulações e os resultados previamente verificados. Dessa forma, ao aplicar esses valores, as simulações podem ser validadas, demonstrando que elas são coerentes com a literatura existente e, por consequência, são tecnicamente viáveis. Isso reforça a validade dos métodos empregados e a robustez das conclusões a serem obtidas ao final da análise.

3.1.2 SIMULADOR DE TRANSMISSÃO

Este capítulo descreve o método para a simulação de transmissão de dados via rádio utilizando o *software Radio Mobile*, versão 11.6.8, FIGURA 20. A simulação será conduzida em dois cenários distintos, com o objetivo de avaliar o desempenho

do sistema em diferentes condições ambientais: uma área urbana densa e uma região de campo aberto.

FIGURA 20 – VISÃO GERAL DO SOFTWARE RADIO MOBILE



FONTE: O autor (2024).

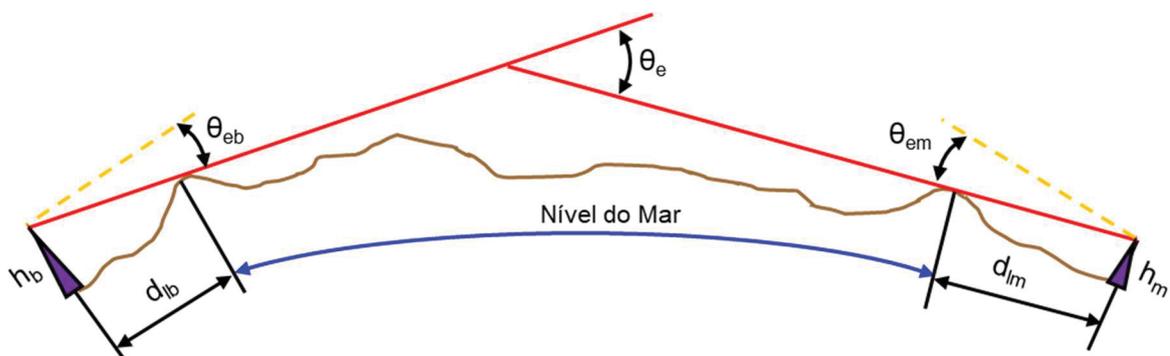
Este *software* implementa de maneira eficiente o modelo *Longley-Rice*, que é utilizado para a previsão de propagação troposférica em transmissões de rádio sobre terrenos irregulares em enlaces de médio e longo alcance. Além disso, o *software* oferece diversas ferramentas de suporte ao design e simulação de enlaces e redes de telecomunicações. Os parâmetros inseridos para realizar as simulações permitem uma representação precisa dos equipamentos reais planejados para a instalação prevista (Rodríguez, 2009).

No entanto, não é objetivo deste estudo detalhar o passo a passo de uso do referido *software*. Para aqueles que desejam se aprofundar nas instruções de uso, recomendamos as referências de Rodríguez (2009) e Instalación [...] (2022), que fornecem orientações completas e detalhadas sobre o uso do *software*. Essas referências apresentam uma abordagem abrangente, garantindo que os usuários tenham todos os recursos necessários para operar o *software* de maneira eficaz. Na

sequência, será apresentado um breve descritivo do modelo de propagação utilizado pelo *software* em suas análises.

Conforme Amaral (2012), o modelo *Longley-Rice* foi desenvolvido para frequências entre 20 MHz e 20 GHz em diferentes ambientes e para variadas alturas de antenas transmissoras e receptoras. Ele generaliza a potência do sinal recebido sem detalhar o canal, utilizando métodos estatísticos para compensar essa falta de caracterização específica. A variação do sinal é determinada com base nas mudanças atmosféricas, no perfil topográfico e no espaço livre, sendo descrita por estimativas estatísticas que consideram desvios que contribuem para a atenuação total do sinal. O modelo de *Longley-Rice* opera em dois modos baseados no perfil do terreno: modo ponto a ponto, quando os locais dos terminais são específicos e conhecidos, permitindo estimar a potência de recepção; e modo de área, quando o perfil do terreno não está disponível, utilizando técnicas para estimar os parâmetros necessários (Santos, 2023). Chamberl e Luebbers (1982) comentam que o modelo *Longley-Rice* divide a área de recepção de uma antena em três regiões: linha de visada, difração e espalhamento. Essas regiões são determinadas por meio da análise dos dados de terreno e das localizações das antenas. Na região de linha de visada, onde não há obstrução entre as antenas, a perda de percurso é influenciada pela geometria do enlace que depende da diferença nos comprimentos dos raios diretos e refletidos, FIGURA 21.

FIGURA 21 – GEOMETRIA DO ENLACE NO MODELO LONGLEY-RICE



FONTE: Adaptado de Amaral (2012).

LEGENDA: h_b é a altura efetiva da antena transmissora e h_m da antena receptora; d_{lb} é o horizonte de rádio da antena transmissora e d_{lm} da antena receptora; θ_{eb} é o ângulo de elevação do horizonte de rádio da antena transmissora e θ_{em} da antena receptora; θ_e é o ângulo de cruzamento dos horizontes de rádio das antenas.

Este modelo considera a irregularidade do terreno, uma vez que a propagação da onda ocorre por refração, reflexão e difração, dependendo do perfil do terreno. Embora a variação da localização da estação dependa da irregularidade do terreno em função da sua posição, alguns valores são tabelados para esse cálculo, conforme indicado na TABELA 5.

TABELA 5 – VALORES ESTIMADOS PARA IRREGULARIDADE DO TERRENO

Tipo de Terreno	Parâmetro
Água	0 a 50
Planície	30
Serras	80 a 150
Montanhas	150 a 300
Picos e Cordilheiras	300 a 700

FONTE: Adaptado de Santos (2023).

Nas regiões de difração, a perda de percurso é calculada usando a atenuação de difração, significativa à medida que a antena se aproxima da fronteira de sombreamento. Para áreas abaixo da fronteira de sombreamento, onde a atenuação de difração supera a atenuação de espalhamento, o modelo utiliza uma média ponderada de ambos. A atenuação por espalhamento depende de fatores como frequência, distância, refratividade da superfície e condições atmosféricas. O modelo ajusta os cálculos para a irregularidade do terreno, que afeta o coeficiente de reflexão, para levar em conta variações na elevação do terreno (Chamberl; Luebbers, 1982).

A refratividade da superfície é determinada pela análise das condições atmosféricas, como temperatura, pressão e umidade relativa, que influenciam o índice de refração do ar. Essas características desempenham um papel crucial na determinação da resistência e das propriedades de desvanecimento de sinais troposféricos. O índice de refração da atmosfera próximo à superfície da Terra é o parâmetro atmosférico mais importante para o cálculo da propagação de ondas eletromagnéticas e é utilizado para prever a atenuação média a longo prazo. No modelo *Longley-Rice*, um raio efetivo da Terra é definido como uma função do gradiente de refratividade da superfície (Amaral, 2012). Os dados de refratividade podem ser resumidos em função do clima local conforme TABELA 6.

TABELA 6 – REFRAATIVIDADE DA SUPERFÍCIE EM RELAÇÃO AO CLIMA

Clima	Refratividade da Superfície [N-unidades]
Deserto	280
Continental Temperado	301
Continental Subtropical	320
Marítimo Temperado	320
Marítimo Temperado sobre o mar	350
Equatorial	360
Marítimo Subtropical	370

FONTE: Adaptado de Amaral (2012).

A curvatura efetiva da Terra é utilizada nos cálculos da geometria de sistemas de comunicação, conforme EQUAÇÃO 4.

$$\gamma_e = \gamma_a \left[1 - 0,4665e^{\left(-\frac{N_s}{179,3}\right)} \right] \quad (4)$$

Onde γ_e é a curvatura efetiva da Terra, em km; γ_a é o fator de raio efetivo da Terra, 157 N-unidades/km; N_s é o índice de refratividade da superfície, em N-unidades.

Segundo Amaral (2012), é comum definir para refratividade o valor de 301 N-unidades, considerando um raio efetivo da Terra de 8495 km. O modelo é menos sensível a mudanças no índice de refratividade para curtas distâncias, mas essas mudanças podem afetar a atenuação em distâncias superiores a 100 km. Santos (2023) descreve que a impedância da superfície de transferência é determinada pela análise da permissividade e da condutividade do solo em relação à polarização das ondas eletromagnéticas e das antenas, TABELA 7.

TABELA 7 – PERMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE DE REFERÊNCIA DO SOLO

Tipo de Solo	Permissividade Relativa [F/m]	Condutividade Relativa [S/m]
Pobre	4	0,001
Médio	15	0,005
Bom	25	0,02
Úmido (Água doce)	81	0,01
Úmido (Mar)	81	5

FONTE: Adaptado de Rodríguez (2009).

Um ambiente de propagação pode ser modelado por distribuições estatísticas, como a distribuição *Rice*, que descreve a envoltória do sinal recebido em cenários com múltiplos percursos e uma componente dominante estacionária. Esta distribuição é comum em ambientes urbanos e suburbanos. Mesmo com obstruções parciais, o sinal dominante tende a prevalecer. O modelo *Longley-Rice* utiliza essa distribuição para entender o comportamento da densidade de probabilidade de um sinal dominante estacionário, aplicando o Teorema do Limite Central (Santos, 2023). A função densidade de probabilidade $P(r)$ pode ser expressa em termos do nível de sinal r , do valor médio m_r e do desvio padrão σ , conforme EQUAÇÃO 5.

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left[-\frac{(r-m_r)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (5)$$

O modelo *Longley-Rice* define quatro modos de variabilidade para determinar a confiabilidade dos cálculos de propagação de sinal: mensagem única, individual, móvel e radiodifusão. Esses modos especificam como interpretar a confiabilidade dos resultados. O modelo considera três tipos principais de variabilidade: tempo, local e situação. A variabilidade de tempo analisa mudanças nos valores medianos de sinal ao longo do tempo, enquanto a variabilidade por localização avalia diferenças estatísticas de longo prazo entre diferentes trajetórias. A variabilidade por situação lida com variáveis ocultas que não podem ser controladas ou explicadas, diferenciando casos com condições similares. Essas variabilidades são usadas para ajustar a precisão dos cálculos de propagação de sinal, embora o modelo não cubra variabilidades de curto prazo associadas à propagação por multitrajetória (Rodríguez, 2009).

3.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

3.2.1 Cenário 1: Área Urbana Densa

O primeiro cenário é caracterizado por uma região urbana densa, com uma alta concentração de prédios e estruturas edificadas. Este ambiente apresenta desafios significativos para a transmissão de dados via rádio devido à obstrução do sinal pelas construções e possíveis reflexões e difusões.

A simulação neste cenário permitirá avaliar o impacto das condições urbanas densas na qualidade e alcance da transmissão de dados.

- Localização: Avenida Visconde de Guarapuava, Curitiba
 - Ponto 1: Praça Oswaldo Cruz
 - Ponto 2: Hospital Santa Cruz

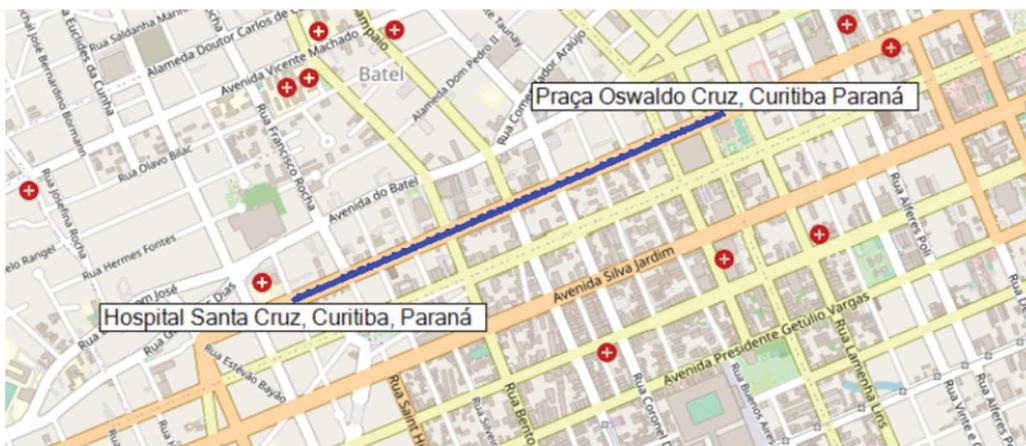
A TABELA 8 e a FIGURA 22 apresentam de forma detalhada as coordenadas cartográficas e o mapa que retratam o trajeto simulado. O percurso abrange desde a Praça Oswaldo Cruz até o Hospital Santa Cruz, oferecendo uma representação precisa e visualmente clara do caminho analisado. As coordenadas cartográficas fornecem uma referência geoespacial exata, enquanto o mapa facilita a compreensão visual do trajeto percorrido, permitindo uma análise abrangente das características geográficas envolvidas. Dessa forma, os dados fornecidos não apenas elucidam a trajetória em termos de localização, mas também destacam os pontos de interesse ao longo do percurso, auxiliando na contextualização espacial da análise realizada.

TABELA 8 – LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS DO PRIMEIRO CENÁRIO SIMULADO

Local	Latitude	Longitude	Elevação
Praça Oswaldo Cruz, Curitiba Paraná	-25° 26' 23,4"	-49° 16' 34,9"	924 m
Hospital Santa Cruz, Curitiba, Paraná	-25° 26' 42,5"	-49° 17' 23,4"	935,6 m

FONTE: O autor (2024).

