



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS E TECNOLOGIA DA  
INFORMAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VITÓRIA JACOMELLI BARATELLA

**CONCEITOS DE IOT APLICADOS NO  
DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO  
ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO DE  
DADOS A LONGAS DISTÂNCIAS**

ITAJUBÁ

2025

VITÓRIA JACOMELLI BARATELLA

**CONCEITOS DE IOT APLICADOS NO  
DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO  
ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO DE  
DADOS A LONGAS DISTÂNCIAS**

Dissertação submetida ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação da Universidade Federal do Itajubá, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Microeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti

ITAJUBÁ

2025

VITÓRIA JACOMELLI BARATELLA

**CONCEITOS DE IOT APLICADOS NO  
DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO  
ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO DE  
DADOS A LONGAS DISTÂNCIAS**

Dissertação submetida ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação da Universidade Federal do Itajubá, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Microeletrônica.

Aprovada em 21/07/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti  
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

---

Prof. Dr. Robson Luiz Moreno  
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

---

Prof. Dr. Carlos Alberto De Francisco  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

# AGRADECIMENTOS

A presente dissertação é marco importante de mais uma etapa da minha vida acadêmica. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio, a inspiração e a paciência de muitas pessoas, a quem desejo expressar minha mais profunda gratidão.

Aos meus pais, Cláudia e Erinor, minhas maiores referências de perseverança, amor e honestidade. À minha avó, Elvira, por seu exemplo de superação e liderança. Ao meu namorado, Guilherme, por ser meu grande e fiel companheiro em todos os momentos. Aos meus familiares e amigos, que sempre estiveram comigo, em especial ao Caio Tácito, amigo que me acompanha nesta desafiadora jornada desde 2022, e à sua família — Milton, Rosângela, André, Arthur e Vó Rita —, que se tornou também a minha.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Danilo Henrique Spadoti, e à sua família, estendo minha admiração e gratidão. Agradeço não apenas pela orientação técnica, pelos ensinamentos e pela experiência compartilhada, mas, sobretudo, pela amizade e parceria.

Aos meus colegas de profissão e parceiros de pesquisa, Anderson Guerra de Almeida e Bruno Faus, pela colaboração e amizade ao longo de toda a jornada acadêmica. Ao Prof. Dr. Décio Rennó de Mendonça Faria, por todos os ensinamentos e pelo incansável apoio. Aos amigos do Laboratório de Telecomunicações (LabTel), Jean, Reinaldo, Christian e Marciano, pelas conversas e pela amizade que tornaram o ambiente de trabalho mais leve e produtivo.

À equipe da empresa Asthon Tecnologia, pelo papel crucial em minha vida e pelos conhecimentos compartilhados. Um agradecimento em especial ao Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva pela confiança depositada e aprendizados.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. À equipe de apoio técnico do Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação (IESTI), em especial a Patrícia, Anderson e Nedson, pelo suporte com os equipamentos desenvolvidos nesta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo indispensável apoio financeiro.

# RESUMO

A expansão de aplicações de *Internet* das Coisas (IoT) em territórios de grande extensão, como o Brasil, enfrenta desafios significativos de conectividade, tanto em áreas remotas com infraestrutura limitada quanto em ambientes urbanos com alta interferência. A validação de tecnologias de Redes de Longa Distância e Baixa Potência (LPWAN) em cenários reais é de grande importância para o desenvolvimento de soluções robustas e escaláveis.

Assim, este trabalho tem como foco a aplicação de conceitos de *Internet* das Coisas (IoT) no desenvolvimento de um módulo eletrônico otimizado para a transmissão de dados a longa distância, priorizando alcance, máxima confiabilidade, autonomia operacional e viabilidade de produção em escala. Para isso, foi desenvolvido e validado experimentalmente um sistema de comunicação utilizando tecnologia LoRaWAN, permitindo analisar o desempenho do sistema em condições reais de uso.

A avaliação de desempenho, baseada em indicadores como a Indicação da Força do Sinal Recebido (RSSI), a Relação Sinal-Ruído (SNR) e a Taxa de Perda de Pacotes (PLR), permitiu analisar a degradação do canal e identificar os limites práticos da comunicação. A análise quantitativa dos resultados demonstrou que a presença de uma linha de visada direta (LoS) é um dos fatores mais determinantes para a alta confiabilidade, alcançando uma taxa de perda de pacotes de 4,39%. Para cenários sem visada, o trabalho comprovou a eficácia do uso de antenas de alto ganho, que reduziram a perda de pacotes de quase 30% para 6,02% em ambiente rural. Ao mesmo tempo, o estudo estabeleceu o limite prático do sistema, onde a combinação de longa distância e múltiplas obstruções de relevo levou à falha total de comunicação (100% de perda de pacotes). Esses limites práticos, que também validam a robustez teórica do sistema em operar com SNR de até -20,39 dB, servem como um guia para o planejamento de redes resilientes em cenários de propagação desafiadores, como os encontrados no Brasil.

**Palavras-chave:** comunicação sem fio IoT LoRaWAN propagação de ondas

# ABSTRACT

The expansion of Internet of Things (IoT) applications in large territories, such as Brazil, faces significant connectivity challenges in remote areas with limited infrastructure and urban environments with high interference. The validation of Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) technologies in real-world scenarios is of great importance for the development of robust and scalable solutions.

Thus, this study focuses on the application of IoT concepts in the development of an electronic module optimized for long-range data transmission, prioritizing range, maximum reliability, operational autonomy, and viability for large-scale production. To this end, a communication system using LoRaWAN technology was developed and experimentally validated, allowing for the analysis of the system performance under real-world conditions. The performance evaluation, based on metrics such as Received Signal Strength Indication (RSSI), Signal-to-Noise Ratio (SNR), and Packet Loss Rate (PLR), allowed for the analysis of channel degradation and identification of practical communication limits. The quantitative analysis of the results demonstrated that the presence of a direct Line-of-Sight (LoS) is a key factor for high reliability, achieving a packet loss rate of 4.39%. For non-line-of-sight scenarios, the study demonstrated the effectiveness of using high-gain antennas, which reduced the packet loss rate from nearly 30% to 6.02% in a rural environment. Simultaneously, the study established the practical limit of the system, where the combination of long distance and multiple terrain obstructions led to total communication failure (100% packet loss). These practical thresholds, which also validate the theoretical robustness of the system in operating with an SNR as low as -20.39dB, serve as a guide for planning resilient networks in challenging propagation scenarios, such as those found in Brazil.

**Keywords:** IoT. LoRaWAN. wave propagation. wireless communication.

# Lista de Siglas

- ABP** Ativação por Personalização (*Activation By Personalization*)
- ADR** Taxa de Dados Adaptativa (*Adaptive Data Rate*)
- ATC** *American Tower Corporation*
- BW** Largura de Banda (*Bandwidth*)
- CR** Taxa de Codificação (*Coding Rate*)
- CSS** Espectro de Espalhamento *Chirp* (*Chirp Spread Spectrum*)
- DR** Taxa de Dados (*Data Rate*)
- ED** Dispositivo Final (*End Device*)
- IoT** Internet das Coisas (*Internet of Things*)
- IP** Protocolo de Internet (*Internet Protocol*)
- ISM** Industrial, Científica e Médica (*Industrial, Scientific, and Medical*)
- LPWAN** Rede de Longa Distância e Baixa Potência (*Low Power Wide Area Network*)
- LoRaWAN** Rede de Longa Distância e Ampla Área (*Long Range Wide Area Network*)
- MAC** Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control*)
- MCU** Unidade de Microcontrolador (*Microcontroller Unit*)
- MIMO** Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas (*Multiple-Input Multiple-Output*)
- MQTT** (*Message Queuing Telemetry Transport*)
- NB-IoT** Internet das Coisas de Banda Estreita (*Narrowband IoT*)
- NLoS** Sem Linha de Visada (*Non-Line-of-Sight*)
- NS** Servidor de Rede (*Network Server*)
- OFDMA** Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal  
(*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)
- OTAA** Ativação Over-The-Air (*Over-the-Air Activation*)
- PCI** Placa de Circuito Impresso
- PLR** Taxa de Perda de Pacotes (*Packet Loss Rate*)
- QoS** Qualidade de Serviço (*Quality of Service*)
- RSSI** Indicação da Força do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication*)
- SF** Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*)
- SNR** Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio*)

**TX Power** Potência de Transmissão (*Transmission Power*)

**WLAN** Rede Local Sem Fio (*Wireless Local Area Network*)

**WMAN** Rede Metropolitana Sem Fio (*Wireless Metropolitan Area Network*)

**WPAN** Rede de Área Pessoal Sem Fio (*Wireless Personal Area Network*)

**WWAN** Rede de Área Ampla Sem Fio (*Wireless Wide Area Network*)

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 Motivação e contexto da pesquisa . . . . .	1
1.2 Problema Investigado e Justificativa . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.4 Estrutura do Trabalho . . . . .	4
1.5 Artigos Publicados . . . . .	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	6
2.1 Trabalhos anteriores e relevância do tema . . . . .	6
2.2 Tecnologias de redes sem fio . . . . .	10
2.2.1 Classificação das redes sem fio (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN)	10
2.2.2 Características das redes LPWAN . . . . .	13
2.2.3 Comparação entre LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M . . . . .	14
2.3 LoRa e LoRaWAN: fundamentos, arquitetura e parâmetros . . . . .	16
2.3.1 Parâmetros Técnicos de Transmissão Lora . . . . .	16
2.3.1.1 Fator de Espalhamento ( <i>Spreading Factor, SF</i> ) . . . . .	16
2.3.1.2 Largura de Banda ( <i>Bandwidth, BW</i> ) . . . . .	17
2.3.1.3 Potência de Transmissão ( <i>TX Power</i> ) . . . . .	17
2.3.1.4 Taxa de Codificação ( <i>Coding Rate, CR</i> ) . . . . .	18

2.3.2	Parâmetros Operacionais . . . . .	18
2.3.2.1	Taxa de Dados ( <i>Data Rate</i> , DR) . . . . .	18
2.3.2.2	Taxa de <i>Chirp</i> ( <i>Chirp Rate</i> , $\beta$ ) . . . . .	19
2.3.2.3	Tempo no Ar ( <i>Time on Air</i> , ToA) . . . . .	19
2.3.2.4	Ciclo de Trabalho ( <i>Duty Cycle</i> ) . . . . .	19
2.3.3	Mecanismos de Configuração . . . . .	20
2.3.3.1	Estrutura de Pacote ( <i>Packet Structure</i> ) . . . . .	20
2.3.3.2	Taxa de Dados Adaptativa ( <i>Adaptive Data Rate</i> , ADR) . . . . .	21
2.3.4	Fatores de Propagação e o Canal de Rádio . . . . .	22
2.3.4.1	Visada Direta ( <i>Line of Sight</i> , LoS) . . . . .	22
2.3.5	Métricas de Desempenho . . . . .	23
2.3.5.1	Relação Sinal-Ruído ( <i>Signal-to-Noise Ratio</i> , SNR) . . . . .	23
2.3.5.2	Indicação da Força do Sinal Recebido ( <i>Received Signal Strength Indication</i> , RSSI) . . . . .	23
2.3.5.3	Taxa de Perda de Pacotes ( <i>Packet Loss Rate</i> , PLR) . . . . .	24
2.3.6	Faixa de frequência . . . . .	26
2.3.7	Arquitetura do Protocolo LoRaWAN . . . . .	26
2.3.8	Classes de Dispositivos LoRaWAN . . . . .	28
2.3.8.1	Classe A . . . . .	28
2.3.8.2	Classe B . . . . .	29
2.3.8.3	Classe C . . . . .	29
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DESENVOLVIDO</b> . . . . .	<b>30</b>
3.1	Justificativa da escolha pelo LoRaWAN . . . . .	30
3.2	Descrição da Arquitetura do Sistema de Transmissão . . . . .	31
3.3	Descrição do Módulo Transmissor Desenvolvido (ED) . . . . .	34
3.3.1	Requisitos de Projeto do Módulo Transmissor . . . . .	35

3.3.2	Escolha dos Componentes Principais . . . . .	36
3.3.3	Arquitetura do Hardware . . . . .	37
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS</b>	<b>39</b>
4.1	Metodologia de Testes e Implantação em Campo . . . . .	39
4.1.1	Configuração da Infraestrutura de Testes . . . . .	39
4.1.2	Parâmetros de Transmissão . . . . .	40
4.1.3	Configuração do Protocolo LoRaWAN . . . . .	40
4.2	Cenário de Teste e Implantação . . . . .	41
4.2.1	Instalação da Estação Base ( <i>Gateway</i> ) . . . . .	41
4.2.2	Implantação dos Dispositivos Finais (EDs) . . . . .	42
4.2.2.1	ED 1: Ambiente Urbano sem Visada Direta (NLoS) . . . . .	42
4.2.2.2	ED 2: Ambiente Urbano com Visada Direta (LoS) . . . . .	43
4.2.2.3	ED 3: Ambiente Urbano sem Visada Direta (NLoS) . . . . .	44
4.2.2.4	ED 4: Ambiente Rural sem Visada Direta (NLoS) - Mé- dia Distância . . . . .	45
4.2.2.5	ED 5: Ambiente Rural sem Visada Direta (NLoS) - Longa Distância . . . . .	46
4.2.2.6	ED 6: Ambiente Rural sem Visada Direta (NLoS) - Al- cance Extremo . . . . .	47
4.3	Indicadores Coletados . . . . .	49
4.4	Análise e Interpretação dos Dados . . . . .	50
4.4.1	Análise de RSSI . . . . .	50
4.4.1.1	Impacto da Visada Direta (LoS) em Ambiente Urbano . . . . .	56
4.4.1.2	Influência do Ambiente e da Topografia (Urbano vs. Ru- ral) . . . . .	56
4.4.1.3	Influência do Ganho da Antena . . . . .	57
4.4.1.4	Influência da Altitude em Longa Distância . . . . .	57

4.4.1.5	Limites Práticos e Falha de Comunicação . . . . .	58
4.4.2	Análise de SNR . . . . .	58
4.4.2.1	Impacto da Visada Direta (LoS) . . . . .	64
4.4.2.2	Influência do Ambiente . . . . .	64
4.4.2.3	Influência do Ganho da Antena . . . . .	65
4.4.3	Análise de Confiabilidade do Enlace (Perda de Pacotes) . . . . .	65
4.4.3.1	Impacto da Visada Direta . . . . .	65
4.4.3.2	Impacto do Ganho da Antena . . . . .	66
4.4.3.3	Influência do Ambiente e da Altitude . . . . .	66
4.4.3.4	Limiar de Operação e Falha de Comunicação . . . . .	66
4.4.4	Correlação entre os resultados de RSSI, SNR e PLR . . . . .	66
4.5	Cenário de Teste Complementar: Desempenho em Ambiente Interno com Alta Densidade . . . . .	68
4.5.1	Configuração do Cenário de Teste . . . . .	68
4.5.2	Análise de Confiabilidade e Impacto de Colisões . . . . .	69
4.5.2.1	Impacto da Visada Direta em Curta Distância . . . . .	70
4.5.2.2	Efeito de Colisões em Ambiente Denso . . . . .	70
4.5.2.3	Comparativo com Cenários de Longo Alcance . . . . .	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>71</b>
5.1	Conclusões Gerais sobre o Desempenho do Sistema . . . . .	72
5.2	Limitações Observadas . . . . .	72
5.3	Sugestões para Continuidade da Pesquisa . . . . .	73
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>

# LISTA DE FIGURAS

1	Alcance em função da taxa de dados [28] . . . . .	12
2	Formato da mensagem LoRa [48] . . . . .	20
3	Topologia da rede LoRaWAN, desde os dispositivos finais até a nuvem [65]	27
4	Arquitetura do sistema de comunicação construído . . . . .	31
5	<i>Dashboard</i> da plataforma <i>ChirpStack</i> . . . . .	33
6	Face superior 3D da PCI do módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0	34
7	Diagrama de Blocos Funcionais do módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0 . . . . .	35
8	Esquemático segmentado do módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0	37
9	Instalação do <i>Gateway</i> LoRaWAN nas instalações da Rádio Panorama FM. . . . .	42
10	Instalação do ED 1 na Rua Tatuí com antena de 2 dBi (esquerda) e 6.5 dBi (direita). . . . .	43
11	Instalação do ED 2 no Bairro Santos Dumont com antena de 2 dBi. . . . .	44
12	Instalação do ED 3 no Bairro Distrito Industrial com antena de 2 dBi. . . . .	45
13	Instalação do ED 4 na Serra dos Toledos (Ponto 1) com antena de 2 dBi (esquerda) e 6.5 dBi (direita). . . . .	46
14	Instalação do ED 5 na Serra dos Toledos (Ponto 2) com antena de 2 dBi. . . . .	47
15	Instalação do ED 6 no Bairro dos Borges com antena de 2 dBi. . . . .	48
16	Mapa geral com a localização do <i>gateway</i> e dos seis dispositivos de teste (EDs). . . . .	48
17	Mapa com foco na localização do dispositivo de teste 6 (ED 6). . . . .	49

18	Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED1 - Urbano, NLoS (Rua Tatuí). . . . .	51
19	Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED2 - Urbano, LoS (B. Santos Dumont). . . . .	52
20	Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED3 - Urbano, NLoS (Distrito Industrial). . . . .	53
21	Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED4 - Rural, NLoS, Média Distância (Serra dos Toledos (Ponto 1)). . . . .	54
22	Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED5 - Rural, NLoS, Longa Distância (Serra dos Toledos (Ponto 2)). . . . .	55
23	Gráficos de RSSI ao longo do tempo para os cinco dispositivos de teste em diferentes cenários. . . . .	56
24	Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED1 - Urbano, NLoS (Rua Tatuí). . . . .	59
25	Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED2 - Urbano, LoS (B. Santos Dumont). . . . .	60
26	Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED3 - Urbano, NLoS (Distrito Industrial). . . . .	61
27	Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED4 - Rural, NLoS (Serra dos Toledos 1). . . . .	62
28	Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED5 - Rural, NLoS (Serra dos Toledos 2). . . . .	63
29	Gráficos de SNR ao longo do tempo para os cinco dispositivos de teste em diferentes cenários. . . . .	64
30	Disposição do <i>gateway</i> e dos dispositivos de teste no ambiente interno. .	69

# LISTA DE TABELAS

1	Resumo de trabalhos relacionados com soluções de comunicação sem fio de longo alcance . . . . .	9
2	Comparação entre os tipos de redes sem fio . . . . .	13
3	Comparação entre tecnologias LPWAN . . . . .	15
4	Classificação dos Parâmetros, Mecanismos e Métricas do LoRaWAN. . . . .	25
5	Principais Identificadores e Chaves de Segurança do LoRaWAN . . . . .	28
6	Matriz de dispositivos e cenários de teste avaliados. . . . .	49
7	Resumo dos Resultados de Desempenho por Cenário de Teste. . . . .	66
8	Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 2 e ED 3 . . . . .	67
9	Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 1 e ED 4 . . . . .	67
10	Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 8, ED 9 e ED 10. . . . .	69
11	Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 2 e ED 10. . . . .	70

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e contexto da pesquisa

Nas últimas décadas, a crescente demanda por conectividade transformou a *Internet* das Coisas (*Internet of Things*, IoT) em um dos pilares do desenvolvimento tecnológico mundial. O termo IoT refere-se à interligação de dispositivos físicos capazes de adquirir, processar e transmitir dados sem a intervenção humana direta, o que permitiu grandes avanços em áreas como cidades inteligentes, monitoramento ambiental e automação industrial [1].

Entretanto, apesar do avanço das infraestruturas de comunicação, a conectividade segue sendo um desafio em contextos geográficos e operacionais variados. Em países com dimensões continentais, como é o caso do Brasil, regiões remotas, como as rurais, ainda enfrentam limitações estruturais, como a ausência de rede de dados, baixa cobertura de operadoras móveis e alto custo de implantação de infraestrutura convencional. Estima-se que milhões de brasileiros em áreas de difícil acesso carecem de conexão confiável com a *internet*, o que limita a aplicação de soluções baseadas em IoT nesses territórios [2].

Por outro lado, áreas urbanas densamente povoadas também apresentam desafios para a expansão de redes de conectividade. Nesses ambientes existe uma alta densidade de dispositivos conectados, a sobreposição de redes Wi-Fi, sinais de telefonia móvel e outros sistemas sem fio, que podem gerar interferência eletromagnética, comprometendo a qualidade da transmissão. Existe, ainda, a interferência devido à propagação multipercurso, resultando em interferência construtiva ou destrutiva entre as diferentes versões do sinal. Isso resulta em variações nos níveis de Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) e Indicação da Força do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication*, RSSI), aumento na taxa de perda de pacotes e redução na confiabilidade da transmissão, principalmente em locais com obstruções físicas, como edifícios, túneis e subsolos [3].

Diante desses cenários distintos, como o isolamento rural e a complexidade urbana, torna-se necessária a busca por tecnologias de comunicação sem fio que possam combinar

longo alcance com robustez contra interferências, baixo consumo de energia, garantindo uma simplicidade de implantação. Nesse contexto, as chamadas Redes de Longa Distância e Baixa Potência (*Low Power Wide Area Network, LPWAN*) têm se destacado como alternativas viáveis para viabilizar a conectividade. Tecnologias como LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), Sigfox e NB-IoT (*Narrowband IoT*) são os principais exemplos dessa categoria, pois operam em frequências sub-GHz não-licenciadas e são capazes de cobrir grandes áreas com taxas de dados modestas, o que as torna ideais para sensores e dispositivos distribuídos em larga escala [4].

## 1.2 Problema Investigado e Justificativa

Apesar de seu potencial, as tecnologias IoT possuem certas limitações. Tratando de protocolos de curto alcance, o ZigBee e o Wi-Fi não são adequados para ambientes rurais ou de difícil acesso devido à sua baixa cobertura, que pode variar entre 10 e 300 metros, além de possuírem maior consumo energético, aumentando a complexidade da instalação, especialmente em áreas remotas.

Essas deficiências abrem espaço para o uso de redes LPWAN, como LoRaWAN, NB-IoT e Sigfox, que conseguem transmitir dados a longas distâncias em áreas abertas, com baixo consumo de energia. Ao mesmo tempo, o aumento da densidade de dispositivos IoT traz à tona desafios relacionados à escalabilidade, gerenciamento de espectro e interferências eletromagnéticas [3].

Tratando da rede LoRaWAN, por exemplo, estudos experimentais [5] demonstram que, embora eficiente em áreas abertas, a rede apresenta significativa degradação de sinal e aumento na taxa de perdas em regiões com alto ruído eletromagnético, densidade de dispositivos, qualidade do *gateway*, frequência utilizada e obstruções físicas, como condições topográficas que não permitem visadas diretas entre transmissores e receptores.

Em contextos onde nem mesmo as redes LPWAN são capazes de atender às exigências de conectividade, a comunicação via satélite se apresenta como uma alternativa estratégica. A literatura recente tem apontado para a tendência de integração entre redes terrestres e satelitais (multi-conectividade) como uma forma de aumentar a disponibilidade e confiabilidade em aplicações como, por exemplo, IoT críticas de longas distâncias [6].

Além disso, outras pesquisas recentes vêm explorando a integração de redes LoRa com satélites, criando enlaces híbridos capazes de ampliar o alcance das redes IoT sem a

necessidade de infraestrutura terrestre densa. Tais abordagens, embora ainda limitadas do ponto de vista financeiro, logístico e em estágio inicial de maturação tecnológica, abrem possibilidades para futuras linhas de pesquisa [7].

Portanto, esta pesquisa tem como foco a avaliação de tecnologias de rádio frequência de longo alcance, como possíveis soluções viáveis para ampliar a conectividade em ambientes com desafios de propagação. O objetivo é identificar alternativas que conciliem confiabilidade na transmissão, longo alcance e viabilidade de expansão em larga escala. Assim, será possível observar divergências e concordâncias entre o comportamento teórico e a realidade de campo, oferecendo subsídios para decisões em aplicações IoT em ambientes com diferentes características de propagação, como variações de altitude, interferência eletromagnética, presença ou ausência de visada direta e distintas distâncias em relação ao *gateway*.

### 1.3 Objetivos

Objetivo geral: avaliar tecnologias de comunicação sem fio de longo alcance aplicadas à IoT, por meio do desenvolvimento e validação experimental de um sistema de comunicação em ambientes com desafios de propagação.

