

PM

Propagação de Sinal em Meios Urbanos para Implementação de Sistemas LoRa

PROJETO DE MESTRADO

Rodrigo Luís Abreu Gonçalves

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

outubro | 2024

Propagação de Sinal em Meios Urbanos para Implementação de Sistemas LoRa

PROJETO DE MESTRADO

Rodrigo Luís Abreu Gonçalves

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTAÇÃO

Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo



Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

**Propagação de sinal em meios urbanos para implementação de sistemas
LoRa**

Dissertação submetida à Universidade da Madeira para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Telecomunicações

Orientador: Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Rodrigo Luís Abreu Gonçalves

2024

Resumo

No contexto atual, onde a comunicação eficiente e de longo alcance é cada vez mais crucial para diversas aplicações, este trabalho de Mestrado teve como foco o estudo da tecnologia LoRa (*Long Range*) para a transmissão de dados em ambientes urbanos. A tecnologia LoRa, devido ao seu baixo consumo de energia e capacidade de comunicação a longas distâncias, é amplamente utilizada em aplicações de Internet das Coisas (IoT), incluindo monitorização ambiental, gestão de infraestruturas urbanas e agricultura inteligente.

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de comunicação baseado em dispositivos LoRa para analisar a propagação de sinais em diferentes cenários urbanos, como áreas com linha de vista direta, ruas estreitas, e ambientes com obstáculos como edifícios altos. Foram medidos parâmetros essenciais para a qualidade da comunicação, como o Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) e a Relação Sinal-Ruído (SNR). A metodologia adotada incluiu a realização de testes de campo para avaliar o impacto de variáveis ambientais e estruturais na qualidade da transmissão.

Além disso, o trabalho contemplou a comparação dos dados empíricos obtidos com modelos teóricos e empíricos de propagação de sinal, permitindo uma análise aprofundada sobre o comportamento da atenuação do sinal em ambientes urbanos para o sistema LoRa. Os resultados obtidos contribuíram para um melhor entendimento das limitações e potencialidades da tecnologia LoRa, fornecendo diretrizes para a sua implementação otimizada em cenários urbanos complexos.

Assim, o trabalho realizado reforça a relevância da tecnologia LoRa como uma solução viável e eficiente para a comunicação em redes de sensores urbanos, proporcionando dados úteis para futuras implementações e pesquisas nesta área.

Palavras chave

LoRa; propagação de sinais; ambientes urbanos; obstáculos urbanos; testes de campo; modelos de propagação; redes de sensores

Abstract

In the current context, where efficient and long-range communication is increasingly crucial for various applications, this Master's thesis focused on studying LoRa (Long Range) technology for data transmission in urban environments. LoRa technology, due to its low energy consumption and long distance communication capability, is widely used in Internet of Things (IoT) applications, including environmental monitoring, urban infrastructure management, and smart agriculture.

In this work, a communication system based on LoRa devices was developed to analyze signal propagation in different urban scenarios, such as direct line-of-sight areas, narrow streets, and environments with obstacles like tall buildings. Essential parameters for communication quality, such as the Received Signal Strength Indicator (RSSI) and the Signal-to-Noise Ratio (SNR), were measured. The adopted methodology included field tests to evaluate the impact of environmental and structural variables on transmission quality.

Moreover, the work included a comparison of the empirical data obtained with theoretical and empirical signal propagation models, allowing for an in-depth analysis of signal attenuation behavior in urban environments for the LoRa system. The results contributed to a better understanding of the limitations and potentialities of LoRa technology, providing guidelines for its optimized implementation in complex urban scenarios.

Thus, the work carried out reinforces the relevance of LoRa technology as a viable and efficient solution for communication in urban sensor networks, providing useful data for future implementations and research in this area.

Keywords

LoRa; signal propagation; urban environments; urban obstacles; field tests; propagation models; sensor networks

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor Joaquim Azevedo, meu orientador, pela orientação sábia e dedicada ao longo de todo o percurso, proporcionando sempre os melhores conselhos e incentivo para seguir em frente. A sua experiência e paciência foram essenciais para a conclusão deste projeto.

Um especial agradecimento ao Engenheiro Filipe Santos, cuja assistência técnica foi fundamental para superar diversos desafios que surgiram durante a execução deste trabalho.

Agradeço também aos meus pais, pelo constante apoio incondicional e motivação em todos os momentos.

À minha namorada, por ter estado sempre ao meu lado, recolhendo exaustivamente dados comigo em todas as fases mais desafiantes deste estudo, oferecendo sempre o seu apoio e carinho, que foram inestimáveis.

Agradeço ainda à ANACOM, pelo seu apoio ao permitir o uso de um *duty cycle* mais adequado para a recolha dos dados, o que facilitou o processo e permitiu uma poupança considerável de tempo.

Por fim, expresso a minha gratidão a todos os docentes que contribuíram para a minha formação ao longo dos anos, assim como a toda a comunidade académica, que, de diferentes formas, foi fundamental para o meu crescimento e desenvolvimento pessoal e profissional.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura do documento	3
2	Estado da arte	5
2.1	Lora.....	5
2.1.1	Parâmetros de qualidade	5
2.1.2	Parâmetros do Sistema	7
2.2	Modelos de Propagação	12
2.2.1	Propagação em espaço livre	13
2.2.2	Egli	13
2.2.3	Okumura-Hata	14
2.2.4	Walfisch-Bertoni	14
2.2.5	COST 231 Hata	15
2.2.6	COST 231 Walfisch-Ikegami	16
2.2.7	Lee	17
2.2.8	Log-Distance	17
2.2.9	SUI	18
2.2.10	3GPP	19
2.2.11	Ericsson	21
2.2.12	ECC-33	22
2.3	Análise Comparativa de Estudos Relevantes.....	22
2.3.1	Comparação de desempenho de modelos de propagação em redes LoRa	23
2.3.2	Avaliação da Propagação de Sinal LoRa em Ambientes Diversificados	23
2.3.3	Perda de percurso no meio urbano em redes LoRa: um estudo empírico	24
2.3.4	Modelos de atenuação e cobertura para LoRa em cenários urbanos	25
2.3.5	Modelação de canais para redes IoT em cidades inteligentes	26
2.3.6	Otimização e aplicação do modelo Lee em redes LoRa urbanas	27
2.3.7	Estudo experimental da propagação de sinal LoRa em ambientes urbanos densamente construídos	29
3	Desenvolvimento.....	31
3.1	Sistema de medição	31
3.1.1	Componentes do sistema	31
3.1.2	Sistema	33
3.2	Verificação da potência de transmissão	38

3.3	Calibração do RSSI.....	39
3.4	Ensaio preliminares.....	42
3.4.1	Medições em linha de vista com antenas à mesma altura.....	42
3.4.2	Medições e impacto do diagrama de radiação na atenuação do sinal	43
3.4.3	Medições sem linha de vista para análise do método da ponta de faca	45
3.5	Locais de Teste e características do terreno	48
3.5.1	Locais de medição.....	48
3.5.2	Terreno plano com estação móvel entre edifícios	50
3.5.3	Terreno inclinado	51
3.5.4	Terreno Inclinado e depois plano.....	51
4	Resultados	53
4.1	Medições em linha de vista com antenas à mesma altura.....	53
4.2	Medições e impacto do diagrama de radiação na atenuação do sinal.....	54
4.3	Medições sem linha de vista para análise do método da ponta de faca	55
4.4	Medições em radiais	56
4.5	Medições com antenas no solo	62
4.6	Pontos escolhidos para a análise.....	64
4.6.1	Análise dos parâmetros influentes na atenuação do sinal.....	65
4.6.2	Análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e o ângulo68	
4.6.3	Análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e a largura da rua	70
4.6.4	Análise da atenuação do sinal relacionando altura dos edifícios com largura da rua e ângulo	72
4.7	Comparação com modelos teóricos	78
4.8	Análise de resultados	84
5	Conclusão e trabalhos futuros	89
5.1	Conclusões.....	89
5.2	Trabalhos futuros.....	90
6	Referências.....	91
Anexos.....		94
Anexo A	– Modelo 3D da caixa.....	94
Anexo B	– Código estação móvel.....	94
Anexo C	– Código gateway	97
Anexo D	– Tabelas com dados registados.....	99
Anexo E	– Fotografias dos locais de recolha de dados	100
Anexo F	– Tabelas dos parâmetros utilizados.....	101

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Comparação do RSSI e ESP relativamente ao SNR [3].	7
Figura 2.2 - Amostra emitida por um transmissor LoRa [7].	8
Figura 2.3 - Comparação entre modelos e dados obtidos [25].	23
Figura 2.4 - Relação entre distância e perda de percurso para diferentes modelos [26].	24
Figura 2.5 - Diferença entre dados medidos e previstos [27].	25
Figura 2.6 - Perda de propagação em terra [esquerda] e perda de propagação em água [direita] [29].	26
Figura 2.7 - Comparação de modelos de perda de propagação com amostras [28].	27
Figura 2.8 - Comparação entre o modelo Lee e amostras [30].	28
Figura 2.9 - Perda de percurso ajustada [esquerda] e Perda de percurso otimizada [direita] [31].	29
Figura 3.1 - Adafruit Feather 32u4 with LoRa Radio Module [32].	32
Figura 3.2 - Modelo 3D da caixa.	32
Figura 3.3 - Esquema da gateway e da estação móvel.	33
Figura 3.4 - Fluxograma da estação móvel.	34
Figura 3.5 - Definição dos parâmetros do rádio.	35
Figura 3.6 - Criação e envio do pacote.	35
Figura 3.7 - Receção e processamento da resposta.	36
Figura 3.8 - Fluxograma da gateway.	37
Figura 3.9 - Receção e envio do pacote.	37
Figura 3.10 - Estrutura do pacote.	38
Figura 3.11 - Esquema para medição da potência.	38
Figura 3.12 - Esquemas utilizado para a calibração.	39
Figura 3.13 - Verificação da precisão do ESP.	40
Figura 3.14 - Esquema utilizado para a avaliação do RSSI.	41
Figura 3.15 - Comparação de dados obtidos com teóricos.	41
Figura 3.16 - Ambiente em que foram recolhidos os dados.	42
Figura 3.17 - Pontos para os quais foram recolhidos dados no estacionamento.	43
Figura 3.18 - Pontos para o teste da afetação do diagrama de radiação.	44
Figura 3.19 - Desenho para o cálculo dos ângulos de incidência.	44
Figura 3.20 - Pontos para o teste do terraço sem linha de vista.	46
Figura 3.21 - Geometria para o obstáculo em ponta de faca.	47
Figura 3.22 - Locais possíveis para recolha de dados.	49
Figura 3.23 - Cenário com terreno plano.	51
Figura 3.24 - Cenário com terreno inclinado.	51
Figura 3.25 - Cenário com terreno inclinado e depois plano.	52
Figura 4.1 - Atenuação do sinal em linha de vista no estacionamento.	53
Figura 4.2 - Atenuação do sinal com vista a afetação do diagrama de radiação.	54
Figura 4.3 - Dados para comparação com o método da ponta de faca.	55
Figura 4.4 - Pontos escolhidos para a primeira análise.	56
Figura 4.5 - Valores de perda de percurso registados.	56
Figura 4.6 - Relação entre SNR e potencia para uplink e downlink.	57
Figura 4.7 - Radias para estudo inicial.	58
Figura 4.8 - Obstáculo para o modelo da ponta de faca.	59
Figura 4.9 - Dados recolhidos para o radial 1.	60
Figura 4.10 - Dados recolhidos para o radial 2.	61
Figura 4.11 - Comparação entre os dois radiais.	62
Figura 4.12 - Pontos com antenas no solo.	63
Figura 4.13 - radial 1 antenas no solo.	63
Figura 4.14 - radial 2 antenas no solo.	64

Figura 4.15 - Pontos escolhidos para a recolha de dados.....	65
Figura 4.16 - Dados segmentados por altura de edificios (0 – 20 m).....	66
Figura 4.17 - Dados segmentados por altura de edificios (20 – 25 m).....	67
Figura 4.18 - atenuação do sinal considerando a altura dos edificios e o ângulo da rua (0 – 15 m).	68
Figura 4.19 - atenuação do sinal considerando a altura dos edificios e o ângulo da rua (15 – 25 m).	69
Figura 4.20 - atenuação do sinal considerando a altura dos edificios e a largura da rua (0 – 10 m).	70
Figura 4.21 - atenuação do sinal considerando a altura dos edificios e a largura da rua (10 - 25 m).	71
Figura 4.22 - Atenuação para edificio com altura entre 0 e 5 metros.	72
Figura 4.23 - Atenuação para edificio com altura entre 5 e 10 metros.	74
Figura 4.24 - Atenuação para edificio com altura entre 10 e 15 metros.	75
Figura 4.25 - Atenuação para edificio com altura entre 15 e 20 metros.	76
Figura 4.26 - Atenuação para edificio com altura entre 20 e 25 metros.	77
Figura 4.27 - Flutuação do sinal de todos os pontos recolhidos.....	78
Figura 4.28 - Atenuação média dos dados recolhidos.....	79
Figura 4.29 - Dados obtidos e modelos teóricos.	80
Figura 4.30 - Curvas com os pontos escolhidos. (a) grupo 1. (b) grupo 2.	85
Figura 4.31 - Parâmetro β em função de α para diferentes modelos [35].....	87

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Sensibilidade do recetor LoRa Semtech SX1276 [7].....	9
Tabela 2.2 - Tabela de Desempenho LoRa por Fator de Espalhamento.	12
Tabela 2.3 - Parâmetros n e P_0 [17].....	17
Tabela 2.4 - Valores dos parâmetros do SUI para diferentes tipos de terreno [21].....	19
Tabela 2.5 - Parâmetros do Modelo de Propagação 3GPP.....	21
Tabela 3.1 - Valores registados no analisador de espectros.....	39
Tabela 3.2 - Parâmetros do sistema de medição para teste no estacionamento.....	43
Tabela 3.3 - Distâncias e alturas em metros para os respetivos pontos de medição	48
Tabela 4.1 - Dados de RMSE para modelos teóricos.....	80
Tabela 4.2 - Valores RMSE para cada tipo de terreno organizado por altura de edifícios.	81
Tabela 4.3 - Valores RMSE para cada tipo de terreno organizado por largura de rua.....	82
Tabela 4.4 - Valores RMSE para cada tipo de terreno organizado por ângulo.....	83
Tabela 4.5 - Valores de α e β retirados das equações.....	86
Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados nos modelos teóricos.	86
Tabela 4.7 - Valores RMSE calculados (C-231-WI, Lee, SUI-C, Ericsson, ECC-33).	86
Tabela 4.8 - Valores RMSE calculados (Log-distance, B-W, 3GPP, C-231-WI, Egli, O-H).....	87

Lista de Acrónimos

LoRa - Long Range

RSSI - Received Signal Strength Indicator

SNR - Signal-to-Noise Ratio

CR - Coding Rate

SF - Spreading Factor

FEC - Forward Error Correction

ESP – Effective Signal Power

RMSE - Root Mean Square Error

SUI - Stanford University Interim

BW - Bandwidth

LoRaWAN - Long Range Wide Area Network

IoT - Internet of Things

PER - Packet Error Rate

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

ECC - European Communications Committee

ISM - Industrial, Scientific and Medical Radio Band

1 Introdução

A revolução tecnológica proporcionada pela Internet das Coisas tem transformado a maneira como interagimos com o mundo, permitindo a recolha, processamento e transmissão de dados em larga escala para apoiar decisões inteligentes. Estas redes IoT estão a ser implementadas em diversos domínios, como cidades inteligentes, agricultura de precisão, monitorização ambiental e gestão de infraestruturas, colocando novos desafios às tecnologias de comunicação sem fios.