FIGURA 22 – MAPA DO PRIMEIRO CENÁRIO SIMULADO



FONTE: Coudé (2005).

3.2.2 Cenário 2: Área Aberta

Para o segundo cenário, o ambiente será configurado para refletir um terreno aberto e relativamente plano, com poucas obstruções. Desta forma, a simulação permitirá uma comparação direta da cobertura do sinal e da qualidade da transmissão entre a área urbana densa e a região de campo aberto ao longo da rodovia.

- Localização: BR 277, divisa entre Curitiba e São José dos Pinhais
 - Ponto 1: Subestação Uberada
 - Ponto 2: Contorno Leste, saída 71A

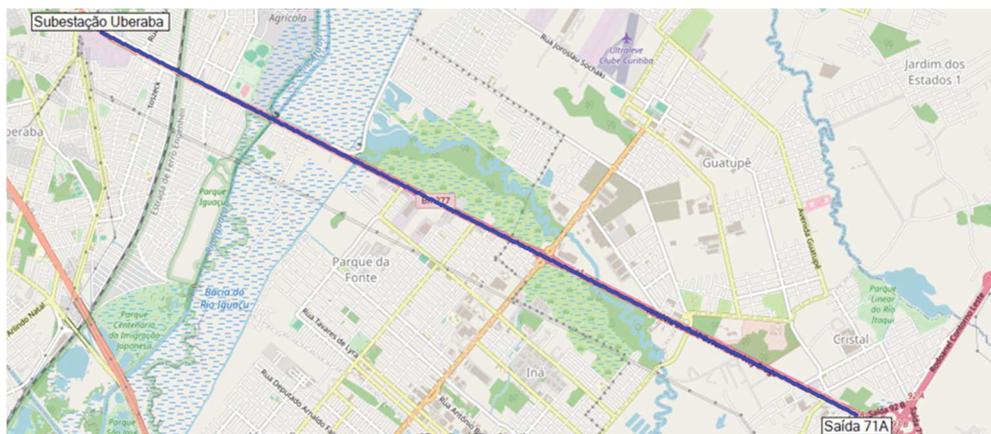
Para o segundo cenário, situado na BR 277 entre Curitiba e São José dos Pinhais, a TABELA 9 e a FIGURA 23 oferecem uma representação abrangente das coordenadas cartográficas e do mapa do trajeto simulado, destacando o percurso que vai da Subestação Uberada até o Contorno Leste, saída 71A.

TABELA 9 – LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS DO SEGUNDO CENÁRIO SIMULADO

Local	Latitude	Longitude	Elevação
Subestação Uberada, Curitiba Paraná	-25° 28' 34"	-49° 12' 25,3"	903 m
Contorno Leste, Saída 71A, São José dos Pinhais, Paraná	-25° 30' 36,1"	-49° 7' 53,6"	904 m

FONTE: O autor (2024).

FIGURA 23 – MAPA DO SEGUNDO CENÁRIO SIMULADO



FONTE: Coudé (2005).

Este capítulo forneceu a base teórica e metodológica necessária para a análise dos resultados que serão discutidos no próximo capítulo. A compreensão do efeito *Doppler*, a metodologia de extração e conversão de dados para uma escala de velocidade, e a descrição dos cenários de simulação e do *software* utilizado são fundamentais para interpretar como diferentes condições afetam a comunicação LoRa. Essas informações permitirão uma análise detalhada dos resultados, evidenciando o impacto do ambiente e da mobilidade na qualidade da transmissão de dados.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentamos os resultados das simulações realizadas para avaliar o desempenho da transmissão LoRa em diferentes cenários de mobilidade. Inicialmente, definimos a sensibilidade do receptor necessária para garantir a qualidade da transmissão LoRa, considerando as condições específicas dos dois cenários de mobilidade propostos. Esta definição é crucial para estabelecer um ponto de referência que guiará as análises subsequentes, pois a sensibilidade do receptor afeta diretamente a capacidade do sistema de comunicação em operar eficientemente em ambientes de diferentes condições de ruído e interferência.

Em seguida, detalharemos os parâmetros configurados no *software* de simulação, que foram utilizados para modelar as transmissões nos cenários estudados. Esses parâmetros incluem, mas não se limitam, a configurações de potência de transmissão e frequência de operação. A seleção cuidadosa desses parâmetros é fundamental para garantir que as simulações reflitam com precisão as condições reais de operação e permitam uma análise robusta do desempenho do sistema de comunicação LoRa.

Os resultados serão apresentados em duas partes principais, correspondendo aos dois cenários de mobilidade analisados. No primeiro cenário, a análise será conduzida em duas simulações distintas: a primeira simulação considera uma estação base fixa no ponto 1 e uma antena móvel no ponto 2; enquanto a segunda simulação inverte as posições, com a estação base no ponto 2 e a antena móvel no ponto 1. Essa abordagem permite observar como a mudança de posição influencia a qualidade da comunicação e a cobertura do sinal, além de fornecer uma visão abrangente sobre a robustez do sistema em diferentes configurações espaciais.

Por fim, para o segundo cenário, uma análise similar será realizada, começando com a estação base no ponto 1 e a antena móvel no ponto 2, seguida pela inversão das posições. Através dessas análises, buscamos entender como diferentes configurações de mobilidade afetam a performance da transmissão LoRa, considerando tanto a estabilidade da conexão quanto a integridade dos dados transmitidos.

4.1 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

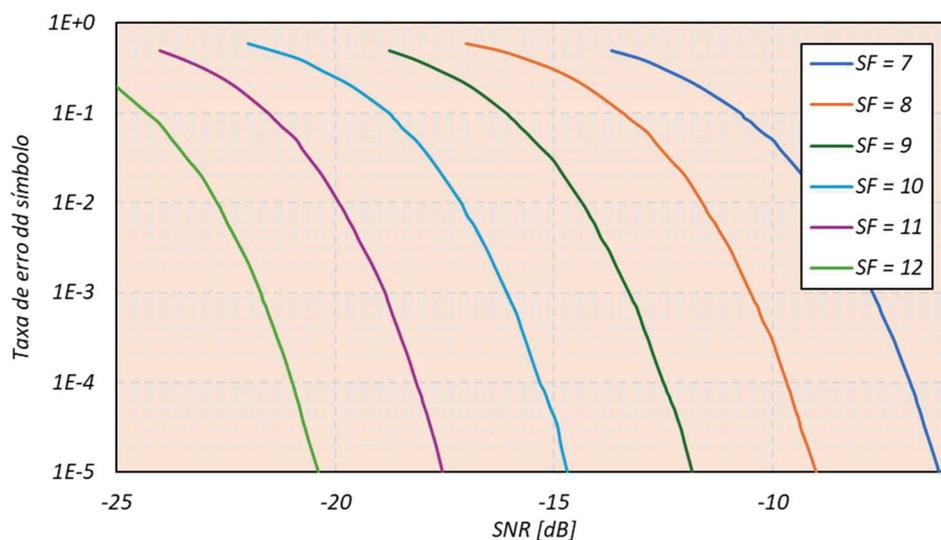
4.1.1 Definição da Sensibilidade do Receptor

Primeiramente, basearemos nossas análises na Taxa de Erro de Símbolo (SER), que mede a proporção de símbolos transmitidos que são erroneamente decodificados pelo receptor durante a transmissão e recepção de sinais em LoRa. A SER é uma métrica fundamental para avaliar a qualidade e a confiabilidade do sistema, pois uma alta taxa de erro pode comprometer a integridade da comunicação.

Para assegurar que a SER permaneça dentro de limites aceitáveis, estabelecemos um critério de avaliação fundamentado em estudos já consolidados na literatura. Em particular, os trabalhos de Afisiadis et al. (2020) e Marini et al. (2021) forneceram considerações sobre as condições sob as quais a SER é influenciada por variáveis críticas, como a Relação Sinal-Ruído (SNR) e o Fator de Espalhamento (SF).

A FIGURA 24, baseada nesses estudos, apresenta o critério permissível de SER em função das variáveis SNR e SF. Esse critério nos permite avaliar se o desempenho do sistema atende às exigências de comunicação eficazes, conforme documentado nas literaturas citadas.

FIGURA 24 – TAXA DE ERRO DE SÍMBOLO ADMISSÍVEL PARA CADA SF, COM BASE EM CADA SNR



FONTE: Adaptado de Afisiadis et al. (2020) e Marini et al. (2021).

Esses critérios foram uniformemente adotados em diversos estudos, o que reforça sua relevância e aplicabilidade em cenários de comunicação. A análise da SER conforme esses parâmetros permitirá compreender os limites operacionais e as condições necessárias para minimizar erros na transmissão de dados, contribuindo significativamente para a eficiência do sistema de comunicação discutido neste trabalho. A TABELA 10 apresenta os valores extraídos da FIGURA 24 para cada combinação de SF e SNR. Esses valores foram selecionados como parâmetros fundamentais para as simulações realizadas, permitindo avaliar diferentes cenários de aplicação e sua viabilidade prática.

TABELA 10 – ESPECIFICAÇÕES DE SER PARA OS POSSÍVEIS SF E SNR UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

SF	SNR [dB]	Taxa de Erro de Símbolo Permissível
7	-7	0,0002
8	-10	0,0003
9	-13	0,0005
10	-16	0,0008
11	-19	0,0015
12	-22	0,0022

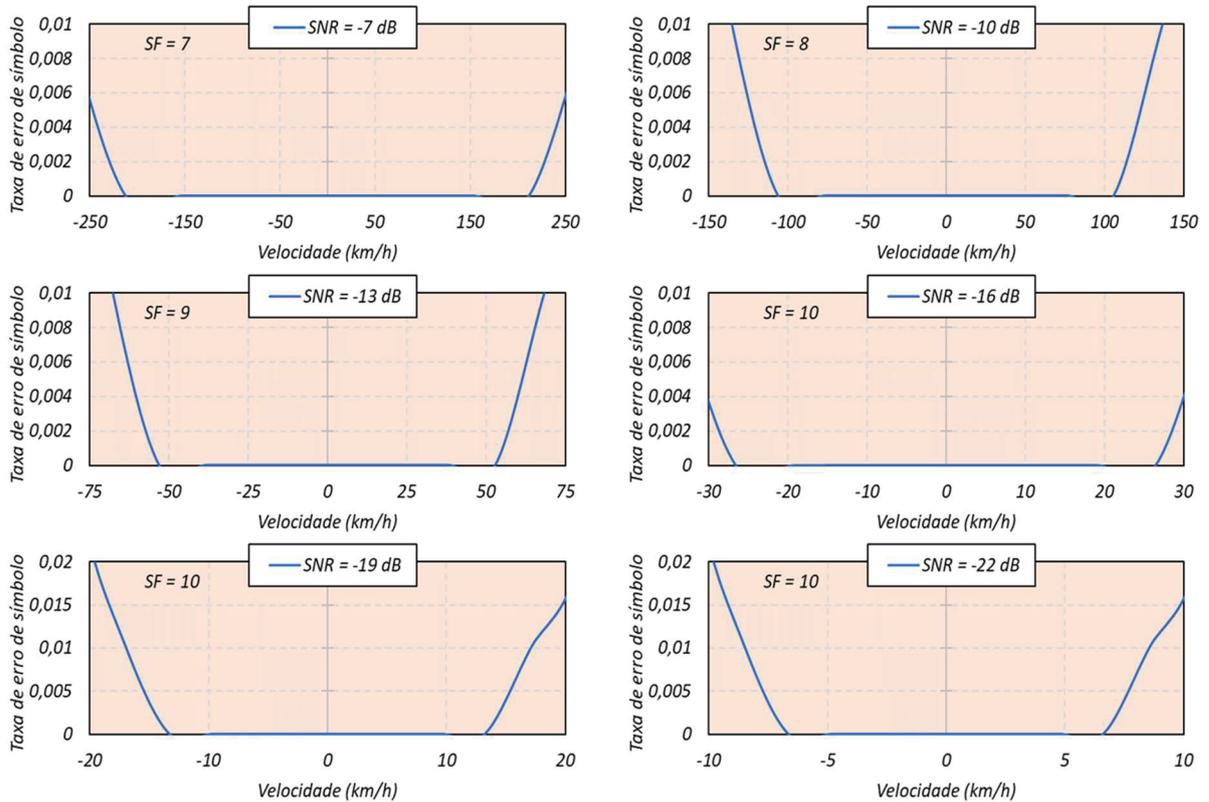
FONTE: O autor (2024).

Após definirmos os limites admissíveis de SER para cada fator de espalhamento, com base no valor de SNR, avançamos para a próxima etapa do processo de análise. Esta etapa consiste na determinação dos valores de velocidade máxima correspondentes a cada combinação de SF e SNR. Esses limites são cruciais, pois estabelecem os intervalos de velocidade dentro dos quais cada SF pode operar de maneira eficaz, garantindo que a comunicação seja mantida com a qualidade desejada.

A FIGURA 25 desempenha um papel essencial ao ilustrar como a eficiência da comunicação, medida pela SER, é impactada pelo SNR e pelas características de SF. Analisando os dados apresentados, conseguimos estabelecer correlações entre a taxa de erro de símbolo e a velocidade para cada SF, proporcionando uma compreensão mais abrangente do comportamento do sistema sob diferentes

condições de SNR. Com isso, é possível fazer escolhas informadas sobre o SF mais adequado para maximizar a velocidade enquanto se mantém uma SER aceitável.