Objetivos específicos:

- Realizar revisão bibliográfica sobre redes sem fio e suas aplicações em ambientes com desafios de propagação;
- Avaliar comparativamente os protocolos LPWAN com ênfase em LoRaWAN;
- Desenvolver um protótipo funcional de módulo transmissor baseado na tecnologia LoRaWAN, criando um sistema de comunicação com *gateway* para recepção dos dados;
- Validar o desempenho do sistema em campo por meio de testes em diversos cenários, analisando de forma quantitativa o enlace a partir de métricas de potência (RSSI), qualidade de sinal (SNR) e confiabilidade (PLR);
- Estabelecer, a partir dos resultados práticos, subsídios técnicos para o planejamento de redes IoT robustas, quantificando o impacto de fatores como linha de visada, ganho de antena e altitude em condições de teste reais.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos principais:

- Capítulo 1: Introdução, contextualização e objetivos;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica detalhada sobre redes sem fio, estudos anteriores e caracterização das tecnologias LPWAN;
- Capítulo 3: Justificativa da escolha pelo LoRaWAN e apresentação do sistema de comunicação desenvolvido;
- Capítulo 4: Avaliação experimental e resultados de testes reais com equipamentos implantados em diferentes ambientes;
- Capítulo 5: Conclusões, limitações observadas e propostas de trabalhos futuros.

## 1.5 Artigos Publicados

Durante o período de Iniciação Científica, Graduação e Mestrado, a autora contribuiu com diversas publicações em eventos científicos nacionais. Abaixo estão listados os artigos publicados, organizados de forma cronológica:

1. BARATELLA, Vitória Jacomelli; COSTA, Caio Tácito Borges da; SPADOTI, Danilo Henrique. **Aplicação da tecnologia LoRaWAN como solução para transmissão de dados de sensor de nível e temperatura.** In: Anais do *XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2022)*. Brasil, 2022. DOI: [10.14209/sbrt.2022.1570824888](https://doi.org/10.14209/sbrt.2022.1570824888) [8].
2. BARATELLA, Vitória Jacomelli; COSTA, Caio Tácito Borges da; SPADOTI, Danilo Henrique; ALMEIDA, Anderson Guerra de; SILVA, Benedito C. da. **Ultra low power water level transmission system using LoRaWAN technology.** In: Anais do *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2023)*. Brasil, 2023. DOI: [10.14209/sbrt.2023.1570917497](https://doi.org/10.14209/sbrt.2023.1570917497) [9].
3. BARATELLA, Vitória Jacomelli; ALMEIDA, Anderson Guerra de; COSTA, Caio Tácito Borges da; FARIA, Décio Rennó de Mendonça; SPADOTI, Danilo Henrique. **Assessing the Impact of Jamming Attacks on LoRaWAN Devices: An**

- Experimental Study.** In: Anais da *Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM 2024)*. Natal, RN, 2024. Disponível em: [link](#) [10].
4. ALMEIDA, Anderson Guerra de; BARATELLA, Vitória Jacomelli; COSTA, Caio Tácito Borges da; FARIA, Décio Rennó de Mendonça; SPADOTI, Danilo Henrique. **Low-Cost Configurable Data Acquisition Module Design For Real-Time Monitoring.** In: Anais da *Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM 2024)*. Natal, RN, 2024. Disponível em: [link](#) [11].
  5. COSTA, Caio Tácito Borges da; ALMEIDA, Anderson Guerra de; BARATELLA, Vitória Jacomelli; SPADOTI, Danilo Henrique. **A Cost-Effective LoRa Gateway for Low-Density IoT Applications.** In: Anais do *XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2024)*. Brasil, 2024. DOI: [10.14209/sbrt.2024.1571036837](https://doi.org/10.14209/sbrt.2024.1571036837) [12].
  6. COSTA, Caio Tácito Borges da; BARATELLA, Vitória Jacomelli; SILVA, Benedito Cláudio da; REBOITA, Michelle Simões; SPADOTI, Danilo Henrique. **Monitoramento hidrometeorológico em tempo real na bacia do Alto Rio Verde: uma solução inovadora para prevenção de inundações.** In: Anais do *I Congresso Nacional da Associação Brasileira de Engenharia Hídrica*. Itajubá, MG, 2024. ISBN: 978-65-272-0988-1. Disponível em: [link](#) [13].

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este Capítulo tem como objetivo apresentar a base teórica que fundamenta esta pesquisa, por meio da análise de trabalhos relacionados à conectividade sem fio de curto e longo alcance. Inicialmente, são discutidos estudos prévios que evidenciam a relevância da área, bem como suas lacunas e desafios.

Em seguida, é realizada uma caracterização abrangente das principais tecnologias de redes sem fio. Essa contextualização técnica é essencial para embasar a escolha da tecnologia utilizada no desenvolvimento do sistema proposto, permitindo uma análise criteriosa de limitações e adequação a diferentes cenários de aplicação.

### 2.1 Trabalhos anteriores e relevância do tema

A busca por soluções de comunicação sem fio de longo alcance tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias LPWAN aplicadas à IoT. Reflexo da relevância do tema são as diversas literaturas recentes que apresentam uma série de trabalhos que contribuíram para o entendimento do desempenho dessas tecnologias em diferentes cenários, avaliando viabilidade técnica e também limitações práticas. A seleção dos trabalhos buscou trazer experimentos aplicados à realidade, com foco na variedade dos cenários utilizados para os testes.

Além disso, de forma a contextualizar e complementar as análises das pesquisas experimentais, foram analisados estudos que apresentaram uma revisão crítica sobre as principais tecnologias LPWAN (LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT), como é o caso do trabalho apresentado em Mekki et al. (2018) [14].

Iniciando a análise por estudos que abordaram áreas remotas, Fragkopoulos et al. (2023) [15] apresentaram uma análise experimental do desempenho do LoRaWAN em áreas suburbanas e rurais. Os autores identificaram que, à medida que a densidade de dispositivos aumenta, ocorrem degradações severas no SNR e na taxa de entrega de pa-

cotes devido a colisões. Para minimizar esses efeitos, propuseram uma estratégia de clusterização e ajustes do Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF), que permitiram alcançar até 10 km de cobertura estável com ganhos na confiabilidade da rede.

No contexto industrial, Thinesh et al. (2022) [16] implementaram um sistema real de gerenciamento de ativos em um estaleiro de 206 hectares, utilizando sensores com LoRaWAN. A experiência de campo mostrou que a tecnologia é viável em aplicações industriais distribuídas, mas sofre interferência significativa de estruturas metálicas em ambientes sem visada direta. O trabalho ressalta que o sucesso da operação depende da calibração precisa dos *gateways* e da posição dos sensores.

Ainda no contexto fabril, mas abordando outra tecnologia de longo alcance, Ballerini et al. (2019) [17] exploraram uma comparação prática entre LoRaWAN e NB-IoT. Enquanto o LoRaWAN se destacou pelo baixo consumo energético, o NB-IoT apresentou maior confiabilidade sob condições de ruído e interferência. A principal conclusão foi que não existe uma tecnologia ideal para todos os cenários: a escolha deve levar em conta o perfil da aplicação, o nível de cobertura e os requisitos energéticos.

O estudo de Abdallah et al. (2024) [18], também na indústria, examinou a confiabilidade da tecnologia LoRa, em comparação ao NB-IoT e ao Sigfox, em condições Sem Linha de Visada (*Non-Line-of-Sight*, NLoS), em ambientes móveis e também ruidosos voltados para aplicações de IoT industrial. A pesquisa considerou fatores diversos, como vegetação e infraestrutura, introduzindo mobilidade para simular condições NLoS. O estudo revelou uma confiabilidade geral estimada em 90,23% para os sinais LoRa em cenários desafiadores.

A fim de abordar cenários urbanos, o estudo de Aksoy et al. (2024) [19] investigou a propagação do sinal LoRaWAN em um edifício de 18 andares. Os autores identificaram que a comunicação horizontal (no mesmo andar) é muito mais estável do que a vertical (entre andares), devido à atenuação e às barreiras estruturais. Sugerem-se ajustes automáticos de SF para compensar as perdas em edificações verticais densas.

Em condições móveis, Wang et al. (2021) [20] investigaram o desempenho das tecnologias NB-IoT e Sigfox. Foi utilizado um drone voando a 70 km/h ao longo de uma rodovia de 10 km para avaliar o desempenho em condições móveis de alta velocidade no ar. A pesquisa forneceu contribuições valiosas sobre as capacidades dessas tecnologias em cenários dinâmicos e de longo alcance.

Já o estudo de Alobaidy et al. (2022) [21] avaliou de forma abrangente o desempe-

nho do NB-IoT em ambientes externos, com foco em parâmetros de cobertura, perda de percurso (*path loss*), taxa de entrega de pacotes e limites de latência. Os autores obtiveram uma taxa média de entrega de pacotes de 91,76% para o NB-IoT, demonstrando sua capacidade de lidar com altas taxas de dados com mínima degradação da qualidade do sinal em distâncias prolongadas.

Por fim, o trabalho de Melo (2021) [22] relata o desenvolvimento de um sistema de monitoramento ambiental e energético com base em LoRa + Wi-Fi em uma planta fotovoltaica semiurbana. Os testes demonstraram eficácia em ambientes abertos, com alcance de até 15 km, mas perdas significativas em zonas urbanas densas. O autor recomenda avaliar obstáculos físicos e utilizar *gateways* com visada para mitigar esse efeito.

O resumo dos trabalhos abordados consta na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo de trabalhos relacionados com soluções de comunicação sem fio de longo alcance

Referência	Tecnologia Avaliada	Sistema Funcional	Cenário Testado	Alcance Obtido	Conclusão Principal
Fragkopoulos et al. (2023)	LoRaWAN	Sim	Rural / Suburbano	Até 10 km	Colisões afetam a PLR; clusteração e ajuste de SF melhoraram o desempenho
Thinesh et al. (2022)	LoRaWAN	Sim	Estaleiro industrial (206 ha)	Por RSSI	Interferência industrial significativa; posição do <i>gateway</i> influencia cobertura
Ballerini et al. (2022)	LoRaWAN e NB-IoT	Sim	Industrial	Qualitativo	NB-IoT mais robusto, LoRaWAN mais econômico; uso depende da aplicação
Abdallah et al. (2024)	LoRa	Sim	NLoS industrial / urbano ruidoso	90.23% confiabilidade	Ambientes móveis com obstáculos; LoRa demonstrou bom desempenho em NLoS
Aksoy et al. (2024)	LoRaWAN	Sim (indoor)	Prédio de 18 andares	Vertical comparativo	Comunicação horizontal superior; SF precisa de ajuste dinâmico
Wang et al. (2021)	NB-IoT, Cat-M1, Sigfox, LoRa	Sim	Drone em rodovia (10 km)	10 km (em movimento)	Avaliação comparativa em alta velocidade; NB-IoT se destaca em estabilidade
Abdallah et al. (2024)	LoRa	Sim	NLoS industrial / urbano ruidoso	90.23% confiabilidade	Ambientes móveis com obstáculos; LoRa demonstrou bom desempenho em NLoS
Alobaidy et al. (2022)	NB-IoT	Sim	Externo real (Malásia)	Alta cobertura (não especificada)	91.76% de entrega; destaque em eficiência energética e alcance urbano
Melo (2021)	LoRa + Wi-Fi	Sim	Planta fotovoltaica (semiurbano)	2–15 km	Bom alcance rural; perdas urbanas exigem visada e avaliação topográfica

Em resumo, diante da variedade de cenários avaliados e metodologias aplicadas, os estudos analisados demonstram as tentativas contínuas da academia e da indústria em compreender os limites e possibilidades das tecnologias LPWAN em contextos diversos. As conclusões mostraram que o LoRaWAN oferece a melhor flexibilidade e custo, enquanto o Sigfox é mais estável em termos de cobertura e o NB-IoT lidera em Qualidade de Serviço

(*Quality of Service*, QoS). Dessa forma, foi majoritariamente destacado que nenhuma solução é universal, sendo necessário adequar a escolha ao tipo de aplicação, o que reafirma a necessidade da escolha cautelosa da tecnologia para esta pesquisa.

## 2.2 Tecnologias de redes sem fio

### 2.2.1 Classificação das redes sem fio (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN)

Para compreender como as tecnologias de comunicação são segmentadas, é importante abordar que as redes sem fio podem ser classificadas em quatro categorias principais com base em seu alcance e contexto de aplicação: Redes de Área Pessoal Sem Fio (*Wireless Personal Area Networks*, WPANs), Redes de Área Local Sem Fio (*Wireless Local Area Networks*, WLANs), Redes de Área Metropolitana Sem Fio (*Wireless Metropolitan Area Networks*, WMANs) e Redes de Área Ampla Sem Fio (*Wide Area Networks*, WWANs) [23].

As WPANs são projetadas para comunicação de curto alcance, geralmente dentro de pequenos ambientes, viabilizando a conexão entre dispositivos como smartphones. Para isso, utilizam tecnologias como Bluetooth e ZigBee para estabelecer comunicações entre dispositivos, sem a necessidade de uma infraestrutura central com roteadores ou pontos de acesso [23].

As WLANs operam idealmente na cobertura de áreas de médio porte, como, por exemplo, residências, escritório, campi universitários e pequeno conjunto de edifícios. Para isso, utilizam principalmente a tecnologia Wi-Fi, que permite o acesso à *internet* e o compartilhamento de dados entre múltiplos dispositivos. Recursos como Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas (*Multiple-Input Multiple-Output*, MIMO) e Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, OFDMA) tornam as WLANs eficientes mesmo em cenários com alta densidade de usuários e mobilidade elevada [24, 25].

As WMANs cobrem áreas urbanas extensas, como cidades inteiras, conectando múltiplas redes WLAN distribuídas. São utilizadas para fornecer conectividade de alta velocidade em regiões metropolitanas, tanto para usuários fixos quanto móveis. Uma das tecnologias comumente associadas às WMANs é o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), que permite acesso à *internet* de banda larga sem fio em longas

distâncias, especialmente onde a infraestrutura cabeada é limitada [26].

As WWANs oferecem o maior alcance, cobrindo grandes áreas geográficas ou até mesmo alcance global. Elas utilizam, tipicamente, tecnologias celulares como 3G, 4G LTE e os padrões 5G. As WWANs são adequadas para fornecer conectividade à *internet* em regiões com infraestrutura limitada, operando a partir de torres celulares em vez de pontos de acesso [27].

Além disso, o avanço do IoT impulsionou o surgimento de novas soluções dentro dessa categoria, como as LPWANs, voltadas para dispositivos de baixo consumo energético e transmissão esporádica de dados em aplicações como cidades inteligentes e agricultura conectada. Essa subcategoria será abordada em mais detalhes na próxima seção.

Em resumo, a classificação das redes sem fio se baseia conforme seu uso, sendo necessário compreender suas características para a correta implantação da tecnologia. Com objetivo de ilustrar as distinções, a Figura 1 apresenta uma relação entre alcance das tecnologias citadas em função da taxa de dados e consumo de energia, parâmetros importantes para a determinação de requisitos de projetos da área. A análise da Figura 1 demonstra que as tecnologias da categoria WWAN são as que possuem maior alcance, porém variam nos quesitos custo e taxa de dados. Enquanto as redes celulares operam com taxas de dados que podem chegar a 100 Mbps ou mais, as tecnologias LPWAN, como o LoRaWAN por exemplo, operam em uma faixa de 0,3 a 50 kbps, possuindo custo menor do que as redes celulares, sendo cada uma das tecnologias apropriada para uma aplicação.

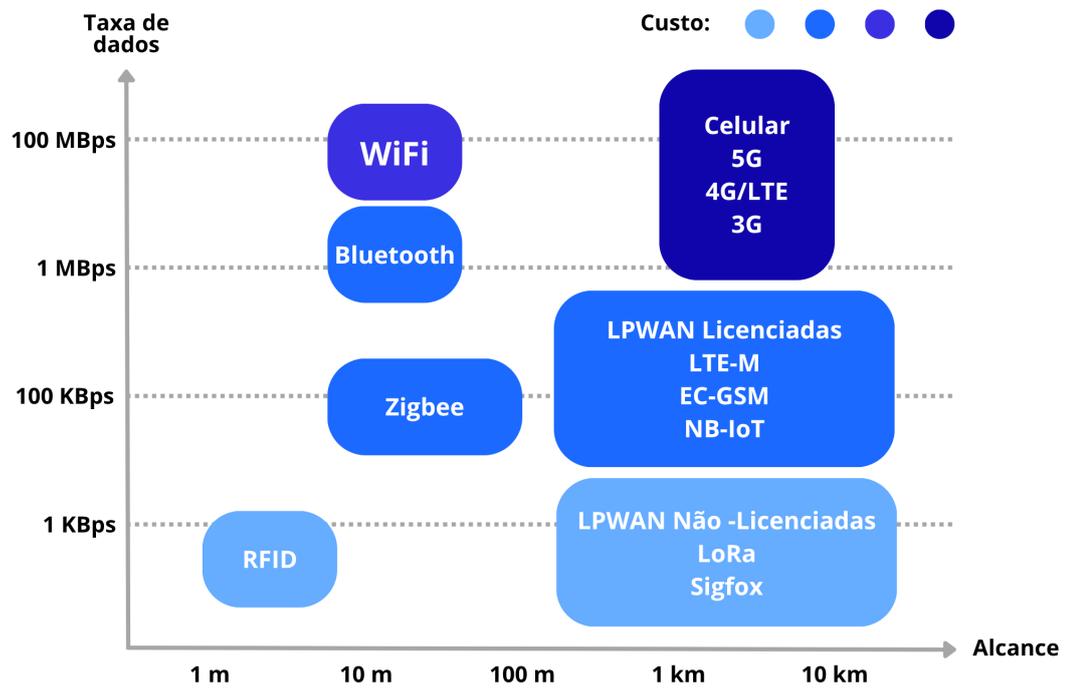


Figura 1: Alcance em função da taxa de dados [28]

Por fim, para síntese das análises realizadas, abaixo a Tabela 2 traz de forma objetiva a comparação entre os tipos de rede.

Tabela 2: Comparação entre os tipos de redes sem fio

Tipo de Rede	Alcance	Ambiente Ideal	Tecnologias Comuns	Aplicações Típicas
WPAN (Wireless Personal Area Network)	Centímetros a poucos metros	Uso pessoal e em pequenos espaços (residências, wearables)	Bluetooth, Zig-Bee	Dispositivos móveis, sensores pessoais, IoT doméstico
WLAN (Wireless Local Area Network)	Até centenas de metros	Interno (residências, escritórios, campi)	Wi-Fi (IEEE 802.11), OFDMA, MIMO	Acesso à <i>internet</i> , redes corporativas e educacionais
WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)	Vários quilômetros	Áreas urbanas e cidades inteiras	WiMAX (IEEE 802.16)	Banda larga urbana, interconexão de WLANs
WWAN (Wireless Wide Area Network)	Centenas de quilômetros a escala global	Regiões amplas com infraestrutura limitada	3G, 4G LTE, 5G	Celulares, monitoramento remoto, IoT industrial e rural

### 2.2.2 Características das redes LPWAN

As LPWANs representam uma subcategoria específica dentro das Redes de Área Ampla Sem Fio (WWANs), discutidas na seção anterior. Enquanto as WWANs abrangem soluções de comunicação em escala regional ou global com foco em mobilidade e largura de banda, as LPWANs se destacam por oferecer cobertura de longo alcance com consumo energético extremamente reduzido, atendendo especialmente às necessidades da *Internet das Coisas* (IoT) [29].

Em geral, as redes LPWAN possuem a capacidade de transmitir dados a distâncias de vários quilômetros, característica que as torna particularmente adequadas para regiões rurais e semiurbanas onde a infraestrutura de rede tradicional, como fibra óptica ou redes cabeadas, muitas vezes é inexistente ou economicamente inviável [30].

Outro aspecto fundamental das LPWANs é o baixo consumo de energia. Essas redes são voltadas para dispositivos que transmitem dados com pouca frequência, como sensores ambientais, rastreadores e medidores inteligentes. Por essa razão, elas possibilitam que

os dispositivos operem por vários anos com uma única bateria, eliminando a necessidade de fontes de energia contínuas ou recargas frequentes [31]. Essa característica é essencial para viabilizar aplicações de IoT em locais remotos ou de difícil acesso.

Nesse contexto, tecnologias como LoRa e LoRaWAN são exemplos proeminentes nesse grupo, sendo adotadas em aplicações como cidades inteligentes, agricultura de precisão e monitoramento ambiental de larga escala [30].

Por fim, as LPWANs se destacam por sua escalabilidade. Embora apresentem taxas de transmissão de dados mais baixas do que outras tecnologias sem fio, como Wi-Fi ou redes celulares, elas conseguem suportar um número muito maior de dispositivos conectados simultaneamente. Isso se deve à combinação entre seu amplo alcance e baixo consumo energético, o que reduz significativamente a necessidade de infraestrutura de rede densa para cobertura e torna possível a implementação em larga escala de sistemas de IoT [31].

### 2.2.3 Comparação entre LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M

LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M são tecnologias LPWAN voltadas para aplicações de IoT. Todas oferecem conectividade de longo alcance com baixo consumo de energia e são capazes de suportar um grande número de dispositivos, divergindo quanto ao desempenho e adequação a cada tipo de aplicação [32].

Com relação à eficiência energética, estudos demonstram que o LoRaWAN e o Sigfox são mais eficientes em comparação com NB-IoT e LTE-M. Por exemplo, em uma simulação com o envio de um único pacote por dia, o tempo de vida útil da bateria foi estimado em cerca de 1608,9 dias para LoRaWAN e 1527,6 dias para Sigfox. Já, o NB-IoT alcançou apenas 344,9 dias, o que evidencia seu maior consumo energético [33]. Estes resultados são consistentes com outros estudos que também apontam o LoRaWAN como a alternativa mais eficiente energeticamente entre as LPWANs avaliadas [34].

Entretanto, quando a prioridade é latência, o NB-IoT torna-se uma opção por oferecer menor latência e maior qualidade de serviço, sendo indicado para aplicações que exigem transmissão de dados em tempo real [32]. Já, quando a prioridade é suportar taxas de dados mais altas e mobilidade, o LTE-M é mais indicado. Por fim, o LoRaWAN e o Sigfox apresentam vantagens em escalabilidade, flexibilidade na adaptação da taxa de dados e menor custo de implantação [32, 35]. A Tabela 3 resume as principais características para comparação entre as tecnologias LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M, ressaltando que o desempenho de cada uma pode variar conforme a configuração da rede.

Tabela 3: Comparação entre tecnologias LPWAN

Característica	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Faixa de Frequência	Sub-GHz (868/915 MHz)	Sub-GHz (868/902 MHz)	Licenciada (LTE)	Licenciada (LTE)
Modulação	CSS ( <i>Chirp Spread Spectrum</i> )	DBPSK (uplink), GFSK (downlink)	OFDMA/SC-FDMA	SC-FDMA
Taxa de Dados	0.3–50 kbps	até 100 bps	até 250 kbps	até 1 Mbps
Consumo de Energia	Ordem de $\mu\text{W}$	Ordem de $\mu\text{W}$	Ordem de mW	Ordem de W
Cobertura	2–15 km urbano, até 40 km rural	3–10 km urbano	1–10 km	1–11 km
Mobilidade	Baixa (estacionário)	Não suporta	Suporta (limitada)	Suporta mobilidade
Bidirecionalidade	Sim (Classe A, B, C)	Limitada	Sim	Sim
Capacidade de Conexões de Dispositivos	Milhares por <i>gateway</i>	Dezenas de milhares por estação base	Dezenas de milhares por estação base	Dezenas de milhares por estação base
Latência	Até horas	Até horas	Tipicamente menor que 10 segundos	Tipicamente menor que 10 segundos
Qualidade de Serviço (QoS)	Limitado	Muito limitado	Garantido	Garantido
Segurança	AES-128 + autenticação de rede	Criptografia simples	Segurança LTE integrada	Segurança LTE integrada

## 2.3 LoRa e LoRaWAN: fundamentos, arquitetura e parâmetros

LoRa é a tecnologia de modulação utilizada na camada física das redes LPWAN e emprega a técnica de espalhamento espectral denominada Espectro de Espalhamento *Chirp* (*Chirp Spread Spectrum*, CSS) para permitir uma comunicação robusta de longo alcance com baixo consumo de energia. A CSS emprega sinais de frequência em varredura linear, conhecidos como sinais ascendentes (*upchirps*) e descendentes (*downchirps*). Sendo assim, a informação digital é codificada na temporização e na sequência desses símbolos, os *chirps*, garantindo a transmissão dos dados mesmo em condições adversas de propagação [36, 37].

### 2.3.1 Parâmetros Técnicos de Transmissão Lora

O funcionamento do LoRa é configurável por meio de parâmetros técnicos de transmissão: Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF), Largura de Banda (*Bandwidth*, BW), Taxa de Codificação (*Coding Rate*, CR) e Potência de Transmissão (*TX Power*).