Uma das principais tecnologias que emergiram para responder a estes desafios é o LoRa, uma solução que combina longo alcance, baixo consumo energético e operação em bandas não licenciadas, posicionando-se como uma escolha viável para redes de sensores distribuídas. O LoRa é especialmente adequado para cenários em que a eficiência energética e o baixo custo são essenciais, sendo capaz de operar com baterias durante vários anos e oferecer cobertura em áreas extensas, mesmo em ambientes urbanos densos.

No entanto, a propagação de sinais LoRa em ambientes urbanos apresenta desafios técnicos significativos. A presença de obstáculos como edifícios, características das ruas e o dinamismo inerente a cenários urbanos afeta diretamente a qualidade da comunicação, através de fenómenos como a atenuação, a difração, as reflexões e o desvanecimento de pequena escala. Além disso, os modelos teóricos de propagação atualmente disponíveis não capturam adequadamente estas complexidades, devido às simplificações assumidas, limitando a sua aplicabilidade prática. Assim, compreender e caracterizar o comportamento do sinal LoRa em cenários urbanos reais é uma tarefa essencial para melhorar a sua implementação e otimizar o desempenho das redes IoT.

Esta investigação surge, portanto, para abordar estas lacunas, combinando medições empíricas rigorosas em cenários urbanos com a análise e validação de modelos teóricos. Ao integrar variáveis do ambiente, este trabalho contribui para a construção de um conhecimento mais aprofundado sobre os fatores que condicionam a propagação do sinal LoRa em ambientes urbanos.

1.1 Motivação

O avanço tecnológico e a crescente necessidade de recolha e análise de dados ambientais em larga escala têm impulsionado a procura por sistemas de comunicação eficazes e abrangentes. O sistema LoRa surge como uma inovação promissora nesse cenário, oferecendo um alcance de comunicação de até aproximadamente 20 km. Esta vasta zona de cobertura, aliada ao baixo consumo energético, torna o LoRa não apenas uma ferramenta eficiente, mas também sustentável. Num mundo cada vez mais urbanizado, a capacidade de monitorizar vastas áreas metropolitanas é essencial para garantir o desenvolvimento de cidades inteligentes. Aplicações como a monitorização da qualidade do ar, a gestão do fluxo de tráfego e a otimização do consumo de energia destacam-se como exemplos práticos da importância deste tipo de tecnologia.

Dentro deste contexto, o planeamento e a implementação adequados de redes LoRa tornam-se imprescindíveis. No entanto, a propagação de sinais de rádio, um dos pilares fundamentais para o sucesso de qualquer rede sem fios, apresenta desafios significativos, especialmente em ambientes urbanos e suburbanos. A densidade de edifícios, a geometria das ruas e a presença de obstáculos dinâmicos afetam consideravelmente a transmissão de dados, dificultando a previsão e a otimização do desempenho do sistema. Este problema é particularmente relevante no Funchal, onde a morfologia urbana oferece uma oportunidade única para estudar e avaliar a propagação de sinais LoRa em meios urbanos densos, permitindo uma implementação mais eficaz de redes dedicadas à recolha de dados críticos para o município.

A literatura atual sobre propagação de sinais LoRa aponta várias lacunas. Muitos estudos baseiam-se em medições realizadas em condições simplificadas, como áreas abertas ou cenários suburbanos, que não refletem a complexidade de ambientes urbanos. Além disso, os modelos teóricos de propagação amplamente utilizados, como Log-Distance, COST 231 e Walfisch-Ikegami, foram desenvolvidos com suposições que não capturam adequadamente as variáveis específicas dos ambientes urbanos. Estes modelos carecem de validação empírica robusta para prever com precisão o comportamento do sinal em cenários como o Funchal, onde a topografia montanhosa e a densidade urbana criam condições únicas.

Este trabalho surge, portanto, com o intuito de contribuir para um melhor entendimento das variáveis que afetam a propagação do sinal LoRa em ambientes urbanos. A realização de medições empíricas detalhadas e sistemáticas, aliada à validação e ao ajuste de modelos teóricos, permitirá responder a questões cruciais relacionadas com a atenuação do sinal. Assim, este trabalho não só contribuirá para a implementação de redes LoRa mais eficazes, mas também para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre propagação de sinais em ambientes desafiadores.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto é explorar e avaliar o sistema LoRa na transmissão e receção de dados em ambientes urbanos, com foco na análise da propagação do sinal e no desempenho em cenários reais. Para alcançar este objetivo, será feita, inicialmente, uma revisão aprofundada do estado da arte relacionado com os modelos de propagação de sinal, como Log-Distance, COST 231 e Walfisch-Ikegami, proporcionando uma base teórica sólida para as etapas subsequentes.

Posteriormente, será realizado o projeto, construção e otimização de um sistema de medição LoRa, garantindo a sua eficácia na recolha e envio de informações em diferentes condições urbanas. Este sistema será utilizado para recolher dados em cenários reais, com medições sistemáticas e controladas, analisando como variáveis do ambiente que influenciam a atenuação do sinal. Pretende-se, assim, identificar desafios específicos relacionados com a propagação do sinal em ambientes urbanos densos e propor possíveis soluções para melhorar a performance da tecnologia LoRa.

Após a recolha de dados, os resultados obtidos serão analisados e comparados com os modelos teóricos de propagação, procurando identificar validações e discrepâncias. Esta comparação permitirá não apenas avaliar a aplicabilidade dos modelos em cenários urbanos, mas também propor ajustes e novas perspectivas para o seu aprimoramento. Por fim, pretende-se fornecer diretrizes práticas e recomendações para a implementação de redes LoRa mais eficazes, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico e para o desenvolvimento de aplicações IoT mais robustas e otimizadas em ambientes urbanos.

1.3 Estrutura do documento

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos principais, cada um abordando diferentes aspetos da pesquisa sobre a propagação de sinal em ambientes urbanos para a implementação de sistemas LoRa. A estrutura foi concebida da seguinte forma:

No Capítulo 1 – Introdução, são apresentados o contexto e a motivação para a realização deste estudo, além dos objetivos específicos que guiaram a investigação.

O Capítulo 2 – Estado da Arte oferece uma revisão abrangente da literatura relacionada à tecnologia LoRa e aos modelos de propagação de sinal em ambientes urbanos. Este capítulo está subdividido em três secções principais: a primeira foca-se nos parâmetros de qualidade e desempenho da tecnologia LoRa; a segunda descreve os diversos modelos teóricos e empíricos de propagação de sinal, como os modelos Okumura-Hata, COST 231 Hata e Walfisch-Bertoni; e a terceira apresenta uma análise comparativa de estudos relevantes sobre a propagação de sinais em redes LoRaWAN.

No Capítulo 3 – Desenvolvimento, é descrito o processo de *design* e implementação do sistema de medição desenvolvido para o estudo. Este capítulo detalha os componentes do sistema, a metodologia utilizada para a calibração dos dispositivos e os ensaios preliminares realizados em diferentes cenários urbanos. Além disso, são descritas as características dos locais de teste e as especificidades dos terrenos onde foram conduzidos os ensaios de propagação de sinal.

O Capítulo 4 – Resultados apresenta os dados recolhidos durante os testes e discute a análise dos mesmos. Este capítulo inclui a comparação dos resultados obtidos com os modelos teóricos de propagação e explora as variações observadas em diferentes condições ambientais e estruturais. São também abordadas as implicações dos resultados para o entendimento das limitações e potencialidades da tecnologia LoRa em ambientes urbanos.

O Capítulo 5 – Conclusão sintetiza as principais conclusões do estudo, refletindo sobre os objetivos inicialmente propostos e o grau de sucesso alcançado. Este capítulo também sugere direções para pesquisas futuras, destacando áreas onde a tecnologia LoRa pode ser otimizada para uso em ambientes urbanos e sugerindo possíveis melhoramentos para estudos subsequentes.

2 Estado da arte

O estudo do estado da arte é uma etapa essencial para a compreensão e desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fios, como o LoRa, em ambientes urbanos. Este capítulo apresenta uma revisão abrangente dos principais conceitos relacionados com a tecnologia LoRa, incluindo os seus parâmetros de qualidade e as características do sistema. Além disso, são abordados diversos modelos de propagação de sinal, essenciais para prever o desempenho da comunicação em diferentes cenários urbanos.

Este trabalho dá continuidade a um projeto anterior intitulado "Recolha de Dados Meteorológicos Utilizando LoRa", onde foi explorado e detalhado o funcionamento do sistema LoRa, incluindo os seus princípios e componentes. Assim, neste estudo, não será novamente explicado o sistema LoRa ao detalhe, uma vez que essa análise já foi realizada de forma abrangente no trabalho anterior.

2.1 Lora

LoRa, significando *Long Range*, é uma tecnologia de modulação RF (rádio frequência) adaptada para baixo consumo e WAN (*wide-area networks*), o que o torna adequado para aplicações IoT (*Internet of Things*). Esta tecnologia foca-se em facilitar comunicações de longo alcance entre dispositivos, garantindo ao mesmo tempo um consumo mínimo de potência. Em zonas urbanas e rurais, o alcance do LoRa pode atingir de 5 quilómetros a 15 quilómetros, sendo influenciado por fatores como densidade de edifícios, interferência e barreiras físicas [1].

Uma das principais vantagens do LoRa é permitir que os dispositivos comuniquem entre si utilizando a banda de frequência de ISM (*Industrial, Scientific and Medical Radio Band*), não necessitando de licença para a sua operação, permitindo assim que, com mínimo investimento, seja possível cobrir uma vasta área geográfica. Na Europa a frequência de operação é 868 MHz, enquanto nos Estados Unidos a frequência utilizada é de 915 MHz. Sendo esta tecnologia de baixo consumo, é especialmente útil para que dispositivos alimentados com uma bateria possam funcionar durante longos períodos sem que seja necessário efetuar a troca da mesma. A capacidade de penetração do LoRa, mesmo através de edifícios e obstáculos, garante que este sistema possa ser usado em cenários *indoor* e *outdoor* [1].

Além da capacidade de transmissão de dados num sentido, o LoRa suporta também comunicações bidirecionais. Os dispositivos podem transmitir informação e receber comandos, promovendo interações dinâmicas entre dispositivos.

2.1.1 Parâmetros de qualidade

De modo a avaliar o desempenho e eficiência do sistema em diferentes contextos de funcionamento, é necessário conhecer parâmetros como o SNR (*Signal to Noise Ratio*), RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e ESP (*Effective Signal Power*). Em primeiro lugar será feita a análise detalhada do RSSI, que fornece uma medida da potência do sinal. Em seguida será abordado o SNR, esclarecendo a relação entre o sinal e o ruído

de fundo do sistema. Por fim o ESP, que corresponde ao valor da potência do sinal de interesse sem o ruído.

2.1.1.1 RSSI e SNR

O *Received Signal Strength Indicator* é uma métrica utilizada em comunicações sem fios para medir a intensidade do sinal recebido por um dispositivo, permitindo a avaliação da qualidade e confiabilidade da conexão. Um sinal forte de RSSI indica uma conexão segura, enquanto um sinal fraco de RSSI sugere um sinal mais fraco que pode estar mais suscetível a interferências.

O *Signal to Noise Ratio* representa a relação entre a potência de um sinal (informação útil) e a potência do ruído (sinais não desejados). O SNR é expresso em dB e pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (2.1)$$

Um valor elevado de SNR indica que a potência de sinal é muito superior à potência de ruído, enquanto um valor negativo de SNR indica que a potência de ruído é superior à potência do sinal.

2.1.1.2 ESP

O ESP é uma medida da potência de sinal recebida removendo a potência de ruído. A importância do ESP reside no seu impacto direto com o *Packet Delivery Rate* (PDR), um indicador chave de desempenho para a confiabilidade e eficiência da rede [3]. O ESP pode ser determinado por

$$ESP_{dBm} = RSSI_{dBm} + SNR_{dB} - 10 \log_{10}(1 + 10^{0,1SNR_{dB}}) \quad (2.2)$$

Para valores positivos de SNR, onde a potência do sinal é superior ao nível de ruído, o RSSI pode fornecer uma medida adequada da qualidade do sinal, no entanto, em situações que o SNR é negativo, o ESP fornece uma medida mais confiável da potência real do sinal que pode ser efetivamente usado para a comunicação.

Na Figura 2.1, está representada a comparação entre o RSSI e o ESP em função do SNR. Verifica-se que o RSSI satura para valores de SNR inferiores a 0 dB, mantendo-se praticamente constante nessas condições. Este comportamento evidencia uma limitação do RSSI como métrica de desempenho em ambientes com elevado ruído ou interferências. Em contraste, o ESP continua a variar com o SNR abaixo de 0 dB, indicando ser uma métrica mais fiável para avaliar a qualidade do sinal.