FIGURA 25 – CURVA DA TAXA DE ERRO DE SÍMBOLO PELA VELOCIDADE COM BASE EM DIFERENTES NÍVEIS DE SNR E SF



FONTE: O autor (2024).

A TABELA 11 indica a velocidade máxima para cada fator de espalhamento, com base na interpolação dos pontos extraídos da FIGURA 25.

TABELA 11 – VELOCIDADE MÁXIMA PARA CADA SF E SNR APLICÁVEIS NAS SIMULAÇÕES DE MOBILIDADE

SF	SNR [dB]	Velocidade Máxima [km/h]
7	-7	-214,03 e 212,77
8	-10	-107,3 e 106,7
9	-13	-53,94 e 53,66
10	-16	-27,19 e 27,06
11	-19	-13,85 e 13,8
12	-22	-7,05 e 7,04

FONTE: O autor (2024).

Após uma análise cuidadosa, decidimos não nos restringir aos limites de velocidade específicos de cada cenário individual. Em vez disso, definimos cinco valores de velocidade que cobrem todos os limites regulamentares, permitindo uma abordagem mais abrangente e padronizada. Essa estratégia facilita a comparação entre diferentes condições e garante que todas as velocidades críticas sejam consideradas. Os valores de velocidade estabelecidos foram: 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 110 km/h e 150 km/h.

Com essas velocidades definidas, avançamos para avaliar quais combinações de SF e SNR poderiam atender a cada uma das velocidades propostas de maneira eficiente e confiável. Esta avaliação envolveu a análise da relação entre SF, SNR e a velocidade máxima que poderia ser mantida sob diferentes condições. Utilizamos dados experimentais complementados por modelos teóricos bem estabelecidos para identificar as combinações ideais de SF e SNR, garantindo robustez na comunicação mesmo em condições variáveis.

Os resultados desta análise, que indicam os SF e SNR mais eficazes para cada cenário de velocidade proposto, estão apresentados na TABELA 12. Esses achados são fundamentais para otimizar o desempenho da comunicação em ambientes dinâmicos e variáveis.

TABELA 12 – ESPECIFICAÇÕES DE SF E SNR APLICÁVEIS NAS SIMULAÇÕES DE MOBILIDADE

SF	SNR [dB]	40 [km/h]	60 [km/h]	80 [km/h]	110 [km/h]	150 [km/h]
7	-7					
8	-10					
9	-13					
10	-16					
11	-19					
12	-22					

FONTE: O autor (2024).

A etapa final dessa fase consistiu em definir a sensibilidade do receptor, com base nos valores de SNR que atendem às velocidades simuladas. A sensibilidade do receptor foi calculada utilizando a EQUAÇÃO 6.

$$S_{RX} = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \quad (6)$$

Onde S_{RX} é sensibilidade do receptor, em dBm; BW é a largura da banda, em kHz; NF é Figura de Ruído do receptor, definido em 6 dB; SNR é a Razão Sinal-Ruído, em dB.

A TABELA 13 apresenta os valores de sensibilidade do receptor para cada SF, determinados com base na análise do SNR.

TABELA 13 – ESPECIFICAÇÕES DE SENSIBILIDADE DO RECEPTOR PARA CADA SF E SNR

SF	SNR [dB]	Sensibilidade Receptor [dBm]
7	-7	-124
8	-10	-127
9	-13	-130
10	-16	-133
11	-19	-136
12	-22	-139

FONTE: O autor (2024).

Para a simulação, definimos a sensibilidade com um fator de espalhamento de 7 e uma SNR de -7 dB como referência. Incluímos uma margem de desvanecimento de 20 dB para compensar variações e perdas de sinal que ocorrem no ambiente real, como obstruções, mudanças atmosféricas e variações do terreno. Este ajuste é essencial para representar realisticamente as condições práticas de operação. O valor de -104 dBm foi utilizado como referência para o limite de recepção, garantindo que a simulação avalie a capacidade de recepção do sistema em condições adversas de sinal fraco e alto ruído, permitindo uma análise precisa do desempenho do sistema.

4.1.2 Definição dos Parâmetros Aplicados ao Radio Mobile

Para a simulação, estabelecemos a frequência portadora do LoRa em 915 MHz, que está dentro da faixa permitida no Brasil de 915 a 928 MHz, com largura de banda de 125 kHz para 64 canais de *uplink*.

O tipo de antena utilizado na simulação será a omnidirecional. Com base nos experimentos de Santos et al. (2020), definimos a altura da estação base em 30 m e a altura da estação móvel em 1,8 m, levemente ajustada em relação aos experimentos anteriores para refletir condições específicas do nosso estudo. Utilizamos um ganho de 12 dBi e polarização vertical para a estação base, baseado no modelo Omnidirecional OA-915M12-NF da *Fei Teng Wireless Technology Co.*, e um ganho de 3,5 dBi e polarização vertical para a antena móvel, baseado no modelo Omnidirecional TX915-XPL-100 da *Chengdu Ebyte Electronic Technology Co.* Em relação à potência de transmissão, Jendal (2020) define um EIRP máximo de 30 dBm para dispositivos LoRa no Brasil.

Considerando a potência de transmissão de 14 dBm utilizada em nossas simulações, comum em sensores comerciais, e o ganho da antena de 12 dBi, a potência total fica em 26 dBm, respeitando o limite regulamentar. Santos et al. (2020) define um valor prático para a perda por cabos em cerca de 2 dB, portanto, manteremos essa referência.

As condições climáticas foram simuladas como continentais subtropicais, refletindo as condições atmosféricas típicas dessa região e seu impacto na propagação do sinal. A refratividade da superfície atmosférica foi definida como 320, conforme a TABELA 6, alinhando-se ao clima escolhido.

Quanto às propriedades do solo, a permissividade relativa foi estabelecida em 15 F/m e a condutividade relativa em 0,005 S/m, baseadas nos valores para solo médio, também referenciados na TABELA 7.

Para nossas simulações, utilizaremos a variabilidade no modo Radiodifusão, que permite uma abordagem abrangente na avaliação da confiabilidade dos cálculos de propagação de sinal. Neste modo, a variabilidade de tempo e localização será configurada em 50%, refletindo uma condição moderada de incerteza temporal e espacial. Adicionalmente, a variabilidade por situação será ajustada para 70%, permitindo um controle mais rigoroso sobre as variáveis ocultas que podem afetar o desempenho da comunicação, garantindo assim uma simulação mais realista e robusta do sistema em diferentes condições operacionais.

Esses parâmetros, resumidos na TABELA 14, foram cuidadosamente configurados para garantir que as simulações de transmissão representem de maneira precisa as condições reais de operação.

TABELA 14 – PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE

	Valor
Tipo de antena	Omnidirecional
Frequência	915 MHz
Polarização	Vertical
Potência de transmissão	14 dBm
Altura da estação base	30 m
Altura antena móvel	1,8 m
Ganho da estação base	12 dBi
Ganho da antena móvel	3,5 dBi
Perda por cabos	2 dB
Confiabilidade necessária:	
Modo de variabilidade	<i>Radiodifusão</i>
Porcentagem do tempo	50%
Porcentagem de locais	50%
Porcentagem de situações	70%
Refratividade de superfície	320
Condutividade do solo	0,005 S/m
Permissividade do solo	15 F/m
Clima	Continental subtropical

FONTE: O autor (2024).

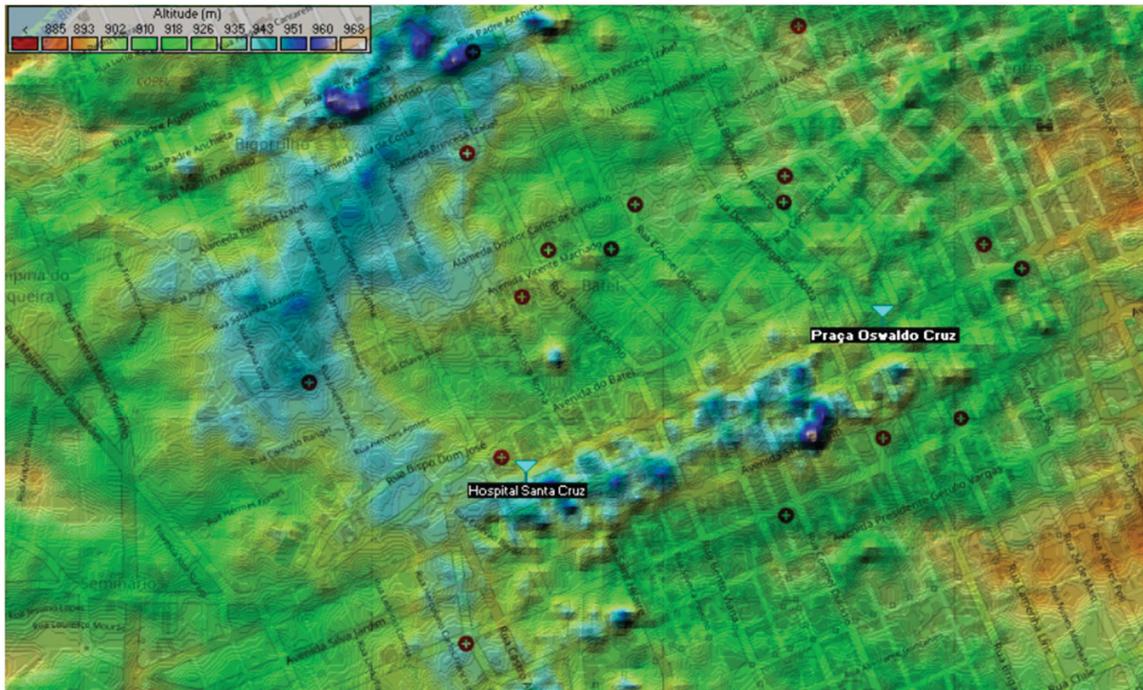
4.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados da simulação de transmissão serão apresentados de forma a oferecer uma compreensão detalhada do desempenho do sistema em dois cenários distintos, com análises que consideram a troca das posições das antenas de transmissão e recepção. Essa abordagem permite avaliar o impacto da altura das antenas sobre o desempenho do sistema.

4.2.1 Resultados do Primeiro Cenário

No primeiro cenário, focado na Avenida Visconde de Guarapuava, em Curitiba, a estação base estará inicialmente posicionada na Praça Oswaldo Cruz, enquanto a antena móvel será localizada no Hospital Santa Cruz, FIGURA 26.

FIGURA 26 – RELEVO DO PRIMEIRO CENÁRIO



FONTE: Coudé (2005).

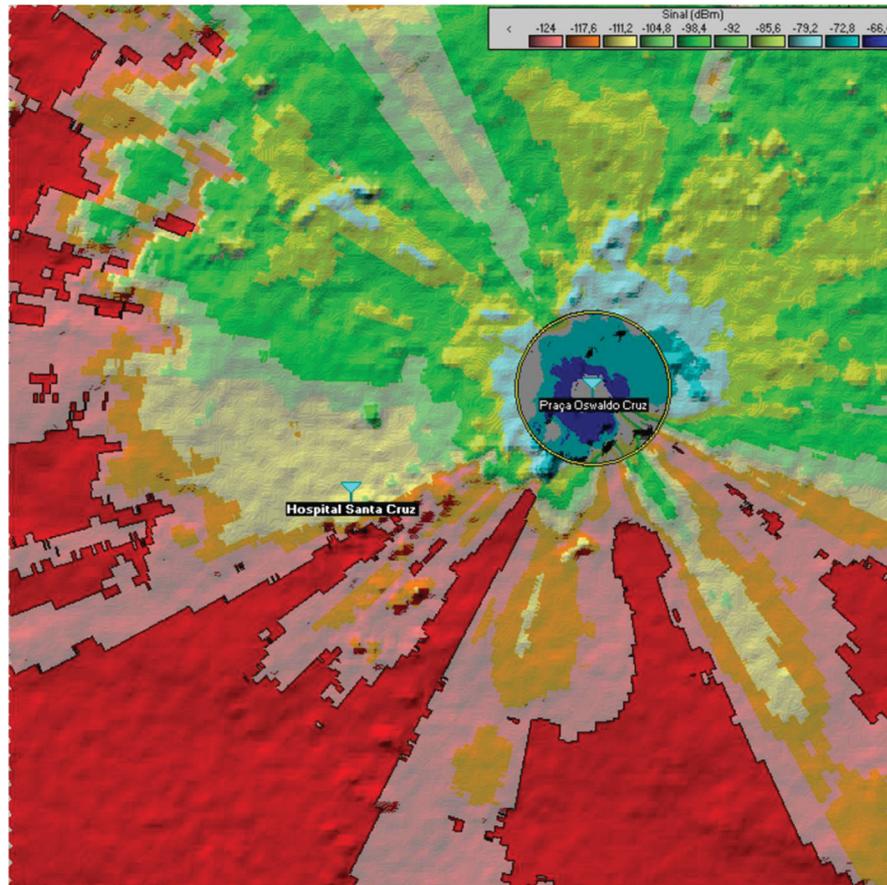
A FIGURA 27 apresenta a zona de Fresnel, e a FIGURA 28 demonstra a cobertura do sinal num raio de 5 km da estação base. A TABELA 15 resume os resultados obtidos nesta configuração.