#### 2.3.1.1 Fator de Espalhamento (*Spreading Factor*, SF)

O SF é um dos parâmetros mais críticos da modulação LoRa, pois define o tempo de duração de cada *chirp* (símbolo) e, conseqüentemente, a taxa de dados [38]. Ele varia de SF7 a SF12 e controla não só o tempo de transmissão, como a distância, sendo que valores mais altos resultam em maior alcance, porém transmitem menores taxa de dados [39].

Cada símbolo LoRa é composto por  $2^{SF}$  *chirps*, e a modulação é realizada através do deslocamento cíclico de uma forma de onda *chirp* base. Essencialmente, um SF é mais lento e redundante, enquanto um SF menor é mais rápido e conciso. Na prática, a escolha do SF determina um *trade-off* fundamental:

- SFs mais altos (por exemplo, SF11, SF12): Aumentam a sensibilidade do receptor e, conseqüentemente, o alcance do sinal, tornando a comunicação mais robusta a ruído. A contrapartida é uma taxa de dados menor e um maior tempo de transmissão no ar (*Time on Air*), ou seja, o *chirp* é mais longo, o que aumenta o consumo de energia e a probabilidade de colisões na rede [38].

- SFs mais baixos (por exemplo, SF7, SF8): Permitem uma taxa de dados maior e um tempo de transmissão mais curto, visto que o chirp é mais curto, resultando em menor consumo de energia por bit transmitido. No entanto, o alcance é menor e a comunicação é mais suscetível a interferências [38].

Matematicamente, o SF é definido como a razão logarítmica, na base 2, entre a taxa de *chirps* ( $R_c$ ) e a taxa de símbolos ( $R_s$ ), conforme a Equação 2.1 [40]:

$$SF = \log_2 \left( \frac{R_c}{R_s} \right) \quad (2.1)$$

### 2.3.1.2 Largura de Banda (*Bandwidth*, BW)

A BW define a faixa de frequência ocupada pelo sinal *chirp* durante a transmissão e é normalmente configurada em 125, 250 ou 500 kHz. Ela está diretamente ligada à taxa de *chirps* ( $R_c$ ) do sinal.

Como a taxa de símbolos ( $R_s$ ) é dada por  $R_s = \frac{BW}{2SF}$ , uma BW de 125 kHz resulta em uma taxa de 125.000 *chirps* por segundo. Isso significa que o sinal varre toda a faixa de 125 kHz durante o período de um símbolo [38].

A escolha da largura de banda impacta diretamente o *trade-off* entre a taxa de dados e a sensibilidade do receptor:

- BW maior (por exemplo, 500 kHz): Permite uma taxa de dados mais alta, pois mais símbolos podem ser transmitidos no mesmo intervalo de tempo. A desvantagem é uma menor sensibilidade do receptor, o que pode reduzir o alcance, pois o ruído de fundo integrado em uma banda mais larga é maior [41].
- BW menor (por exemplo, 125 kHz): Resulta em uma taxa de dados mais baixa, mas melhora a sensibilidade do receptor (melhor SNR), tornando a comunicação mais robusta a longas distâncias e mais imune a ruído [41].

### 2.3.1.3 Potência de Transmissão (*TX Power*)

A Potência de Transmissão (*TX Power*) é a potência que é emitida após o conector da antena, estando diretamente relacionada ao consumo real de energia de um dispositivo final (*end device*, ED). A potência de transmissão é geralmente expresso em dBm e pode ser ajustado em passos de 1 dBm, variando de 4 a 20 dBm [38] [42].

No Brasil, a maior potência de transmissão permitida para dispositivos LoRa é de 30 dBm (1 Watt), conforme regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Essa limitação é crucial para garantir que as transmissões de rádio não interfiram em outros serviços de comunicação e para assegurar o uso eficiente do espectro de rádio [43].

#### 2.3.1.4 Taxa de Codificação (*Coding Rate*, CR)

O CR ajusta a quantidade de bits de redundância adicionados à mensagem, influenciando a confiabilidade da transmissão e fornecendo robustez contra a perda de pacotes devido a ruído, sombreamento, interferência, entre outros fatores. Dessa forma, em cada pacote de dados transmitido podem ser inseridos bits adicionais ( $r$ ), o que aumenta o CR, a proteção, mas também torna a transmissão mais longa. O CR pode ser calculado conforme a Equação 2.2 [40]:

$$CR = \left( \frac{4}{4 + r} \right) \quad (2.2)$$

### 2.3.2 Parâmetros Operacionais

Além dos parâmetros de transmissão, os parâmetros operacionais do LoRa possuem um papel crucial na definição do desempenho de sua rede e incluem Taxa de Dados (*Data Rate*, DR), Taxa de *Chirp* (*Chirp Rate*,  $\beta$ ), Estrutura de Pacote (Packet Structure), Tempo no Ar (Time on Air) e Ciclo de Trabalho (Duty Cycle).

#### 2.3.2.1 Taxa de Dados (*Data Rate*, DR)

A taxa de dados no LoRa refere-se à velocidade na qual os dados são transmitidos de um dispositivo para outro e é influenciada pelo fator de espalhamento (SF) e pela largura de banda (BW) [44]. Tipicamente, as taxas de dados do LoRa variam entre 0,3 kbps e 50kbps e abaixo está a Equação 2.3 típica para calculá-la [45]:

$$\text{Taxa de Dados (bps)} = \frac{\text{SF} \times \text{BW}}{2^{\text{SF}}} \times CR \quad (2.3)$$

### 2.3.2.2 Taxa de *Chirp* (*Chirp Rate*, $\beta$ )

A taxa de *chirp* ( $\beta$ ) está relacionada com a modulação por CSS e indica a taxa na qual a frequência do sinal se altera durante o período de um símbolo ( $T_s$ ). Isso contribui para a resistência à interferência, à capacidade de cobertura extensa [37] e pode ser definida pela Equação 2.4 [45], na qual ( $R_s$ ) representa a taxa de símbolos e  $L = 2^{\text{SF}}$ .

$$\beta = \text{BW} \times R_s = \frac{\text{BW}^2}{L} \quad (2.4)$$

A partir da equação, é possível compreender que a Taxa de *Chirp* é uma função direta da Largura de Banda (BW) e do Fator de Espalhamento (SF). Para uma mesma BW, SFs diferentes produzirão Taxas de *Chirp* distintas. Essa diferenciação na taxa de varredura da frequência é a base para a propriedade de pseudo-ortogonalidade entre os diferentes SFs [46].

É devido a essa propriedade que um *gateway* LoRaWAN consegue demodular múltiplos pacotes simultaneamente no mesmo canal de frequência, desde que cada pacote seja transmitido com um SF diferente. Esta característica é um dos pilares que permite a escalabilidade da rede LoRaWAN, possibilitando transmissões simultâneas em um canal compartilhado [46].

### 2.3.2.3 Tempo no Ar (*Time on Air*, ToA)

O tempo no ar representa o tempo total que um pacote ocupa o canal de comunicação. Isso é crucial em redes de baixa potência para otimizar a bateria e reduzir a interferência. O tempo no ar pode ser calculado pela Equação 2.5 [45]:

$$\text{ToA} = \left( \frac{\text{Número de Chirps}}{\text{Taxa de Chirp}} \right) + \text{Overhead} \quad (2.5)$$

Onde o *overhead* é o tempo adicional necessário para o preâmbulo, cabeçalho, etc [44].

### 2.3.2.4 Ciclo de Trabalho (*Duty Cycle*)

O ciclo de trabalho é a fração de tempo durante a qual um dado está ativo em um período de tempo. No LoRaWAN, o ciclo de trabalho legal limita o tempo que um transmissor pode permanecer ativo para minimizar interferências, típico em bandas não licenciadas. O ciclo de trabalho é expresso como uma porcentagem ou proporção

Equação 2.6 [47]:

$$\text{Ciclo de Trabalho} = \left( \frac{\text{Tempo de transmissão}}{\text{Período total}} \right) \times 100\% \quad (2.6)$$

## 2.3.3 Mecanismos de Configuração

### 2.3.3.1 Estrutura de Pacote (*Packet Structure*)

A estrutura de um pacote LoRa inclui cabeçalho, carga útil (*payload*) e CRC (*Cyclic Redundancy Check*) [48]. O cabeçalho pode ser explícito, onde inclui informações sobre a carga útil e a codificação de correção de erros, ou implícito, onde essas informações são omissas para reduzir o tamanho do pacote e o tempo de transmissão [49]. A estrutura de um pacote na camada física (PHY) é composta por quatro seções principais, como ilustra a Figura 2.

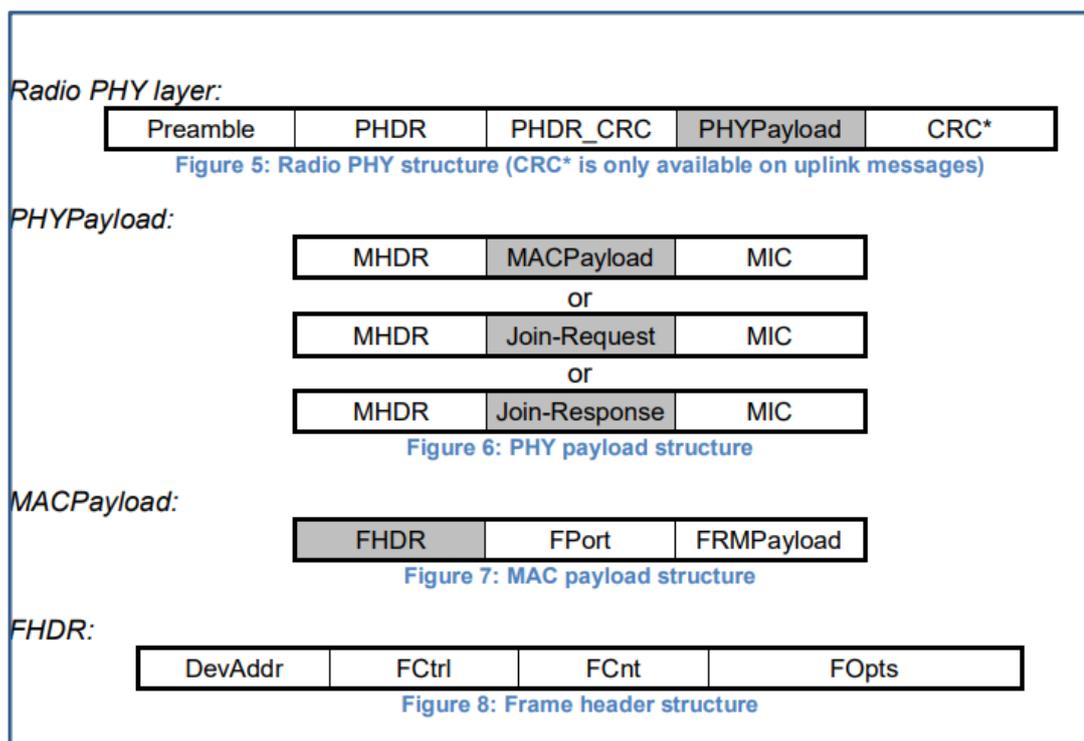


Figura 2: Formato da mensagem LoRa [48]

A partir da análise da Figura 2, é possível identificar todos os itens que compõem os pacotes, sendo que cada um deles possui uma função [48]:

- **Cabeçalho Físico (*PHY Header*, PHDR):** Cabeçalho opcional que, quando

presente, contém informações sobre o *payload*, como seu tamanho, a Taxa de Codificação (CR) e se há um CRC. Para máxima robustez, o próprio cabeçalho é sempre protegido por um CRC próprio PHDR\_CRC.

- **Preâmbulo (*Preamble*):** É uma sequência de *chirps* que inicia a transmissão. Sua função é sincronizar o receptor com o sinal de rádio que está chegando, permitindo que ele se prepare para decodificar o restante do pacote.
- **Carga Útil Física (*PHYPayload*):** Esta é a seção que contém os dados da camada LoRaWAN, que por sua vez é subdividida em três partes fundamentais:
  - **MHDR (Cabeçalho MAC):** Um byte que define o tipo da mensagem (ex: *uplink* de dados, pedido de *join*) e a versão do protocolo LoRaWAN.
  - **MACPayload:** Contém os dados da aplicação e os cabeçalhos da camada de rede. É composto por:
    - \* **FHDR (Cabeçalho do Quadro):** Contém informações essenciais para a rede, como o endereço do dispositivo (DevAddr), o contador de quadros para segurança (FCnt), os bits de controle (FCtrl) e os comandos MAC opcionais (FOpts).
    - \* **FPort (Porta do Quadro):** Um campo que indica qual é a aplicação final para a qual a mensagem se destina (ex: FPort 10 para dados de sensor de nível, FPort 20 para dados de GPS).
    - \* **FRMPayload (Carga Útil da Aplicação):** Dados úteis do sensor, já criptografados.
  - **MIC (Código de Integridade de Mensagem):** Uma assinatura criptográfica de 4 bytes que garante a autenticidade e a integridade da mensagem, garantindo que ela não foi alterada e que veio de um dispositivo válido.
- **Verificação de Redundância Cíclica (CRC):** Ao final do pacote físico, pode ser incluído um CRC opcional de 16 bits para uma verificação de erros adicional sobre o *PHYPayload* [48].

### 2.3.3.2 Taxa de Dados Adaptativa (*Adaptive Data Rate*, ADR)

Os parâmetros acima descritos são otimizados dinamicamente por mecanismos de Taxa de Dados Adaptativa (*Adaptive Data Rate*, ADR) [50], que permite a configuração

automática dos parâmetros de transmissão de *uplink* dos dispositivos finais (EDs) por meio de comandos na camada MAC [46].

A ADR é um mecanismo que ajusta dinamicamente o SF, a potência de transmissão e outros parâmetros conforme as condições do canal. Esse mecanismo de adaptação atua tanto no nível do dispositivo final (ED) quanto no servidor de rede (*network server*, NS) e é essencial para preservar a eficiência energética e a capacidade da rede, especialmente em ambientes densamente povoados com dispositivos conectados [51, 37].

Contudo, métodos tradicionais de ADR podem ser lentos para reagir a mudanças rápidas no canal, e novas abordagens, como algoritmos baseados em aprendizado de máquina, têm sido exploradas para melhorar essa agilidade [50].

### 2.3.4 Fatores de Propagação e o Canal de Rádio

Além dos parâmetros configuráveis do protocolo, o desempenho de um enlace LoRaWAN é profundamente influenciado pelas características do canal de rádio, que é o meio físico por onde o sinal se propaga. O fator mais determinante neste contexto é a existência ou não de uma linha de visada direta entre o transmissor e o receptor, fator que influencia o desempenho das transmissões LoRa [52].

#### 2.3.4.1 Visada Direta (*Line of Sight*, LoS)

A visada direta, ou *Line of Sight* (LoS), desempenha um papel crucial na transmissão de sinal LoRa, pois afeta diretamente a eficiência de transmissão [52]. Além disso, a presença de LoS também facilita a utilização do LoRa para aplicações de localização interna, nas quais a precisão pode atingir uma taxa de erro média mínima de 0,12 metros em condições de LoS, contrastando com um erro de 13,94 metros em cenários sem visada direta, ou *Non-Line of Sight* (NLoS) [53].

Esses ambientes em condições de NLoS, como por exemplo, os industriais, urbanos densos ou com relevos acentuados, possuem a ausência de visada, o que prejudica o desempenho da transmissão LoRa. Portanto, quanto mais obstruções existirem no caminho do sinal, maior será a interferência e a degradação em sua qualidade [53].

### 2.3.5 Métricas de Desempenho

Além dos parâmetros de transmissão, operacionais e os mecanismos de configuração, a avaliação do desempenho de um enlace LoRaWAN depende de duas métricas fundamentais recebidas pelo *gateway*: o SNR e o RSSI.

#### 2.3.5.1 Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR)

O SNR é uma medida que compara o nível do sinal desejado com o nível do ruído de fundo (*noise floor*) e é expressa em decibéis (dB), sendo importante por afetar a robustez da transmissão de dados.

Matematicamente, ele representa a razão entre a potência do sinal ( $P_{sinal}$ ) e a potência do ruído ( $P_{ruído}$ ), conforme a Equação 2.7 [47].

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (2.7)$$

Um valor de SNR positivo indica que a potência do sinal recebido é maior que a do ruído, enquanto um valor negativo indica que o sinal está mais fraco que o ruído de fundo [54]. Entretanto, vale salientar que em aplicações reais, valores negativos superiores a -20dBm são comuns em sinais que são decodificáveis e que ainda podem resultar em uma transmissão bem-sucedida, como validado em diversos estudos [54].

Esta capacidade de decodificar pacotes mesmo com um SNR negativo (por exemplo, até -20 dB para SF12) é uma das grandes vantagens da modulação LoRa. Conhecida como ganho de processamento, permite que o receptor LoRa faça uma varredura do sinal onde outras modulações falhariam. Por essa razão, o SNR é uma das métrica mais importante para avaliar a qualidade e a robustez de um enlace de comunicação [54].

Além disso, como demonstrado na literatura, o valor do SNR pode variar significativamente com base nas condições ambientais e nos cenários de propagação, como ambientes urbanos, florestais e suburbanos, afetando diretamente a qualidade e a confiabilidade do enlace [44, 55].

#### 2.3.5.2 Indicação da Força do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication*, RSSI)

O RSSI é outra métrica que mede o nível de potência do sinal recebido. Ele também é expresso em decibéis e fornece uma indicação direta de quão bem o sinal pode ser detectado

pelo receptor. Em redes LoRaWAN, o RSSI é utilizado para diversas aplicações, incluindo localização e rastreamento, pois ajuda a determinar a proximidade de um dispositivo em relação a um *gateway* ou outro nó transmissor [56]. O valor do RSSI é influenciado por vários fatores, como a potência de transmissão do remetente, a distância entre o receptor e o transmissor, e a presença de obstruções ou interferência no ambiente [57].

Níveis elevados de RSSI e SNR estão associados a uma menor perda de pacotes em redes LoRaWAN, visto que um sinal forte e claro tem maior probabilidade de ser decodificado com sucesso pelo receptor, reduzindo as chances de perda de pacotes. Inversamente, valores baixos de RSSI e SNR frequentemente se correlacionam com uma maior perda de pacotes, uma vez que sinais fracos e ruidosos são mais propensos a erros durante a transmissão e recepção [58].

O valor do RSSI é dependente das condições do ambiente e da distância. Geralmente, um RSSI aceitável para comunicação satisfatória varia entre -120 dBm e -80 dBm. No entanto, valores entre -130 dBm e -115 dBm ainda podem permitir a transmissão de pacotes, especialmente quando o SNR é favorável [59].

Sendo assim, em aplicações práticas, a combinação de SNR e RSSI fornece uma visão mais abrangente do desempenho do enlace do que qualquer uma das métricas isoladamente. Por exemplo, em redes de sensores subterrâneas, a combinação dessas métricas pode ser um indicador melhor da taxa de entrega de pacotes (PLR) do que confiar nelas individualmente [58]. Isso ocorre porque o SNR fornece informações sobre a qualidade do sinal em relação ao ruído, enquanto o RSSI indica o nível de potência do próprio sinal.

### 2.3.5.3 Taxa de Perda de Pacotes (*Packet Loss Rate*, PLR)

A Taxa de Perda de Pacotes (*Packet Loss Rate*, PLR) é uma métrica de desempenho crítica em redes LoRaWAN, pois quantifica a confiabilidade do enlace de comunicação. A perda de pacotes ocorre principalmente devido a colisões, que acontecem quando múltiplos dispositivos transmitem simultaneamente, e à interferência de outras fontes de radiofrequência. Essas falhas na transmissão não apenas resultam na perda de dados, mas também desperdiçam a energia limitada dos dispositivos, exigindo o desenvolvimento de novas técnicas para utilizar os recursos de forma eficiente [60].

O valor percentual aceitável de perda de pacotes depende da aplicação e dos requisitos específicos de uso. Taxas mais baixas geralmente são priorizadas em aplicações que demandam maior confiabilidade. Apesar de não existir um percentual de perda de pacotes

universalmente aceitável, uma alta taxa de entrega de pacotes (PLR), que é o inverso da PLR, é abordado na literatura, sendo que valores acima de 90% são frequentemente citados como meta para garantir uma comunicação confiável [61]. O ajuste fino de parâmetros, a otimização dos limiares de SNR e a adoção de protocolos avançados de decodificação de colisão, contribuem para minimizar a perda de pacotes e aprimorar o desempenho geral da rede [49].

Uma síntese dos principais parâmetros e métricas é apresentada na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Classificação dos Parâmetros, Mecanismos e Métricas do LoRaWAN.

Item	Descrição Resumida
<b>Parâmetros Técnicos de Transmissão (Configuráveis)</b>	
Spreading Factor (SF)	Controla o balanço entre alcance e taxa de dados.
Bandwidth (BW)	Define a largura do canal de frequência da transmissão.
Coding Rate (CR)	Define o nível de correção de erros para robustez do pacote.
Potência de Transmissão	Controla a potência do sinal de rádio que é efetivamente transmitido.
<b>Parâmetros Operacionais (Resultantes)</b>	
Taxa de Dados (DR)	Velocidade efetiva da transmissão de dados (em bps).
Time on Air (ToA)	Duração total que um pacote ocupa o canal de rádio.
Taxa de <i>Chirp</i>	Velocidade da variação de frequência da modulação CSS.
Duty Cycle	Porcentagem de tempo que um dispositivo tem permissão para transmitir.
<b>Mecanismos e Estruturas de Rede</b>	
Adaptive Data Rate (ADR)	Mecanismo que otimiza os parâmetros de transmissão automaticamente.
Estrutura do Pacote	Define o formato e as seções de um pacote LoRa (preâmbulo, cabeçalho, etc.).
<b>Condições do Canal de Propagação (Ambientais)</b>	
Linha de Visada (LoS)	Ocorre quando há um caminho livre e desobstruído entre o transmissor e o receptor.

**Tabela 4: Continuação**

Item	Descrição Resumida
Sem Linha de Visada (NLoS)	Ocorre quando há obstáculos (prédios, relevo) bloqueando o caminho direto do sinal.
<b>Métricas de Desempenho (Medidas)</b>	
RSSI	Mede a potência do sinal recebido pelo <i>gateway</i> (força do sinal).
SNR	Mede a qualidade do sinal em relação ao nível de ruído.
PLR	Mede a porcentagem de pacotes recebidos com sucesso (confiabilidade).

### 2.3.6 Faixa de frequência

No que se refere à faixa de frequência, o LoRa opera em bandas de frequência não licenciadas, ou seja, bandas que podem ser utilizadas sem autorizações específicas, permitindo implantações de redes IoT de formas mais acessíveis e com uma maior flexibilidade regulatória [62]. No entanto, deve-se respeitar as normas técnicas, como limites de potência e de tempo de transmissão, a fim de minimizar interferências. No Brasil por exemplo, o LoRa opera na faixa de frequência de 915-928MHz, que está inserida dentro da banda sub-GHz [37, 62].

### 2.3.7 Arquitetura do Protocolo LoRaWAN

O LoRaWAN, por sua vez, é uma especificação de protocolo que atua na camada de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control*, MAC) e opera sobre a tecnologia física LoRa, sendo responsável pela gestão da comunicação entre os dispositivos finais e os servidores de rede. Dessa forma, enquanto o LoRa define o funcionamento da camada física, ou seja, a forma como os dados são transmitidos utilizando modulação CSS, o LoRaWAN gerencia a troca de mensagens entre dispositivos coletores de dados (sensores e atuadores), *gateways* receptores de dados e servidor, evitando colisões de pacotes e organizando o tráfego. Sua arquitetura segue uma topologia em estrela, em que cada dispositivo final se comunica diretamente com um *gateway*, que por sua vez encaminha os pacotes de dados para um servidor central de rede por meio de conexões IP (*Internet*

*Protocol*) tradicionais (como Ethernet ou celular) [63, 64].