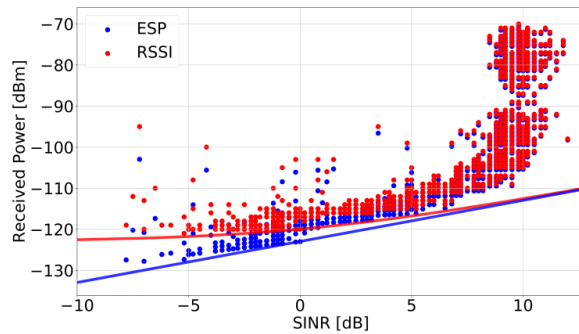


Figura 2.1 - Comparação do RSSI e ESP relativamente ao SINR [3].

2.1.2 Parâmetros do Sistema

O LoRa utiliza como técnica de modulação o *Chirp Spread Spectrum* (CSS), em que a frequência da portadora varia continuamente, melhorando assim a confiabilidade e o alcance da transmissão. Este *chirp* é depois combinado com um padrão de bits predefinido, produzindo um sinal espalhado no espectro com uma largura de banda maior que o sinal inicial. Adicionalmente o LoRa incorpora correção de erros através da adição de bits à trama, de modo a aumentar a robustez do sinal. Por fim, o *Spreading Factor* (SF) influencia a distância que o sinal consegue percorrer e também a capacidade de combater o ruído [1].

2.1.2.1 Fator de espalhamento

O *Spreading Factor* em LoRa é um parâmetro da modulação que determina como o sinal é "espalhado" no espectro de frequência. O processo de espalhamento é realizado multiplicando o sinal de dados com uma sequência de *chips* ou código de espalhamento. Aumentar a taxa de *chips* resulta em espalhar a energia do sinal por uma faixa mais ampla de frequências, permitindo que o recetor distinga um sinal mesmo com uma relação sinal-ruído (SNR) baixa. Quanto maior o SF, mais largo o espectro de frequência do sinal transmitido, sendo que o SF varia entre 7 e 12. Um SF maior permite que o sinal viaje maiores distâncias e seja recebido sem erros pelo recetor, no entanto isso reduz a taxa de bits do sinal e aumenta o tempo necessário para transmitir uma quantidade de dados, conhecido como *Time on Air* (TOA).

Os fatores de espalhamento de modulação LoRa são ortogonais entre si, significando que sinais modulados com diferentes SF podem ser transmitidos na mesma frequência ao mesmo tempo sem interferência mútua, o que é útil para o tráfego de dados simultâneo numa rede LoRa [5].

O parâmetro 2^{SF} no contexto da modulação LoRa refere-se ao número de *chirps* que compõem um símbolo LoRa e está diretamente relacionado com o SF. A modulação LoRa define de maneira não convencional o SF como o logaritmo de base 2 do número de *chirps* por símbolo. Isso significa que, para um dado SF, 2^{SF} será o número total de *chirps* únicos que formam um símbolo LoRa completo [7].

Cada símbolo LoRa é composto por 2^{SF} *chirps* que cobrem toda a largura de banda (BW). Um *chirp* é uma variação de frequência que começa numa frequência baixa e

aumenta até uma frequência mais alta dentro da largura de banda especificada, quando este atinge a frequência máxima, há uma "quebra" onde o *chirp* reinicia na frequência mínima. Esta quebra é o que codifica as informações, e com 2^{SF} *chirps* disponíveis, um símbolo pode codificar até SF bits de informação.

Quando o SF aumenta uma unidade, o intervalo de frequência de um *chirp* é dividido por dois, já que o dobro de *chirps* agora deve cobrir a mesma largura de banda. Isso, por sua vez, duplica a duração de um símbolo LoRa, porque cada *chirp* leva o dobro do tempo para ser transmitido. No entanto, isso não divide a taxa de bits por dois, pois cada símbolo agora transmite um bit a mais de informação. A figura 2.2 retrata um exemplo de uma transmissão LoRa em que a frequência varia ao longo do tempo.

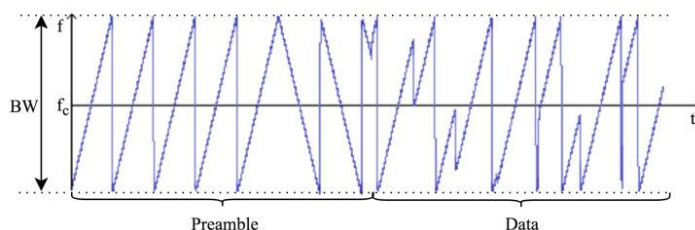


Figura 2.2 - Amostra emitida por um transmissor LoRa [7].

O gráfico da figura 2.2 ilustra a modulação utilizada pelo LoRa, baseada no *Chirp Spread Spectrum*. Esta técnica é fundamental para garantir comunicação estável em ambientes ruidosos, mesmo em condições de baixo nível de sinal. No gráfico, observa-se duas seções principais: o preâmbulo e os dados. O preâmbulo consiste numa sequência inicial de "*chirps*" que serve para sincronizar o receptor e ajustar os seus parâmetros antes da transmissão dos dados reais. Após esta sincronização, os dados são transmitidos, com cada "*chirp*" modulado para transportar informações específicas. A posição inicial de cada "*chirp*" no espectro de frequência codifica os bits de informação.

A transição entre o "*Preamble*" e a "*Data*" representa o momento em que o receptor reconhece que o preâmbulo terminou e que a transmissão da informação desejada começou. Durante o preâmbulo, os "*chirps*" são uniformes e previsíveis, servindo exclusivamente para sincronizar os parâmetros de comunicação. No entanto, ao entrar na seção *Data*, os "*chirps*" começam a variar para codificar a informação transmitida. Essa mudança reflete a transição de uma fase regular e padronizada (sincronização) para uma fase onde os "*chirps*" transportam dados específicos.

A frequência central (f_c) representa o ponto ao redor do qual ocorre a varredura de frequências (sinal varia continuamente e de forma linear ao longo do tempo). Este parâmetro, em conjunto com a largura de banda e o *Spreading Factor*, determinam o desempenho da comunicação em termos de alcance, taxa de dados e resistência a interferências.

2.1.2.1.1 Sensibilidade

Ao examinar a relação entre os parâmetros de modulação LoRa e a sensibilidade do recetor, os dados empíricos fornecem informações importantes. Conforme a ficha técnica do SX1276, a sensibilidade melhora consideravelmente com o aumento do SF. Uma configuração com uma largura de banda de 125 kHz e SF de 7, emparelhada com uma *coding rate* (CR) de 4/5, oferece uma taxa de bits de 5,5 kbps. Os dados da tabela 2.1 demonstram um aumento progressivo na sensibilidade do recetor à medida que o SF aumenta de 7 para 12 nesta largura de banda. Esta observação está em consonância com as expectativas teóricas que demonstram uma relação inversa entre a largura de banda e a sensibilidade do recetor, e uma relação direta entre SF e a sensibilidade [7].

Tabela 2.1 - Sensibilidade do recetor LoRa Semtech SX1276 [7].

<i>BW</i>	<i>SF</i>					
	7	8	9	10	11	12
125 kHz	-123 dBm	-126 dBm	-129 dBm	-132 dBm	-133 dBm	-136 dBm
250 kHz	-120 dBm	-123 dBm	-125 dBm	-128 dBm	-130 dBm	-133 dBm
500 kHz	-116 dBm	-119 dBm	-122 dBm	-125 dBm	-128 dBm	-130 dBm

2.1.2.2 Largura de banda

No contexto da modulação LoRa, a largura de banda é um dos parâmetros mais importantes que moldam as características de transmissão pois está intrinsecamente ligada à taxa de *chirp*, sendo esta equivalente à própria largura de banda. Isso quer dizer que para cada Hertz de largura de banda, um *chirp* é emitido a cada segundo. Uma largura de banda mais ampla permite, portanto, uma maior taxa de transmissão de *chirps*, acelerando a velocidade com que os dados são enviados. Além disso, tanto a taxa de símbolos quanto a taxa de bits são proporcionais à largura de banda. Consequentemente, se a largura de banda for aumentada, haverá um aumento correspondente na taxa de transmissão de dados, já que uma maior quantidade de *chirps* pode ser transmitida no mesmo intervalo de tempo.

A largura de banda também afeta a capacidade de transmissão de dados. Uma largura de banda mais larga pode suportar uma taxa de *chirp* mais rápida, o que melhora a capacidade de transmissão. No entanto, é necessário considerar que uma largura de banda maior pode reduzir a sensibilidade do recetor e diminuir a robustez do sinal diante de interferências. Sinais LoRa numa largura de banda mais estreita tendem a ser mais resistentes a ruídos e interferências, uma vez que a energia do sinal fica mais concentrada. A escolha da largura de banda é, portanto, uma etapa crítica no projeto de um sistema LoRa, equilibrando a necessidade de taxa de transferência de dados, o alcance da comunicação e a resistência a interferências. Diferentes larguras de banda, como 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz, oferecem variados compromissos entre esses fatores, influenciando diretamente o desempenho da rede LoRa no ambiente pretendido [7].

2.1.2.3 Coding Rate

O *coding rate* é um componente vital na correção de erros em sistemas de comunicação, com destaque para o sistema LoRa, que emprega a técnica de *Forward Error Correction* (FEC). Esta abordagem adiciona bits extras às tramas para facilitar a detecção e correção de erros. No LoRa, as opções de taxa de código incluem 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8, onde essa proporção reflete a quantidade de bits de informação útil em relação ao total de bits transmitidos, incluindo aqueles dedicados à correção de erros. A escolha da taxa de código tem um impacto direto sobre a sensibilidade do decodificador e a sua capacidade de lidar com interferências.

Por exemplo, na taxa de código de 4/8, de um total de 8 bits transmitidos, 4 são de dados úteis e os outros 4 são utilizados para correção de erros. Esta taxa proporciona uma maior tolerância a interferências em comparação com taxas mais altas, como 4/5, o que é refletido numa redução na Taxa de Erro de Pacote (PER) em ambientes com interferências breves, mas intensas.

Além disso, cada taxa de código possui capacidades distintas de detecção e correção de erros. Por exemplo, enquanto a taxa de 4/5 não consegue corrigir ou detetar erros, a taxa de 4/6 pode detetar até 1 bit errado, mas não corrigi-lo. Já a taxa de 4/7 pode corrigir 1 bit e detetar até 2 bits errados, e a taxa de 4/8 eleva ainda mais essa capacidade, corrigindo 1 bit e detetando até 3 bits errados. Esta variação nas capacidades de detecção e correção de erros oferece um leque de opções para equilibrar a eficiência na transmissão de dados e a robustez na correção de erros, conforme detalhado em documentos técnicos como o *datasheet* do SX1276.

2.1.2.4 Taxa de símbolos e taxa de bit

A taxa de bits e a taxa de símbolos são dois conceitos fundamentais na teoria da comunicação digital, especialmente em sistemas como o LoRa, que utiliza a modulação *Chirp Spread Spectrum*.

A taxa de símbolos, denotada por R_s , é a quantidade de símbolos de modulação transmitidos por segundo. No contexto da modulação LoRa, cada símbolo corresponde a um *chirp* que varia em frequência e representa um certo número de bits determinado pelo *Spreading Factor*. A taxa de símbolos é inversamente proporcional ao tempo de duração do símbolo T_s e é influenciada pelo *Spreading Factor*. A fórmula para calcular a taxa de símbolos em LoRa é:

$$R_s = \frac{R_c}{2^{SF}} \text{ simbolos/s} \quad (2.3)$$

onde R_c é o *Chip Rate*, ou seja, a taxa na qual os *chips* são transmitidos. Este *Chip Rate* é fixo para uma determinada largura de banda.

A taxa de bits, denotada por R_b , é a quantidade de bits de informação transmitidos por segundo. Na modulação LoRa, essa taxa é determinada pelo produto do *Spreading Factor*, a taxa de símbolos e o *coding rate*. A fórmula para a taxa de bits é:

$$R_b = SF \times \frac{R_c}{2^{SF}} \times CR \text{ bit/s} \quad (2.4)$$

2.1.2.5 Tempo no ar

O TOA no LoRa refere-se ao tempo total necessário para transmitir um pacote de dados pelo ar, excluindo o tempo de propagação da onda eletromagnética. Essa métrica é crucial em sistemas de comunicação sem fio, pois impacta tanto a eficiência energética do dispositivo transmissor quanto a capacidade geral da rede. No contexto do LoRa, o TOA é a soma do tempo gasto para transmitir o preâmbulo do pacote (T_{pre}) e o tempo gasto para transmitir a carga útil ($T_{payload}$), como expresso na equação [6]:

$$TOA = T_{packet} = T_{pre} + T_{payload} \quad (2.5)$$

A carga útil é a parte da transmissão que contém os dados reais que o utilizador deseja enviar, enquanto o preâmbulo é uma sequência usada para sincronização e identificação do início do pacote, que prepara o recetor para a chegada dos dados. A equação da duração da carga útil é:

$$T_{payload} = T_s \left\{ 8 + \max \left\{ \left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \cdot (CR + 4) \right\rceil, 0 \right\} \right\} \quad (2.6)$$

onde

- T_s é o tempo de símbolos, que depende do SF e da largura de banda do canal.
- PL é o tamanho da carga útil (*payload length*) em bytes.
- SF é o fator de espalhamento.
- CRC indica se está a ser usado um código de verificação de redundância cíclica (CRC) (1 se sim, 0 se não).
- H indica se o cabeçalho está habilitado (1 para cabeçalho habilitado, 0 para implícito).
- CR é a taxa de código.
- DE é a ativação da otimização da taxa de dados (1 se ativado, 0 se não).

A equação para a duração do preâmbulo é:

$$T_{pre} = (n_{pre} + 4,25)T_{chirp} \quad (2.7)$$

onde

- n_{pre} é o número de símbolos do preâmbulo.
- T_{chirp} é o tempo de um *chirp*, que é o mesmo que o tempo de símbolo T_s .

Alterações nos parâmetros da transmissão LoRa, como o SF, influenciam diretamente o TOA, com um SF maior, o ganho de processamento é aumentado, melhorando a sensibilidade e, conseqüentemente, o *link budget* (margem de potência disponível para manter a qualidade de comunicação). No entanto, isso também resulta

num aumento do TOA, já que um SF mais alto significa que os dados estão a ser espalhados por um período mais longo, e, conseqüentemente, a taxa de bits diminui e, portanto, cada bit leva mais tempo para ser transmitido. Isto é um compromisso entre a qualidade e a confiabilidade do *link* e a quantidade de tempo que o rádio transmissor precisa de ficar ativo, o que impacta a vida útil da bateria e a capacidade da rede.