FIGURA 27 – ZONA DE FRESNEL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coudé (2005) e Google LLC (2023).

FIGURA 28 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coudé (2005).

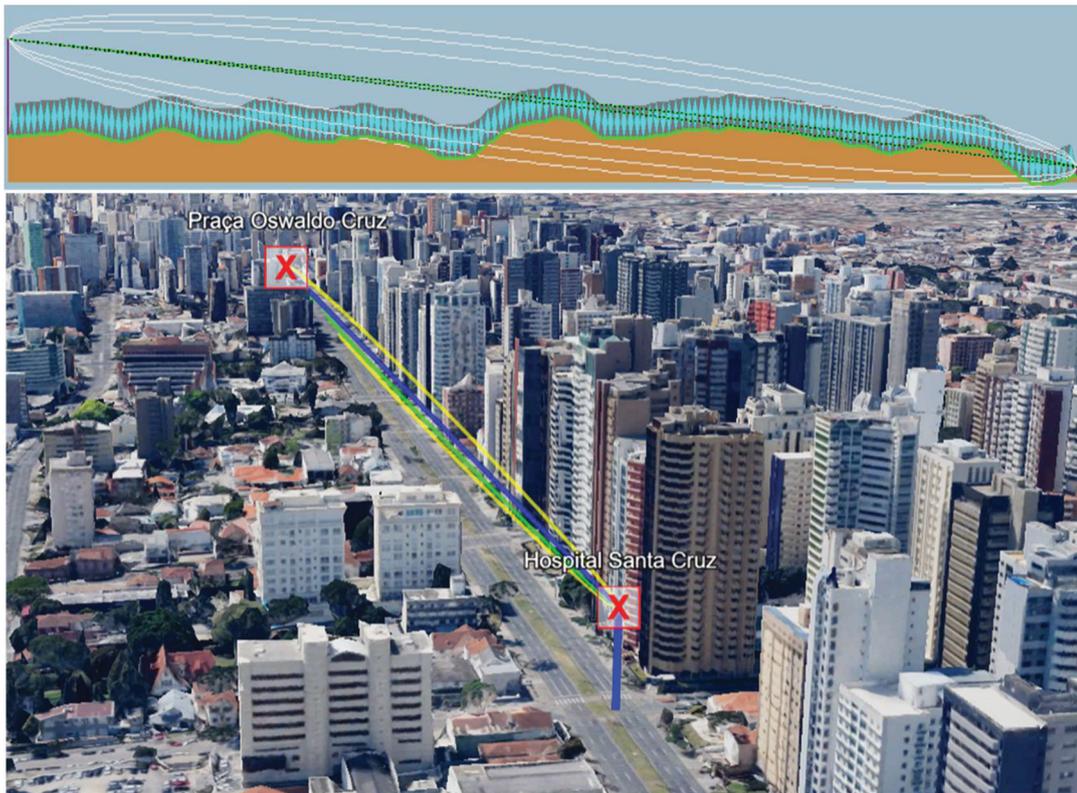
TABELA 15 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1

Parâmetro	Valor
Distância	1,47 km
Perda total do caminho:	
Perda de espaço livre	95 dB
Perda de terreno	7,2 dB
Perda urbana	18,3 dB
Perda por vegetação	0 dB
Perda estática	4,1 dB
Sinal no receptor	-99,1 dBm

FONTE: O autor (2024).

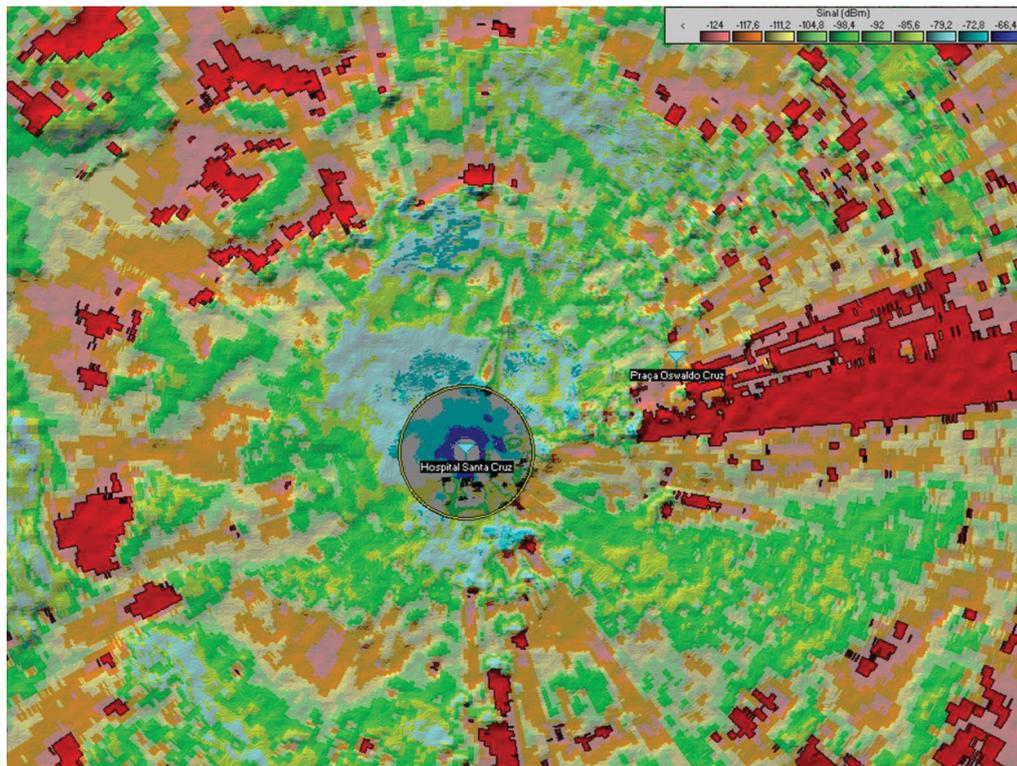
Na sequência, a simulação é invertida, com a estação base agora posicionada no Hospital Santa Cruz e a antena móvel na Praça Oswaldo Cruz. Novamente, a FIGURA 29 mostra a zona de Fresnel, e a FIGURA 30 a cobertura do sinal num raio de 5 km, com a TABELA 16 apresentando os resultados detalhados.

FIGURA 29 – ZONA DE FRESNEL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005) e Google LLC (2023).

FIGURA 30 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005).

TABELA 16 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2

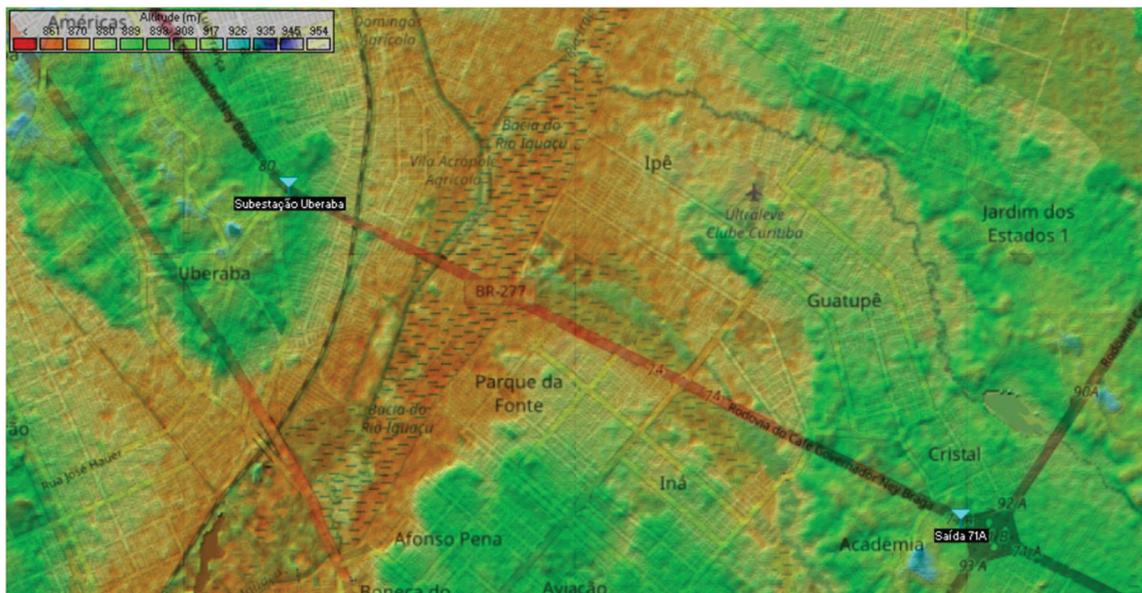
Parâmetro	Valor
Distância	1,47 km
Perda total do caminho:	
Perda de espaço livre	95 dB
Perda de terreno	19,3 dB
Perda urbana	14,7 dB
Perda por vegetação	0 dB
Perda estática	4,1 dB
Sinal no receptor	-107,6 dBm

FONTE: O autor (2024).

4.2.2 Resultados do Segundo Cenário

Para o segundo cenário, localizado na BR 277 entre Curitiba e São José dos Pinhais, a estação base é inicialmente posicionada na Subestação Uberada, com a antena móvel localizada no Contorno Leste, na saída 71A. As características do relevo são ilustradas na FIGURA 31.

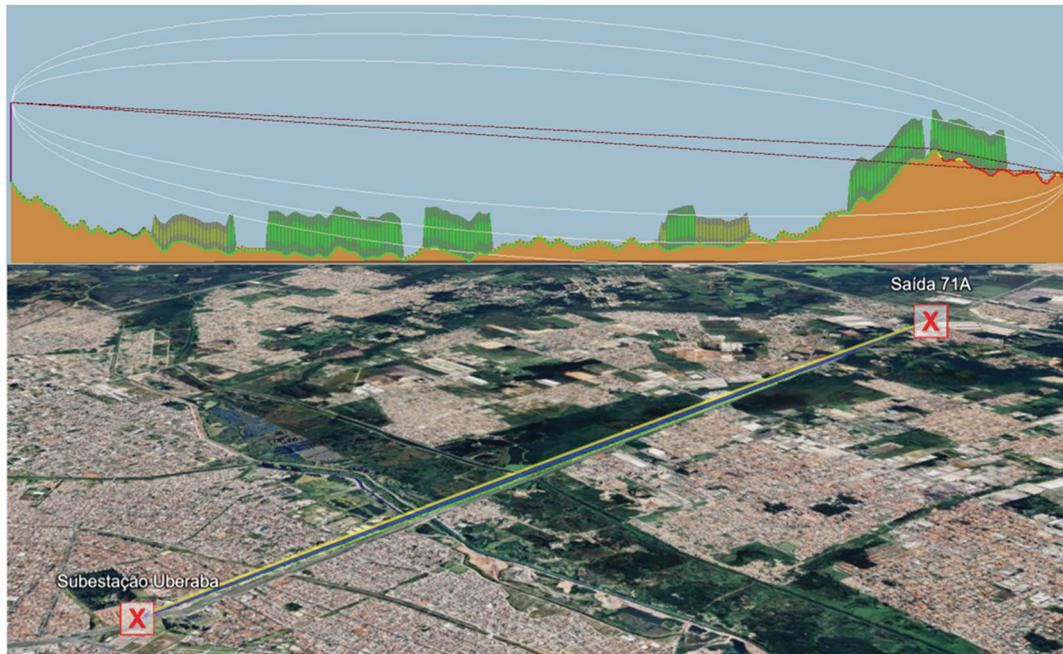
FIGURA 31 – RELEVO DO SEGUNDO CENÁRIO



FONTE: Coudé (2005).

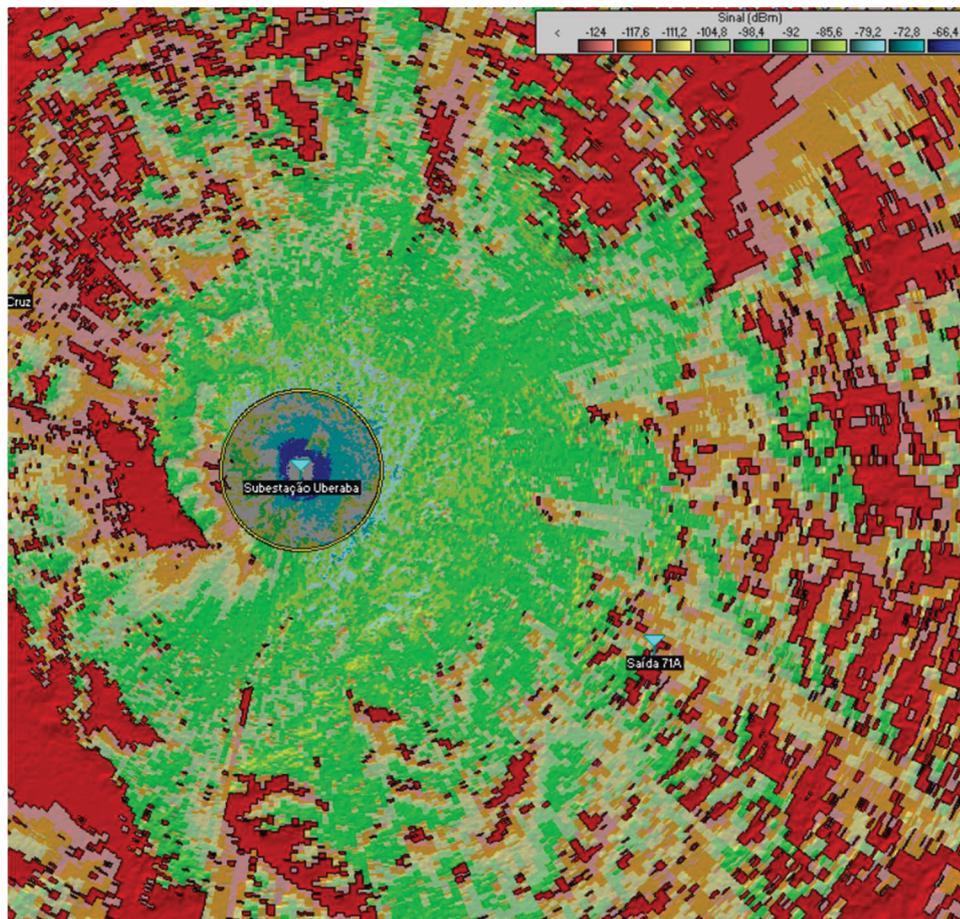
A FIGURA 32 apresenta a zona de Fresnel do segundo cenário, com a estação base no ponto 1. A FIGURA 33 representa a cobertura do sinal num raio de 20 km, com a TABELA 17 apresentando os resultados detalhados.