A arquitetura de rede encontra-se na imagem da Figura 3

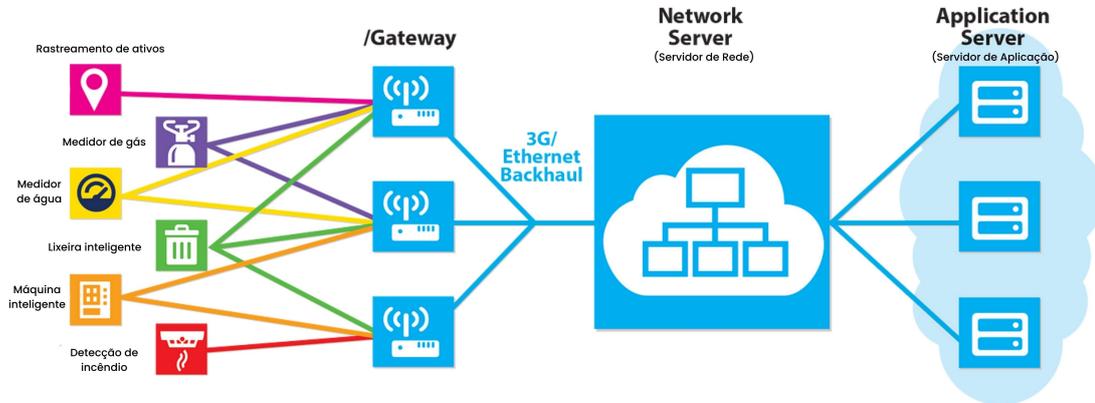


Figura 3: Topologia da rede LoRaWAN, desde os dispositivos finais até a nuvem [65]

Para gerenciar essa comunicação, o protocolo estabelece dois mecanismos principais de ativação de dispositivos: Ativação *Over-The-Air* (OTAA) e Ativação por Personalização (ABP).

A Ativação OTAA é o método mais seguro, pois o dispositivo final realiza um procedimento de *join* com a rede. Esse procedimento consiste em uma troca de mensagens, na qual o dispositivo envia uma requisição de acesso (*Join-Request*) e, após a validação de suas credenciais, o servidor de rede responde com uma aceitação (*Join-Accept*). É a partir dessa comunicação bem-sucedida que as chaves de sessão de rede e de aplicação (NwkSKey e AppSKey) são geradas dinamicamente para cada nova sessão. Isso garante que as chaves de um dispositivo não sejam fixas, aumentando a segurança [48].

Já na Ativação por Personalização (ABP), as chaves de sessão e o endereço do dispositivo (DevAddr) são diretamente pré-programados, não necessitando de um procedimento de *join*, o que pode acelerar a primeira comunicação, mas é considerado menos seguro, pois as chaves são estáticas [48].

Os principais identificadores e chaves de segurança utilizados no protocolo LoRaWAN estão detalhados na Tabela 5.

Tabela 5: Principais Identificadores e Chaves de Segurança do LoRaWAN

<b>Termo / Sigla</b>	<b>Descrição Resumida</b>
<b>DevEUI</b>	<i>End-Device Identifier</i> . Identificador global e único de 64 bits do dispositivo, semelhante ao endereço MAC de uma placa de rede. É gravado no hardware pelo fabricante.
<b>AppEUI / JoinEUI</b>	<i>Application Identifier</i> . Identificador global de 64 bits que aponta para qual servidor de aplicação os dados do dispositivo devem ser encaminhados.
<b>AppKey</b>	<i>Application Key</i> . Chave raiz de 128 bits, secreta e única para cada dispositivo. É a "chave mestra" usada no processo OTAA para gerar as chaves de sessão de forma segura.
<b>DevAddr</b>	<i>Device Address</i> . Endereço de 32 bits do dispositivo dentro de uma rede LoRaWAN específica. É atribuído ao dispositivo após a ativação (dinamicamente no OTAA ou estaticamente no ABP).
<b>NwksKey</b>	<i>Network Session Key</i> . Chave de sessão de 128 bits usada para garantir a integridade das mensagens (cálculo do MIC) e para criptografar comandos da camada MAC.
<b>AppSKey</b>	<i>Application Session Key</i> . Chave de sessão de 128 bits usada para criptografar e descriptografar o <i>payload</i> dos dados da aplicação, garantindo a confidencialidade ponta a ponta entre o dispositivo e o servidor de aplicação.

### 2.3.8 Classes de Dispositivos LoRaWAN

O LoRaWAN define três classes de dispositivos finais, sendo eles Classe A, B e C, cada uma atendendo a diferentes requisitos de aplicação com variados níveis de consumo de energia e latência.

#### 2.3.8.1 Classe A

A Classe A é a classe de menor consumo de energia no protocolo LoRaWAN. Sua operação é baseada no princípio de que a comunicação é sempre iniciada pelo dispositivo

final (ED), que permanece em modo de repouso (*sleep mode*) a maior parte do tempo e pode transmitir uma mensagem de *uplink* a qualquer momento. Imediatamente após o fim da transmissão, o ED abre duas curtas e sucessivas janelas de recepção, denominadas RX1 e RX2 para aguardar por uma possível mensagem de *downlink* do servidor, como uma mensagem de confirmação [38].

Apesar de garantir eficiência energética, a contrapartida consiste em uma alta latência, se comparada às Classes B e C, no sentido do servidor para o dispositivo, visto que o servidor precisa esperar por um *uplink* para poder responder [66]. Após as duas janelas, o dispositivo retorna ao modo de repouso para preservar a bateria, independentemente de ter recebido uma resposta.

### 2.3.8.2 Classe B

A Classe B oferece mais oportunidades para a comunicação de *downlink*. Os dispositivos desta classe se sincronizam com a rede por meio de um *beacon*, que é um sinal periódico transmitido pelo *gateway* (tipicamente a cada 128 segundos) para alinhar o relógio interno do dispositivo com o do servidor de rede. Uma vez sincronizado, o dispositivo abre janelas de recepção extras e agendadas, conhecidas como *ping slots*, em momentos predeterminados para escutar por mensagens do servidor. Essas janelas agendadas são adicionais às duas janelas de recepção (RX1 e RX2) que já se abrem após cada transmissão de *uplink*, como ocorre na Classe A. Essa abordagem resulta em uma comunicação de *downlink* com latência determinística e maior disponibilidade, tornando-os adequados para aplicações que exigem mensagens regulares de *downlink* sem altos custos energéticos [67].

### 2.3.8.3 Classe C

Projetados para aplicações onde a baixa latência é crucial, os dispositivos Classe C mantêm janelas de recepção abertas quase continuamente, fechando-as apenas quando os dispositivos estão realizando uma transmissão de *uplink*. Essa abordagem resulta no maior consumo de energia entre as classes, mas facilita a comunicação imediata do servidor para o dispositivo assim que um comando ou dado é transmitido. São mais indicados para casos de uso em que respostas de *downlink* imediatas são necessárias, como em certas aplicações de controle [68].

# 3 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DESENVOLVIDO

## 3.1 Justificativa da escolha pelo LoRaWAN

A escolha pela tecnologia LoRa está diretamente relacionada aos objetivos desta pesquisa, que buscam avaliar tecnologias de comunicação sem fio de longo alcance para aplicações em IoT. Para isso, a análise ocorrerá em ambientes com desafios de propagação, como áreas rurais isoladas ou centros urbanos com alta interferência. Diante desses cenários, o LoRa possui um conjunto de características que o torna a solução ideal para a validação experimental proposta.

Seu esquema de modulação CSS garante robustez contra interferências e propagação de longo alcance mesmo sob baixas razões sinal-ruído (SNR). Além disso, pelo fato de a maioria das validações experimentais da pesquisa ser realizada em aplicações alimentadas por bateria e de difícil acesso para manutenção, o baixo consumo de energia, característica do LoRa, também é elemento fundamental na escolha.

Em termos de frequência, a operação do LoRa em bandas sub-GHz não licenciadas elimina a necessidade de concessões regulatórias específicas, o que simplifica a implantação de redes e reduz significativamente os custos operacionais, aspecto relevante para a pesquisa.

O LoRaWAN, por sua vez, devido à sua topologia em estrela, facilita o gerenciamento e escalabilidade da rede, gerando possibilidades reais de expansão da tecnologia a partir da pesquisa. Por fim, o uso de mecanismos de ADR permite a otimização automática de parâmetros como o fator de espalhamento e a potência de transmissão, adaptando a comunicação às condições dos ambientes experimentados.

Além das vantagens técnicas, comprovou-se por meio dos trabalhos anteriores a re-

levância da tecnologia, o que gera uma comunidade ativa de desenvolvedores e acesso facilitado a bibliotecas, módulos, *gateways* comerciais e plataformas de integração em nuvem, o que também gera a ampla aceitação do LoRa em soluções comerciais.

Dessa forma, o LoRa se apresenta como a alternativa viável, alinhando-se ao escopo desta pesquisa, que busca não apenas validar seus limites teóricos na prática, mas também oferecer subsídios técnicos para sua adoção em aplicações reais de *Internet* das Coisas (IoT).

### 3.2 Descrição da Arquitetura do Sistema de Transmissão

A arquitetura do sistema de transmissão construído nesta pesquisa segue o modelo tradicional de redes LoRaWAN, composto por quatro camadas principais: os dispositivos finais (EDs), o *gateway*, o servidor de rede e a camada de aplicação. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática da arquitetura utilizada, detalhando o fluxo de informação desde a coleta de dados em campo até a sua visualização final.

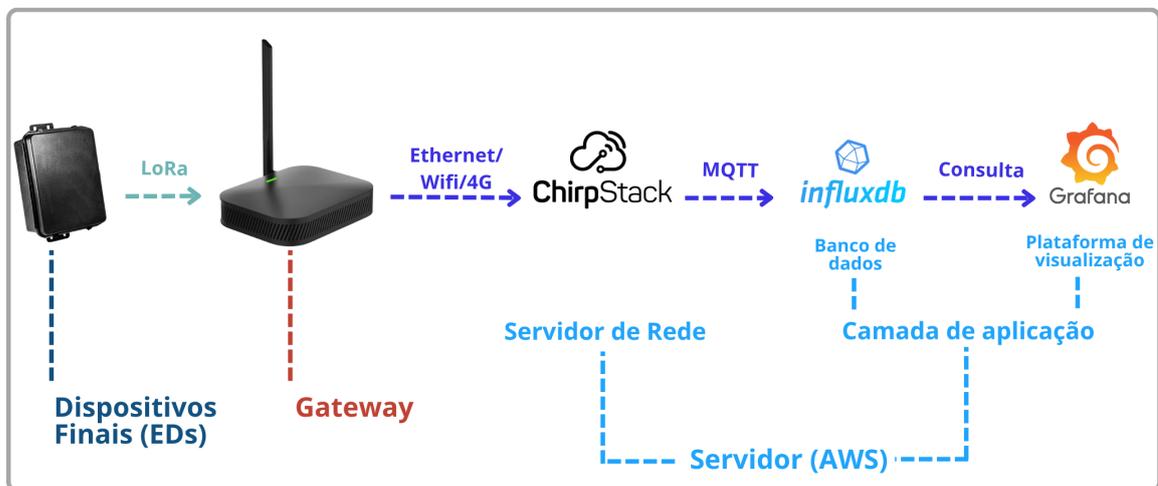


Figura 4: Arquitetura do sistema de comunicação construído

Fonte: Autora (2025)

O ponto de partida do sistema são os módulos transmissores desenvolvidos para esta pesquisa, que consistem nos dispositivos finais (EDs), responsáveis por coletar e transmitir os dados do ambiente físico. Eles consistem em uma placa de circuito impresso (PCI) com microcontrolador STM32F103C8T6 e módulo de rádio LoRa RFM95W operando na faixa AU915. Os dados coletados por sensores acoplados ao ED, que consistem em uma sonda

de nível hidrostática (saída 4-20mA) e um pluviômetro de báscula (saída pulsada com resolução de 0,25mm), são transmitidos a taxas personalizadas via protocolo LoRaWAN, com autenticação ABP, utilizando técnicas de economia de energia como o modo *standby* do microcontrolador.

O *gateway* LoRaWAN atua como uma ponte, recebendo os pacotes LoRa transmitidos pelos EDs e encaminhando-os para o servidor de rede. O modelo utilizado foi o modelo comercial 7268 da RAK *Wireless*, com suporte à banda ISM sub-GHz brasileira (915-928 MHz) e equipado com uma antena omnidirecional de 6,5 dBi. A escolha por uma antena omnidirecional é estratégica para a função do *gateway*, pois permite a recepção de sinais em 360° no plano horizontal, garantindo a comunicação com dispositivos distribuídos em qualquer direção ao seu redor. Após o recebimento do dado, o *gateway* utiliza uma conexão de *internet* padrão, como *Ethernet*, Wi-Fi ou 4G, para encaminhar os pacotes ao servidor de rede. Sua escolha foi pautada pela sua confiabilidade, compatibilidade com protocolos padrão e facilidade de integração com servidores LoRaWAN *open source*, ou seja, servidores que possuem código-fonte publicamente acessível, permitindo que qualquer pessoa possa modificá-lo e distribuí-lo.

O Servidor de Rede escolhido foi a plataforma *ChirpStack*, utilizada como servidor de rede devido à sua natureza *open source*, flexibilidade e compatibilidade com redes privadas. Suas principais funções são: receber os dados dos *gateways*, validar a autenticidade dos pacotes, decodificar os payloads, gerenciar a rede (como o mecanismo de ADR) e, por fim, publicar os dados úteis dos sensores em um tópico MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), que desacopla o servidor de rede da camada de aplicação. A escolha pelo *ChirpStack* também se justificou pela facilidade de implantação local, permitindo maior controle sobre a infraestrutura e independência de servidores externos. A Figura 5 apresenta o *dashboard* do servidor de rede *ChirpStack*, que mostra em tempo real o estado da rede LoRaWAN por meio de três diagramas circulares principais. O primeiro à esquerda detalha o status dos dispositivos ativos (*Active Devices*), segmentando-os entre ativos, inativos ou nunca vistos. O diagrama central ilustra o *status* dos *gateways* ativos (*Active Gateways*), indicando quais estão *online* e *offline*. Por fim, o gráfico à direita mostra o uso da taxa de dados (*Device data-rate usage*), que demonstra a distribuição das diferentes Taxas de Dados (DR) utilizadas pelos dispositivos, sendo um indicador visual fundamental para avaliar a eficiência do mecanismo de ADR na otimização da rede.

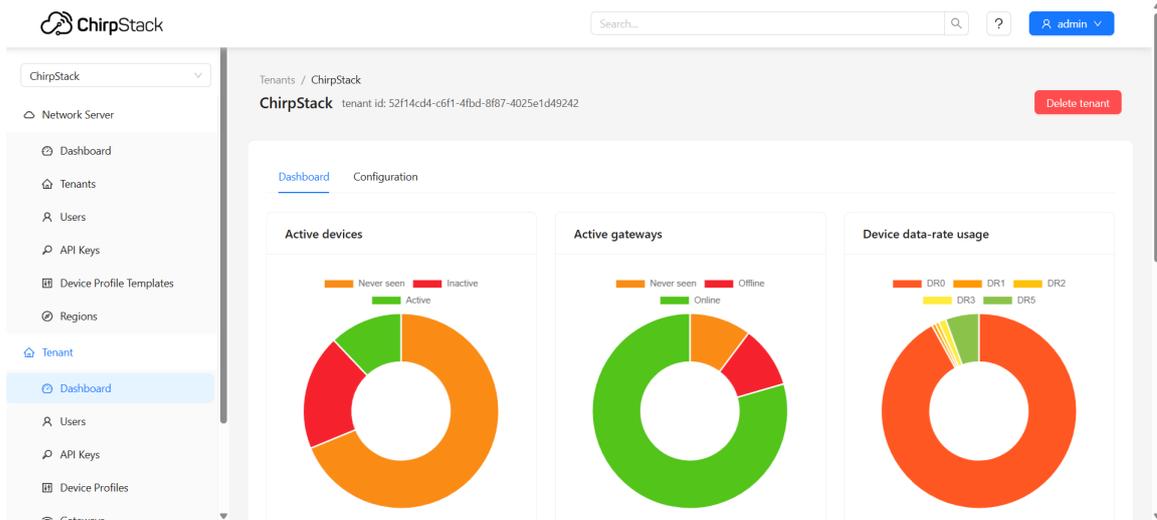


Figura 5: *Dashboard* da plataforma *ChirpStack*

A camada de aplicação é onde os dados são efetivamente armazenados, processados e apresentados ao usuário. Após serem publicados no tópico MQTT, os dados são consumidos e direcionados para o InfluxDB, um banco de dados do tipo séries temporais. A escolha por essa tecnologia, em detrimento de um banco de dados relacional tradicional, deve-se à sua alta performance na ingestão e consulta de grandes volumes de dados indexados por tempo, suportando centenas de milhares de informações por segundo, o que é característico de aplicações IoT. Por fim, a plataforma Grafana conecta-se ao InfluxDB para realizar consultas e exibir os dados em *dashboards* interativos, permitindo o monitoramento e a análise dos fenômenos em tempo real pelo usuário final.

A partir dessa configuração, estruturou-se um sistema completo de comunicação via LoRaWAN, no qual as informações são coletadas em campo e transmitidas pelos EDs desenvolvidos aos *gateways* comerciais, processadas pelo servidor de rede *ChirpStack* na nuvem (*Amazon Web Services*, AWS) e, por fim, armazenadas no banco de dados InfluxDB para visualização em tempo real na plataforma Grafana.

O diferencial da solução reside na integração eficiente entre *hardware* e *software*, aliada a um projeto físico otimizado. O *end device* desenvolvido apresenta dimensões reduzidas, baixo consumo energético — possibilitado pela combinação do microcontrolador STM32 com o rádio LoRa SX1276 operando em modo de *deep sleep* — e alta confiabilidade de transmissão mesmo em ambientes com desafios de propagação. A utilização de antena embutida e de componentes de baixo custo e alta disponibilidade no mercado reforça a viabilidade da solução para aplicações em larga escala, como sistemas de monitoramento ambiental distribuído. O conjunto completo constitui uma solução de baixo custo em

comparação às soluções comerciais mais onerosas, representando uma alternativa viável e replicável.

### 3.3 Descrição do Módulo Transmissor Desenvolvido (ED)

Os dispositivos finais (*end devices*) desta pesquisa consistem em módulos transmissores dedicados, que evoluíram a partir de versões anteriores utilizadas em estudos publicados [8, 9]. A versão final desenvolvida pela autora nesta pesquisa, denominada **Marlin Long Range v1.0.0**, incorpora melhorias significativas de hardware para garantir escalabilidade, alcance de comunicação e desempenho de processamento, requisitos essenciais para validar os limites da tecnologia LoRaWAN em ambientes com desafios de propagação. A Figura 6 apresenta a face superior em 3D da PCI desenvolvida e a Figura 7 apresenta o respectivo Diagrama de Blocos Funcionais (*Functional Block Diagram*).

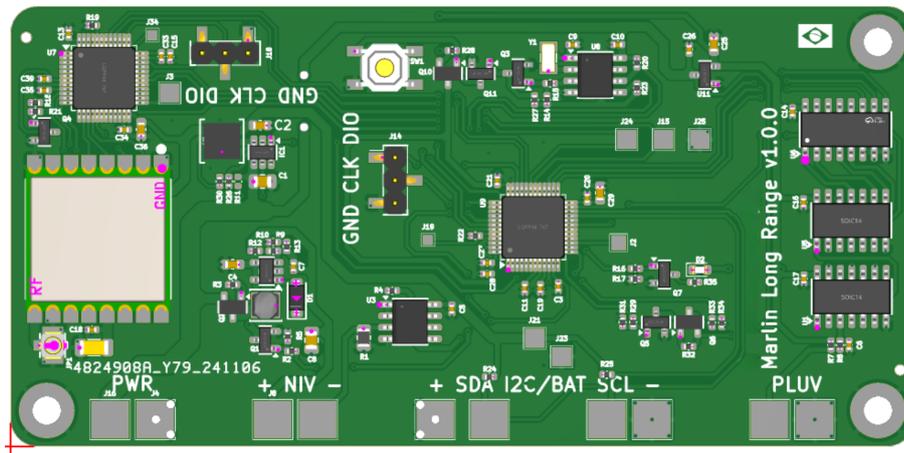


Figura 6: Face superior 3D da PCI do módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0

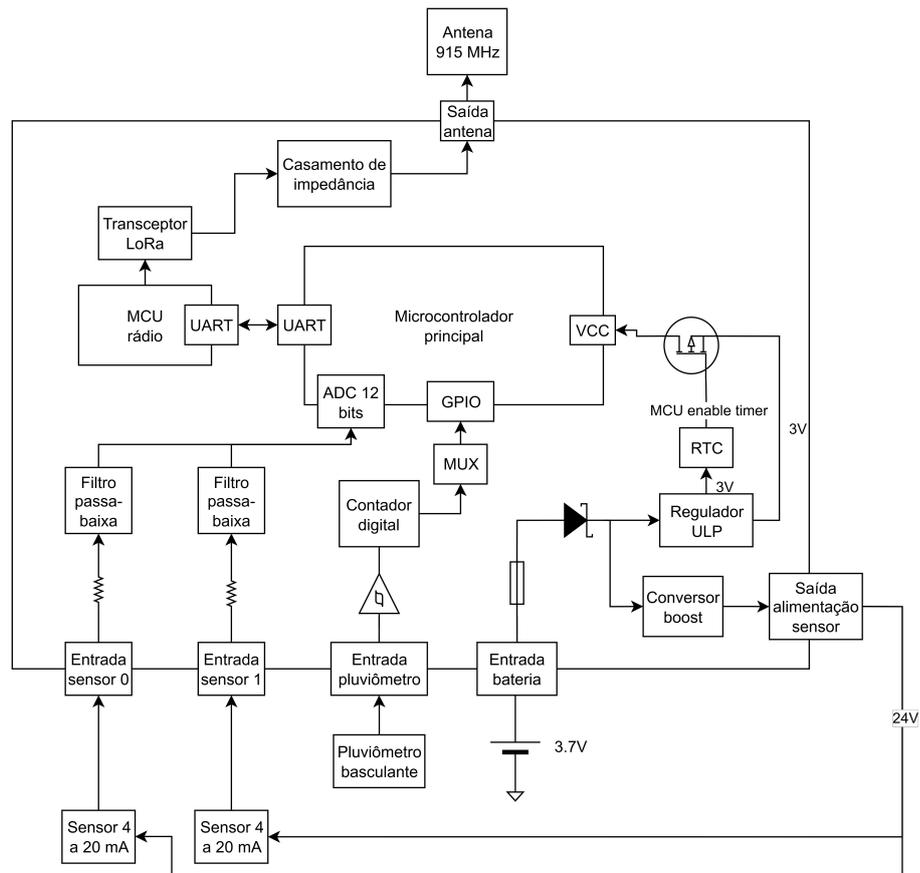


Figura 7: Diagrama de Blocos Funcionais do módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0

Fonte: Autora (2025)

Enquanto a Figura 6 mostra a disposição física dos componentes na PCI, o Diagrama de Blocos Funcionais apresentado na Figura 7 oferece uma visão lógica e de alto nível da arquitetura do sistema. Sua função é ilustrar como os principais subsistemas, como a alimentação, os sensores, o núcleo de processamento e o rádio se interconectam e interagem para realizar a tarefa de coletar, processar e transmitir os dados. Ele é fundamental para compreender o fluxo de informação e as dependências funcionais do hardware.

### 3.3.1 Requisitos de Projeto do Módulo Transmissor

O projeto do módulo transmissor foi orientado por três requisitos: máxima confiabilidade da comunicação em longo alcance, autonomia operacional e viabilidade de produção em escala.

A confiabilidade da comunicação, mesmo em cenários com obstáculos físicos e interferência eletromagnética, constitui outro aspecto crucial do projeto. Para garantir este

requisito, o *hardware* foi desenvolvido priorizando a integridade do sinal de rádio e a capacidade de processamento da placa, sendo que as análises práticas quanto à perda de pacotes e à qualidade do sinal serão apresentadas, visando aferir a integridade da transmissão em ambientes adversos.

A autonomia por sua vez, permanece um fator importante para a viabilidade em campo. O dispositivo é alimentado por uma dupla de baterias de lítio conectadas em paralelo, totalizando 20Ah. Estudos com protótipos anteriores, que possuíam um perfil de consumo semelhante em modo ativo, demonstraram autonomias de aproximadamente 3,8 meses (2752,6 horas) com transmissões a cada 60 segundos. Isso valida a capacidade do *hardware* operar por longos períodos sem manutenção.

Por fim, considerando o potencial de aplicação real da solução desenvolvida, a viabilidade de produção em larga escala também foi um critério decisivo. Todos os componentes empregados foram selecionados com base em sua ampla disponibilidade no mercado nacional, de modo a assegurar a escalabilidade do projeto.

### 3.3.2 Escolha dos Componentes Principais

Para atender aos requisitos de projeto, a seleção de componentes representa aspecto crucial do desenvolvimento.