A sensibilidade do recetor é um parâmetro que é influenciado por vários fatores cuja compreensão é essencial para o desenho de sistemas de comunicação robustos. O protocolo de comunicação LoRa, utiliza uma métrica de sensibilidade que é calculada da seguinte forma [8]:

$$\text{Sensibilidade} = -10 \log_{10}(kTBW_{1Hz}) + 10 \log_{10}(BW_{Rx}) + NF + SNR \quad (2.8)$$

com T igual a 290 K, o termo constante $-10 \log_{10}(kTBW_{1Hz})$ iguala a -174 dBm/Hz. Para esta análise a largura de banda é fixada em 125 kHz e o NF em 6,5 dB [8]. Rearranjando a equação em função do SNR obtém-se:

$$SNR = 174 - 51 - 6,5 + \text{Sensibilidade} \quad (2.9)$$

Através da calculadora LoRa da Semtech [9], para os parâmetros especificados anteriormente, obtiveram-se os valores da sensibilidade representados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tabela de Desempenho LoRa por Fator de Espalhamento.

SF	Sensibilidade	SNR	TOA	Bitrate
7	-124 dBm	-7,5 dB	41,21 ms	5470 bps
8	-126,5 dBm	-10 dB	82,42 ms	3125 bps
9	-129 dBm	-12,5 dB	144,38 ms	1758 bps
10	-131,5 dBm	-15 dB	288,76 ms	977 bps
11	-134 dBm	-17,5 dB	495,61 ms	537 bps
12	-136,5 dBm	-20 dB	991,22 ms	293 bps

Observa-se na tabela que, à medida que o SF aumenta de 7 para 12, há um incremento correspondente na sensibilidade do recetor, evidenciado pelos valores decrescentes de -124 dBm para $-136,5$ dBm. Paralelamente, o SNR mínimo necessário para desmodulação também diminui, refletindo a robustez do LoRa que permite comunicação eficaz mesmo com SNR negativo. Conseqüentemente, o tempo no ar aumenta consideravelmente, indicando uma transmissão mais longa, enquanto a taxa de bits diminui, demonstrando o compromisso entre a robustez da transmissão e a velocidade de transmissão de dados.

2.2 Modelos de Propagação

No contexto de sistemas de comunicação sem fio, a compreensão dos modelos de propagação é essencial para prever e otimizar a transmissão de sinais sobre diversas condições geográficas e urbanas. A secção 2.2 do documento aborda uma variedade de modelos de propagação, cada um com suas peculiaridades e aplicações específicas. Desde

os clássicos modelos de Okumura-Hata e COST 231, passando pelas adaptações e evoluções como COST 231 Walfisch-Ikegami e os modelos SUI, até as formulações mais recentes desenvolvidas por entidades como 3GPP e empresas como Ericsson, o capítulo oferece uma visão abrangente e detalhada. Adicionalmente, inclui modelos como o de Lee e Egli, bem como variantes específicas como Walfisch-Bertoni, resultando numa análise comparativa que sintetiza estudos relevantes, fornecendo assim a informação necessária para o entendimento e a aplicação prática destes modelos no projeto e análise de redes sem fio.

2.2.1 Propagação em espaço livre

A propagação em espaço livre refere-se à diminuição do sinal num ambiente onde não há obstáculos entre o transmissor e o recetor, apenas a linha de vista (LOS). Este modelo assume que não existem obstáculos e meios que afetem a propagação do sinal. É importante notar que o modelo de espaço livre é aplicável apenas quando o recetor está na zona de campo distante da antena do transmissor, o que geralmente significa uma distância maior que a distância de Fraunhofer. A distância de Fraunhofer é calculada com base na dimensão mais larga da antena do transmissor e no comprimento de onda do sinal. O modelo é baseado na equação de Friis, que ajuda a determinar a potência recebida com base na potência do transmissor, no ganho da antena do transmissor, e na distância entre o transmissor e o recetor. A equação é dada por [4]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2.10)$$

em que P_t é a potência transmitida pelo transmissor, G_t o ganho da antena do transmissor, G_r o ganho da antena do recetor, λ o comprimento de onda do sinal transmitido, 4π é a consideração da dispersão esférica do sinal no espaço livre e d a distância entre as antenas do transmissor e do recetor.

O modelo de atenuação em espaço livre define a perda de sinal entre o recetor e o emissor e é dada pela seguinte equação [11]:

$$PL_{FS}(dB) = 32,45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (2.11)$$

onde

- d representa distância entre transmissor (Tx) e o recetor (Rx) (km).
- f é a frequência (MHz).

2.2.2 Egli

O modelo de propagação de Egli foi desenvolvido com base numa formulação de Terra Plana, que leva em consideração os raios diretos e refletidos entre o transmissor e o recetor. Este modelo é particularmente aplicado a situações de terreno irregular, onde a linha de vista direta pode não estar presente devido às variações topográficas do terreno. No entanto, é importante notar que o modelo de Egli não contempla os efeitos da

vegetação na propagação do sinal, o que pode ser uma limitação em ambientes com densa cobertura vegetal. A expressão matemática que descreve o modelo de Egli, conforme referido no estudo original e em literatura subsequente, é dada pela equação [20]:

$$PL = 20 \log_{10} f + 40 \log_{10} d - 20 \log_{10} h_b + \begin{cases} 76,3 - 10 \log_{10} h_m & h_m \leq 10 \\ 85,9 - 20 \log_{10} h_m & h_m > 10 \end{cases} \quad (2.12)$$

onde

- h_b é a altura efetiva da antena base em metros.
- h_m é a altura efetiva da antena do dispositivo final em metros.

Este modelo foi derivado de dados reais obtidos a partir de transmissões de UHF e VHF em várias grandes cidades, oferecendo uma estimativa da perda total de percurso para uma ligação ponto a ponto.

2.2.3 Okumura-Hata

O Modelo Okumura-Hata é um modelo muito popular e pode fornecer previsões de 150 MHz a 1500 MHz, distâncias de 1 km a 20 km, altura da estação de base de 30 m a 200 m e altura da estação móvel de 1 m a 10 m. Este modelo é útil para cobertura de células de grande dimensão. A fórmula de perda de percurso é [22]:

Áreas Urbanas

$$PL = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_b) \log_{10} d - a(h_m) \quad (2.13)$$

$$a(h_m) = \begin{cases} 3,2(\log_{10}(11,75h_m))^2 - 4,97 & , \text{para grandes cidades } f \geq 400 \text{ MHz} \\ 8,29(\log_{10}(1,54h_m))^2 - 1,1 & , \text{para grandes cidades } f \leq 200 \text{ MHz} \\ (1,1 \log_{10} f - 0,7)h_m - (1,56 \log_{10} f - 0,8) & \text{para cidades pequenas e médias} \end{cases} \quad (2.14)$$

Áreas suburbanas

$$PL = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_b) \log_{10} d - a(h_m) - 2 \left(\log_{10} \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \quad (2.15)$$

Áreas abertas

$$PL = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_b) \log_{10} d - 4,78(\log_{10} f)^2 + 18,33 \log_{10} f - 40,94 - a(h_m) \quad (2.16)$$

2.2.4 Walfisch-Bertoni

O modelo de propagação Walfisch-Bertoni, também conhecido como modelo de difração, aborda as complexidades inerentes aos sistemas de comunicação sem fios, particularmente aquelas associadas à transmissão rádio em ambiente urbano. Diferente de outros modelos que se concentram principalmente na perda de percurso em espaço livre,

o modelo Walfisch-Bertoni engloba tanto a perda de percurso em espaço livre como a perda por difração ao longo do percurso de propagação. Este modelo leva em consideração o impacto de estruturas urbanas como telhados e alturas de edifícios na propagação do sinal. Reconhecido pela sua aplicabilidade em diversos cenários urbanos, o modelo Walfisch-Bertoni foi incorporado na norma ITU-R para IMT-2000 e é particularmente relevante para a gama de frequências entre 300 MHz e 3000 MHz e para distâncias de 1km a 20km [18].

$$PL = PL_{FS} + 57,1 + \log_{10} f + 18 \log_{10} d - 18 \log_{10}(h_b - h_a) + A - 18 \log_{10} \left(1 - \frac{d^2}{17(h_b - h_a)} \right) \quad (2.17)$$

$$A = 5 \log_{10} \left[\left(\frac{W}{2} \right)^2 + (h_a - h_m)^2 \right] - 9 \log_{10} W + 20 \log_{10} \left(\tan^{-1} \left[\frac{2(h_a - h_m)}{W} \right] \right) \quad (2.18)$$

onde

- W é a distância entre edifícios (largura da rua) (m).
- h_a é a altura média dos edifícios (m).

2.2.5 COST 231 Hata

A extensão do modelo Hata para o COST 231 é utilizada para estimar a perda de percurso para distâncias até 20 km entre a estação base e o recetor. Este modelo requer que a antena transmissora esteja posicionada acima dos telhados. As alturas das antenas são especificadas entre 30 m a 200 m para o transmissor e entre 1 m a 10 m para o recetor, para uma frequência de 150 MHz a 2000 MHz. A equação de perda de percurso é dada por [19]:

$$P_{Loss}(dB) = 46,3 + 33,9 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_b) \log_{10} d + C_m \quad (2.19)$$

com o fator de correção ($a(h_m)$) para ambientes urbanos:

$$3,2(\log_{10}(11,75h_m))^2 - 4,97 \quad , \text{para grandes cidades } f \geq 400 \text{ MHz} \quad (2.20)$$

e com o fator de correção ($a(h_m)$) para pequenas e médias cidades:

$$a(h_m) = (1,11 \log_{10}(f) - 0,7)h_m - (1,56 \log_{10}(f) - 0,8) \quad (2.21)$$

onde

- C_m é um fator de correção, definido como 0 dB para áreas rurais e suburbanas, e 3dB para áreas urbanas.

2.2.6 COST 231 Walfisch-Ikegami

O Modelo de Propagação COST 231 Walfisch-Ikegami é mais adequado para perfis de terreno suburbanos e rurais com altura uniforme de edifícios, proporcionando uma estimativa precisa da perda do percurso. Este modelo considera alturas de antena de 4 a 50m para o transmissor, de 1 a 3 m para o recetor, frequências de 800 MHz a 2000 MHz e distâncias até 5 km. As equações de perda de percurso são as seguintes [19]:

Comunicação com Linha de Visão (LoS) para $d \geq 20$ m:

$$PL = 42,6 + 20 \log_{10}(f) + 26 \log_{10}(d) \quad (2.22)$$

Comunicação Sem Linha de Visão (NLoS):

$$PL = PL_{FS} + PL_{msd} + PL_{rts} \quad (2.23)$$

Perda devido à difração do telhado para a rua (PL_{rts}):

$$PL_{rts} = -16,9 - 10 \log_{10}(W) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_m) + PL_{ori} \quad (2.24)$$

$$\Delta h_m = h_r - h_m \quad (2.25)$$

$$\Delta h_b = h_b - h_r \quad (2.26)$$

Fator de orientação da rua (PL_{ori}):

$$PL_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55^\circ) & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (2.27)$$

onde

- φ é o angulo formado do eixo da rua com a direção da onda incidente.
- h_r é a altura do edificio.

Difração multi-screen (PL_{msd}):

$$PL_{msd} = PL_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad (2.28)$$

onde

$$PL_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b > h_r \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (2.29)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h_r \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{para } d \geq 0,5 \text{ km e } h_b \leq h_r \\ 54 - 0,8\Delta h_b \frac{d}{0,5} & \text{para } d < 0,5 \text{ km e } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (2.30)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{para } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (2.31)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para cidades médias} \\ 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$h_r = 3 \text{ m} \times (\text{número de andares}) + (\text{altura do telhado}) \quad (2.33)$$

$$\text{altura do telhado} = \begin{cases} 3 \text{ m inclinado} \\ 0 \text{ m plano} \end{cases}$$

2.2.7 Lee

O modelo de Lee representa uma abordagem fundamental no estudo da propagação de ondas de rádio, destacando-se pela sua base em medições empíricas realizadas numa variedade de ambientes, como espaços abertos, suburbanos e urbanos. Este modelo incorpora a análise da altura efetiva das antenas e a influência do terreno no sinal de comunicação. Desenvolvido por Lee nas décadas de 1980 e 1990, oferece uma compreensão detalhada da atenuação do sinal em diferentes contextos, sendo crucial para o planeamento e otimização de sistemas de telecomunicações. O modelo de Lee é dado pela seguinte equação [17]:

$$PL = 10n \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_b) - P_0 - 10 \log_{10}(h_m) + 29 \quad (2.34)$$

onde P_0 e n são parâmetros dependentes do ambiente, derivados experimentalmente. Na tabela 2.3 estão representados valores de P_0 e n para diferentes ambientes.

Tabela 2.3 - Parâmetros n e P_0 [17].

Ambiente	n	P_0
Espaço livre	2	-45
Espaço aberto	4,35	-49
Suburbano	3,84	-61,7
Urbano: filadelfia	3,68	-70
Urbano: newark	4,31	-64
Urbano: tokyo	3,05	-84
Urbano: nova york	4,08	-77

2.2.8 Log-Distance

O modelo Log-distance é uma representação matemática usada para descrever como a potência média do sinal recebido diminui de forma logarítmica com a distância entre o transmissor e o recetor. Esta abordagem combina resultados teóricos e medições de campo, estabelecendo que a perda de percurso (PL) varia com o logaritmo da distância. A perda de percurso é dada por [4]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.35)$$

onde $PL(d_0)$ é a perda de percurso a uma distância de referência, que pode ser 1 m, 100 m ou 1 km, é utilizada como ponto de calibração e pode ser definida pela perda em espaço livre a d_0 ou por medições no ponto d_0 .

No modelo, n é o expoente de perda de percurso, que depende do ambiente e varia tipicamente entre 2 e 6.