FIGURA 32 – ZONA DE FRESNEL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coudé (2005) e Google LLC (2023).

FIGURA 33 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coudé (2005).

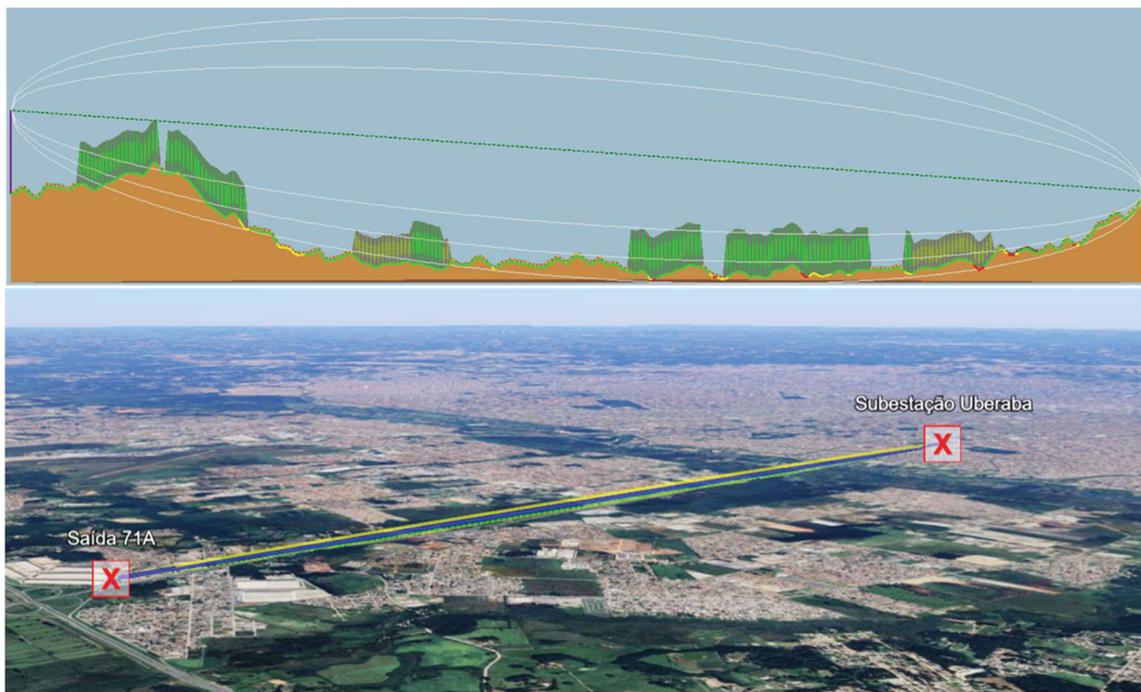
TABELA 17 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1

Parâmetro	Valor
Distância	8,46 km
Perda total do caminho:	
Perda de espaço livre	110,2 dB
Perda de terreno	18,6 dB
Perda urbana	0 dB
Perda por vegetação	1,7 dB
Perda estática	3,9 dB
Sinal no receptor	-109 dBm

FONTE: O autor (2024).

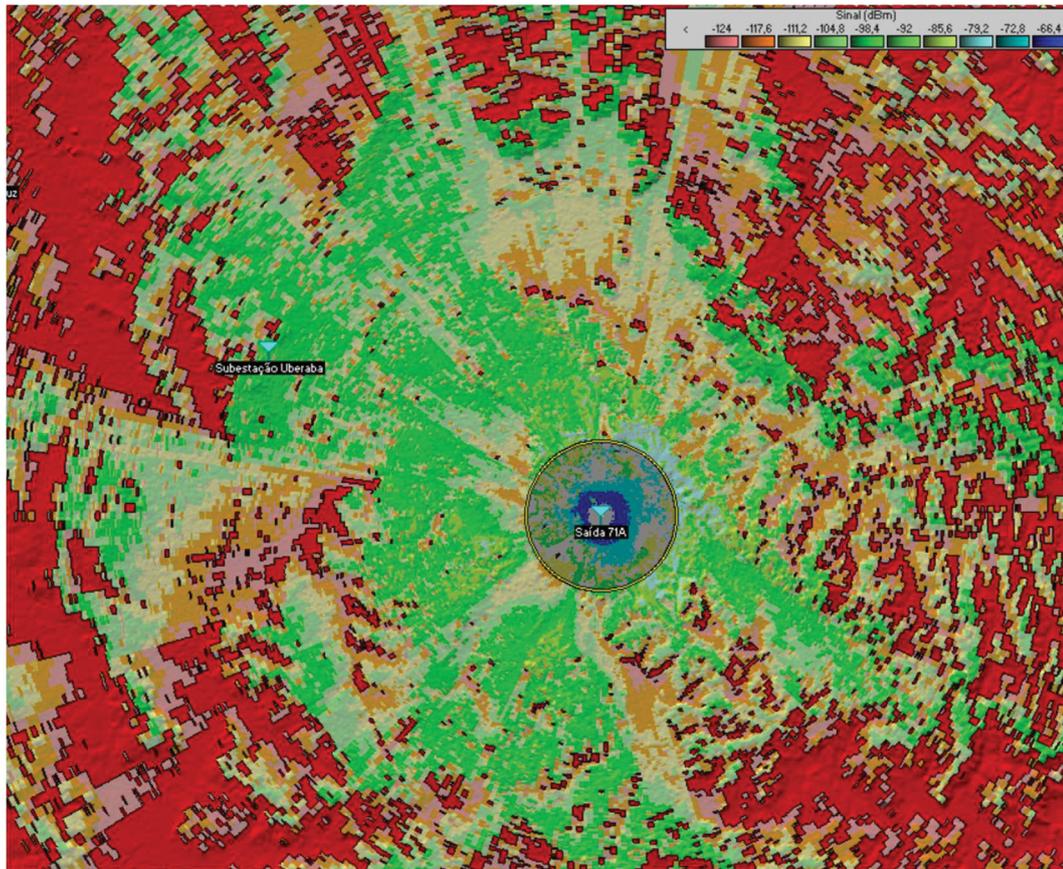
A última simulação, também invertida, apresenta a estação base agora posicionada no Contorno Leste, na saída 71A e a antena móvel na Subestação Uberaba. A FIGURA 34 mostra a zona de Fresnel. A FIGURA 35 ilustra a cobertura do sinal num raio de 20 km, com a TABELA 18 apresentando os resultados detalhados da última simulação.

FIGURA 34 – ZONA DE FRESNEL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005) e Google LLC (2023).

FIGURA 35 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005).

TABELA 18 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO RADIO MOBILE NO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2

Parâmetro	Valor
Distância	8,46 km
Perda total do caminho:	
Perda de espaço livre	110,2 dB
Perda de terreno	2,5 dB
Perda urbana	0 dB
Perda por vegetação	1 dB
Perda estática	4 dB
Sinal no receptor	-87,2 dBm

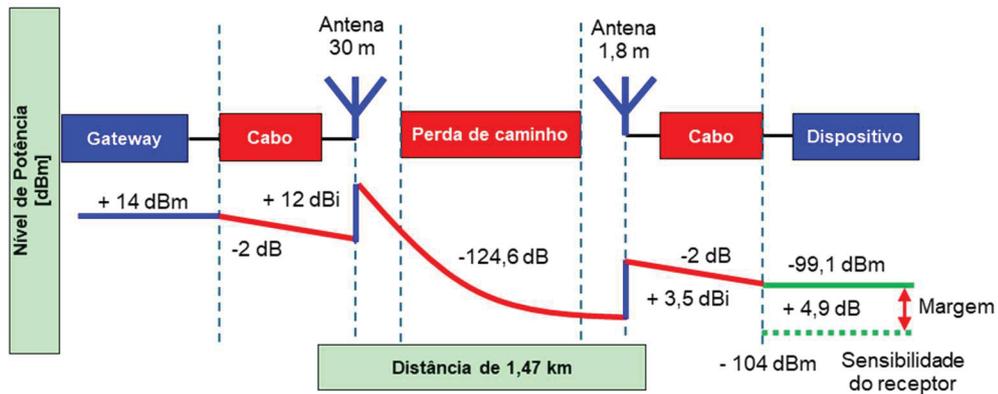
FONTE: O autor (2024).

Essa estrutura de apresentação dos resultados visa oferecer uma visão clara e compreensiva das condições analisadas e suas implicações na qualidade da comunicação, levando em consideração diversos fatores de variabilidade e suas influências no desempenho geral do sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

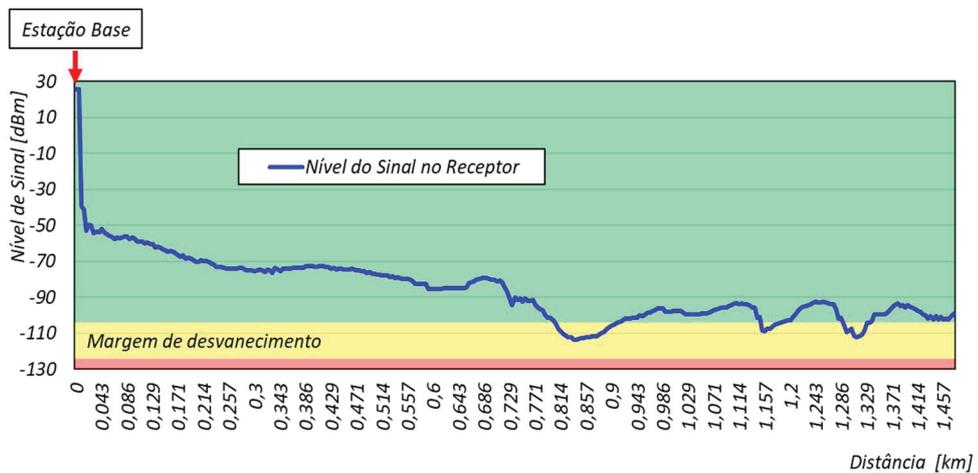
No primeiro cenário, com a estação base localizada na Praça Oswaldo Cruz, o nível do sinal recebido no Hospital Santa Cruz foi de -99,1 dBm, o que se mostrou satisfatório, estando 4,9 dB acima do limite estipulado para o receptor, que é de -104 dBm, como pode ser visto na FIGURA 36. Analisando o nível de sinal ao longo do trajeto entre a estação base e a antena móvel, FIGURA 37, foi possível verificar que, em alguns pontos, o sinal esteve abaixo da margem de desvanecimento estabelecida de 20 dB. Contudo, em nenhuma distância o sinal caiu abaixo da sensibilidade do receptor, definida para um fator de desvanecimento SF7 com um SNR de -7 dB.

FIGURA 36 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: O autor (2024).

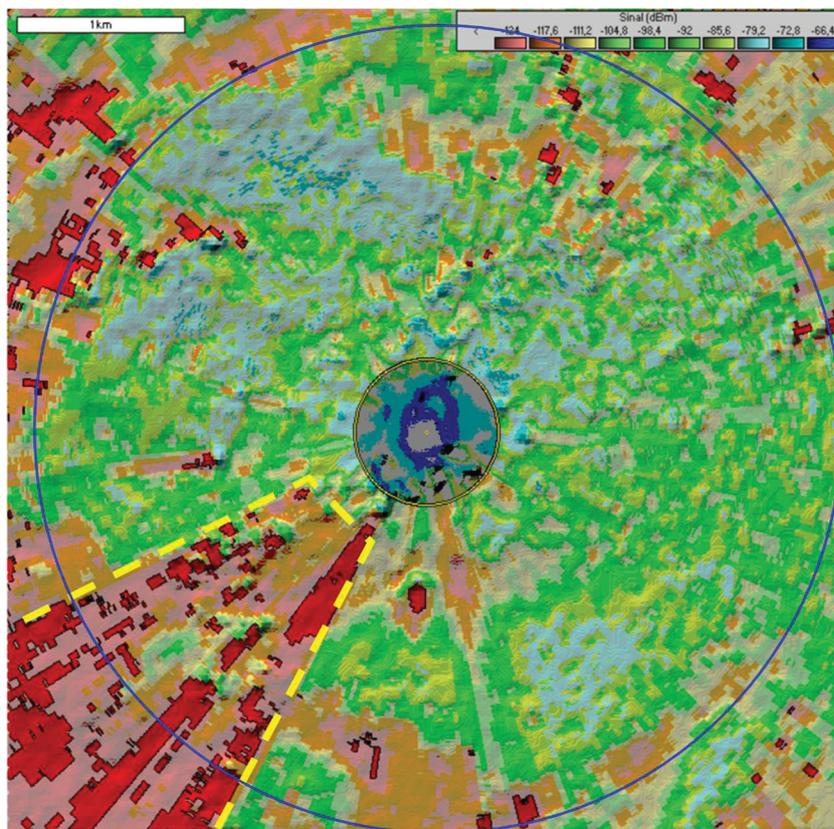
FIGURA 37 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 2



FONTE: O autor (2024).