- **Arquitetura *Dual-MCU*:** Um dos principais diferenciais de projeto do hardware desenvolvido nesta dissertação, em comparação com protótipos anteriores da autora, é a adoção de dois microcontroladores idênticos. O escolhido foi o STM32F103C8T6, microcontrolador de 32 bits com núcleo ARM Cortex-M3, operando a 72 MHz, com 64 KB de *Flash* e 20 KB de SRAM. A arquitetura dual-MCU foi implementada para gerenciar a alta carga computacional da biblioteca LoRaWAN MCCI LMIC Assim, foi possível segmentar as tarefas: um MCU atua como coprocessador de rádio, dedicado exclusivamente a executar a pilha de protocolo LoRaWAN, enquanto o segundo MCU atua como controlador principal, responsável pela lógica da aplicação e leitura dos sensores. Essa divisão garante que o processamento da rede não afete o desempenho e a temporização da aplicação principal.
- **Módulo Transceptor LoRa:** Foi selecionado o módulo HopeRF RFM95W, um transceptor baseado no chip Semtech SX1276, que apresenta robustez e desempenho confiável para comunicação de longo alcance na faixa ISM de 915 MHz.

- **Relógio de Tempo Real (*Real Time Clock*, RTC):** A placa conta com um RTC dedicado e isolado para o gerenciamento de ciclos de hibernação (*sleep*) e temporização do sistema. Isso garante uma base de tempo mais estável e confiável, desonerando os microcontroladores dessa função e mantendo consumo ultra-reduzido.
- **Conector para Antena Externa:** Em vez de uma antena embutida, a placa possui um conector (via *pigtail*) para antenas externas. Essa escolha de projeto é fundamental para o foco em alcance, pois permite a utilização de antenas de alto ganho. Para os testes de campo, foi utilizada uma antena omnidirecional de 6.5 dBi.

### 3.3.3 Arquitetura do Hardware

A arquitetura da placa foi desenvolvida para compor um sistema compacto e funcional, com blocos dedicados para cada tarefa. A Figura 8 apresenta uma visão segmentada da Placa de Circuito Impresso (PCI) com seus principais subsistemas destacados.

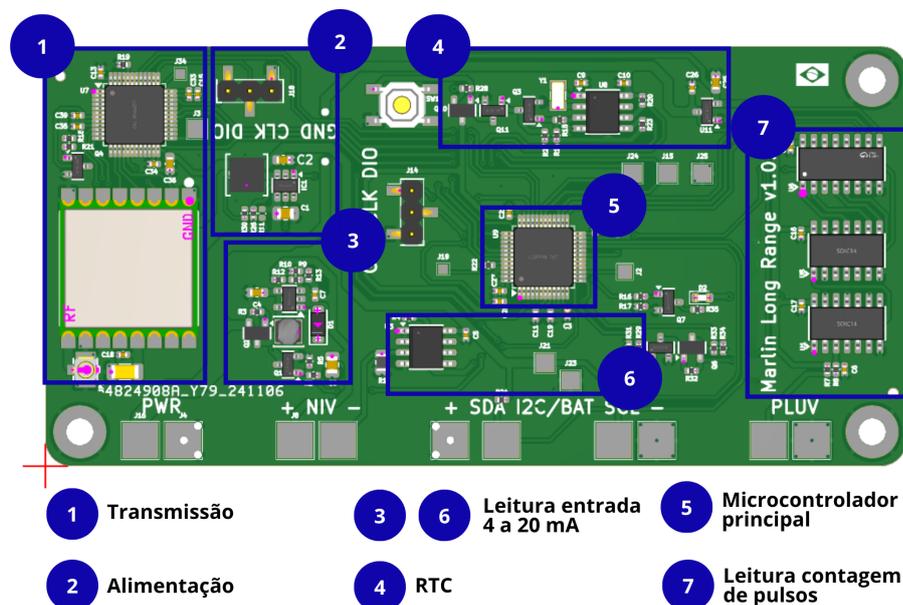


Figura 8: Esquemático segmentado do módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0

**Módulo de Transmissão:** O bloco número 1 constitui o circuito de radiofrequência (RF) do sistema. Ele contém o transceptor LoRa HopeRF RFM95W e seus componentes de suporte, como o circuito de casamento de impedância para o conector da antena externa. Este subsistema é responsável por toda a comunicação da camada física, sendo controlado pelo microcontrolador dedicado à pilha de protocolo LoRaWAN.

**Módulo de Alimentação:** o bloco 2 é o subsistema de alimentação, alimentado por um conjunto de baterias de lítio de 20Ah. Suas funções essenciais incluem a regulação de tensão, utilizando um regulador LDO para fornecer 3,3V estáveis aos componentes, e a distribuição de energia com proteções contra sobrecorrente e subtensão, garantindo a operação confiável do hardware.

**Condicionamento de Sinal para Entradas 4-20 mA:** A placa possui dois circuitos independentes, identificados com os números 3 e 6, para a leitura de sensores com saída de corrente de 4-20 mA. Cada bloco é um condicionador de sinal que converte a corrente do sensor em um nível de tensão compatível com o conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador principal, permitindo a leitura precisa de variáveis como nível, pressão, vazão dentre outros parâmetros.

**Controlador de Tempo Real (RTC):** Este circuito identificado com o número 4 abriga o RTC dedicado e seu cristal oscilador. Sua função é fornecer uma base de tempo estável e de baixo consumo para todo o sistema, gerenciando os ciclos de hibernação e despertar de forma independente e precisa, o que é fundamental para a estabilidade operacional do dispositivo em campo.

**Microcontrolador Principal:** Neste bloco número 5 está localizado o STM32 que atua como o cérebro da aplicação. Ele é responsável por executar a lógica principal do programa: gerenciar as interfaces de sensores, realizar as leituras das entradas analógicas (após o condicionamento) e digitais, processar esses dados e comunicar-se com o segundo MCU (coprocessador de rádio) para solicitar o envio das informações.

**Interface Digital para Contagem de Pulsos:** Este bloco número 7 é uma interface de entrada digital otimizada para a contagem de pulsos. Seu circuito é projetado para detectar e registrar transições de sinal de forma confiável, sendo ideal para a interface com uma variedade de sensores que quantificam fenômenos por meio de contagem. Embora tenha sido validado com um pluviômetro de báscula, onde cada pulso representa um volume de chuva, a interface é igualmente compatível com outros instrumentos, como medidores de vazão (hidrômetros) ou anemômetros, que também utilizam uma saída de pulso para representar uma medição.

# 4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Este Capítulo apresenta a metodologia e os resultados dos testes de campo realizados para validar o desempenho do sistema de transmissão LoRaWAN desenvolvido nesta pesquisa. O foco da avaliação experimental foi quantificar a performance do sistema em termos de alcance e confiabilidade da comunicação sob diferentes condições de operação, que simulam cenários de aplicação reais com desafios de propagação. A abordagem metodológica, incluindo a configuração de hardware e os parâmetros de transmissão, foi definida com base na fundamentação teórica do Capítulo 2 e nas melhores práticas da literatura [37] [63] [18], garantindo a relevância e a comparabilidade dos resultados obtidos.

## 4.1 Metodologia de Testes e Implantação em Campo

A metodologia de validação consistiu em uma série de testes de campo, utilizando o hardware desenvolvido em uma infraestrutura de rede controlada para avaliar sistematicamente o desempenho do enlace de comunicação.

### 4.1.1 Configuração da Infraestrutura de Testes

A infraestrutura de testes foi composta por dois elementos principais: o módulo transmissor Marlin Long Range v1.0.0, atuando como Dispositivo Final (ED) e transmitindo dados a cada 2 minutos, e um *gateway* comercial da RAK *Wireless*, como estação base receptora. O *gateway* foi equipado com uma antena omnidirecional de 6,5 dBi. O ED, por sua vez, foi testado com duas antenas distintas para avaliar o impacto no desempenho: uma antena compacta de 2 dBi e uma de alto ganho de 6,5 dBi. A coleta de dados foi automatizada através do servidor de rede *ChirpStack* (hospedado na AWS), com ar-

mazenamento no InfluxDB e visualização no Grafana, conforme arquitetura descrita na Figura 4.

### 4.1.2 Parâmetros de Transmissão

Para focar na avaliação de alcance máximo e robustez em cenários desafiadores, foram definidos parâmetros de transmissão fixos, justificados pela teoria apresentada no Capítulo 2:

- Fator de Espalhamento (SF): Configurado em SF12. Conforme discutido na Seção 2.2.3.1, este é o maior SF disponível, oferecendo a máxima sensibilidade do receptor e, conseqüentemente, o maior alcance teórico, sendo ideal para ambientes com alta atenuação de sinal [69].
- Largura de Banda (BW): Fixada em 125 kHz. A escolha pela menor largura de banda, em conjunto com o SF12, maximiza a sensibilidade e a robustez do enlace contra ruído, embora resulte em uma menor taxa de dados.
- Frequência de Transmissão: Fixada em 916 MHz. Este canal foi escolhido por pertencer à primeira sub-banda (canais 0-7, de 915.2 a 916.6 MHz) do plano de frequências AU915, utilizado no Brasil. A vantagem desta escolha reside na garantia de compatibilidade com as principais redes LoRaWAN comerciais do país, como a da *American Tower Corporation* (ATC), que concentram sua operação nesta mesma sub-banda. Dessa forma, assegura-se que o dispositivo desenvolvido possa, eventualmente, operar sobre infraestruturas de rede já existentes, aumentando sua interoperabilidade e viabilidade de aplicação em larga escala.
- Potência de Transmissão (TX Power): Configurada em 20 dBm, que corresponde à potência máxima suportada pelo rádio RFM95W, visando maximizar o orçamento de enlace (*link budget*).

### 4.1.3 Configuração do Protocolo LoRaWAN

As configurações do protocolo da camada MAC também foram definidas visando à estabilidade em cenários de difícil conectividade:

- Classe do Dispositivo: Utilizada a Classe A, pois, mesmo com o foco em alcance, a otimização do consumo de energia para dispositivos a bateria continua sendo um

requisito secundário importante.

- Ativação: Adotada a ABP. Este método foi escolhido para eliminar a dependência de um enlace de *downlink* para o procedimento de *join* (OTAA), o que é crítico em testes de alcance onde a recepção de respostas do *gateway* pode ser instável.
- Estrutura do Pacote: Cada transmissão possui um *PHYPayload* total de 33 bytes. Este é composto por um preâmbulo de 8 bytes (inserido pelo rádio), um cabeçalho (FHDR), um campo de porta (FPort), um *payload* de aplicação (*FRMPayload*) de 12 bytes e um Código de Integridade de Mensagem (*MIC*) de 4 bytes. Para garantir a confidencialidade, o *FRMPayload* é criptografado com o algoritmo AES-128.

## 4.2 Cenário de Teste e Implantação

Para avaliar o desempenho do sistema em diversas condições de propagação do sinal, a validação experimental foi dividida em dois cenários de teste distintos.

O foco principal desta dissertação reside no primeiro cenário, que consistiu na implantação de uma infraestrutura de teste de longo alcance na cidade de Itajubá-MG. Neste cenário, um *gateway* foi posicionado em um ponto estratégico e seis dispositivos finais (EDs) foram distribuídos em locais com diferentes características de ambiente, distância e visada. Os testes ocorreram no período de 02 de agosto de 2024 a 02 de fevereiro de 2025 e seus resultados são a base para as análises apresentadas neste capítulo.

Adicionalmente, foi realizado um ensaio complementar para avaliar o desempenho do sistema em um ambiente fechado com alta densidade de dispositivos. Este segundo teste, que será detalhado especificamente na Seção 4.5, ocorreu em um supermercado entre os dias 30 de março e 30 de abril de 2025 e visou analisar o impacto de colisões e interferência em curtas distâncias.

### 4.2.1 Instalação da Estação Base (*Gateway*)

O *gateway* LoRaWAN, um modelo comercial da RAK *Wireless* com antena omnidirecional de 6,5 dBi, foi instalado no topo da torre da Rádio Panorama FM em 02 de julho de 2024. A escolha do local, de altitude elevada (903 metros), de coordenadas do *gateway*: -22.43156, -45.45192, visou maximizar a área de cobertura sobre a cidade e arredores. A estação base foi alimentada pela rede elétrica local e utilizou uma conexão 4G para o *backhaul* dos dados para a nuvem (AWS). Na montagem, a antena foi posicionada de

forma que seu elemento radiante, localizado na extremidade superior, ficasse acima da grade metálica de suporte, garantindo que não houvesse interferência em seu padrão de irradiação horizontal. A Figura 9 ilustra a instalação.



Figura 9: Instalação do *Gateway* LoRaWAN nas instalações da Rádio Panorama FM.

## 4.2.2 Implantação dos Dispositivos Finais (EDs)

Os seis módulos **Marlin Long Range v1.0.0** foram instalados em pontos estratégicos para criar um conjunto variado de cenários de teste.

### 4.2.2.1 ED 1: Ambiente Urbano sem Visada Direta (NLoS)

- **Localização:** Rua Tatuí, Itajubá-MG.
- **Ambiente:** Urbano, sem visada direta para o *gateway* (NLoS).
- **Coordenadas:** -22.43578, -45.43893.
- **Altitude:** 848 m.

- **Distância ao *Gateway*:** 1,45 km.
- **Configuração:** Instalado em 02/08/24 com antena de 2 dBi. Em 07/10/24, a antena foi substituída por um modelo de 6.5 dBi para análise comparativa.

A Figura 10 ilustra a instalação.



Figura 10: Instalação do ED 1 na Rua Tatuí com antena de 2 dBi (esquerda) e 6.5 dBi (direita).

#### 4.2.2.2 ED 2: Ambiente Urbano com Visada Direta (LoS)

- **Localização:** Bairro Santos Dumont, Itajubá-MG.
- **Ambiente:** Urbano, com visada direta para o *gateway* (LoS).
- **Coordenadas:** -22.42091, -45.47991.
- **Altitude:** 838 m.

- **Distância ao *Gateway*:** 3,13 km.
- **Configuração:** Instalado em 02/08/24 com antena de 2 dBi.

A Figura 11 ilustra a instalação.



Figura 11: Instalação do ED 2 no Bairro Santos Dumont com antena de 2 dBi.

#### 4.2.2.3 ED 3: Ambiente Urbano sem Visada Direta (NLoS)

- **Localização:** Distrito Industrial, Itajubá-MG.
- **Ambiente:** Urbano, sem visada direta (NLoS).
- **Coordenadas:** -22.43041, -45.48556.
- **Altitude:** 838 m.
- **Distância ao *Gateway*:** 3,40 km.
- **Configuração:** Instalado em 02/08/24 com antena de 2 dBi.

A Figura 12 ilustra a instalação.



Figura 12: Instalação do ED 3 no Bairro Distrito Industrial com antena de 2 dBi.

#### 4.2.2.4 ED 4: Ambiente Rural sem Visada Direta (NLoS) - Média Distância

- **Localização:** Serra dos Toledos (Ponto 1).
- **Ambiente:** Rural, sem visada direta (NLoS), com obstrução por relevo.
- **Coordenadas:** -22.42267, -45.39851.
- **Altitude:** 1028 m.
- **Distância ao *Gateway*:** 5,60 km.
- **Configuração:** Instalado em 02/08/24 com antena de 2 dBi. Em 25/10/24, a antena foi substituída por um modelo de 6.5 dBi.

A Figura 13 ilustra a instalação.



Figura 13: Instalação do ED 4 na Serra dos Toledos (Ponto 1) com antena de 2 dBi (esquerda) e 6.5 dBi (direita).

#### 4.2.2.5 ED 5: Ambiente Rural sem Visada Direta (NLoS) - Longa Distância

- **Localização:** Serra dos Toledos (Ponto 2).
- **Ambiente:** Rural, sem visada direta (NLoS).
- **Coordenadas:** -22.42135, -45.38426.
- **Altitude:** 1058 m.
- **Distância ao *Gateway*:** 7,06 km.
- **Configuração:** Instalado em 02/08/24 com antena de 2 dBi.

A Figura 14 ilustra a instalação.



Figura 14: Instalação do ED 5 na Serra dos Toledos (Ponto 2) com antena de 2 dBi.

#### 4.2.2.6 ED 6: Ambiente Rural sem Visada Direta (NLoS) - Alcance Extremo

- **Localização:** Bairro dos Borges.
- **Ambiente:** Rural, sem visada direta (NLoS), com múltiplas obstruções de relevo.
- **Coordenadas:** -22.57116, -45.45940.
- **Altitude:** 927 m.
- **Distância ao *Gateway*:** 15,45 km.
- **Configuração:** Instalado em 02/08/24 com antena de 2 dBi.

A Figura 15 ilustra a instalação.



Figura 15: Instalação do ED 6 no Bairro dos Borges com antena de 2 dBi.

As Figuras 16 e 17 apresentam os mapas com as localizações georreferenciadas do *gateway* e de todos os dispositivos finais.



Figura 16: Mapa geral com a localização do *gateway* e dos seis dispositivos de teste (EDs).

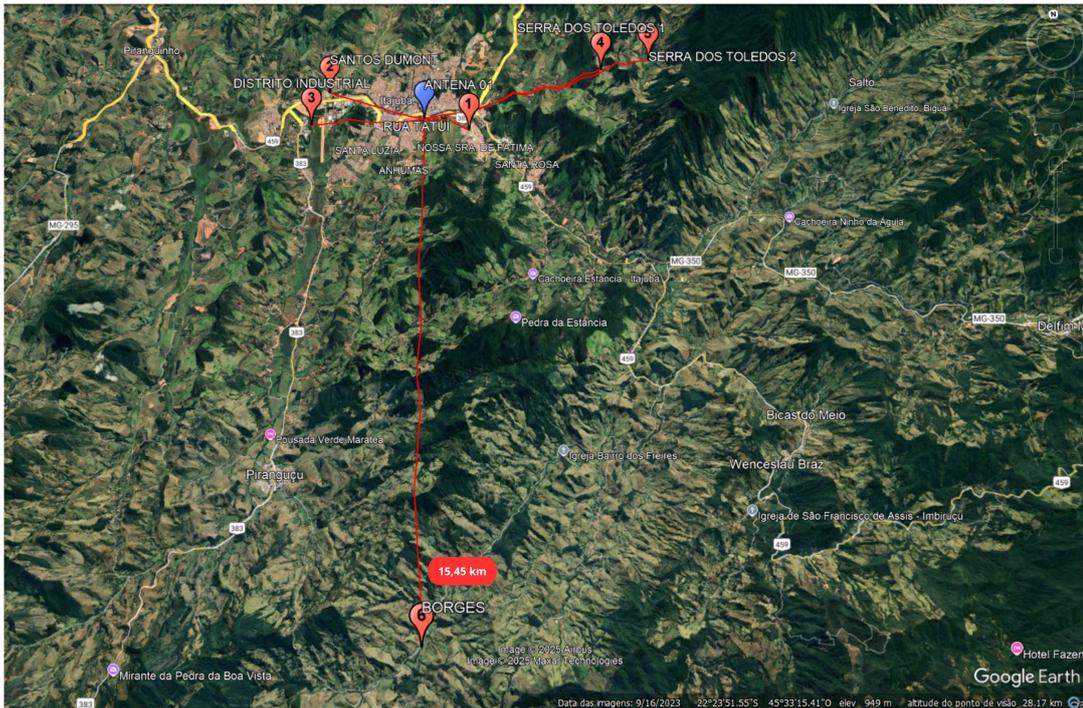


Figura 17: Mapa com foco na localização do dispositivo de teste 6 (ED 6).

Para sintetizar a variedade de condições avaliadas, a Tabela 6 resume a matriz de cenários cobertos pelos testes. Esta organização permite uma análise comparativa clara entre os diferentes ambientes e configurações.

Dispositivos (Localização)	Ambiente	Visada (LoS)	Distância até o gateway (km)	Altitude (m)	Antenas Testadas (dBi)
ED 1 (Rua Tatuí)	Urbano	Não	1,45	848	2 e 6.5
ED 2 (Bairro Santos Dumont)	Urbano	Sim	3,13	838	2
ED 3 (Distrito Industrial)	Urbano	Não	3,4	838	2
ED 4 (Serra dos Toledos 1)	Rural	Não	5,6	1028	2 e 6.5
ED 5 (Serra dos Toledos 2)	Rural	Não	7,06	1058	2
ED 6 (Bairro dos Borges)	Rural	Não	15,45	927	2 e 6.5

Tabela 6: Matriz de dispositivos e cenários de teste avaliados.

### 4.3 Indicadores Coletados

Para a avaliação quantitativa do desempenho do sistema, foram coletados os seguintes indicadores, cuja relevância é corroborada pela literatura [63]:

- RSSI (*Received Signal Strength Indication*): É a métrica fundamental para medir a potência do sinal recebido. Conforme a teoria de propagação do Capítulo 2,

sua análise em função da distância permite caracterizar a atenuação do canal nos diferentes cenários testados.

- SNR (*Signal-to-Noise Ratio*): Mede a qualidade do sinal em relação ao ruído de fundo. Como visto, a capacidade do LoRa de operar com SNR negativo é um de seus maiores diferenciais, e a análise deste indicador é crucial para determinar a robustez da comunicação em ambientes ruidosos.
- PLR (*Packet Loss Rate*): É a métrica final de confiabilidade da rede. Enquanto RSSI e SNR avaliam as condições do enlace, o PLR quantifica o resultado prático, ou seja, a porcentagem de pacotes que efetivamente se perderam na transmissão.
- Alcance: Sendo um dos principais focos desta pesquisa, o alcance é avaliado como a distância máxima em que uma comunicação com PLR aceitável (inferior a 10%) foi estabelecida, validando os limites do sistema em ambientes com desafios de propagação.

## 4.4 Análise e Interpretação dos Dados

Nesta seção, os dados coletados a partir dos seis dispositivos finais implantados em campo são analisados e interpretados. A análise foi estruturada para, primeiramente, apresentar o desempenho individual de cada dispositivo e, em seguida, realizar análises comparativas para isolar o impacto de cada variável do estudo: a distância, o ambiente (urbano/rural), a condição de visada e o ganho da antena.

### 4.4.1 Análise de RSSI

Para compreender o comportamento fundamental do enlace de rádio, a primeira análise investiga os valores de RSSI e seu comportamento ao longo do tempo de validação em campo para cada um dos EDs. Utilizando os dados de todos os seis EDs, foram gerados gráficos de dispersão para o RSSI em função do tempo.

A Figura 18 apresenta o comportamento do RSSI para o ED 1. Este dispositivo, em ambiente urbano NLoS, obteve um RSSI médio de **-109,840 dBm** com a antena de 2 dBi. O círculo azul no gráfico destaca o momento da troca pela antena de 6.5 dBi, que elevou o RSSI médio para **-108,512 dBm**.

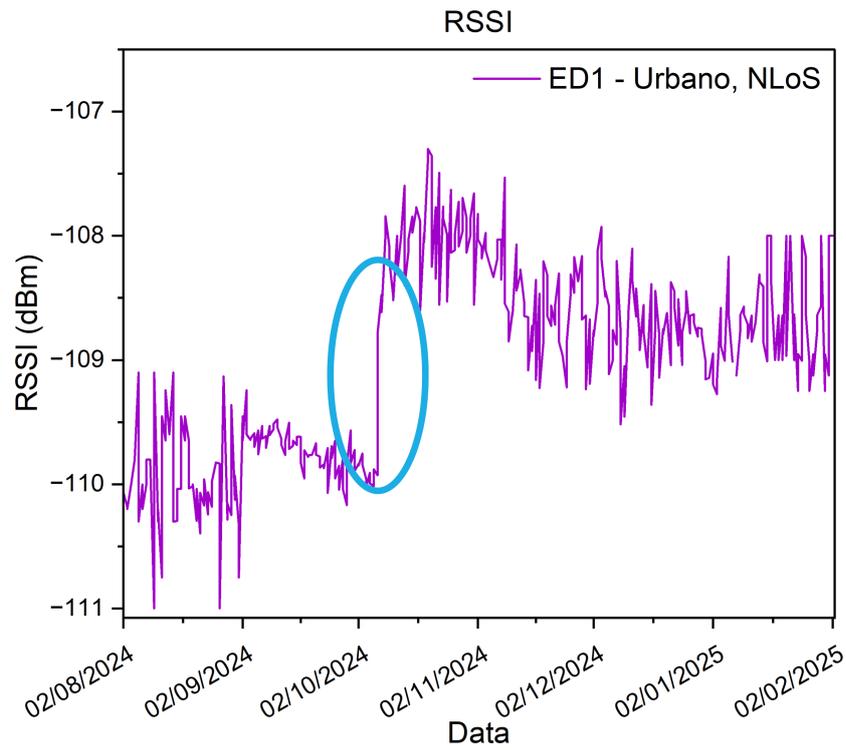


Figura 18: Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED1 - Urbano, NLoS (Rua Tatuí).

O comportamento do RSSI para o ED 2, em ambiente urbano com visada direta (LoS), é ilustrado na Figura 19. A presença da visada resultou em um RSSI médio de **-105,804 dBm**, o melhor entre os dispositivos.