2.2.8.1 Log-normal shadowing

O Log-normal shadowing é um modelo estatístico que leva em consideração variações aleatórias na perda de percurso devido a obstruções e mudanças em objetos refletoras e dispersores no ambiente, que afetam a propagação do sinal. Enquanto os modelos determinísticos como o Log-distance fornecem valores de perda de percurso simétricos radiais baseados apenas na distância e num fator de atenuação (" n "), o Log-normal shadowing adiciona uma variável aleatória X com distribuição gaussiana de média zero para modelar o sombreamento que ocorre devido a esses obstáculos. Isso resulta em valores de perda de percurso que podem variar consideravelmente mesmo para locais com a mesma distância transmissor-recetor. A equação é dada por [4]:

$$PL = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2.36)$$

A variável aleatória X tem um desvio padrão σ (ambos em dB), e os valores de n e σ são determinados pela regressão linear dos dados medidos, com o objetivo de minimizar o erro quadrático médio entre os dados medidos e a perda de percurso estimada. Notar que o expoente é igual a dois para propagação em espaço livre.

2.2.9 SUI

O Modelo de Propagação Interino da Universidade de Stanford (SUI) foi desenvolvido como parte do IEEE 802.16 pela Universidade de Stanford, e deriva do Sistema de Distribuição de Micro-ondas Multiponto. Este modelo é utilizado para frequências em torno de 2 GHz. Considera alturas de antena para a estação base entre 10 m a 80 m e para o recetor entre 2 m a 10 m. O modelo SUI categoriza perfis de terreno em três tipos: Categoria A (perda de percurso elevada, ambientes montanhosos com densidades de árvores moderadas a densas), Categoria B (terrenos planos ou áreas montanhosas com pouca vegetação ou terreno plano com alta vegetação) e Categoria C (perda de percurso baixa, útil para terreno plano com densidades moderadas a densas) [21]. A equação de perda de percurso no modelo SUI é dada por:

$$PL = PL_{FS} + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s \quad \text{para } d_0 < d \quad (2.37)$$

Valor do expoente de perda de percurso:

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (2.38)$$

onde

- d_0 é a distância de referência (100m).
- s é o fator de correção de sombra (dB).

Na tabela 2.4 estão representados os valores dos parâmetros a , b , c e s para diferentes tipos de terreno.

Tabela 2.4 - Valores dos parâmetros do SUI para diferentes tipos de terreno [21].

Parâmetro	Categoria A	Categoria B	Categoria C
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,0050
c	12,6	17,1	20,0
s	10,6	9,6	8,2

De modo a utilizar este modelo para outras frequências é necessário adicionar alguns termos às equações.

$$PL_{\text{modificado}} = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (2.39)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (2.40)$$

$$\Delta PL_h = \begin{cases} -10,8 \log_{10} \left(\frac{h_m}{2} \right) & \text{para Categoria A e B} \\ -20 \log_{10} \left(\frac{h_m}{2} \right) & \text{para categoria C} \end{cases} \quad (2.41)$$

2.2.10 3GPP

O modelo 3GPP é um modelo de propagação desenvolvido pelo 3rd Generation Partnership Project, voltado para a simulação de redes de telecomunicações móveis. Este modelo é aplicável a uma variedade de ambientes de propagação, considerando fatores como tipo de ambiente, altura média dos edifícios, distância de comunicação e parâmetros específicos da área, como as alturas das antenas do transmissor e do recetor. É capaz de estimar a atenuação do sinal para frequências de 2 GHz a 6 GHz para diferentes alturas de antena e de 450 MHz a 6 GHz para o meio rural [23]. Para ambiente urbano (UMa) e em condições onde a linha de vista é desobstruída, a fórmula do modelo é a seguinte:

$$PL = 22,0 \log_{10}(d \times 10^{-3}) + 28,0 + 20 \log_{10}(f \times 10^{-3}) \quad , \quad 10 < d < d'_{BP} \quad (2.42)$$

$$PL = 40,0 \log_{10}(d \times 10^3) + 7,8 \quad (2.43)$$

$$- 18 \log_{10}(h'_b) - 18 \log_{10}(h'_m) + 2,0 \log_{10}(f \times 10^{-3}) , \quad d'_{BP} < d < 5000$$

Se estiver sem linha de vista, o modelo é dado pela seguinte equação:

$$PL = 161,04 - 7,1 \log_{10}(W) + 7,5 \log_{10}(h_a) - \left(24,37 - 3,7 \left(\frac{h_a}{h_b}\right)^2\right) \log_{10}(h_b) + (43,42 - 3,1 \log_{10}(h_b))(\log_{10}(d \times 10^3) - 3) + 20 \log_{10}(f \times 10^{-3}) - (3,2(\log_{10} 11,75h_m)^2 - 4,97) \quad (2.44)$$

$$10 < d < 5000$$

Para ambiente suburbano (SMa) e em condições onde a linha de vista é desobstruída, a fórmula do modelo é a seguinte:

$$PL_1 = 20 \log_{10} \left(\frac{40\pi(d \times 10^3)(f \times 10^{-3})}{3} \right) + \min(0,03h_a^{1,72}, 10) \log_{10}(d \times 10^3) \quad (2.45)$$

$$- \min(0,044h_a^{1,72}, 14,77) + 0,002 \log_{10}(h_a) d \times 10^3 , \quad 10 < d < d_{BP}$$

$$PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10} \left(\frac{d \times 10^3}{d_{BP}} \right) , \quad d_{BP} < d < 5000 \quad (2.46)$$

Se estiver sem linha de vista, o modelo é dado pela seguinte equação:

$$PL = 161,04 - 7,1 \log_{10}(W) + 7,5 \log_{10}(h_a) - \left[24,37 - 3,7 \left(\frac{h_a}{h_b}\right)^2\right] \log_{10}(h_b) + [43,42 - 3,1 \log_{10}(h_b)][\log_{10}(d \times 10^3) - 3] + 20 \log_{10}(f \times 10^{-3}) - [3,2(\log_{10}(11,75h_m))^2 - 4,97] \quad (2.47)$$

$$10 < d < 5000$$

Para ambiente rural (RMa) e em condições onde a linha de vista é desobstruída, a fórmula do modelo é a seguinte:

$$PL_1 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi(d \times 10^3)(f \times 10^{-3})}{3} \right) + \min(0,03h_a^{1,72}, 10) \log_{10}(d \times 10^3) \quad (2.48)$$

$$- \min(0,044h_a^{1,72}, 14,77) + 0,002 \log_{10}(h_a) d \times 10^3 , \quad 10 < d < d_{BP}$$

$$PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10} \left(\frac{d \times 10^3}{d_{BP}} \right) , \quad d_{BP} < d < 10000 \quad (2.49)$$

Caso esteja em condições sem linha de vista, o modelo é dado pela seguinte equação:

$$PL = 161,04 - 7,1 \log_{10}(W) + 7,5 \log_{10}(h_a) - \left(24,37 - 3,7 \left(\frac{h_a}{h_b}\right)^2\right) \log_{10}(h_b) \quad (2.50)$$

$$+ (43,42 - 3,1 \log_{10}(h_b))(\log_{10}(d \times 10^3) - 3)$$

$$+ 20 \log_{10}(f \times 10^{-3}) - (3,2(\log_{10} 11,75h_m)^2 - 4,97) , \quad 10 < d < 5000$$

onde

- d_{BP} é a distância de “Break Point”.

A distância do "Break Point", é determinada pela altura das antenas, conforme as seguintes equações:

$$d'_{BP} = \frac{4h'_b h'_m (f \times 10^6)}{c} \quad (2.51)$$

$$h'_b = h_b - 1 \quad (2.52)$$

$$h'_m = h_m - 1 \quad (2.53)$$

$$d_{BP} = \frac{2\pi h_b h_m (f \times 10^6)}{c} \quad (2.54)$$

Na tabela 2.5 estão representados os parâmetros para o modelo de propagação 3GPP.

Tabela 2.5 - Parâmetros do Modelo de Propagação 3GPP.

Ambiente		σ	d	h_a	W	h_b	h_m
Urbano	LOS	4 dB	$10 < d < d'_{BP}$	-	-	25 m	1,5 m
	LOS	4 dB	$d'_{BP} < d < 5000$	-	-	25m	1,5 m
	NLOS	6 dB	$10 < d < 5000$	5 - 50 m	5 - 50 m	10 - 150 m	1 - 10 m
Suburbano	LOS	4 dB	$10 < d < d_{BP}$	-	-	35 m	1,5 m
	LOS	6 dB	$d_{BP} < d < 5000$	10 m	20 m	35 m	1,5 m
	NLOS	8 dB	$10 < d < 5000$	10 m	20 m	35 m	1,5 m
Rural	LOS	4 dB	$10 < d < d_{BP}$	5 m	20 m	35 m	1,5 m
	LOS	6 dB	$d_{BP} < d < 10000$	5 m	20 m	35 m	1,5 m
	NLOS	8 dB	$10 < d < 5000$	5 m	20 m	35 m	1,5 m

2.2.11 Ericsson

O modelo de perda de percurso Ericsson foi desenvolvido pela Ericsson como uma melhoria do Modelo Hata. Este modelo utiliza uma faixa de frequência até 1900 MHz e permite ajustes nos fatores conforme o ambiente específico. A equação de perda de percurso no modelo Ericsson é calculada como [11]:

$$PL_{Ericsson} = b_0 + b_1 \log_{10}(d) + b_2 \log_{10}(h_b) + b_3 \log_{10}(h_b) \cdot \log_{10}(d) - 3,2(\log_{10}(11,75h_m))^2 + h(f) \quad (2.55)$$

$$h(f) = 44,49 \log_{10}(f) - 4,78(\log_{10}(f))^2 \quad (2.56)$$

Na tabela 2.6 estão representados os parâmetros b_0 , b_1 , b_2 e b_3 para diferentes tipos de ambiente.

Tabela 2.6 - Parâmetros para diferentes tipos de ambiente [11].

PARÂMETROS	ÁREA RURAL	ÁREA SUBURBANA	ÁREA URBANA
b_0	45,95	43,0	36,2
b_1	100,6	68,93	30,2
b_2	12,0	12,0	12,0
b_3	0,1	0,1	0,1

2.2.12 ECC-33

No contexto do planeamento e otimização de redes de comunicação móvel, o modelo ECC-33 surge como uma ferramenta analítica fundamental. Desenvolvido pelo Electronic Communications Committee, este modelo é especificamente concebido para prever a perda de percurso do sinal em diversos ambientes, incluindo áreas urbanas, suburbanas e rurais. A robustez do modelo ECC-33 reside na sua capacidade de incorporar variáveis críticas como a altura das antenas, a frequência de operação e as características específicas do terreno. Esta abordagem permite que o modelo ofereça estimativas mais precisas da atenuação do sinal, um aspeto crucial para a eficiência e a confiabilidade das redes de telecomunicações móveis. Assim, o modelo ECC-33 representa um componente integral no desenvolvimento de estratégias eficazes para a implementação de infraestrutura de comunicações sem fio, especialmente em cenários geográficos e demográficos complexos [24]. O modelo é dado pelas seguintes equações:

$$PL = A_{fs} + A_{bm} - G_t - G_r \quad (2.57)$$

onde

- A_{fs} é a atenuação em espaço livre.
- A_{bm} perda de percurso média.
- G_t é o fator de ganho da altura da estação base.
- G_r é o fator de ganho da altura da estação móvel.

$$A_{fs} = 92,4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f \times 10^{-3}) \quad (2.58)$$

$$A_{bm} = 20,41 + 9,83 \log_{10}(d) + 7,894 \log_{10}(f \times 10^{-3}) + 9,56(\log_{10}(f \times 10^{-3}))^2 \quad (2.59)$$

$$G_t = \log_{10}\left(\frac{h_b}{200}\right) (13,98 + 5,8(\log_{10}(d))^2) \quad (2.60)$$

$$G_r = (42,57 + 13,7 \log_{10}(f \times 10^{-3}))(\log_{10}(h_m) - 0,585) \quad (2.61)$$

2.3 Análise Comparativa de Estudos Relevantes

Neste capítulo são abordados diversos estudos no campo da propagação de sinais em redes LoRaWAN, com foco particular em ambientes urbanos. A tecnologia LoRaWAN tem ganhado destaque devido à sua eficiência e aplicabilidade em cenários de cidades inteligentes e Internet das Coisas (IoT). Cada secção apresenta uma análise

comparativa de diferentes modelos de propagação e estudos de caso, destacando as suas particularidades e contribuições no avanço da tecnologia LoRaWAN.

2.3.1 Comparação de desempenho de modelos de propagação em redes LoRa

Em [25] são analisados três modelos empíricos de propagação de rádio: Okumura-Hata, COST-231 Hata e COST-231 Walfisch-Ikegami (COST-WI). Estes modelos são utilizados para simular a propagação de rádio para a LoRaWAN a 868 MHz, especificamente em ambientes urbanos, com foco em Glasgow, Reino Unido. O principal objetivo é avaliar a precisão desses modelos na previsão da intensidade do sinal recebido, comparando os valores simulados com medições reais feitas em Glasgow. Na figura 2.3 está representada a comparação entre os dados obtidos e os modelos teóricos.

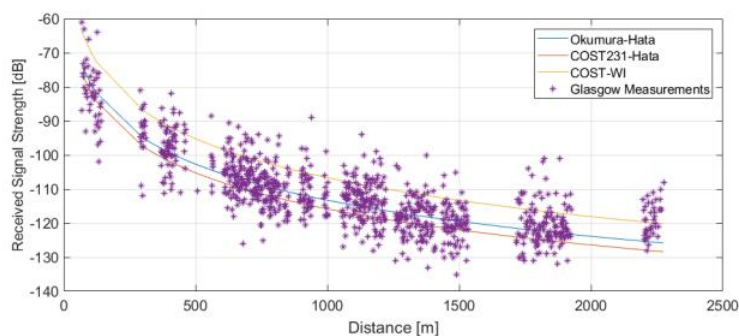


Figura 2.3 - Comparação entre modelos e dados obtidos [25].

Os resultados mostram que o modelo Okumura-Hata subestima a intensidade do sinal recebido, enquanto o modelo COST-WI sobrestima. Entre os três, Okumura-Hata foi encontrado como o mais preciso nas previsões, enquanto COST-WI teve a menor precisão. Esta informação é refletida no gráfico da figura 2.3, que traça a distância contra a intensidade do sinal recebido (em dB), comparando as previsões dos modelos com as medições reais de Glasgow.