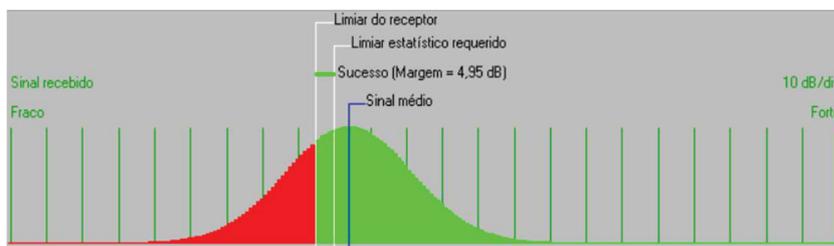
Ao avaliar a cobertura do sinal ao redor da estação base, conforme ilustrado na FIGURA 38, observa-se que, em um raio de 2,5 km, a maior parte da região apresenta condições favoráveis para a recepção do sinal. Entretanto, uma pequena parcela da área apresenta pontos de sombreamento, especialmente nas proximidades onde a antena móvel foi posicionada. A FIGURA 39 mostra a distribuição normal do sinal de recepção no Hospital Santa Cruz, reforçando os resultados obtidos.

FIGURA 38 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coudé (2005).

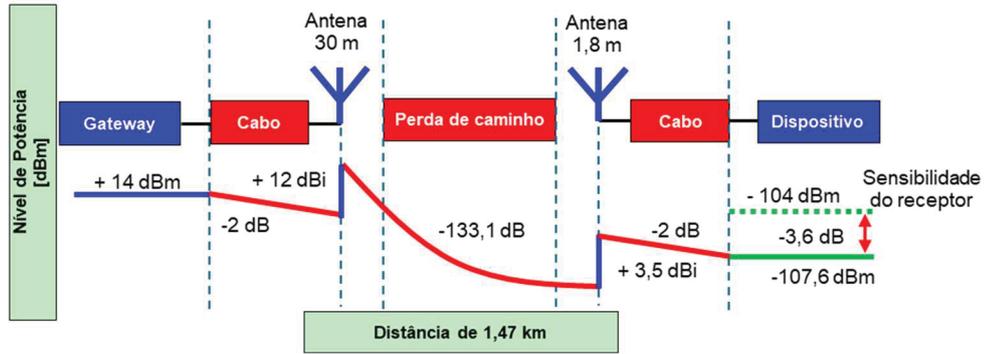
FIGURA 39 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coudé (2005).

Ao inverter a localização da estação base para o Hospital Santa Cruz, o nível de sinal na Praça Oswaldo Cruz caiu para -107,6 dBm, ficando abaixo do nível estabelecido, como mostrado na FIGURA 40.

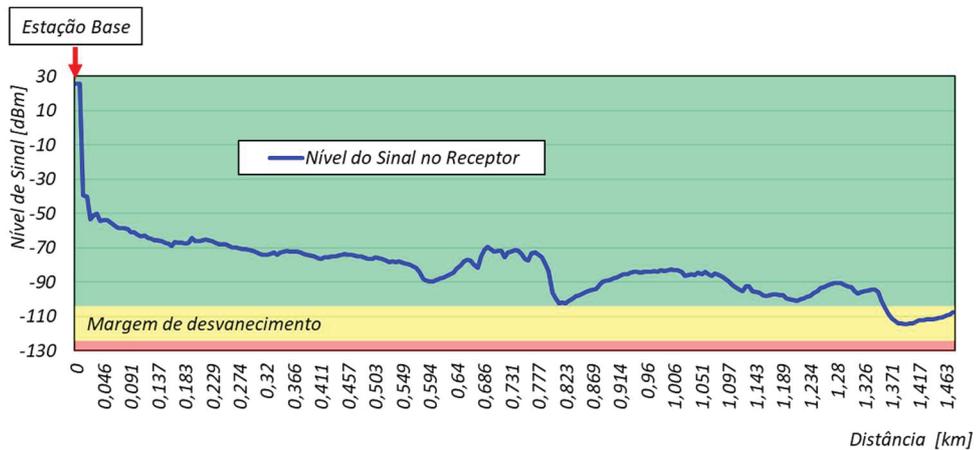
FIGURA 40 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: O autor (2024).

Analisando o nível de sinal ao longo de todo o trajeto, mostrado na FIGURA 41, observa-se que, exceto por um ponto próximo de 830 m, todas as outras distâncias permaneceram acima do limite até cerca de 1,3 km, onde o sinal caiu abaixo do nível estipulado de -104 dBm, mas ainda dentro do limite operacional do receptor de -124 dBm.

FIGURA 41 – NÍVEL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 1

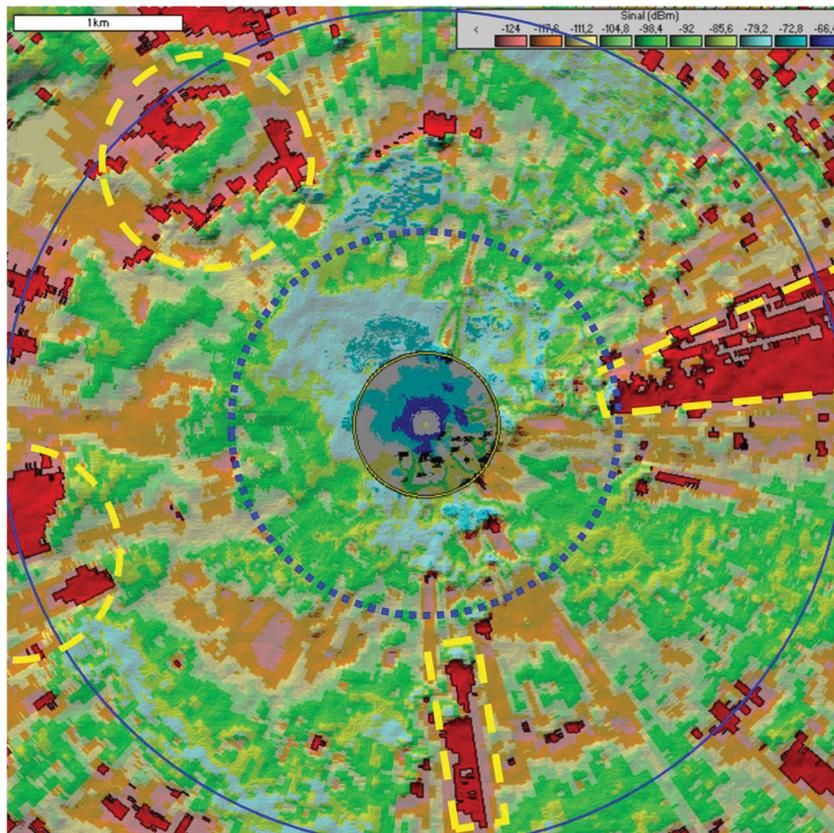


FONTE: O autor (2024).

A cobertura do sinal, centralizada na estação base do Hospital Santa Cruz, é mostrada na FIGURA 42 e revela que, em um raio de 2,5 km, há pequenas áreas de

sombreamento em todas as direções. Esse resultado sugere a necessidade de redefinir a célula para um raio de 1,2 km (círculo azul pontilhado), onde a interferência seja minimizada.

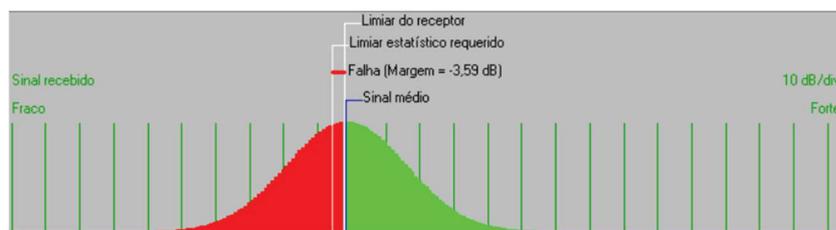
FIGURA 42 – COBERTURA DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005).

A curva de distribuição normal do sinal de recepção, ilustrada na FIGURA 43, confirma a possibilidade de falhas significativas no sinal na Praça Santa Cruz.

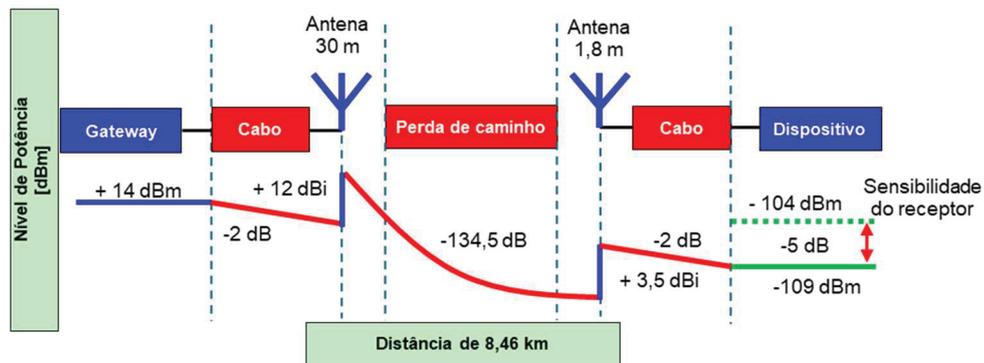
FIGURA 43 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO PRIMEIRO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005).

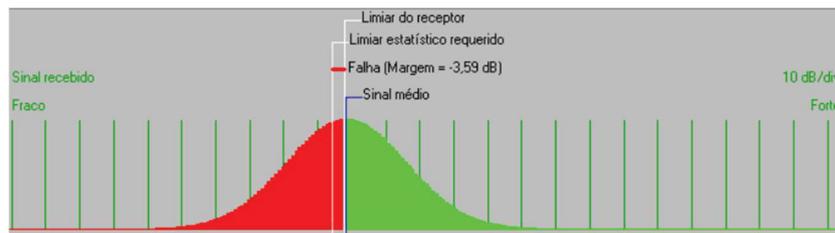
No segundo cenário, a estação base foi inicialmente posicionada na Subestação Uberaba, enquanto a antena móvel foi colocada na Saída 71A do Contorno Leste. Os resultados desse cenário, conforme mostrado na FIGURA 44, indicam uma performance marginal, com o nível de sinal de recepção atingindo -109 dBm, novamente abaixo do nível estipulado. A distribuição normal do sinal na Saída 71A, vista na FIGURA 45, demonstra a existência de um nível de falha relativamente alto.

FIGURA 44 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 45 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1

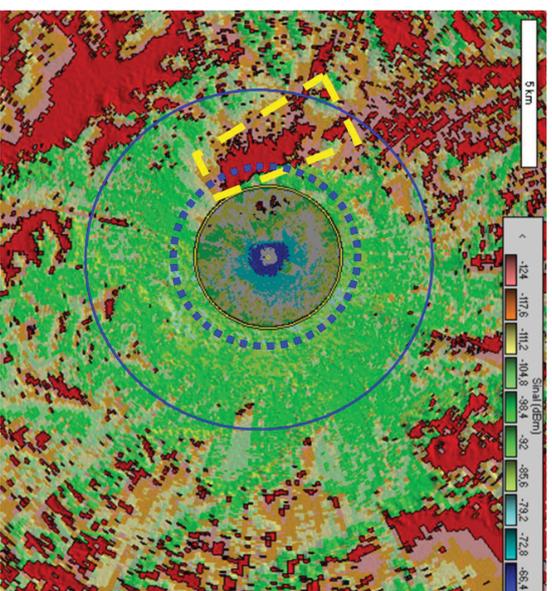


FONTE: Coudé (2005).

A cobertura do sinal de recepção a partir da estação base na Subestação Uberaba, ilustrada na FIGURA 46, abrange um raio de aproximadamente 6 km, com poucos pontos onde o sinal possa falhar. No entanto, para garantir uma cobertura eficaz, foi proposta uma nova célula com um raio de cerca de 3 km (círculo azul pontilhado). Embora o raio de eficiência tenha sido reduzido pela metade, ao observar o nível de recepção no sentido da Saída 71A, conforme mostrado na FIGURA 47, o sinal se manteve em uma condição muito favorável, acima até mesmo da margem de

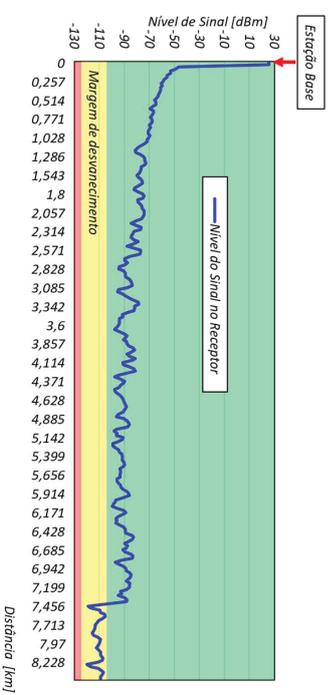
desvanecimento definida, até uma distância aproximada de 7,5 km da estação base. Após essa distância, o relevo começa a afetar significativamente o nível de sinal de recepção, conforme ilustrado na FIGURA 47.