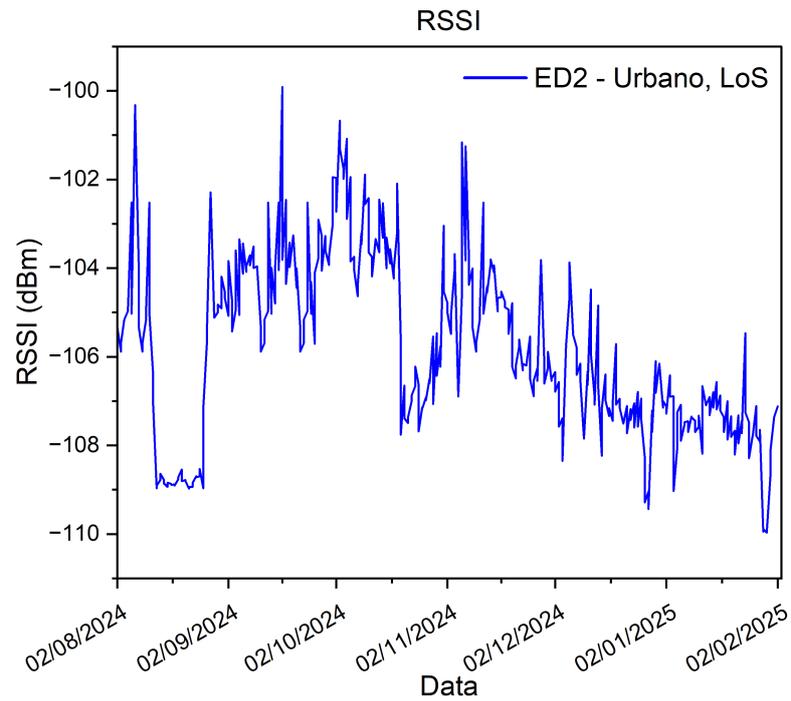


Figura 19: Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED2 - Urbano, LoS (B. Santos Dumont).

A Figura 20 exibe os dados do ED 3, posicionado no Distrito Industrial. Apesar de estar a uma distância similar à do ED 2, a ausência de visada direta resultou em um RSSI médio inferior, de **-108,176 dBm**.

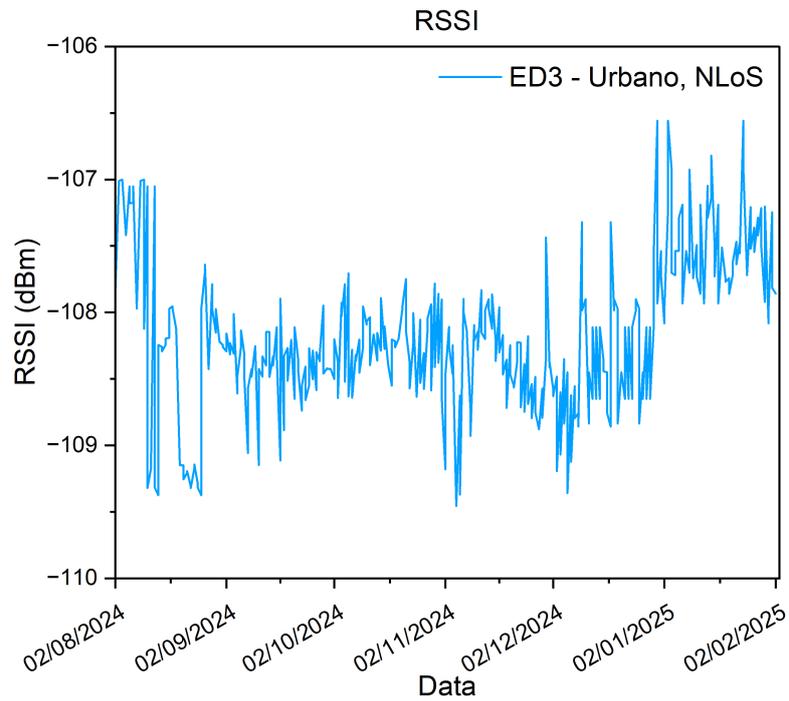


Figura 20: Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED3 - Urbano, NLoS (Distrito Industrial).

O desempenho do ED 4, em ambiente rural de média distância, é apresentado na Figura 21. Com a antena de 2 dBi, o RSSI médio foi de **-110,700 dBm**. O círculo azul novamente destaca a troca pela antena de 6.5 dBi, que proporcionou uma melhoria no sinal, elevando o RSSI médio para **-107,683 dBm**.

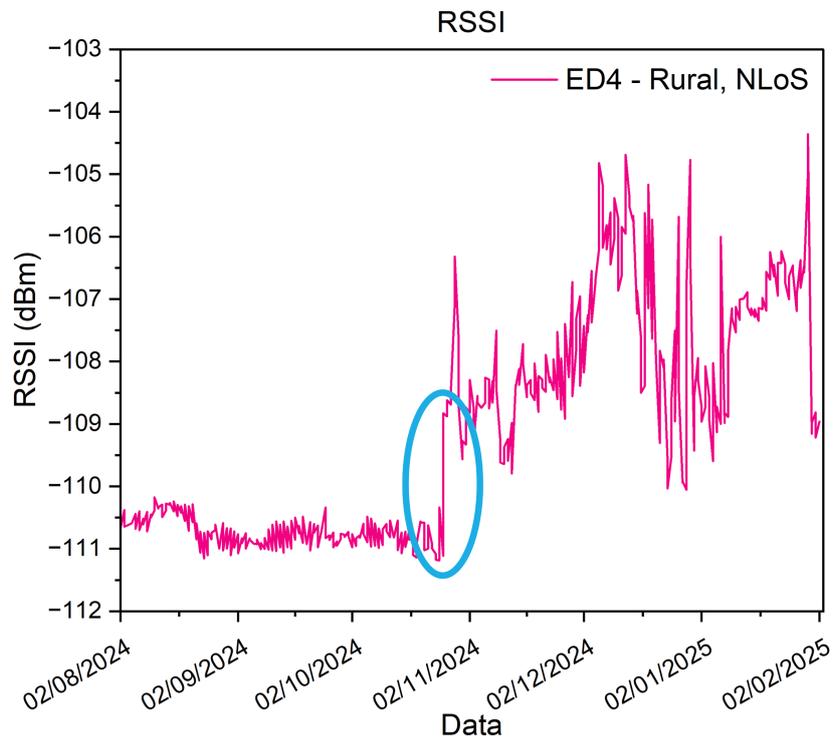


Figura 21: Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED4 - Rural, NLoS, Média Distância (Serra dos Toledos (Ponto 1)).

A Figura 22 mostra os dados do ED 5, o dispositivo em ambiente rural mais distante com comunicação estabelecida. O RSSI médio de **-108,665 dBm**, superior ao do ED 4 (com 2 dBi).

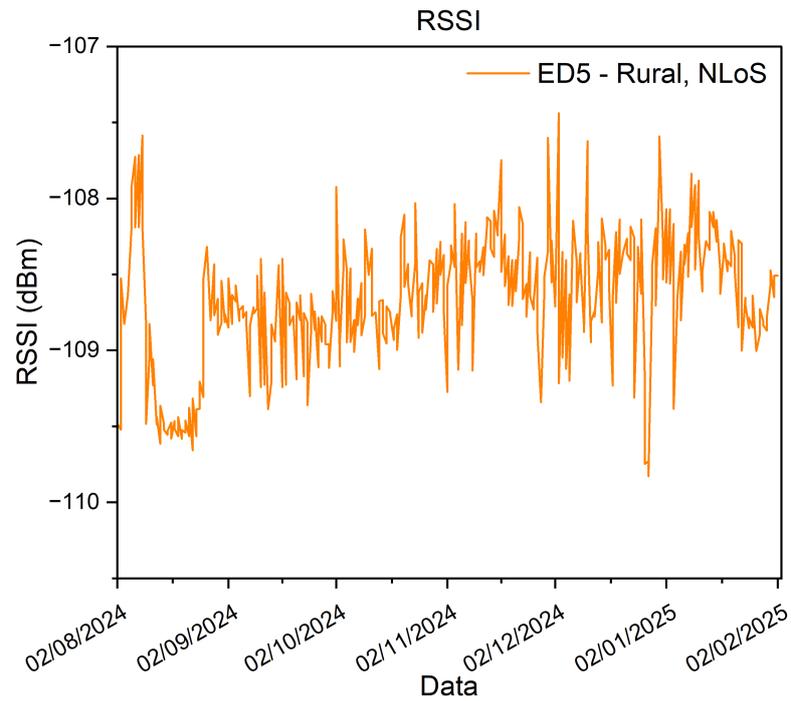


Figura 22: Gráfico de RSSI ao longo do tempo para o ED5 - Rural, NLoS, Longa Distância (Serra dos Toledos (Ponto 2)).

Por fim, a Figura 23 apresenta a sobreposição dos gráficos de RSSI para todos os dispositivos, permitindo uma análise comparativa direta do comportamento de cada enlace e evidenciando visualmente o impacto de cada cenário.

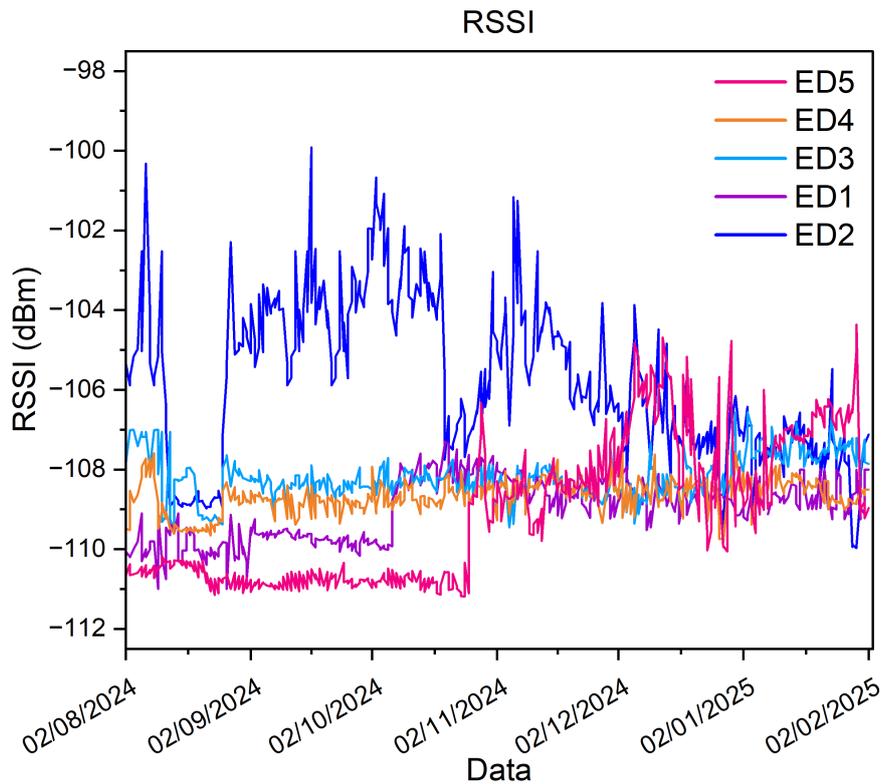


Figura 23: Gráficos de RSSI ao longo do tempo para os cinco dispositivos de teste em diferentes cenários.

#### 4.4.1.1 Impacto da Visada Direta (LoS) em Ambiente Urbano

A importância da visada direta é demonstrada ao se comparar o **ED 2** com o **ED 3**. Ambos estão em ambiente urbano, a distâncias e altitudes semelhantes (3,13 km e 3,40 km, ambos a 838 m). No entanto, o ED 2, com visada direta (LoS), apresentou um RSSI médio de **-105,804 dBm**. Já o ED 3, sem visada (NLoS) devido a um leve relevo, teve um RSSI médio de **-108,176 dBm**, 2,372 dBm de diferença. Este resultado valida empiricamente que, mesmo para obstruções parciais, a ausência de uma linha de visada direta é um fator preponderante na degradação da potência do sinal.

#### 4.4.1.2 Influência do Ambiente e da Topografia (Urbano vs. Rural)

A comparação entre o **ED 1** (Urbano, NLoS) e o **ED 4** (Rural, NLoS) revela o impacto combinado do tipo de ambiente e da altitude. O ED 1, embora seja o mais próximo do *gateway* (1,45 km), está em um "vale" topográfico (848 m de altitude, contra 903 m do *gateway*) e em ambiente urbano denso. Isso resultou em um RSSI médio de **-109,840 dBm** (com antena de 2 dBi). Em contrapartida, o ED 4, mesmo estando quase quatro

vezes mais distante (5,6 km), mas em um ambiente rural com menos interferências e em uma altitude superior à do *gateway* (1028 m), registrou um RSSI médio de **-110,700 dBm** (com antena de 2 dBi). O desempenho próximo, mesmo a uma distância maior, sugere que a altitude elevada e um ambiente de radiodifusão sem grandes obstáculos são fatores que podem compensar a falta de visada direta e a distância de propagação.

#### 4.4.1.3 Influência do Ganho da Antena

Para quantificar o impacto do ganho da antena do transmissor no desempenho do enlace, foi realizada uma análise comparativa nos dispositivos em que a antena de 2 dBi foi substituída por uma de 6.5 dBi. Os resultados revelam nuances importantes sobre a eficácia desse upgrade em diferentes ambientes.

No **ED 1** (Urbano, NLoS), a troca da antena resultou em uma melhoria no RSSI médio de **1,328 dB** (de -109,840 dBm para -108,512 dBm). Já no **ED 4** em ambiente rural, a mesma substituição produziu um ganho de RSSI mais expressivo, de **3,017 dB** (de -110,700 dBm para -107,683 dBm).

Essa diferença na magnitude do ganho de RSSI pode ser atribuída ao fenômeno do multipercurso. No ambiente urbano denso do ED 1, o sinal chega ao *gateway* por múltiplas reflexões, sem uma via dominante clara. Nesse cenário, o benefício de uma antena com maior ganho na captação de potência pode ser parcialmente reduzido. Já no ambiente rural do ED 4, com menos reflexões, a antena de maior ganho consegue capturar de forma mais eficiente o sinal que chega por um caminho mais definido. Em resumo, pode-se comprovar empiricamente que a antena de maior ganho rouxe benefícios significativos no

#### 4.4.1.4 Influência da Altitude em Longa Distância

A análise dos dispositivos **ED 4** e **ED 5** reforça a importância da altitude. O ED 5, a 7,06 km e 1058 m de altitude, apresentou um RSSI médio de **-108,665 dBm**. Este valor é melhor que o do ED 4 (-110,700 dBm), que está 1,46 km mais perto, porém 30 metros mais baixo. Surpreendentemente, o desempenho do ED 5 a 7 km de distância é comparável ao do ED 1 a apenas 1,45 km. Isso evidencia que, em cenários de longo alcance, um ganho de altitude pode ter um impacto mais significativo na qualidade do sinal do que um aumento considerável na distância.

#### 4.4.1.5 Limites Práticos e Falha de Comunicação

O **ED 6** (Bairro dos Borges), posicionado a 15,45 km em um ambiente rural e com múltiplas obstruções de relevo, não estabeleceu comunicação com o *gateway* em nenhum momento. O sinal com a antena de 2 dBi já estava tão atenuado pelas múltiplas obstruções e pela distância que o ganho adicional da antena de 6.5 dBi não foi capaz de elevá-lo acima do limiar de sensibilidade do receptor. Apesar de sua altitude ser superior à do *gateway* (927 m), a combinação da longa distância com a severidade das obstruções (NLoS) foi suficiente para atenuar o sinal abaixo do limiar de sensibilidade do receptor. Este resultado prático é de grande importância, pois demonstra um limite da tecnologia desenvolvida, pois mesmo com parâmetros otimizados para alcance (SF12), a comunicação a longas distâncias, em um ambiente com múltiplos obstáculos, inviabilizou a recepção dos pacotes transmitidos.

#### 4.4.2 Análise de SNR

Para compreender o comportamento fundamental do enlace de rádio, a análise investiga os valores de SNR e seu comportamento ao longo do tempo de validação em campo para cada um dos EDs, sendo fundamental para compreender a robustez e a confiabilidade de cada enlace de comunicação estabelecido. Utilizando os dados de todos os seis EDs, foram gerados gráficos de dispersão para o SNR em função do tempo.

A Figura 24 apresenta o comportamento do SNR para o ED 1. Este dispositivo operou com um SNR médio de **-20,39 dB** com a antena de 2 dBi, valor no limiar da capacidade de decodificação do LoRa. O círculo azul destaca a troca pela antena de 6.5 dBi, que proporcionou um ganho na qualidade do sinal, elevando o SNR médio para **-12,87 dB**.

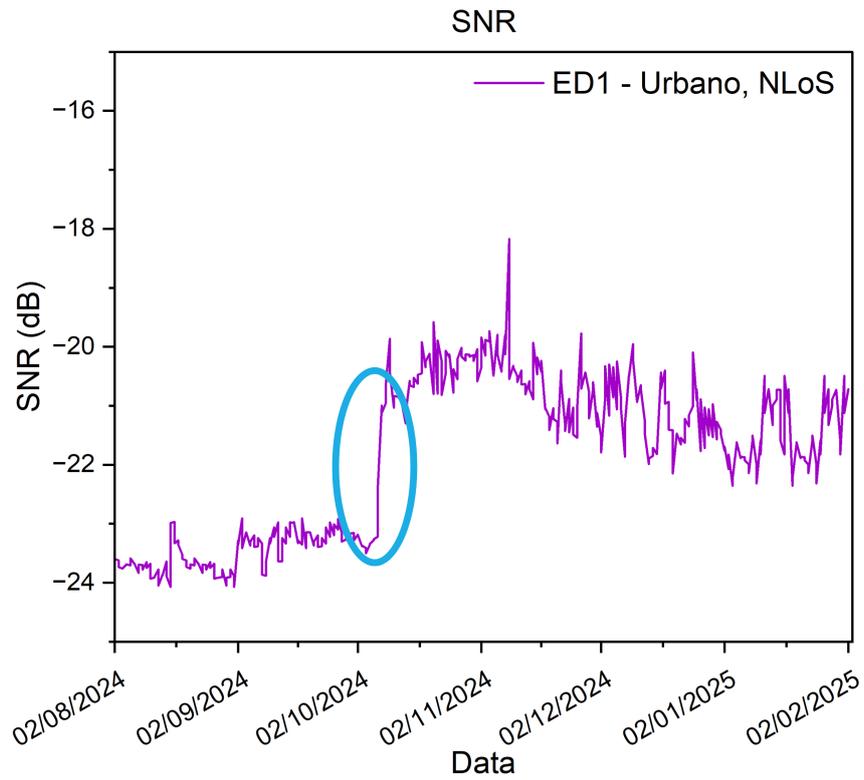


Figura 24: Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED1 - Urbano, NLoS (Rua Tatuí).

O SNR para o ED 2 é ilustrado na Figura 25. Os testes resultaram em um SNR médio de **-8,13 dB**, o melhor de todos os cenários.

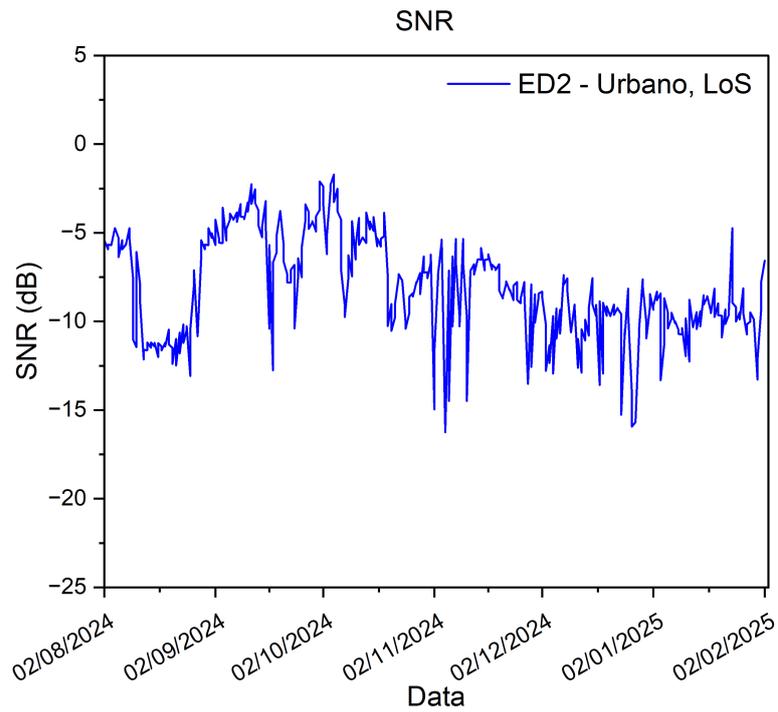


Figura 25: Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED2 - Urbano, LoS (B. Santos Dumont).

A Figura 26 exibe os dados do ED 3. Em um cenário NLoS urbano e industrial, o SNR médio foi de **-13,14 dB**.

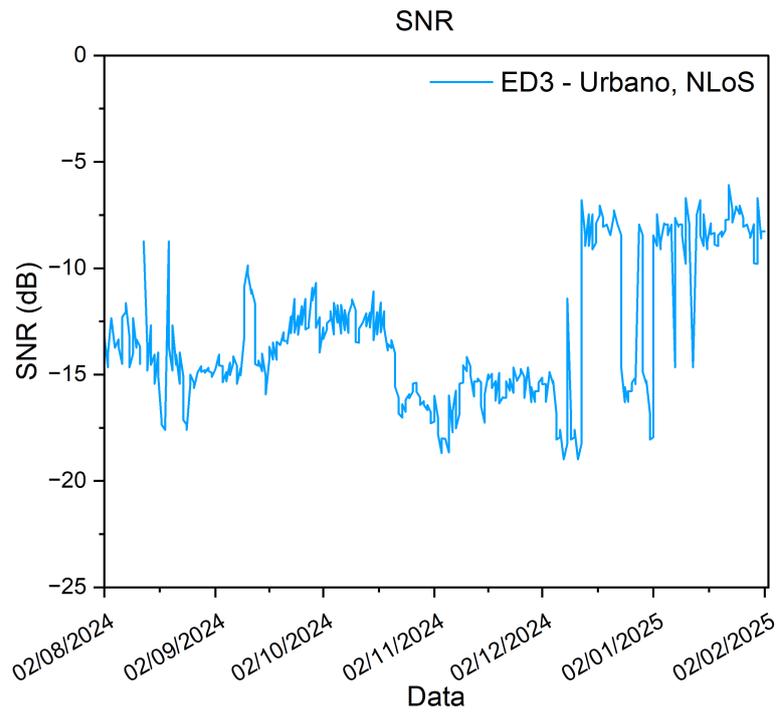


Figura 26: Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED3 - Urbano, NLoS (Distrito Industrial).

O desempenho do ED 4 em ambiente rural é apresentado na Figura 27. Com a antena de 2 dBi, o SNR médio foi de **-16,28 dB**. O círculo azul novamente destaca a troca pela antena de 6.5 dBi, que melhorou a qualidade do enlace, elevando o SNR médio para **-10,62 dB**.

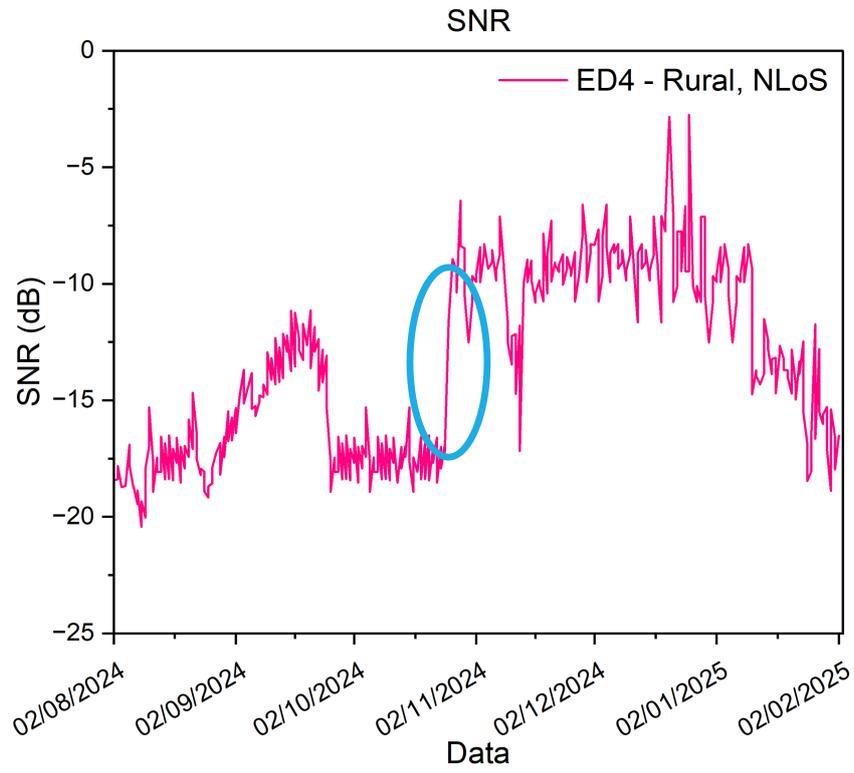


Figura 27: Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED4 - Rural, NLoS (Serra dos Toledos 1).