2.3.2 Avaliação da Propagação de Sinal LoRa em Ambientes Diversificados

O estudo [26] aborda uma investigação do canal de rádio na banda de 868 MHz através de medições extensivas em diferentes ambientes no Líbano, incluindo áreas urbanas e rurais. O estudo desenvolveu modelos de perda de percurso (PL) baseados em resultados empíricos e comparou-os com modelos empíricos amplamente utilizados. Os resultados indicaram que os modelos PL propostos são precisos e simples, aplicáveis ao Líbano e locais com características semelhantes. Verificou-se que o LoRaWAN poderia alcançar distâncias de cobertura de até 8 km em áreas urbanas e até 45 km em áreas rurais, demonstrando a confiabilidade da tecnologia para comunicações IoT de longo alcance. Na figura 2.4 está representada a perda de percurso de diferentes modelos e ambientes.

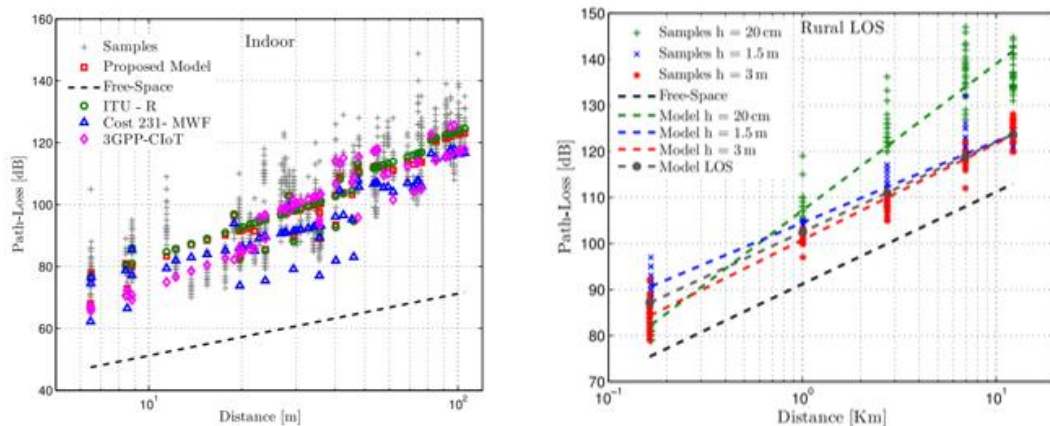


Figura 2.4 - Relação entre distância e perda de percurso para diferentes modelos [26].

Os gráficos da figura 2.4 apresentam a relação entre a distância e a perda de percurso em diferentes ambientes testados no Líbano, tanto em ambientes internos quanto externos, urbanos e rurais. A altura da antena do dispositivo final também foi considerada. Em áreas urbanas densas foi alcançada uma cobertura de até 9 km, enquanto em áreas rurais, a cobertura chegou a até 47 km com um único *Gateway* (GW) implantado. A qualidade da transmissão em ambientes com grande sombreamento e bloqueios pode ser melhorada com a instalação de GW adicionais e a otimização das suas localizações. Estes resultados reafirmam a viabilidade do LoRaWAN para diversas aplicações de IoT, como cidades inteligentes e agricultura inteligente.

2.3.3 Perda de percurso no meio urbano em redes LoRa: um estudo empírico

O estudo [27] foca-se na precisão dos modelos de perda de percurso, essenciais para o planeamento de redes de rádio e a previsão do impacto de novas localizações na cobertura da rede. Um estudo de medição em larga escala foi conduzido numa área urbana de 200 km² durante 230 dias, utilizando sensores montados em camiões de lixo, resultando em mais de 112.000 amostras. Os dados foram usados para comparar onze modelos de perda de percurso previamente propostos e para refinar os coeficientes do modelo Log-distance.

As principais conclusões sugerem que o modelo Log-distance e outros modelos empíricos como Okumura ou Winner+ fornecem estimativas razoáveis para ambientes urbanos, enquanto modelos baseados em terreno, como ITM ou ITWOM, não oferecem vantagens, mesmo utilizando dados precisos de terreno LiDAR. Também foi determinado que um tamanho de amostra superior a 20000 é necessário para conclusões confiáveis, e que ligações de longa distância afetam consideravelmente os coeficientes do modelo. Na figura 2.5 está representado a relação entre modelos teóricos e os dados recolhidos.

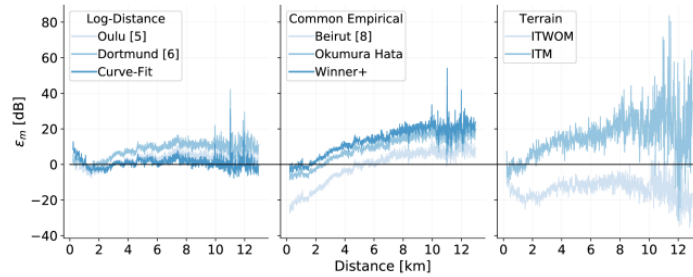


Figura 2.5 - Diferença entre dados medidos e previstos [27].

A Figura 2.5 ilustra a diferença entre a potência do pacote recebido medida (Received Packet Power - RPP) e a prevista por diversos modelos de propagação de sinal para diferentes distâncias. Os pontos abaixo da linha horizontal indicam onde o modelo previu uma potência de sinal mais alta (sobrestimação) do que a medida, e os pontos acima indicam onde o modelo previu uma potência de sinal mais baixa (subestimação) do que a medida.

O estudo conclui que os modelos empíricos comuns tendem a sobrestimar a potência de pacotes recebidos (RPP) para distâncias mais curtas e subestimá-la para distâncias mais longas. Enfatiza ainda a necessidade de um grande número de amostras para realizar um processo de ajuste confiável para modelos de perda de percurso e sugere que medições de longa distância têm um grande impacto nos resultados.

2.3.4 Modelos de atenuação e cobertura para LoRa em cenários urbanos

Em [28] as experiências foram realizadas em Oulu, Finlândia, e envolveram testar o alcance de comunicação de nós LoRa, tanto em terra como sobre a água. Os resultados do estudo indicaram que, para nós operando na banda ISM de 868 MHz com uma potência de transmissão de 14 dBm e SF máximo, o alcance máximo de comunicação foi de mais de 15 km em terra e perto de 30 km sobre a água. Adicionalmente, o estudo introduziu um modelo de atenuação de canal baseado nos dados de medição, que pode ser usado para estimar a perda de percurso para áreas similares.

A configuração de medição envolveu uma estação base fixa e um dispositivo final móvel operado num carro ou barco em movimento. Os dispositivos finais usados foram LoRaMotes equipados com um transmissor Semtech SX1272 e vários sensores, incluindo GPS. Estas medições pretendiam encontrar o alcance máximo de comunicação, com os nós configurados para o maior SF possível, o que aumentou consideravelmente a sensibilidade da estação base. Os dados medidos foram usados para calcular a perda de percurso e derivar um modelo de atenuação de canal. Na figura 2.6 estão representados os dados obtidos em terra e em água.

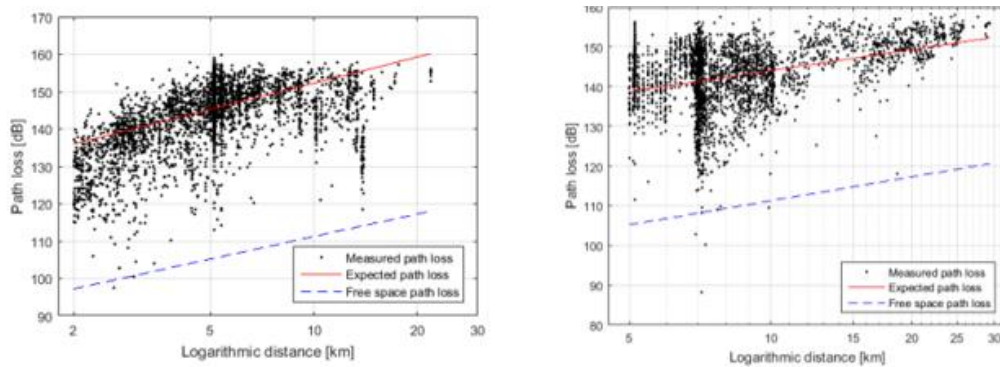


Figura 2.6 - Perda de propagação em terra [esquerda] e perda de propagação em água [direita] [29].

Os gráficos da figura 2.6 mostram a perda de percurso para medições em terra e sobre a água, respetivamente. A perda de percurso medida é indicada por pontos pretos, enquanto a perda de percurso esperada com base no modelo de atenuação de canal é representada pela curva vermelha. Para referência, a perda de percurso do espaço livre também é mostrada com uma curva azul tracejada. Os gráficos mostram que o modelo de perda de percurso esperado alinha-se com a perda de percurso medida, especialmente no cenário sobre a água, onde a perda de percurso é menor devido à inexistência de obstáculos comparativamente ao cenário em terra. O desvio entre a perda de percurso medida e a perda de percurso do espaço livre indica o impacto do ambiente na atenuação do sinal.

As medições em terra mostraram que a potência recebida excedeu -100 dBm dentro de um alcance de 2 km da estação base, mas ainda havia uma perda de 12% dos pacotes. À medida que a distância aumentava, a perda de pacotes também aumentava, atingindo 74% para distâncias de 10-15 km. As medições sobre a água mostraram um desempenho melhor, com cerca de 70% de entrega bem sucedida de pacotes para distâncias abaixo de 15 km e um alcance de comunicação de quase 30 km. O modelo de atenuação de canal derivado pode ajudar os provedores de rede a estimar a densidade das estações base e a realizar análises mais precisas do desempenho do LoRa. O expoente de perda de percurso foi maior do que o do espaço livre para medições em terra, devido a obstruções como edifícios, enquanto as medições sobre a água tiveram um expoente de perda de percurso menor, indicando menos obstruções e um caminho mais claro para a estação base.

2.3.5 Modelação de canais para redes IoT em cidades inteligentes

O estudo [29] foi conduzido para avaliar o desempenho de redes LoRa num ambiente urbano, considerando alcances de sinal até 5,8 km. A análise mostrou que tanto nós LoRa internos como externos poderiam alcançar uma Taxa de Entrega de Pacotes superior a 99% dentro de um alcance de 4,8 km, dependendo do local de instalação. No entanto, os modelos de canal empíricos estabelecidos mostraram-se com precisão de previsão insuficiente para a área da Cidade Inteligente de Dortmund. Como resultado,

dois novos modelos de perda de percurso para áreas urbanas foram apresentados para as bandas de frequência de 868MHz e 433MHz.

A avaliação de alcance consistiu duas partes: uma análise de disponibilidade usando nós móveis para detetar a força do sinal LoRa e uma análise de fiabilidade de transmissões de pacotes LoRa para várias localizações fixas. A análise de disponibilidade produziu um mapa de disponibilidade com múltiplos pontos de medição para ambas as bandas de frequência. Os valores medidos do RSSI foram categorizados em segmentos para avaliar a potência do sinal.

A análise da adequação de modelos de perda de percurso para sinais LoRa em áreas urbanas comparou os modelos empíricos de perda de percurso com as medições realizadas. Verificou-se que os modelos estabelecidos não previam a perda de percurso esperada com precisão. Consequentemente, foram propostos novos modelos de perda de percurso para cenários LoRa Smart City a 868 MHz e 433 MHz. Estes modelos baseiam-se em medições intensivas de dados e destinam-se a ser utilizados em cenários de Cidades Inteligentes semelhantes a Dortmund. Na figura 2.7 estão representados os dados recolhidos e os modelos de propagação.

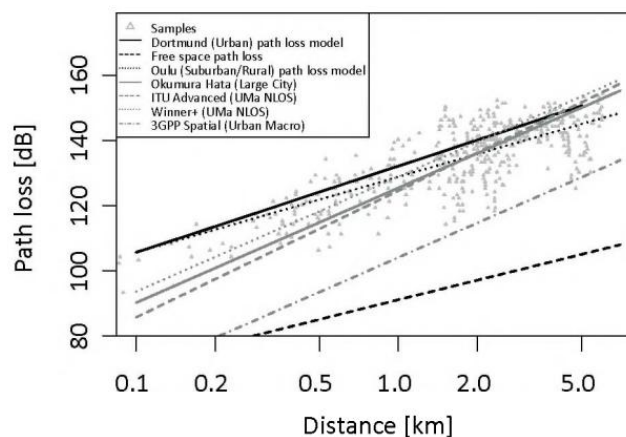


Figura 2.7 - Comparação de modelos de perda de propagação com amostras [28].

O gráfico da figura 2.7 compara vários modelos de perda de percurso com uma curva de regressão da medição para LoRa de 868 MHz. O gráfico traça a perda de percurso contra a distância, mostrando que os novos modelos de perda de percurso desenvolvidos neste estudo alinham-se melhor com os dados medidos do que os modelos existentes. Os dados sugerem que a perda de percurso em Dortmund aumenta mais acentuadamente com a distância devido à maior densidade de edifícios em comparação com outros modelos, como o modelo de Oulu. O gráfico demonstra a necessidade de modelos de perda de percurso atualizados que reflitam mais precisamente o impacto do ambiente urbano na propagação do sinal para redes IoT.

2.3.6 Otimização e aplicação do modelo Lee em redes LoRa urbanas

O estudo [30] foca-se na comparação de medições de campo com cálculos do modelo e discute possíveis otimizações do modelo de Lee. Este modelo foi originalmente

desenvolvido para 900MHz e é utilizado para prever a perda de percurso em terreno plano.

A experiência foi conduzida usando a plataforma Arduino, tanto para o transmissor (estação móvel) como para o recetor (estação base). As medições abrangeram 17 locais em Zrenjanin, Sérvia, com os resultados incluindo o número de pacotes enviados e recebidos, taxa de erro de pacote, média do RSSI, SNR e as coordenadas geográficas das posições de medição.

A análise dos resultados utilizou uma fórmula para cálculo de potência recebida, conhecida como *link budget*, que considera todos os ganhos e perdas para chegar ao nível médio de sinal no recetor. O artigo também inclui as potências de sinal previstas calculadas para áreas urbanas de Filadélfia, Newark, Tóquio, áreas suburbanas, rurais e de espaço livre, bem como amostras da experiência. Na figura 2.8 estão representados os dados recolhidos e o modelo Lee adaptado.