FIGURA 46 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1



FONTE: Coude (2005).

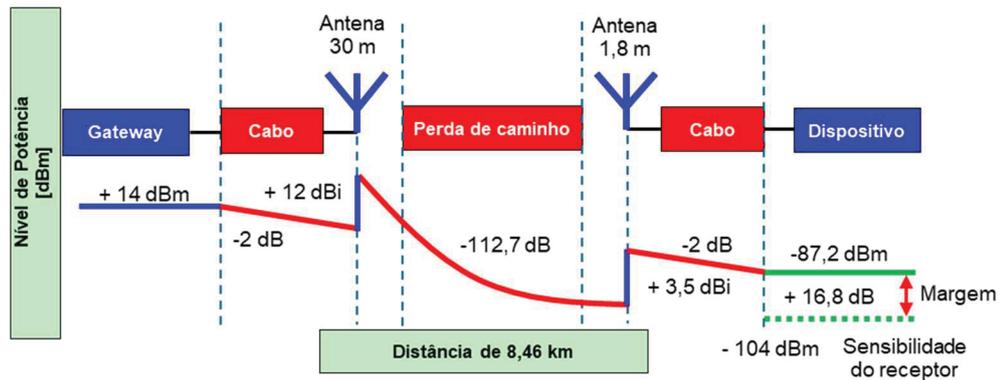
FIGURA 47 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 1 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 2



FONTE: O autor (2024).

Na última simulação do segundo cenário, a estação base foi posicionada na Saída 71A, enquanto a antena móvel foi colocada na Subestação Uberaba. Os resultados dessa configuração, conforme mostrado na FIGURA 48, revelam que o nível do sinal recebido na Subestação Uberaba, de $-87,2$ dBm, foi satisfatório, ficando $16,8$ dB acima do limite estipulado para o receptor de -104 dBm.

FIGURA 48 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: O autor (2024).

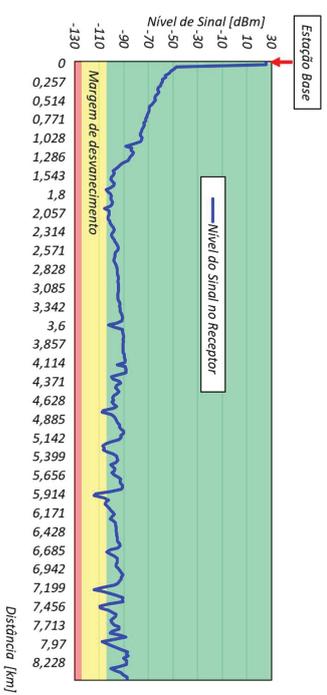
A FIGURA 49 mostra a distribuição normal do sinal de recepção na Subestação Uberaba, indicando um bom resultado. Analisando o nível de sinal ao longo do trajeto entre a estação base e a antena móvel, mostrado na FIGURA 50, observamos que, embora o sinal tenha caído na margem de desvanecimento de 20 dB em alguns pontos, ele permaneceu distante da sensibilidade do receptor para um fator de desvanecimento SF7 com um SNR de -7 dB em todas as distâncias.

FIGURA 49 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005).

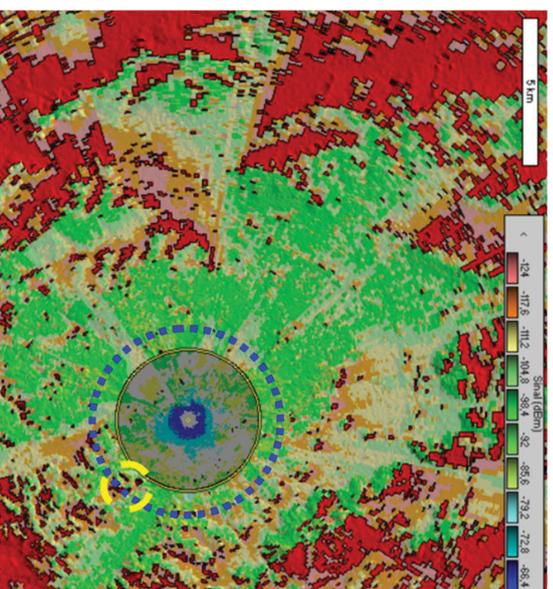
FIGURA 50 – NÍVEL DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO, TRAJETO ENTRE ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2 E ANTENA MÓVEL NO PONTO 1



FONTE: O autor (2024).

Ao observar a cobertura do sinal, verifica-se que o resultado foi beneficiado pela direção favorável de propagação. Entretanto, para manter uma célula com cobertura eficaz, foi necessário reduzir o raio de cobertura para aproximadamente 3,2 km, como ilustrado na FIGURA 51.

FIGURA 51 – COBERTURA DO SINAL DO SEGUNDO CENÁRIO COM ORIGEM NA ESTAÇÃO BASE NO PONTO 2



FONTE: Coudé (2005).

Após essas análises dos resultados das simulações, pode-se concluir que, ao posicionar a estação base em uma localização estratégica que otimiza a propagação do sinal, os resultados atendem plenamente aos objetivos do sistema, garantindo uma comunicação estável e eficiente, mesmo em ambientes urbanos densos. Embora o tamanho das células tenha sido reduzido, considerando a margem de desvanecimento proposta e a sensibilidade do receptor definida para situações extremas de velocidade acima de 150 km/h, os resultados indicam que, com o posicionamento estratégico da antena, o desempenho do LoRa é satisfatório para aplicações de mobilidade, onde a confiabilidade e a qualidade do sinal são essenciais.

Além da análise dos resultados, a aplicação em mobilidade foi complementada com observações sobre o desempenho do LoRa em situações em que o número de nós trocando dados simultaneamente pode impactar a quantidade de pacotes devido a possíveis colisões. No que diz respeito à distância de comunicação, Liando et al. (2019) demonstram que, em condições ideais de linha de visada, a tecnologia LoRa pode alcançar distâncias de até 10 km utilizando o fator de espalhamento SF12, com uma Taxa de Recepção de Pacotes (PRR) de 70%. No entanto, essa distância varia significativamente dependendo das condições ambientais e das configurações do fator de espalhamento SF. Para SF mais baixos, como o SF7, que proporciona uma taxa de transmissão de dados mais alta, a distância máxima de comunicação é reduzida para cerca de 5 km, mantendo um PRR de 70%. Esse comportamento reflete a necessidade de equilibrar a distância de comunicação com a taxa de transmissão de dados. Em cenários sem linha de visada, como áreas urbanas com muitos obstáculos físicos, o desempenho do LoRa é significativamente afetado. O estudo mostrou que a cobertura de comunicação é severamente reduzida nesses ambientes, com uma distância máxima de menos de 2 km ao usar SF12 e um PRR de 70%. Isso indica que a presença de obstruções físicas no caminho de transmissão degrada a qualidade do sinal de forma substancial, limitando a aplicabilidade do LoRa em ambientes urbanos densos para distâncias mais curtas.

Em uma rede LoRa, cada nó pode transmitir em diferentes fatores de espalhamento, o que permite que múltiplas transmissões ocorram simultaneamente sem interferência direta, desde que os SF sejam ortogonais. Contudo, quando vários nós operam no mesmo SF e na mesma frequência, a probabilidade de colisões

aumenta. A robustez do LoRa permite que sinais mais fortes ou com melhor relação sinal-ruído (SNR) sejam decodificados pelo receptor, mesmo em caso de colisões parciais. No entanto, à medida que o número de nós na rede cresce, a probabilidade de colisões se eleva, especialmente em ambientes urbanos ou industriais, onde a densidade de dispositivos pode ser maior.

O número de canais disponíveis também desempenha um papel significativo na redução de colisões. Em redes LoRa, cada canal pode ser utilizado independentemente por diferentes nós, permitindo a transmissão simultânea de dados sem colisão, desde que estejam em canais diferentes. Um maior número de canais aumenta a capacidade de a rede suportar mais nós simultaneamente, diminuindo a probabilidade de colisões.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos realizados até o momento forneceram uma base sólida para o entendimento das simulações de transmissão de dados via RF em diferentes cenários. No entanto, algumas limitações foram identificadas, que devem ser abordadas em futuras pesquisas para aprimorar o escopo e a aplicação prática do estudo. Experimentos devem ser realizados para validar a capacidade do LoRa de ser aplicável em mobilidade.

O levantamento e análise da literatura demandaram um tempo considerável, o que acabou por limitar a disponibilidade de execução de simulações mais detalhadas e para a coleta de um maior número de informações essenciais para uma análise mais aprofundada. Para futuros trabalhos, recomenda-se uma abordagem mais eficiente no processo de revisão bibliográfica, possibilitando assim uma maior dedicação às simulações e à interpretação dos dados obtidos. A implementação de simulações mais complexas e a inclusão de variáveis adicionais poderiam fornecer insights mais detalhados e abrangentes sobre o desempenho do sistema em diferentes condições.

Indo mais além, para melhorar o desempenho experimental das redes LoRa em ambientes urbanos densos, onde a interferência e as colisões são mais prováveis,

as técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina podem ser exploradas para otimizar a seleção de canais e a configuração dos fatores de espalhamento. Essas técnicas podem ser utilizadas para prever padrões de tráfego, identificar momentos de pico de transmissão e ajustar dinamicamente os parâmetros da rede para minimizar colisões e melhorar a eficiência da comunicação. Em áreas urbanas densas, onde os obstáculos são comuns, o uso de IA pode ajudar a mapear os melhores caminhos de propagação do sinal e ajustar as configurações da rede em tempo real, garantindo uma cobertura mais robusta e uma comunicação mais estável.

REFERÊNCIAS

- ABDELGADER, Abdeldime M.S.; LENAN, Wu. **The Physical Layer of the IEEE 802.11 p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges**. São Francisco, EUA: World Congress on Engineering and Computer Science 2014, WCECS, 2014. 8 p. v. 2. Disponível em: https://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp691-698.pdf. Acesso em: 4 jun. 2024.
- AFISIADIS, Orion; COTTING, Matthieu; BURG, Andreas; BALATSOUKAS-STIMMING, Alexios. **On the Error Rate of the LoRa Modulation with Interference**. IEEE Transactions on Wireless Communications: [s. n.], 2020. 12 p. v. 19. DOI <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11252>. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1905.11252>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- ALMEIDA, Thales Teixeira de. **Avaliação Experimental e por Simulação do IEEE802.11P e WI-FI Direct para Comunicações Veiculares**. Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, José Geraldo Ribeiro Júnior. 2021. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/Thales21/Thales21.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.
- AMARAL, Cristiano Torres do. **Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice Sob a Perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Área de Clima Tropical**. Orientador: Prof. Dr. Cassio Golçalves do Rego. 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS95QJL2/1/disserta_o_cristiano_torres_do_amaral.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.
- AMELOOT, Thomas; MOENECLAHEY, Marc; VAN TORRE, Patrick; ROGIER, Hendrik. **Characterizing the Impact of Doppler Effects on Body-Centric LoRa Links with SDR**. 21. ed. [S. l.]: Sensors, 2021. 15 p. DOI <https://doi.org/10.3390/s21124049>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/4049>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- AMELOOT, Thomas; TORRE, Patrick Van; ROGIER, Hendrik. **LoRa Base-Station-to-Body Communication with SIMO Front-to-Back Diversity**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation: [s. n.], 2021. 9 p. DOI <http://doi.org/10.1109/TAP.2020.3008660>. Disponível em: <https://biblio.ugent.be/publication/8705025>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- BOCCI, Emanuel Damasceno. **Projeto de um Sistema Embarcado de Aquisição de Dados com Implementação e Testes de Sistema de Telemetria**. Orientador:

Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca. 2020. 96 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13903>. Acesso em: 27 maio 2024.

BOQUET, Guillem; TUSET-PEIRÓ, Pere; ADELANTADO, Ferran; WATTEYNE, Thomas; VILAJOSANA, Xavier. **LoRa-E: Overview and Performance Analysis**. [S. l.]: IEEE Communications Magazine, 2020. 8 p. v. hal-03115551. Disponível em: <https://inria.hal.science/hal-03115551/document>. Acesso em: 5 jun. 2024.

BOR, Martin; ROEDIG, Utz. **LoRa Transmission Parameter Selection**. Lancaster, Inglaterra: School of Computing & Communications, Lancaster University, 2017. 8 p. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/79656197.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

CHAMBERL, Kent A.; LUEBBERS, Raymond J. **An Evaluation of Longley-Rice and GTD Propagation Models**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation: [s. n.], 1982. 1093 - 1099 (7) p. v. AP 30. DOI <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.1982.1142958>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/KentChamberlin/publication/3015630_An_Evaluation_of_LongleyRice_and_GTD_Propagation_Models/links/544a8ed0cf2d6347f4010c0/An-Evaluation-of-Longley-Rice-and-GTDPropagationModels.pdf?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uliwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uln19. Acesso em: 26 ago. 2024.