A Figura 28 mostra os dados do ED 5, sendo o SNR médio de **-16,08 dB**.

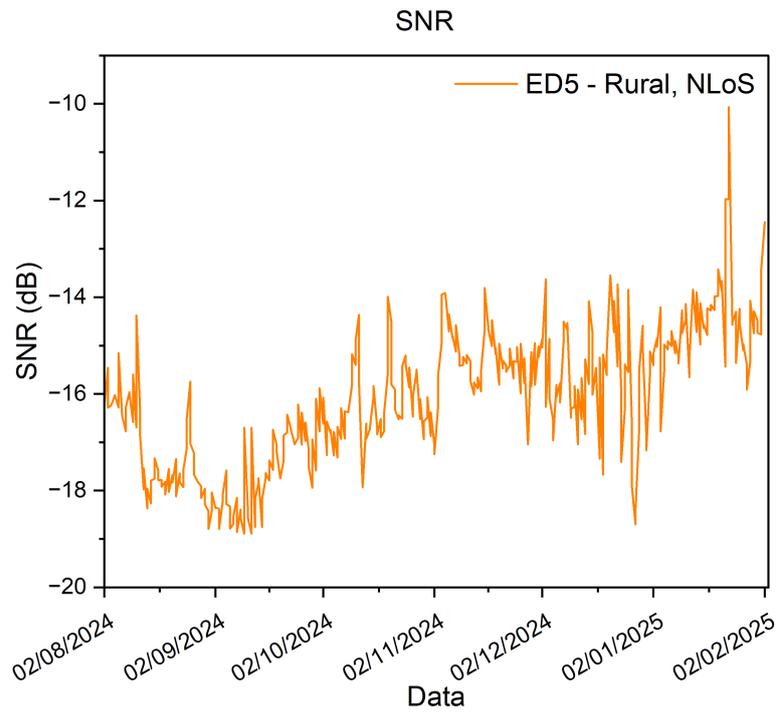


Figura 28: Gráfico de SNR ao longo do tempo para o ED5 - Rural, NLoS (Serra dos Toledos 2).

Por fim, a Figura 29 apresenta a sobreposição dos gráficos de SNR para todos os dispositivos, permitindo uma análise comparativa da qualidade do sinal em cada um dos cenários testados.

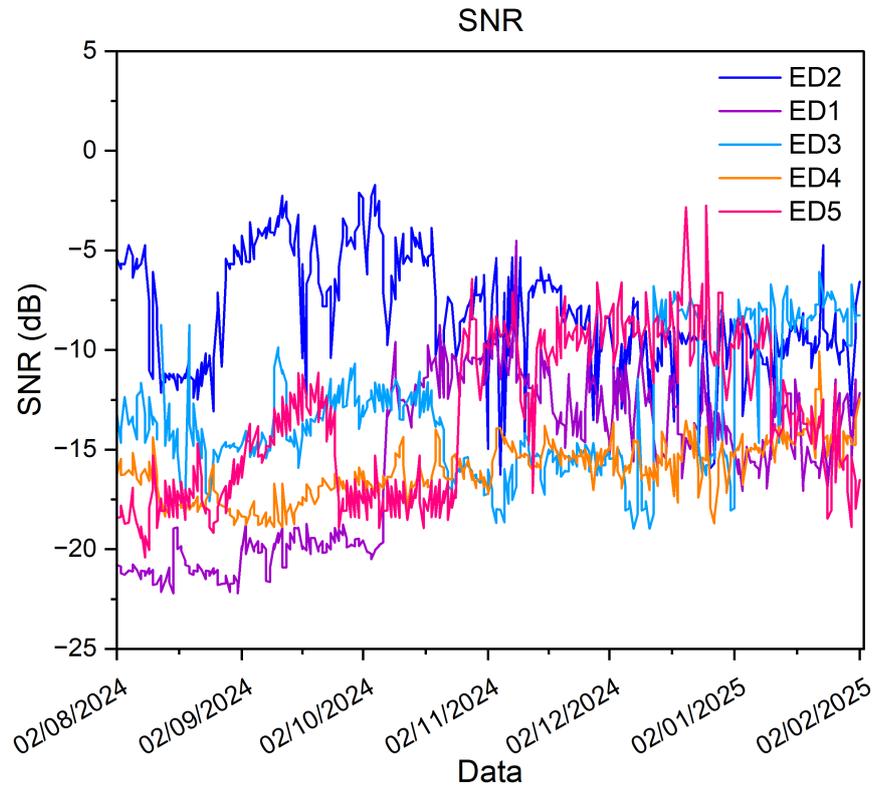


Figura 29: Gráficos de SNR ao longo do tempo para os cinco dispositivos de teste em diferentes cenários.

#### 4.4.2.1 Impacto da Visada Direta (LoS)

A importância da visada direta na qualidade do sinal é ainda mais evidente na análise do SNR. Comparando novamente o **ED 2** (Urbano, LoS) com o **ED 3** (Urbano, NLoS), observa-se uma diferença drástica. Enquanto o ED 2 registrou um SNR médio de **-8,13 dB**, o ED 3, obstruído por relevo, apresentou um SNR médio de **-13,14 dB**. A diferença de mais de 5 dB na qualidade do sinal evidencia que a visada direta não apenas aumenta a potência (RSSI), mas reduz o impacto de interferências e do multipercurso, resultando em um sinal mais "limpo" e fácil de ser decodificado pelo *gateway*.

#### 4.4.2.2 Influência do Ambiente

A análise comparativa entre o **ED 1** (Urbano, NLoS) e o **ED 4** (Rural, NLoS) com a antena de 2 dBi revela um resultado significativo. O ED 1, operando em um ambiente urbano ruidoso e em uma posição topográfica desfavorável, registrou o pior SNR de todos os dispositivos com comunicação estabelecida: **-20,39 dB**. Este valor está no limite extremo da capacidade de decodificação do LoRa com SF12. Por outro lado, o ED 4,

mesmo estando quase quatro vezes mais distante, mas em um ambiente rural com menor interferência eletromagnética, obteve um SNR médio de **-16,28 dB**, uma qualidade de sinal consideravelmente superior. Isso sugere que o "ruído de fundo de escala" (*noise floor*) em ambientes urbanos é significativamente mais alto, degradando a qualidade do sinal de forma mais acentuada que a própria atenuação pela distância em um ambiente rural.

#### 4.4.2.3 Influência do Ganho da Antena

A alteração da antena de 2 dBi para 6.5 dBi teve um impacto ainda mais evidente na qualidade do sinal (SNR) do que na sua potência (RSSI). No **ED 1** (Urbano, NLoS), a troca da antena elevou o SNR de um crítico **-20,39 dB** para um muito mais robusto **-12,87 dB**, um ganho massivo de **7,5 dB**. No **ED 4** (Rural, NLoS), o ganho também foi significativo, com o SNR passando de **-16,28 dB** para **-10,62 dB**, uma melhoria de **5,6 dB**. Essa melhoria substancial no SNR evidencia que uma antena de maior ganho não apenas capta um sinal mais forte, mas também ajuda a rejeitar ruído e interferência de outras direções.

### 4.4.3 Análise de Confiabilidade do Enlace (Perda de Pacotes)

A métrica final para avaliar o desempenho do sistema é a Taxa de Perda de Pacotes (PLR), que quantifica a confiabilidade de cada enlace de comunicação. Para calcular a PLR, foi contabilizado o número total de pacotes que cada dispositivo deveria ter enviado durante o período de teste (descontando os períodos de manutenção em que os dispositivos foram desligados por motivos alheios à transmissão). Esse número esperado foi então comparado com o número de pacotes efetivamente recebidos e registrados no banco de dados, resultando na porcentagem de perda para cada cenário. A análise dos dados de PLR consolida as análises feitas para RSSI e SNR, revelando o impacto prático de cada fator na comunicação.

#### 4.4.3.1 Impacto da Visada Direta

O **ED 2** apresentou uma PLR de **4,39%**, a menor de todos os cenários. Este resultado, alinhado ao seu alto SNR (-8,13 dB), demonstra que um caminho livre para o sinal é o fator mais determinante para uma comunicação de alta confiabilidade. Em comparação, o **ED 3**, a uma distância similar mas sem visada, teve uma perda de **19,63%**, mais de quatro vezes superior.

#### 4.4.3.2 Impacto do Ganho da Antena

A troca da antena de 2 dBi por uma de 6.5 dBi provou ser uma estratégia de redução de perdas extremamente eficaz. No **ED 1**, a PLR foi reduzida de **62,72%**, valor fora dos limites teóricos, para **13,32%**, transformando um enlace disfuncional em um enlace viável. O mesmo ocorreu no **ED 4**, onde a perda caiu de **29,86%** para **6,02%**.

#### 4.4.3.3 Influência do Ambiente e da Altitude

É notável que o **ED 5** (Rural, 7,06 km, -16,08 dB SNR) apresentou uma PLR de **18,50%**, equivalente a do **ED 3** (Urbano/Ind., 3,40 km, -13,14 dB SNR), que registrou **19,63%** de perda, mesmo estando na metade da distância e com um SNR médio superior. Isso sugere que o ambiente do ED 3, próximo a indústrias, pode sofrer com rajadas de interferência não capturadas no SNR médio, que corrompem pacotes e aumentam a PLR.

#### 4.4.3.4 Limiar de Operação e Falha de Comunicação

O **ED 1**, com a antena de 2 dBi, operou com um SNR médio de -20,39 dB e teve uma perda de pacotes superior a 60%, confirmando que operar no limiar teórico da tecnologia é impraticável. Por outro lado, o **ED 6** apresentou uma perda de **100%**, mesmo com a melhor configuração de rádio (SF12) e uma antena de alto ganho. A combinação de longa distância (15,45 km) e obstruções severas de relevo resultou na atenuação completa de sinal.

### 4.4.4 Correlação entre os resultados de RSSI, SNR e PLR

A Tabela 7 consolida os resultados de PLR, correlacionando-os com os valores médios de RSSI e SNR de cada teste para permitir uma análise integrada.

Dispositivos (Localização)	Antena	RSSI Médio (dBm)	SNR Médio (dB)	Perda de Pacotes (%)
ED 1 (Urbano, NLoS - Rua Tatuí)	2	-109,84	-20,39	62,72
	6,5	-108,512	-12,87	13,32
ED 2 (Urbano, LoS - Bairro Santos Dumont)	2	-105,804	-8,13	4,39
ED 3 (Urbano, NLoS - Distrito Industrial)	2	-108,176	-13,14	19,63
ED 4 (Rural, NLoS - Serra dos Toledos 1)	2	-110,7	-16,28	29,86
	6,5	-107,683	-10,62	6,02
ED 5 (Rural, NLoS - Serra dos Toledos 2)	2	-108,665	-16,08	18,5
ED 6 (Rural, NLoS - Bairro dos Borges)	2 e 6,5	N/A	N/A	100

Tabela 7: Resumo dos Resultados de Desempenho por Cenário de Teste.

A tabela introduz as cores verde e vermelho para identificar quais métricas se enquadraram nos seus respectivos limites teóricos. Os critérios adotados foram: um **RSSI** entre -80dBm e -120 dBm, um **SNR** entre +10dB e -20 dB (limite para SF12) e uma **PLR** idealmente inferior a 10%. É importante ressaltar que, embora a literatura aponte 10% de PLR como um bom indicador de confiabilidade, para determinadas aplicações de monitoramento onde a perda esporádica de pacotes é tolerável, um limiar de até 20% pode ser considerado operacional. Sendo assim, pode-se concluir que o ED 2 obteve o melhor desempenho, seguido do ED 4, quando acoplada a antena de 6,5dbi. Considerando 20% de PLR aceitável, o ED 1 com antena de 6,5dbi, ED 3 e ED 5 também se enquadram como um enlace bem sucedido.

Portanto, a análise dos dados dos cenários de teste evidencia o impacto prático de cada variável na comunicação LoRaWAN. A presença de uma linha de visada direta (LoS) provou ser o fator mais determinante para a alta confiabilidade do enlace, resultando na menor taxa de perda de pacotes de todos os cenários (4,39% em ED 2). A Tabela 8 consolida e ilustra essa conclusão de forma clara, ao comparar diretamente o desempenho do ED 2 (LoS) e do ED 3 (NLoS).

Dispositivos (Localização)	Ambiente	Visada (LoS)	Distância (km)	Altitude (m)	Antenas Testadas (dBi)	RSSI Médio (dBm)	SNR Médio (dB)	PLR (%)
ED 2 (Bairro Santos Dumont)	Urbano	Sim	3,13	838	2	-105,804	-8,13	4,39
ED 3 (Distrito Industrial)	Urbano	Não	3,4	838	2	-108,176	-13,4	19,63

Tabela 8: Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 2 e ED 3

Por outro lado, em cenários sem visada (NLoS), a utilização de uma antena de maior ganho (6,5 dBi) foi a estratégia mais eficaz para mitigar perdas, chegando a transformar um enlace anteriormente disfuncional de ED 1, com 62,72% de perda, em um canal viável com 13,32% de perda. A Tabela 9 ilustra o desempenho do ED 1 e do ED 4 com ambas as antenas, demonstrando a eficácia da solução.

Dispositivos (Localização)	Ambiente	Visada (LoS)	Distância (km)	Altitude (m)	Antenas Testadas (dBi)	RSSI Médio (dBm)	SNR Médio (dB)	PLR (%)
ED 1 (Rua Tatuí)	Urbano	Não	1,45	848	2	-109,84	-20,39	62,72
					6,5	-108,512	-12,87	13,32
ED 4 (Serra dos Toledos 1)	Rural	Não	5,6	1028	2	-110,7	-16,28	29,86
					6,5	-107,683	-10,62	6,02

Tabela 9: Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 1 e ED 4

Adicionalmente, os resultados sugerem que uma altitude elevada e um ambiente rural com menor interferência podem compensar distâncias maiores, o que também pode ser comprovado pela análise comparativa entre o desempenho de ED 1 e ED 4. Por fim, os testes estabeleceram um limite prático para o sistema, demonstrando que a combinação de longa distância (15,45 km) e múltiplas obstruções de relevo inviabilizou completamente a comunicação, mesmo com parâmetros de rádio otimizados para máximo alcance.

## 4.5 Cenário de Teste Complementar: Desempenho em Ambiente Interno com Alta Densidade

Para além dos testes de longo alcance, foi conduzido um ensaio experimental complementar com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema em um cenário de curta distância, porém com alta densidade de dispositivos, o que também configura um ambiente não propício à propagação. Foram coletados dados referentes à perda de pacotes para complementar as análises e compreender como as colisões de pacotes e a ausência de visada em um ambiente fechado impactam a confiabilidade da comunicação.

### 4.5.1 Configuração do Cenário de Teste

O teste foi realizado em um supermercado em Bragança Paulista-SP no período de 30 de março a 30 de abril de 2025. O ambiente foi escolhido por já possuir uma rede LoRaWAN em operação, com aproximadamente 90 outros dispositivos transmitindo na mesma faixa de frequência, caracterizando um canal de rádio potencialmente congestionado.

A infraestrutura de teste consistiu no mesmo *gateway* RAK com antena de 6.5 dBi e em três dispositivos finais **Marlin Long Range v1.0.0** (denominados ED8, ED9 e ED10), todos equipados com antena de 2 dBi. A disposição dos equipamentos, ilustrada na Figura 30, foi a seguinte:

- **Gateway:** Posicionado em um ponto central do salão de vendas.
- **ED8 e ED9:** Instalados lado a lado no salão de vendas, a 12 metros de distância do *gateway*, com visada direta (LoS).
- **ED10:** Instalado no corredor das câmaras frias, a 15 metros do *gateway*, porém sem visada direta (NLoS) devido às paredes e estruturas metálicas.

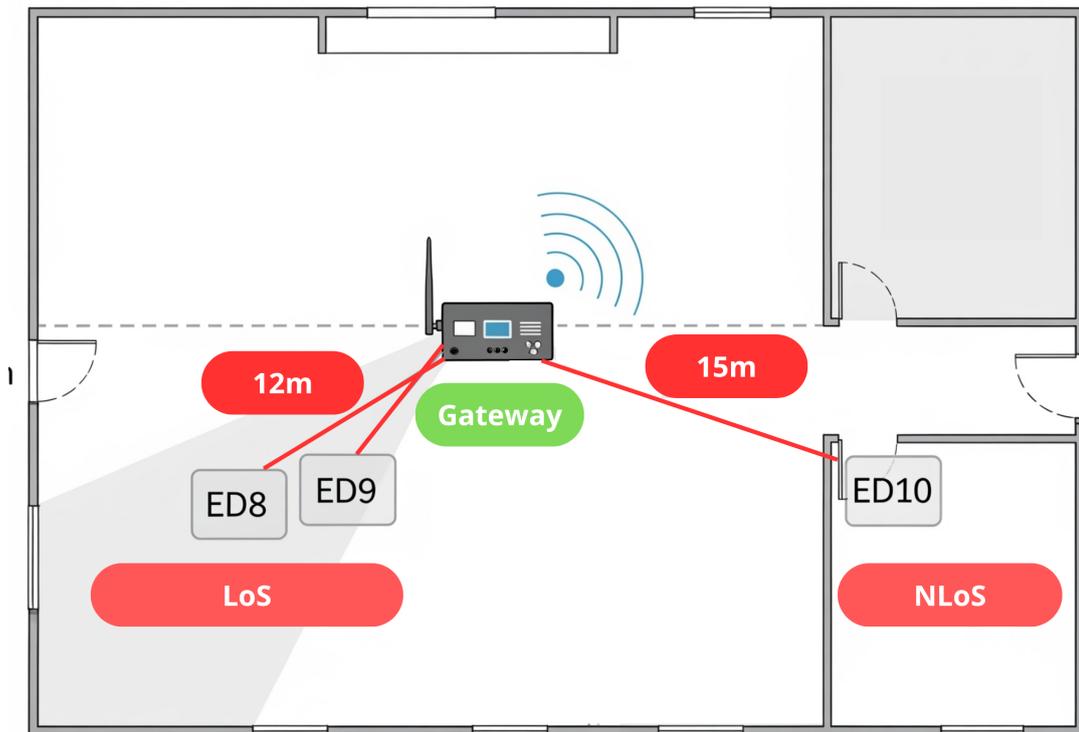


Figura 30: Disposição do *gateway* e dos dispositivos de teste no ambiente interno.

#### 4.5.2 Análise de Confiabilidade e Impacto de Colisões

A Tabela 10 resume os resultados de Perda de Pacotes (PLR) obtidos neste cenário. A análise destes dados revela o forte impacto da interferência e da ausência de visada, mesmo a curtas distâncias.

Dispositivos	Localização	Visada (LoS)	Distância (m)	Antenas Testadas (dBi)	PLR (%)
ED 8	Salão de Vendas	Sim	12	2	0,21
ED 9	Salão de Vendas	Sim	12	2	7,64
ED 10	Corredor das câmaras frias	Não	15	2	44,68

Tabela 10: Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 8, ED 9 e ED 10.

A partir dos dados coletados, foi possível analisar o impacto da visada direta, agora na perspectiva de curtas distâncias, bem como as colisões em ambiente denso, comparando com o primeiro cenário.

#### 4.5.2.1 Impacto da Visada Direta em Curta Distância

Pela análise da PLR, percebe-se que a diferença entre o **ED8** e o **ED10** é bastante expressiva. Mesmo com uma diferença de apenas 3 metros na distância, a obstrução física no caminho do ED10 elevou a perda de pacotes para **44,68%**. Isso comprova que, mesmo em curtas distâncias, a ausência de visada direta é um fator preponderante para a degradação do sinal, tornando a comunicação altamente instável.

#### 4.5.2.2 Efeito de Colisões em Ambiente Denso

A comparação entre o **ED8** e o **ED9** mostra que, mesmo instalados lado a lado, nas mesmas condições, o ED8 apresentou uma performance excelente (PLR de 0,21%), enquanto o ED9 teve uma perda de **7,64%**. A explicação mais provável para essa discrepância é o efeito de colisões de pacotes. Como o acesso ao meio é aleatório, os instantes de transmissão do ED9 podem ter coincidido com mais frequência com as transmissões dos outros 90 dispositivos da rede, fazendo que seus pacotes não fossem decodificados pelo *gateway*.

#### 4.5.2.3 Comparativo com Cenários de Longo Alcance

Ao contrastar estes resultados com os dos testes em ambiente urbano com visada direta, a importância de cada variável fica evidente. O **ED2** (Urbano, LoS), a 3,13 km, obteve uma PLR de apenas 4,39%, muito inferior à do **ED10** (NLoS) a apenas 15 metros, como mostra a Tabela 11. Isso demonstra que a obstrução do sinal pode ser um fator de degradação mais severo do que quilômetros de distância em um caminho livre. Evidencia-se que, embora a distância seja um fator fundamental para a atenuação do sinal, a confiabilidade de um enlace LoRaWAN é determinada por um balanço complexo entre a potência do sinal, a qualidade do canal (visada) e o nível de congestionamento da rede (colisões).

Dispositivos	Localização	Visada (LoS)	Distância	Antenas Testadas (dBi)	PLR (%)
ED 2	Bairro Santos Dumont (externo)	Sim	3,13 <i>km</i>	2	4,39
ED 10	Corredor das câmaras frias (interno)	Não	15 <i>m</i>	2	44,68

Tabela 11: Resumo dos Resultados de Desempenho de ED 2 e ED 10.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este Capítulo consolida os resultados e as contribuições desta dissertação. Inicialmente, são apresentadas as conclusões gerais sobre o desempenho do sistema de comunicação LoRaWAN desenvolvido, correlacionando os resultados experimentais com a fundamentação teórica. Em seguida, são discutidas as limitações observadas durante a pesquisa e por fim, são traçadas considerações sobre tecnologias alternativas e apresentadas sugestões para a continuidade e expansão desta linha de pesquisa.

As principais contribuições deste trabalho, que respondem diretamente aos objetivos específicos propostos, contemplam o desenvolvimento de hardware do módulo transmissor LoRaWAN "Marlin Long Range v1.0.0", envolvendo a elaboração dos requisitos de projeto, o circuito eletrônico, layout de PCB e validação prática.

Outra contribuição consiste na implementação e validação de uma arquitetura de comunicação completa, desde o dispositivo final em campo até a camada de aplicação para visualização de dados. Para a correta operação do sistema como um todo, foi necessária a construção de conhecimento multidisciplinar que envolve desde a configuração do *gateway* até a implantação da infraestrutura de rede e da camada de aplicação na nuvem.

Por fim, outra contribuição científica, além do desenvolvimento do hardware dos EDs, consiste na geração de um conjunto de dados empíricos que oferece subsídios técnicos para o planejamento de redes IoT, quantificando o impacto de variáveis em cenários reais e variados no desempenho da tecnologia LoRaWAN.

## 5.1 Conclusões Gerais sobre o Desempenho do Sistema

O objetivo central desta dissertação foi projetar, desenvolver e validar experimentalmente um sistema de comunicação LoRaWAN para avaliar os limites da tecnologia em cenários com desafios de propagação. Para isso, foi desenvolvido o módulo transmissor **Marlin Long Range v1.0.0** e testado em seis cenários distintos, com distâncias de até 15,45 km.

Os resultados empíricos mostraram concordância com os fundamentos teóricos da tecnologia LoRaWAN. A atenuação do sinal, observada através do RSSI, validou os princípios de propagação em função da distância e da severidade das obstruções. Foi comprovado que a presença de uma linha de visada direta (LoS), como no caso do ED-2, é o fator mais determinante para a alta qualidade do enlace, superando até mesmo o efeito de quilômetros de distância adicional em cenários sem visada (NLoS).

A principal vantagem da modulação LoRa, sua capacidade de decodificar pacotes com baixa Relação Sinal-Ruído (SNR), foi empiricamente confirmada. O limite teórico para SF12, que se aproxima de -20 dB, foi validado pelo ED-1, que operou com um SNR médio de -20,39 dB. A forte correlação observada entre um SNR mais elevado e uma menor Taxa de Perda de Pacotes (PLR) também reforça a validade do SNR como principal preditor da confiabilidade do enlace na prática.