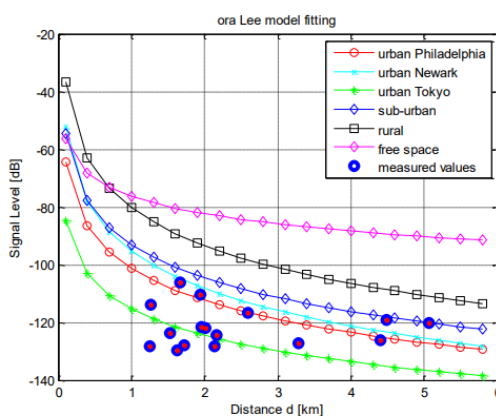


Figura 2.8 - Comparação entre o modelo Lee e amostras [30].

O gráfico da figura 2.8 compara os níveis de sinal previstos pelo modelo de propagação de Lee para diferentes ambientes urbanos com amostras para LoRa de 868 MHz. O gráfico mostra o nível de sinal (dB) contra a distância (km), com várias curvas a representar as previsões do modelo de Lee para diferentes configurações urbanas como Filadélfia, Newark, Tóquio, etc., e espaço livre. Os círculos azuis representam os valores reais medidos na experiência. O gráfico indica que a previsão do modelo para Tóquio alinha-se de perto com os valores medidos, sugerindo que o modelo de Lee, quando otimizado para ambientes específicos, pode fornecer previsões precisas para implantações de rede LoRa 868MHz em áreas urbanas.

Concluiu-se que o modelo de propagação de Lee é eficiente o suficiente para o desenho, planeamento e gestão de redes sem fio baseadas na tecnologia LoRa em áreas urbanas. Verificou-se que o modelo Lee com parâmetros que melhor se ajustam ao ambiente de Tóquio teve o menor Erro Quadrático Médio (MSE – *Mean Squared Error*) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – *Root Mean Square Error*) em comparação com outros modelos urbanos, indicando que poderia ser altamente aplicável em Zrenjanin e áreas urbanas semelhantes para a tecnologia LoRa de 868 MHz.

2.3.7 Estudo experimental da propagação de sinal LoRa em ambientes urbanos densamente construídos

O estudo [31] visa caracterizar a propagação do sinal em ambientes urbanos, criando um novo modelo estatístico de perda de percurso baseado em dados empíricos. Os investigadores realizaram experiências para recolher dados de RSSI e SNR em várias distâncias numa área urbana. Compararam os dados recolhidos com modelos de perda de percurso existentes como Hata, Lee, Log-distance e o modelo Interino da Universidade de Stanford (SUI). O modelo Hata revelou ser o mais próximo do ajuste aos dados empíricos. Os investigadores otimizaram então o modelo Hata para melhor corresponder aos seus dados medidos. Na figura 2.9 estão representados os dados obtidos e as perdas de percurso ajustada e otimizada.

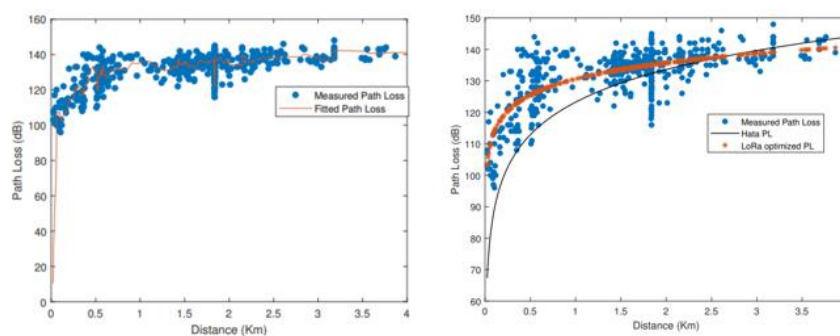


Figura 2.9 - Perda de percurso ajustada [esquerda] e Perda de percurso otimizada [direita] [31].

O gráfico da esquerda da figura 2.9 mostra a perda de percurso *versus* a distância para um SF de 7. Os pontos azuis representam a perda de percurso medida em várias distâncias, e a linha laranja mostra a curva de perda de percurso ajustada. O ajuste próximo entre os pontos de dados medidos e ajustados sugere que o modelo pode prever a perda de percurso em diferentes distâncias.

O gráfico da direita compara a perda de percurso medida (pontos azuis) com dois modelos: o modelo Hata (linha preta) e o modelo otimizado de perda de percurso LoRa (linha laranja). A curva do modelo otimizado LoRa ajusta-se de perto aos dados medidos, especialmente em distâncias mais longas, indicando que o processo de otimização melhorou a precisão do modelo na previsão da perda de percurso para sinais LoRa em ambientes urbanos.

Este estudo, após a otimização dos parâmetros do modelo Hata, mostra que o novo modelo estatístico de perda de percurso foi validado por experiências adicionais num ambiente urbano diferente. O modelo otimizado mostrou uma redução considerável do Erro Quadrático Médio da perda de percurso medida, indicando que poderia caracterizar mais precisamente a atenuação do sinal LoRa em ambientes urbanos. Este modelo pode ser usado para um melhor planeamento e implementação de redes LoRa em ambientes urbanos.

3 Desenvolvimento

A etapa de desenvolvimento do sistema de medição é fundamental para garantir a robustez e fiabilidade dos dados obtidos no estudo da propagação de sinais em ambientes urbanos. Neste capítulo, serão descritos os componentes do sistema desenvolvido, os processos de verificação e calibração dos dispositivos, bem como os ensaios preliminares realizados em diversos cenários. Estes testes iniciais visam avaliar o comportamento do sinal em condições controladas e definir parâmetros críticos para as medições subsequentes, sendo um passo crucial para a validação dos modelos de propagação aplicados à tecnologia LoRa.

3.1 Sistema de medição

Para a realização deste estudo, tornou-se essencial a conceção e desenvolvimento de um sistema de medição capaz de transmitir pacotes de dados de um emissor para um recetor, com o objetivo de analisar a atenuação do sinal durante a sua propagação em diferentes meios. Este sistema proporciona uma avaliação das variações na perda de propagação, constituindo-se como um componente fundamental para uma compreensão aprofundada das dinâmicas de transmissão de sinal em diversos contextos e condições ambientais.

3.1.1 Componentes do sistema

Nesta secção serão descritos os componentes principais utilizados no sistema de medição desenvolvido para avaliar a propagação do sinal LoRa em ambientes urbanos. São ainda apresentados os detalhes sobre a seleção dos dispositivos, como o microcontrolador e os módulos de rádio LoRa, bem como as estruturas de suporte e proteção.

3.1.1.1 Adafruit Feather

O sistema Adafruit Feather 32u4 com Módulo de Rádio LoRa, apresentado na figura 3.1, representa um avanço considerável para projetos portáteis de microcontroladores, combinando a conveniência e a facilidade de uso da família Feather com a capacidade de longo alcance da tecnologia LoRa. Este dispositivo integra um microcontrolador ATmega32u4, conhecido pela sua robustez e versatilidade, com um rádio LoRa, permitindo a comunicação de dados a longas distâncias sem a necessidade de redes Wi-Fi ou celular. Sendo ideal para projetos de IoT, este módulo é uma solução chave para o desenvolvimento de redes sem fio que necessitam de grande alcance e baixo consumo de energia [32].

A vantagem do módulo Adafruit Feather 32u4 com LoRa é a integração direta do rádio LoRa com o microcontrolador, contrastando com outros sistemas onde o módulo LoRa precisa ser conectado separadamente ao Arduino através de ligações externas. Este *design* integrado simplifica consideravelmente o desenvolvimento de projetos, pois elimina a necessidade de montagem mais complexa, resultando numa solução mais

compacta, eficiente e de fácil utilização, ideal para aplicações que exigem mobilidade e minimização de espaço.

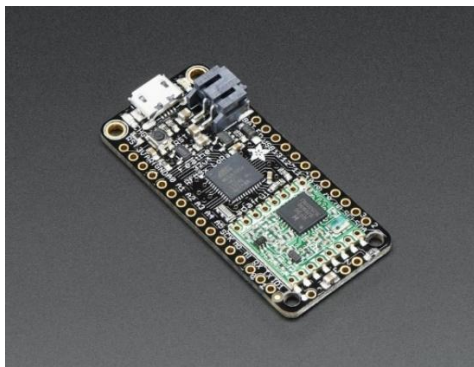


Figura 3.1 - Adafruit Feather 32u4 with LoRa Radio Module [32].

3.1.1.2 Caixa do sistema LoRa

No âmbito do desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fios, a proteção física dos componentes eletrónicos assume uma importância crucial. Esta secção aborda o processo de conceção e fabricação de uma caixa protetora destinada a alojar e proteger um sistema de comunicação LoRa. A utilização de tecnologias de modelação 3D, como o *software* Fusion 360, aliada à impressão 3D, proporciona uma solução eficiente e customizável para este fim.

O projeto da caixa protetora foi desenvolvido no *software* Fusion 360, permitindo a criação de um modelo detalhado. A Figura 3.2 ilustra o modelo tridimensional da caixa, destacando a sua estrutura robusta e funcional. A caixa foi desenhada para acomodar perfeitamente os componentes do sistema LoRa, garantindo sua proteção contra impactos. A fabricação da caixa foi realizada através de impressão 3D, com uma impressora Creality Ender-3 V2 e utilizando material PLA, conhecido pela sua durabilidade e facilidade de impressão. Na figura 3.2 está representado o modelo 3D da caixa, no anexo A estão figuras adicionais do modelo 3D.

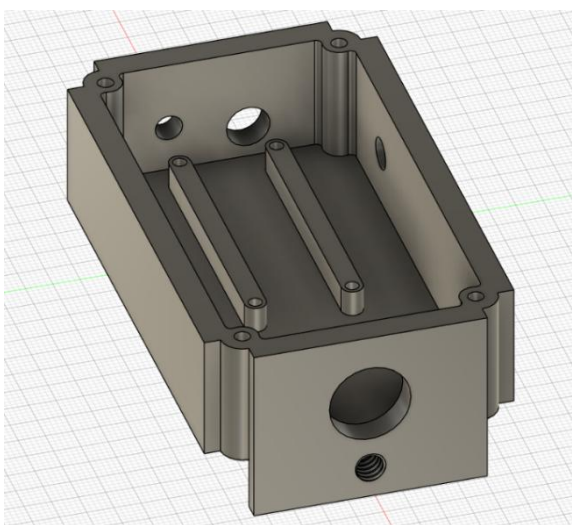


Figura 3.2 - Modelo 3D da caixa.

A Figura 3.2 apresenta a caixa protetora sem a tampa superior, evidenciando vários orifícios funcionais. Estes incluem um orifício para um LED, que permite monitorizar o funcionamento do dispositivo, um orifício para um interruptor que permite ligar e desligar o sistema, e um orifício para ligar a antena. Adicionalmente, existe um orifício com rosca para fixação num tripé e um orifício maior na parte inferior, que permite a passagem de um cabo USB, facilitando a ligação a um computador quando necessário. Entre a tampa e a caixa, foi previsto um compartimento exclusivamente para a bateria, garantindo uma organização interna eficiente e minimizando interferências.

3.1.2 Sistema

A arquitetura do sistema implementado é representada na Figura 3.3. Esta figura ilustra a configuração dos dois principais componentes do sistema: a *Gateway* e a Estação Móvel. Ambos os componentes utilizam uma placa Adafruit Feather 32u4 equipada com um módulo LoRa, que é alimentada por uma bateria de 3,7 V com capacidade de 1500 mAh.

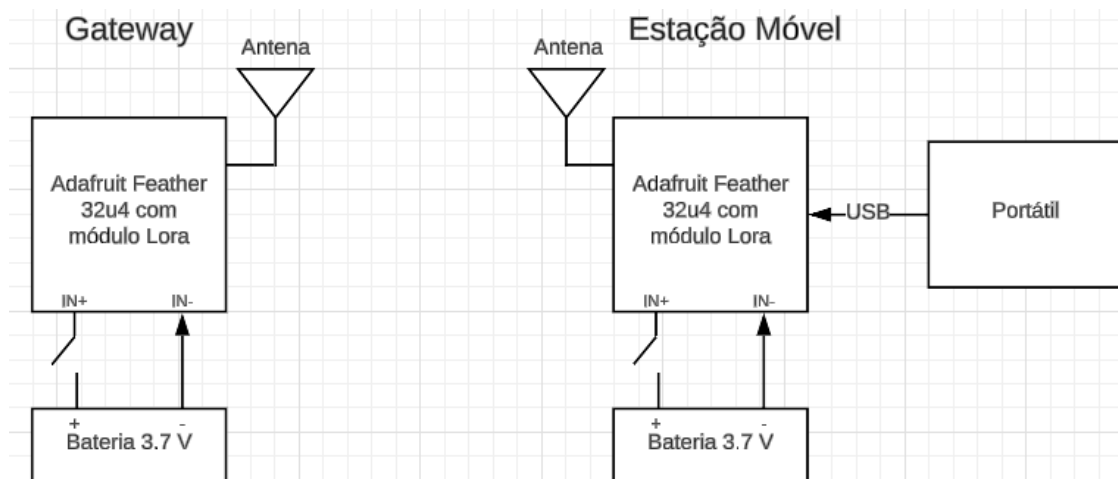


Figura 3.3 - Esquema da gateway e da estação móvel.

A *Gateway*, à esquerda da figura, é alimentada diretamente pela bateria através de um interruptor, permitindo o controlo de energia.

A Estação Móvel, mostrada à direita, segue uma configuração similar, com a adição de uma conexão USB a um portátil, possibilitando a comunicação e a transferência de dados. O interruptor novamente permite o controlo de energia, garantindo a flexibilidade na operação do dispositivo. Embora esteja conectada por USB, o sistema inclui uma bateria integrada, permitindo a realização de testes de despiste sem a necessidade de utilizar um computador portátil, aumentando assim a versatilidade durante as medições.

Para a implementação do sistema de comunicação foi utilizada a biblioteca RadioHead [33]. A biblioteca RadioHead é uma ferramenta utilizada em sistemas embebidos, como Arduíno, para facilitar a comunicação via rádio entre dispositivos. É composta por duas partes principais: os *Drivers*, que cuidam da comunicação básica e

direta com os rádios, e os *Managers*, que gerem o envio e receção de mensagens, oferecendo recursos como endereçamento e confiabilidade.

Na figura 3.4 é apresentado o fluxograma que descreve o funcionamento do programa implementado para a estação móvel. O código completo pode ser encontrado no Anexo B.