CHENGDU EBYTE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO. **TX915-XPL-100**. [S. l.: s. n.], [20--]. Disponível em: <https://www.es-ebyte.com/Uploadfiles/Files/2023-4-3/202343925393693.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2024.

CHINCHILLA-ROMERO, Natalia; NAVARRO-ORTIZ, Jorge; MUÑOZ, Pablo; AMEIGEIRAS, Pablo. **Collision Avoidance Resource Allocation for LoRaWAN**. Granada, Espanha: Sensors, 2021. 19 p. DOI <https://doi.org/10.3390/s21041218>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1218>. Acesso em: 16 maio 2024.

COUDÉ, Roger. **Radio Mobile**. 11.6.8. Canadá, 2005. Disponível em: <https://www.ve2dbe.com/english1.html>. Acesso em: 26 abr. 2024.

DFROBOT. **Introduction to LoRa: What is LoRa Technology?**. [S. l.], [20--]. Disponível em: https://wiki.dfrobot.com/What_is_LoRa. Acesso em: 27 ago. 2024.

DIXIT, Parth; KUMAR, P. Chandan. **V2X Communication for Message Transmission and Warning Detection**. [S. l.]: International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2022. 8 p. DOI <http://dx.doi.org/10.35940/ijeat.F3713.0811622>. Disponível em: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v11i6/F37130811622.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2024.

EL RACHKIDY, Nancy; GUITTON, Alexandre; KANEKO, Megumi. **Collision Resolution Protocol for Delay and Energy Efficient LoRa Networks**. [S. l.]: IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019. 28 p. DOI <https://dx.doi.org/10.1109/TGCN.2019.2908409>. Disponível em: <https://hal.science/hal-02095747/document>. Acesso em: 23 maio 2024.

FEI TENG WIRELESS TECHNOLOGY CO. **Model OA-915M12-NF: 915MHz 12dBi Omni Directional Outdoor Antenna (US 915)**. [S. l.: s. n.], 2021. 8 p. Disponível em: <https://ft-rf.com.tw/915mhz-12dbi-omni-directional-outdoor-antenna-us-915>. Acesso em: 28 ago. 2024.

FERRÉ, Guillaume. **Collision and Packet Loss Analysis in a LoRaWAN Network**. Cós, Grécia: 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017. 2586-2590 p. ISBN 978-0-9928628-7-1. Disponível em: <https://eurasip.org/Proceedings/Eusipco/Eusipco2017/papers/1570347606.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.

FILIPPI, Alessio; MOERMAN, Kees; MARTINEZ, Vincent; TURLEY, Andrew. **IEEE802.11p Ahead of LTE-V2V for Safety Applications**. [S. l.]: NXP Semiconductors, 2017. 19 p. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/LTE-V2V-WP.pdf>. Acesso em: 9 maio 2024.

GOOGLE LLC. **Google Earth**. 10.59.0.2. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

GOOGLE LLC. **Google Maps**. [S. l.], 22 jul. 2024. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/>. Acesso em: 18 jul. 2024.

GULIA, Aman Kumar Gulia. **A Simulation Study on the Performance Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X**. Estocolmo, Suécia: KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering and Computer Science, 2020. 69 p. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1422828/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 23 maio 2024.

HAQUE, Khandaker Foysal; ABDELGAWAD, Ahmed; YANAMBAKA, Venkata Prasanth; YELAMARTHI, Kumar. **LoRa Architecture for V2X Communication: An Experimental Evaluation with Vehicles on the Move**. Michigan, EUA: Sensors, 2020. 26 p. DOI <https://doi.org/10.3390/s20236876>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6876>. Acesso em: 10 jun. 2024.

INSTALACIÓN RadioMobile y GoogleEarth. Intérprete: David Andres Sepulveda Perez. Gravação de Vídeo. Youtube: [s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qeDbtzKSEXE>. Acesso em: 20 ago. 2024.

JENDAL, D.K. (ed.). **RP002-1.0.2 LoRaWAN® Regional Parameters**. [S. l.]: LoRa Alliance, Inc., 2020. 94 p. Disponível em: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/RP_2-1.0.2.pdf. Acesso em: 26 ago. 2024.

JIANG, Yu; PENG, Linning; HU, Aiqun; WANG, Sheng; HUANG, Yi; ZHANG, Lu. **Physical Layer Identification of LoRa Devices Using Constellation Trace Figure**. 223. ed. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking: [s. n.], 2019. 11 p. DOI <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1542-x>. Disponível em: <https://jwcneurasipjournals.springeropen.com/counter/pdf/10.1186/s13638-019-1542-x.pdf>. Acesso em: 26 maio 2024.

KHARATE, Bhagyashri S.; DHAGDI, Sandip T. **WAVE: Wireless Access for Vehicular Environment**. 6. ed. International Journal of Advanced Research in Computer Science: Jawaharlal Darda Institute of Engineering & Technology, 2013. 4 p. v. 4. Disponível em: <https://www.ijarcs.info/index.php/ijarcs/article/download/1731/1719>. Acesso em: 27 maio 2024.

LIANDO, Jansen; GAMAGE, Amalinda; TENGOURTIUS, Agustinus; LI, Mo. **Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large-scale Measurement Study**. [S. l.]: ACM Transactions on Sensor Networks, 2019. 35 p. v. 15. DOI <http://dx.doi.org/10.1145/3293534>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331294324_Known_and_Unknown_Facts_of_LoRa_Experiences_from_a_Large-scale_Measurement_Study. Acesso em: 27 ago. 2024.

MAGRIN, Davide; CAPUZZO, Martina; ZANELLA, Andrea. **A Thorough Study of LoRaWAN Performance Under Different Parameter Settings**. Padova, Italy: University of Padova, 2019. 11 p. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1906.05083>. Acesso em: 26 maio 2024.

MAHMOOD, Adnan; ZHANG, Wei Emma; SHENG, Quan Z. **Software-Defined Heterogeneous Vehicular Networking: The Architectural Design and Open Challenges**. Sydney, Austrália: Future Internet, 2019. 17 p. DOI <https://doi.org/10.3390/fi11030070>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/3/70>. Acesso em: 23 maio 2024.

MANNONI, Valérian; BERG, Vincent; SESIA, Stefania; PERRAUD, Eric. **A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X**. Kuala-Lumpur, Malásia: IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), 2019. 6 p. Disponível em: <https://cea.hal.science/cea-02183828>. Acesso em: 23 maio 2024.

MARINI, Riccardo; MIKHAYLOV, Konstantin; PASOLINI, Gianni; BURATTI, Chiara. **LoRaWANSim: A Flexible Simulator for LoRaWAN Networks**. [S. l.]: Sensors, 2021. 19 p. DOI <https://doi.org/10.3390/s21030695>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/3/695>. Acesso em: 30 maio 2024.

MOLINA-MASEGOSA, Rafael; GOZÁLVEZ, J.; SEPULCRE, M. **Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation With Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size**. Elche, Espanha: [s. n.], 2020. 23 p. v. 8. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3007115. Disponível em: <https://translate.google.com/website?sl=en&tl=pt&hl=pt-BR&prev=search&u=https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09133075.pdf>. Acesso em: 17 maio 2024.

PASTÓRIO, A. F.; ROSSATO, J.; SÁ, J. P. C. A.; SPANHOL, F. A.; RODRIGUES, L. A.; CAMARGO, E. T. **Fundamentos de LoRaWAN - Teoria e Prática**. [S. l.: s. n.], [202-?]. 25 p. DOI <https://doi.org/10.5753/sbc.8898.6.2>. Disponível em: <https://books-sol.sbc.org.br/index.php/sbc/catalog/book/88>. Acesso em: 26 ago. 2024.

PETÄJÄJÄRVI, Juha; MIKHAYLOV, Konstantin; PETTISSALO, Marko; JANHUNEN, Janne; IINATTI, Jari. **Performance of a Low-power Wide-area Network Based on LoRa Technology: Doppler Robustness, Scalability, and Coverage**. International Journal of Distributed Sensor Networks: SAGE Publications, 2017. 16 p. v. 13. DOI <https://doi.org/10.1177/1550147717699412>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/reader/10.1177/1550147717699412>. Acesso em: 27 maio 2024.

PIERI, Victor Cesconetto de. **Simulação de uma rede LoRaWAN: Subsídios a Operação com Alta Densidade de Nodos**. Orientador: Prof. Saul Silva Caetano, Dr. 2023. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) - Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina, São José, Santa Catarina, 2023. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/9/9d/TCC_71_VICTOR_CESCONETTO_DE_PIERI.pdf. Acesso em: 3 jun. 2024.

RAHMADHANI, Andri; KUIPERS, Fernando. **When LoRaWAN Frames Collide**. WiNTECH 2018 - Proceedings of the 12th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization, Co-located with MobiCom 2018: Association for Computing Machinery (ACM), 2018. 89-97 p. DOI <https://doi.org/10.1145/3267204.3267212>. Disponível em: <https://research.tudelft.nl/files/55547256/WiNTECH2018.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2024.

RENZONE, Gabriele Di; PARRINO, Stefano; PERUZZI, Giacomo; POZZEBON, Alessandro; VANGELISTA, Lorenzo. **LoRaWAN for Vehicular Networking: Field Tests for Vehicle-to-Roadside Communication**. 24. ed. Sensors: [s. n.], 2024. 17 p. DOI <https://doi.org/10.3390/s24061801>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/6/1801>. Acesso em: 8 ago. 2024.

RODRÍGUEZ, JD Bueno. **MANUAL USO RADIO MOBILE**. [S. l.: s. n.], 2009. 31 p. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/anexos/Anexo%2016.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

ROHATGI, Ankit. **WebPlotDigitizer**. 4.7. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://automeris.io>. Acesso em: 28 ago. 2024.

SANTOS, Alberto C. P.; MAGALHÃES, Amarilton L.; ALMEIDA, André L. F. de; MACIEL, Tarcisio F. **Integração de Redes de Sensores sem Fio à Plataforma Lora® para Serviços de Monitoramento e Controle Inteligentes**. XXXVIII - Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT 2020: [s. n.], 2020. 5 p. Disponível em: <https://www.sbrt.org.br/sbrt2020/papers/1570661669.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2024.

SANTOS, Vinícius dos. **Redes Wireless: Radio Mobile como Ferramenta de Predição de Nível de Sinal - Teoria e Prática**. Teleco - Inteligência em Telecomunicações, 2 out. 2023. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwirelessrb/default.asp>. Acesso em: 27 ago. 2024.

SANT'ANA, Jean Michel de Souza. **Redes LoRaWAN: Implantação e Desenvolvimento de Aplicações**. Orientador: Prof. MSc. Arliones Stevert Hoeller Jr. 2017. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, São José, Santa Catarina, 2017. Disponível em: https://docente.ifsc.edu.br/noronha/documentos/TCC_Jean_Michel.pdf. Acesso em: 3 jun. 2024.

SAPONARA, Sergio; GAGLIARDI, Alessio. **Modeling and Analysis of 802.11p Physical Layer for V2X Connected Transport Systems Considering Harsh Operating Conditions and HW Device Performance**. Milão, Itália: 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, 2018. 6 p. Disponível em: https://arpi.unipi.it/bitstream/11568/957825/2/08493238_IEEE_Automotive_2018.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

SEMTECH CORPORATION. **AN1200.22 - LoRa Modulation Basics**: Wireless Sensing and Timing Products Division. Camarillo, Califórnia: [s. n.], 2015. Disponível em: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2024.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview**. Camarillo, Califórnia: Technical Paper, 2019. 26 p. Disponível em: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf. Acesso em: 1 jul. 2024.

SILVA, João Paulo Silvino Belo da. **Plataforma de Teste de Gateway LoRa para IoT Baseada em SDR**. Orientador: Cleonilson Protásio de Souza. 2023. 84 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE) - Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, Paraíba, 2023. Disponível em:

https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/26714/1/Jo%C3%A3oPauloSilvinoBeloDaSilva_Dissert.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.

TAHA, Ashraf A.; FETEIHA, Mohamed F.; ABDUL, Wadood. **Performance Evaluation for LoRa Transceiver**. 2. ed. International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE): [s. n.], 2019. 25-39 p. v. 8. Disponível em: <https://ijcsse.org/published/volume8/issue2/p2-V8I12.pdf>. Acesso em: 26 maio 2024.

WANG, Donglin; NGANSO, Yann Nana; SCHOTTEN, Hans D. **A Short Overview of 6G V2X Communication Standards**. Alemanha: Rheinland-Pfälzische Technische Universität, Campus Landau, 2023. 7 p. DOI <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.16810>. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2311.16810>. Acesso em: 23 maio 2024.

XUAN-CHIEN, Le; VRIGNEAU, Baptiste; GAUTIER, Matthieu; MABON, Malo; BERDER, Olivier. **Energy/Reliability Trade-off of LoRa Communications over Fading Channels**. Saint-Malo, França: International Conference on Telecommunication, 2018. 6 p. v. hal-01816574. Disponível em: <https://hal.science/hal-01816574/document>. Acesso em: 4 jun. 2024.