Conclui-se, portanto, que o módulo transmissor desenvolvido e o sistema de transmissão LoRa implementado atendeu aos objetivos propostos e gerou um conjunto de dados valioso que quantifica o desempenho do LoRaWAN em cenários reais e complexos. Os testes validaram os limiares de operação descritos na literatura e permitiram quantificar o impacto de fatores como visada, altitude e ganho de antena, oferecendo subsídios técnicos para o planejamento de futuras redes IoT no Brasil.

## 5.2 Limitações Observadas

Apesar do sucesso na validação do sistema, algumas limitações foram observadas e estão descritas a seguir.

Primeiramente, os testes foram conduzidos com parâmetros fixos (SF12, BW 125 kHz) para focar na análise de alcance máximo. Isso, no entanto, não explora a capacidade dinâmica da rede. Sendo assim, para aplicações que não exijam alcance extremo ou

até mesmo para compreensão de novas estratégias, pode-se realizar a variação desses parâmetros, bem como a ativação do mecanismo de ADR para otimizar a vida útil da bateria e a capacidade da rede.

Outra limitação identificada consistiu na falha de comunicação com o ED 6 (15,45 km), o que demonstra que, mesmo com parâmetros otimizados, existiu um limite de alcance quando há múltiplas obstruções de relevo. Isso indica que, para distâncias dessa ordem em cenários NLoS, a implementação de *gateways* adicionais ou repetidores é necessária.

Por fim, com relação ao impacto da antena, a análise comprovou que a substituição da antena de 2 dBi por um modelo omnidirecional de 6.5 dBi é uma estratégia de alta eficácia para melhorar RSSI, SNR e principalmente, PLR. Contudo, a escolha por uma antena externa omnidirecional representa apenas uma das possibilidades de projeto, o que demonstra que explorar novos tipos de antenas, como as direcionais e as de microfitas integradas poderiam trazer conclusões interessantes e otimizar o sistema desenvolvido.

### 5.3 Sugestões para Continuidade da Pesquisa

Com base nos resultados e limitações identificados, uma série de linhas de pesquisa futuras pode aprofundar o conhecimento gerado nesta dissertação. Uma continuação do trabalho seria a expansão dos cenários experimentais para abranger uma análise ainda mais rica sobre os impactos dos parâmetros da tecnologia LoRa. Isso incluiria a avaliação sistemática de diferentes Fatores de Espalhamento (SF7-SF11), larguras de banda e taxas de codificação, além da ativação do mecanismo de ADR, para caracterizar o trade-off entre alcance, taxa de dados e confiabilidade.

Adicionalmente, a exploração de novos ambientes de teste traria conclusões valiosas sobre a robustez do sistema em condições ainda mais extremas, como por exemplo, testes em ambientes marítimos, áreas de vegetação densa e temperaturas muito baixas, que permitiriam quantificar o impacto de diferentes tipos de obstrução, multipercurso e interferência, além de validar a robustez do hardware.

Avançando para um escopo de maior inovação, sugere-se a investigação de técnicas de Rádio Sensoriamento (*Radio Sensing*). Esta abordagem utilizaria o próprio sinal LoRa não apenas para transmitir dados, mas também para caracterizar o ambiente, gerando o desenvolvimento de algoritmos de otimização da camada física baseados em Inteligência Artificial, que se adaptariam dinamicamente a um conjunto complexo de variáveis para maximizar a robustez do enlace.

Outra frente de pesquisa consiste em explorar outras topologias de rede, como redes *mesh* para aumentar a resiliência e a cobertura em ambientes onde a comunicação direta com um *gateway* não é garantida. Por fim, a validação de enlaces diretos com satélites de baixa órbita (LEO), integrando o módulo desenvolvido a um transceptor satelital seria mais uma linha de pesquisa possível.

# REFERÊNCIAS

- [1] A. Al-Fuqaha et al. “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications”. Em: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17.4 (2015), pp. 2347–2376. DOI: [10.1109/COMST.2015.2444095](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095).
- [2] A. Zanella et al. “Internet of Things for Smart Cities”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 1.1 (2014), pp. 22–32. DOI: [10.1109/JIOT.2014.2306328](https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328).
- [3] F. Adelantado et al. “Understanding the limits of LoRaWAN”. Em: *IEEE Communications Magazine* 55.9 (2017), pp. 34–40. DOI: [10.1109/MCOM.2017.1600613](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613).
- [4] U. Raza, P. Kulkarni e M. Sooriyabandara. “Low Power Wide Area Networks: An Overview”. Em: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.2 (2017), pp. 855–873. DOI: [10.1109/COMST.2017.2652320](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320).
- [5] G. Ferrari, M. Martalò e V. Reggiani. “Design and performance evaluation of LoRa networks with non-uniform traffic”. Em: *Computer Communications* 114 (2017), pp. 1–13. DOI: [10.1016/j.comcom.2017.10.006](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.10.006).
- [6] X. Zhu e C. Jiang. “Integrated Satellite-Terrestrial Networks Toward 6G: Architectures, Applications, and Challenges.” Em: *IEEE Internet of Things Journal* 9.1 (2022), pp. 437–461. DOI: [10.1109/jiot.2021.3126825](https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3126825).
- [7] Chadwick Barklay et al. “Concept for a Cascaded Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator”. Em: *2020 IEEE Aerospace Conference*. 2020, pp. 1–7. DOI: [10.1109/AERO47225.2020.9172602](https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172602).
- [8] Vitória Jacomelli BARATELLA, Caio Tácito Borges da COSTA e Danilo Henrique SPADOTI. “Aplicação da tecnologia LoRaWAN como solução para transmissão de dados de sensor de nível e temperatura”. Português. Em: *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2022)*. Brasil: SBrT, 2022. DOI: [10.14209/sbrt.2022.1570824888](https://doi.org/10.14209/sbrt.2022.1570824888). URL: <https://doi.org/10.14209/sbrt.2022.1570824888>.

- [9] Vitória Jacomelli BARATELLA et al. “Ultra low power water level transmission system using LoRaWAN technology”. Inglês. Em: *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2023)*. Brasil: SBrT, 2023. DOI: <[10.14209/sbrt.2023.1570917497](https://doi.org/10.14209/sbrt.2023.1570917497)>. URL: <<https://doi.org/10.14209/sbrt.2023.1570917497>>.
- [10] Vitória Jacomelli BARATELLA et al. “Assessing the Impact of Jamming Attacks on LoRaWAN Devices: An Experimental Study”. Português. Em: *Anais da Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM 2024)*. Acesso em: 12 jun. 2025. Natal, RN, Brasil: Even3, 2024, pp. 1–5. URL: <<https://www.even3.com.br/anais/encom2024/891430-assessing-the-impact-of-jamming-attacks-on-lorawan-devices--an-experimental-study>>.
- [11] Anderson Guerra de ALMEIDA et al. “Low-Cost Configurable Data Acquisition Module Design For Real-Time Monitoring”. Português. Em: *Anais da Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM 2024)*. Acesso em: 12 jun. 2025. Natal, RN, Brasil: Even3, 2024, pp. 1–6. URL: <<https://www.even3.com.br/anais/encom2024/891350-low-cost-configurable-data-acquisition-module-design-for-real-time-monitoring/>>.
- [12] Caio Tácito Borges da COSTA et al. “A Cost-Effective LoRa Gateway for Low-Density IoT Applications”. Inglês. Em: *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2024)*. Brasil: SBrT, 2024. DOI: <[10.14209/sbrt.2024.1571036837](https://doi.org/10.14209/sbrt.2024.1571036837)>. URL: <<https://doi.org/10.14209/sbrt.2024.1571036837>>.
- [13] Vitória Jacomelli BARATELLA et al. “Monitoramento hidrometeorológico em tempo real na bacia do Alto Rio Verde: uma solução inovadora para prevenção de inundações”. Em: *Anais do I Congresso Nacional da Associação Brasileira de Engenharia Hídrica*. Acesso em: 12 jun. 2025. Itajubá, MG: Even3, 2024. ISBN: 978-65-272-0988-1. URL: <<https://www.even3.com.br/anais/i-congresso-nacional-da-associacao-brasileira-de-engenharia-hidrica/955770-monitoramento-hidrometeorologico-em-tempo-real-na-bacia-do-alto-rio-verde--uma-solucao-inovadora-para-prevencao-d>>.
- [14] Kais Mekki et al. “Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT”. Em: *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. 2018, pp. 197–202. DOI: <[10.1109/PERCOMW.2018.8480255](https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255)>.

- [15] Markos Fragkopoulou et al. “Experimental Assessment of Common Crucial Factors That Affect LoRaWAN Performance on Suburban and Rural Area Deployments”. Em: *Sensors* 23.3 (2023), p. 1316. DOI: [10.3390/s23031316](https://doi.org/10.3390/s23031316). URL: <https://doi.org/10.3390/s23031316>.
- [16] D. R. Thinesh et al. “IIoT based Electrical Asset Management System: A LoRaWAN Deployment Study at Shipyard”. Em: *2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA)*. 2022, pp. 1–6. DOI: [10.1109/ICPEA53519.2022.9744652](https://doi.org/10.1109/ICPEA53519.2022.9744652).
- [17] Massimo Ballerini et al. “Experimental Evaluation on NB-IoT and LoRaWAN for Industrial and IoT Applications”. Em: *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Vol. 1. 2019, pp. 1729–1732. DOI: [10.1109/INDIN41052.2019.8972066](https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972066).
- [18] B. Abdallah et al. “Improving the Reliability of Long-Range Communication against Interference for Non-Line-of-Sight Conditions in Industrial Internet of Things Applications”. Em: *Applied Sciences* 14.2 (2024), p. 868. DOI: [10.3390/app14020868](https://doi.org/10.3390/app14020868). URL: <https://doi.org/10.3390/app14020868>.
- [19] A. Aksoy, Ö. Yıldız e S.E. Karlık. “Comparative Analysis of End Device and Field Test Device Measurements for RSSI, SNR and SF Performance Parameters in an Indoor LoRaWAN Network”. Em: *Wireless Personal Communications* 134 (2024), pp. 339–360. DOI: [10.1007/s11277-024-10911-z](https://doi.org/10.1007/s11277-024-10911-z). URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-024-10911-z>.
- [20] S.-Y. Wang et al. “Comparing the Performance of NB-IoT, LTE Cat-M1, Sigfox, and LoRa for IoT End Devices Moving at High Speeds in the Air”. Em: *Journal of Signal Processing Systems* 94.1(2021), pp. 81–99. DOI: [10.1007/s11265-021-01660-4](https://doi.org/10.1007/s11265-021-01660-4). URL: <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01660-4>.
- [21] Haider A. H. Alobaidy et al. “Real-World Evaluation of Power Consumption and Performance of NB-IoT in Malaysia”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 9.13 (2022), pp. 11614–11632. DOI: [10.1109/JIOT.2021.3131160](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3131160).
- [22] Gustavo Costa Gomes de Melo. “Desenvolvimento de sistema IoT de baixo custo para monitoramento integrado de variáveis climáticas e de geração fotovoltaica”. Orientadores: Prof. Dr. Erick Andrade Barboza e Prof. Dr. Davi Bibiano Brito. Dissertação (Mestrado em Informática). Maceió, AL: Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Computação, abril de 2021. URL: <https://repositorio.ufal.br/handle/riufal/12345>.

- [23] J. Logeshwaran et al. “Smart Load-Based Resource Optimization Model to Enhance the Performance of Device-to-Device Communication in 5G-WPAN”. Em: *Electronics* 12.8 (2023), p. 1821. DOI: <[10.3390/electronics12081821](https://doi.org/10.3390/electronics12081821)>. URL: <<https://doi.org/10.3390/electronics12081821>>.
- [24] P.-H. Juan e S.-W. Su. “EMC Hybrid Loop/Monopole LDS Antenna With Three-Sided Ground Walls for 2.4/5/6 GHz WLAN Operation”. Em: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 22.9 (2023), pp. 2200–2204. DOI: <[10.1109/lawp.2023.3281457](https://doi.org/10.1109/lawp.2023.3281457)>. URL: <<https://doi.org/10.1109/lawp.2023.3281457>>.
- [25] S. Shao et al. “IEEE 802.11ax Meet Edge Computing: AP Seamless Handover for Multi-Service Communications in Industrial WLAN”. Em: *IEEE Transactions on Network and Service Management* 20.3 (2023), pp. 3396–3412. DOI: <[10.1109/tnsm.2023.3239404](https://doi.org/10.1109/tnsm.2023.3239404)>. URL: <<https://doi.org/10.1109/tnsm.2023.3239404>>.
- [26] K. Mekki et al. “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”. Em: *ICT Express* 5.1 (2019), pp. 1–7. DOI: <[10.1016/j.icte.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005)>.
- [27] J. S. Alkasassbeh et al. “Advancements in Wireless Communication Technology: A Comprehensive Analysis of 4G to 7G Systems”. Em: *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications* 15.3 (set. de 2024), pp. 73–91. DOI: <[10.58346/jowua.2024.i3.006](https://doi.org/10.58346/jowua.2024.i3.006)>.
- [28] João SOUZA e Pedro SILVA. *Um estudo dissertativo-expositivo sobre as tecnologias de comunicação sem fio NFC, LORA e RG no contexto de IoT*. Português. <[https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/9092/1/JoaoPS\\_ART.pdf](https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/9092/1/JoaoPS_ART.pdf)>. Repositório UFERSA. Acesso em: 17 mai. 2025. 2023.
- [29] M. Ayoub Kamal et al. “Requirements, Deployments, and Challenges of LoRa Technology: A Survey”. Em: *Computational Intelligence and Neuroscience* 2023.1 (2023), pp. 1–15. DOI: <[10.1155/2023/5183062](https://doi.org/10.1155/2023/5183062)>. URL: <<https://doi.org/10.1155/2023/5183062>>.
- [30] Ryota Kumada e Koichi Adachi. “Interference Cancellation for Coexistence of LoRaWAN With Wireless Power Transfer”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 10.15 (2023), pp. 13109–13122. DOI: <[10.1109/jiot.2023.3259472](https://doi.org/10.1109/jiot.2023.3259472)>. URL: <<https://doi.org/10.1109/jiot.2023.3259472>>.

- [31] Shuai Tong, Zhenqiang Xu e Jiliang Wang. “CoLoRa: Enabling Multi-Packet Reception in LoRa”. Em: *Proceedings of IEEE INFOCOM 2020*. Jul. de 2020. DOI: [10.1109/infocom41043.2020.9155509](https://doi.org/10.1109/infocom41043.2020.9155509). URL: <https://doi.org/10.1109/infocom41043.2020.9155509>.
- [32] MAM Almuhaaya et al. “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions”. Em: *Electronics* 11.1 (2022), p. 164. DOI: [10.3390/electronics11010164](https://doi.org/10.3390/electronics11010164).
- [33] HAH Alobaidy et al. “Real-World Evaluation of Power Consumption and Performance of NB-IoT in Malaysia”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 9.13 (2022), pp. 11614–11632. DOI: [10.1109/jiot.2021.3131160](https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3131160).
- [34] RK Singh et al. “Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application”. Em: *Sensors* 20.17 (2020), p. 4794. DOI: [10.3390/s20174794](https://doi.org/10.3390/s20174794).
- [35] MI Hossain e JI Markendahl. “Comparison of LPWAN Technologies: Cost Structure and Scalability”. Em: *Wireless Personal Communications* 121.1 (2021), pp. 887–903. DOI: [10.1007/s11277-021-08664-0](https://doi.org/10.1007/s11277-021-08664-0).
- [36] M. Hanif e H. H. Nguyen. “Slope-Shift Keying LoRa-Based Modulation”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 8.1 (2020), pp. 211–221. DOI: [10.1109/jiot.2020.3004318](https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3004318). URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3004318>.
- [37] Mohamed Jouhari et al. “A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges”. Em: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 25.3 (2023), pp. 1841–1876. DOI: [10.1109/comst.2023.3274934](https://doi.org/10.1109/comst.2023.3274934). URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2023.3274934>.
- [38] Hakki Soy. “An adaptive spreading factor allocation scheme for mobile LoRa networks: Blind ADR with distributed TDMA scheduling”. Em: *Simulation Modelling Practice and Theory* 125 (2023), p. 102755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102755>.
- [39] Luca Leonardi et al. “Industrial LoRa: A Novel Medium Access Strategy for LoRa in Industry 4.0 Applications”. Em: *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018, pp. 4141–4146. DOI: [10.1109/IECON.2018.8591568](https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591568).
- [40] Rachel Kufakunesu, Gerhard P. Hancke e Adnan M. Abu-Mahfouz. “A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges”. Em: *Sensors* 20.18 (2020). DOI: [10.3390/s20185044](https://doi.org/10.3390/s20185044).

- [41] Natalia Chinchilla-Romero et al. “Collision Avoidance Resource Allocation for LoRaWAN”. Em: *Sensors* 21.4 (2021). DOI: [10.3390/s21041218](https://doi.org/10.3390/s21041218).
- [42] G. A. Halls. “HIPERLAN: the High Performance Radio Local Area Network standard”. Em: *Electronics & Communication Engineering Journal* 6.6 (1994), pp. 289–296. DOI: [10.1049/ecej:19940607](https://doi.org/10.1049/ecej:19940607).
- [43] D. Zorbas et al. “Optimal Data Collection Time in LoRa Networks-A Time-Slotted Approach”. Em: *Sensors* 21.4 (2021), p. 1193. DOI: [10.3390/s21041193](https://doi.org/10.3390/s21041193).
- [44] F. Turcinovic et al. “Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication”. Em: *2020 International Symposium ELMAR (ELMAR)*. Set. de 2020. DOI: [10.1109/elmar49956.2020.9219028](https://doi.org/10.1109/elmar49956.2020.9219028).
- [45] Seungku Kim, Heonkook Lee e Sungho Jeon. “An Adaptive Spreading Factor Selection Scheme for a Single Channel LoRa Modem”. Em: *Sensors* 20.4 (2020). DOI: [10.3390/s20041008](https://doi.org/10.3390/s20041008).
- [46] Hakkı Soy. “An adaptive spreading factor allocation scheme for mobile LoRa networks: Blind ADR with distributed TDMA scheduling”. Em: *Simulation Modelling Practice and Theory* 125 (2023), p. 102755. ISSN: 1569-190X. DOI: [10.1016/j.simpat.2023.102755](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102755). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X23000321>.
- [47] M. J. Faber et al. “A Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology”. Em: *IEEE Sensors Journal* 20.16 (ago. de 2020), pp. 9480–9489. DOI: [10.1109/jsen.2020.2987776](https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2987776).
- [48] LoRa Alliance. *LoRaWAN 1.0.3 Specification*. Technical Specification. Version 1.0.3. LoRa Alliance, Inc., jul. de 2018.
- [49] Q. Chen e J. Wang. “AlignTrack: Push the Limit of LoRa Collision Decoding”. Em: *2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP)*. Nov. de 2021. DOI: [10.1109/icnp52444.2021.9651985](https://doi.org/10.1109/icnp52444.2021.9651985).
- [50] Arshad Farhad et al. “Enhanced LoRaWAN Adaptive Data Rate for Mobile Internet of Things Devices”. Em: *Sensors* 20.22 (2020), p. 6466. DOI: [10.3390/s20226466](https://doi.org/10.3390/s20226466). URL: <https://doi.org/10.3390/s20226466>.
- [51] Rachel Kufakunesu, Gerhard P. Hancke e Adnan M. Abu-Mahfouz. “A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges”. Em: *Sensors* 20.18 (2020), p. 5044. DOI: [10.3390/s20185044](https://doi.org/10.3390/s20185044). URL: <https://doi.org/10.3390/s20185044>.

- [52] N. Bnilam et al. “LoRay: AoA Estimation System for Long Range Communication Networks”. Em: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20.3 (nov. de 2020), pp. 2005–2018. DOI: [10.1109/twc.2020.3038565](https://doi.org/10.1109/twc.2020.3038565).
- [53] Y. Li, J. Yang e J. Wang. “DyLoRa: Towards Energy Efficient Dynamic LoRa Transmission Control”. Em: *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*. Jul. de 2020, pp. 2312–2320. DOI: [10.1109/infocom41043.2020.9155407](https://doi.org/10.1109/infocom41043.2020.9155407).
- [54] The Things Network. *LoRaWAN - RSSI and SNR*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>. Acessado em: 25 de junho de 2025. 2024.
- [55] S. A. Bhat et al. “Correlating the Ambient Conditions and Performance Indicators of the LoRaWAN via Surrogate Gaussian Process-Based Bidirectional LSTM Stacked Autoencoder”. Em: *IEEE Transactions on Network and Service Management* 20.3 (2023), pp. 3413–3427. DOI: [10.1109/tnsm.2023.3238013](https://doi.org/10.1109/tnsm.2023.3238013).
- [56] M. Anjum et al. “RSSI Fingerprinting-Based Localization Using Machine Learning in LoRa Networks”. Em: *IEEE Internet of Things Magazine* 3.4 (2020), pp. 53–59. DOI: [10.1109/iotm.0001.2000019](https://doi.org/10.1109/iotm.0001.2000019).
- [57] W. Ingabire et al. “LoRaWAN Based Indoor Localization Using Random Neural Networks”. Em: *Information* 13.6 (2022), p. 303. DOI: [10.3390/info13060303](https://doi.org/10.3390/info13060303).
- [58] K. Lin e T. Hao. “Experimental Link Quality Analysis for LoRa-Based Wireless Underground Sensor Networks”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 8.8 (2021), pp. 6565–6577. DOI: [10.1109/jiot.2020.3044647](https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3044647).
- [59] G. Di Renzone et al. “LoRaWAN Underground to Aboveground Data Transmission Performances for Different Soil Compositions”. Em: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (jan. de 2021), pp. 1–13. DOI: [10.1109/tim.2021.3061820](https://doi.org/10.1109/tim.2021.3061820).
- [60] K. Adachi et al. “Packet-Level Index Modulation for LoRaWAN”. Em: *IEEE Access* 9 (jan. de 2021), pp. 12601–12610. DOI: [10.1109/access.2021.3051933](https://doi.org/10.1109/access.2021.3051933).
- [61] Z. Wang et al. “Online Concurrent Transmissions at LoRa Gateway”. Em: *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*. Jul. de 2020, pp. 2331–2340. DOI: [10.1109/infocom41043.2020.9155433](https://doi.org/10.1109/infocom41043.2020.9155433).

- [62] Frank Loh, Tobias Hofffeld e Noah Mehling. “Towards LoRaWAN without Data Loss: Studying the Performance of Different Channel Access Approaches”. Em: *Sensors* 22.2 (2022), p. 691. DOI: <[10.3390/s22020691](https://doi.org/10.3390/s22020691)>. URL: <<https://doi.org/10.3390/s22020691>>.
- [63] Lorenzo Parri et al. “Offshore LoRaWAN Networking: Transmission Performances Analysis Under Different Environmental Conditions”. Em: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2020), pp. 1–10. DOI: <[10.1109/tim.2020.3031193](https://doi.org/10.1109/tim.2020.3031193)>. URL: <<https://doi.org/10.1109/tim.2020.3031193>>.
- [64] Daniele Baldo et al. “A Multi-Layer LoRaWAN Infrastructure for Smart Waste Management”. Em: *Sensors* 21.8 (2021), p. 2600. DOI: <[10.3390/s21082600](https://doi.org/10.3390/s21082600)>. URL: <<https://doi.org/10.3390/s21082600>>.
- [65] LoRa Alliance. *A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN*. Rel. técn. White Paper, Version 1.0. LoRa Alliance, Technical Marketing Workgroup, 2015.
- [66] E. Testi e E. Paolini. “Packet Collision Probability of Direct-to-Satellite IoT Systems”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 12.2 (jan. de 2025), pp. 1843–1855. DOI: <[10.1109/jiot.2024.3470113](https://doi.org/10.1109/jiot.2024.3470113)>.
- [67] A. Povalac et al. “Exploring LoRaWAN Traffic: In-Depth Analysis of IoT Network Communications.” Em: *Sensors* 23.17 (ago. de 2023), p. 7333. DOI: <[10.3390/s23177333](https://doi.org/10.3390/s23177333)>.
- [68] V. Bonilla, B. Campoverde e S. G. Yoo. “A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications.” Em: *Sensors* 23.20 (out. de 2023), p. 8440. DOI: <[10.3390/s23208440](https://doi.org/10.3390/s23208440)>.
- [69] L. Aarif, M. Tabaa e H. Hachimi. “Performance Evaluation of LoRa Communications in Harsh Industrial Environments”. Em: *Journal of Sensor and Actuator Networks* 12.6 (nov. de 2023), p. 80. DOI: <[10.3390/jsan12060080](https://doi.org/10.3390/jsan12060080)>.