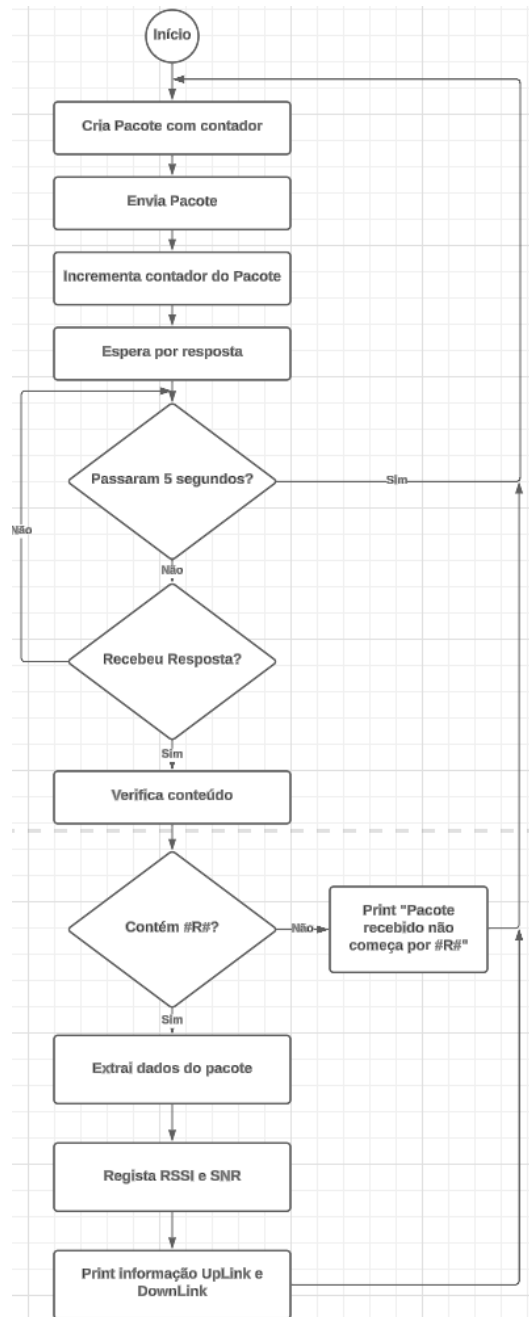


Figura 3.4 - Fluxograma da estação móvel.

O processo inicia-se com a criação de um pacote de 6 bytes que contém um contador e uma sequência “#R#”, o qual é imediatamente enviado. Após o envio, o contador do pacote é incrementado, preparando o sistema para o próximo ciclo de comunicação. O sistema então aguarda por uma resposta durante um intervalo de tempo pré-definido de 5

segundos. Se uma resposta é recebida dentro desse período, o conteúdo é verificado para assegurar a presença da sequência "#R#". Caso a sequência correta seja detetada, os dados do pacote são extraídos e os valores de RSSI e SNR são registados. Por fim, o sistema imprime as informações relativas ao *uplink* e *downlink*, proporcionando uma visão clara da *performance* da comunicação bidirecional. Se a resposta não contiver a sequência "#R#", uma mensagem de erro similar à do *gateway* é gerada. No final do programa, é inserido um *delay* de modo a garantir o cumprimento do *duty cycle* imposto para estas condições. Na figura 3.5 está representado o código utilizado para a configuração dos parâmetros do rádio LoRa utilizando a biblioteca RadioHead.

```
rf95.setTxPower(POWER, false);
rf95.setSpreadingFactor(SFact);
rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND);
rf95.setCodingRate4(COD_RATE);
```

Figura 3.5 - Definição dos parâmetros do rádio.

A função `rf95.setTxPower(POWER, false)` ajusta a potência de transmissão, afetando o alcance e o consumo de energia. A função `rf95.setSpreadingFactor(SFact)` define o fator de espalhamento, que controla a duração de cada símbolo transmitido, influenciando o alcance e a robustez contra interferências, mas diminuindo a taxa de dados. A função `rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND)` ajusta a largura de banda do sinal, onde uma largura de banda maior permite taxas de dados mais elevadas, mas reduz a sensibilidade e o alcance. Por último, `rf95.setCodingRate4(COD_RATE)` define a Taxa de Codificação, que determina a capacidade de correção de erros, equilibrando a resistência a interferências e a taxa de dados. Na figura 3.6, o código foca-se na criação e envio de pacotes.

```
void loop() {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    digitalWrite(LED1, HIGH);

    char packet[6] = "#R#";
    itoa(packetnum, packet + 3, 10);

    delay(10);
    rf95.send((uint8_t *)packet, sizeof(packet));
    rf95.waitPacketSent();
    packetnum++;
}
```

Figura 3.6 - Criação e envio do pacote.

Inicialmente, o pacote é formatado com um prefixo #R# seguido por um número sequencial, que é convertido para uma *string* e adicionado ao pacote. Este formato simples é utilizado para permitir que a estação móvel identifique e processe o pacote adequadamente. A transmissão do pacote é realizada pela função `rf95.send()`. A função `rf95.waitPacketSent()` garante que o pacote foi efetivamente transmitido antes do código

prosseguir. O número do pacote (packetnum) é incrementado a cada transmissão, permitindo que cada pacote enviado tenha um identificador único.

Na figura 3.7, o código trata da recepção e processamento da resposta da *gateway*.

```
if (len >= 6 && strncmp((char*)buf, "#R#", 3) == 0) {
    char numStr[3] = {0};
    strncpy(numStr, (char*)&buf[3], 3);
    int receivedPacketNum = atoi(numStr);

    int rssi = rf95.lastRssi();
    int snr = rf95.lastSNR();

    Serial.print("UpLink: ");
    Serial.println((char*)&buf[3]);
    Serial.print("DownLink: ");
    Serial.print(receivedPacketNum);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(rssi);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(snr, DEC);
}
```

Figura 3.7 - Recepção e processamento da resposta.

Após receber a resposta, a primeira etapa é validar que a mensagem recebida começa com o prefixo #R#, o que indica que é uma resposta legítima proveniente da *gateway*. Essa validação é importante para garantir que a mensagem recebida não seja proveniente de uma fonte desconhecida. Se a validação for bem-sucedida, o código procede para capturar e exibir os valores de RSSI e SNR tanto de *uplink* como de *downlink*.

Na figura 3.8 é apresentado o fluxograma que descreve o funcionamento do programa implementado para a *gateway*. O código completo pode ser encontrado no Anexo C.

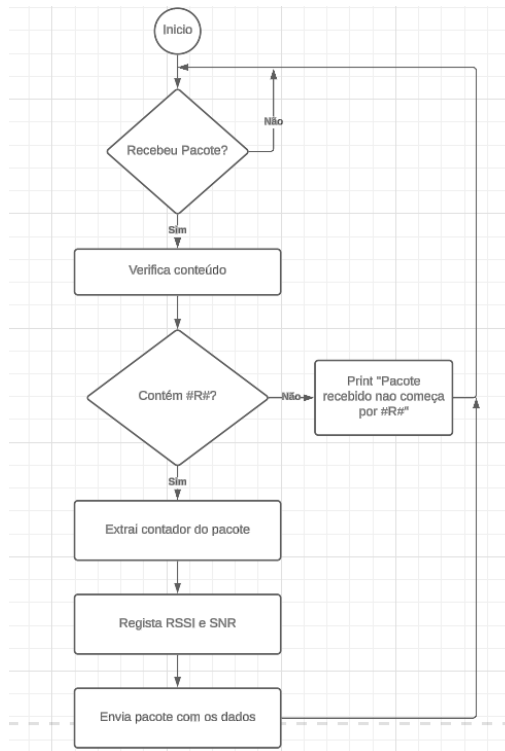


Figura 3.8 - Fluxograma da gateway.

O fluxograma da *gateway*, conforme ilustrado na Figura 3.8, detalha um processo sistemático de receção, verificação e envio de pacotes de dados. Inicialmente, o sistema verifica se um pacote foi recebido. Caso afirmativo, o conteúdo do pacote é examinado para assegurar que contém a sequência "#R#". Se a sequência correta estiver presente, o contador do pacote é extraído. Em seguida, são registados os valores de RSSI e SNR, essenciais para a avaliação da qualidade da comunicação. Finalmente, um pacote, contendo os dados recebidos e os dados registados, é enviado. Caso o pacote recebido não contenha a sequência "#R#", o sistema gera uma mensagem de erro indicando que o pacote recebido não começa por "#R#".

Nas figuras 3.9 e 3.10 estão representados excertos do código relativamente à *gateway*.

```

void loop() {
  if (rf95.available()) {
    ...
    if (rf95.recv(buf, &len)) {
      int rssi = rf95.lastRssi();
      int snr = rf95.lastSNR();
      ...
      sprintf(packet, "#R#%d,%d,%d", receivedPacketNum, rssi, snr);
      rf95.send((uint8_t *)packet, strlen(packet) + 1);
      rf95.waitPacketSent();
    }
  }
}

```

Figura 3.9 - Receção e envio do pacote.

O programa começa por verificar se há um pacote disponível (`rf95.available()`) e, em caso afirmativo, recebe o pacote. De seguida guarda os valores de RSSI e SNR (`rf95.lastRssi()` e `rf95.lastSNR()`) referentes ao pacote recebido, cria um novo pacote contendo esses mesmos dados e envia-os de volta. A função `rf95.waitPacketSent()` assegura que o pacote foi enviado com sucesso antes de prosseguir.

```
char packet[10];
sprintf(packet, "#R%d,%d,%d", receivedPacketNum, rssi, snr);
```

Figura 3.10 - Estrutura do pacote.

A criação do pacote de resposta utilizando “`sprintf`” mostra como os dados (número do pacote, RSSI e SNR) são encapsulados numa estrutura específica antes de serem enviados. A formatação do pacote, iniciando com `#R#`, tem função de endereçamento de modo a verificar que o pacote recebido é proveniente da estação móvel.

3.2 Verificação da potência de transmissão

De modo a verificar a potência de transmissão dos rádios LoRa, utilizou-se um analisador de espectros. Começou-se por conectar o rádio diretamente ao analisador de espectros utilizando um conector adaptado a $50\ \Omega$, evitando assim a reflexão do sinal e assegurando uma atenuação mínima, que pode ser desconsiderada. Definiu-se uma largura de banda de 200 kHz e um *Span* de 500 kHz. A escolha de uma largura de banda de 200 kHz no analisador de espectros assegura uma resolução espectral adequada para captar o sinal LoRa. Esta largura de banda proporciona um compromisso eficiente entre a captação do sinal útil e a minimização da interferência do ruído, garantindo que a medição da potência de transmissão se mantenha dentro do intervalo de frequências de operação. Na figura 3.11 está representado o esquema utilizado para a medição da potência do rádio.

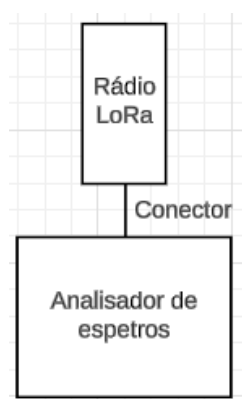


Figura 3.11 - Esquema para medição da potência.

Definiram-se as potências no RadioHead para 2 dBm e 14 dBm para um SF de 12. De seguida foi feita a medição dos valores tanto para o rádio emissor como para o rádio recetor, os resultados estão representados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores registados no analisador de espectros.

Potência de transmissão (dBm)	Potência emissor (dBm)	Potência recetor (dBm)
2	2,6	2,2
14	14,5	14,3

3.3 Calibração do RSSI

A calibração do RSSI dos rádios LoRa é fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade na medição da intensidade do sinal recebido, o que é crítico para otimização da comunicação. No processo de calibração em questão, foi empregue um método que incluiu o uso de um cabo, sete atenuadores de 10 dB, e um analisador de espectros. Esses equipamentos foram essenciais para a medição da atenuação do sinal do rádio num ambiente controlado. Ao simular diferentes níveis de sinal, os atenuadores de 10 dB ajudaram a avaliar a resposta do RSSI do rádio LoRa num espectro amplo de intensidades de sinal. Este processo garante que o sistema LoRa possa operar de maneira eficiente, melhorando assim a qualidade da avaliação da comunicação. Na figura 3.12 está representado o esquema utilizado para a calibração do sistema. Para a mesma atenuação entre o gerador de sinais e o analisador de espectros e potências de transmissão semelhantes, foi possível avaliar a qualidade da medida do RSSI fornecida pelos rádios LoRa. O teste foi feito para uma potência de transmissão de 2,3 dB e uma atenuação no cabo de 22,5 dB.

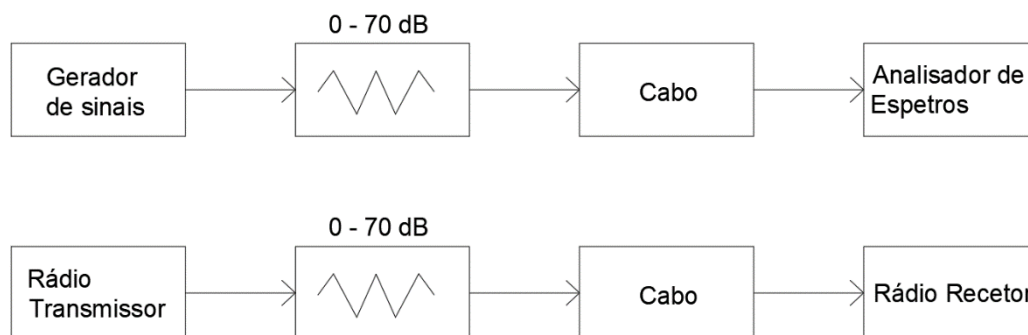


Figura 3.12 - Esquemas utilizado para a calibração.

Para validar a precisão das medições de potência recebida e a correspondência com os valores esperados de ESP, foi realizada uma comparação entre a potência efetivamente recebida pelos dispositivos e os valores esperados de ESP. O gráfico apresentado na figura 3.13 ilustra a diferença entre a potência recebida e o ESP, em função da potência medida, permitindo uma análise do comportamento do sistema. No anexo D estão os valores registados.

Na figura 3.13 observa-se uma tendência linear decrescente, o que indica que, à medida que a potência recebida diminui, a diferença entre os valores medidos e esperados aumenta. Verifica-se que o desvio entre os valores medidos e os esperados varia entre -13.2 dB e -23.2 dB. Esta linearidade é fundamental para facilitar o processo de

calibração e ajuste dos dispositivos, garantindo que as medições de potência são consistentes e alinhadas com os valores teóricos.

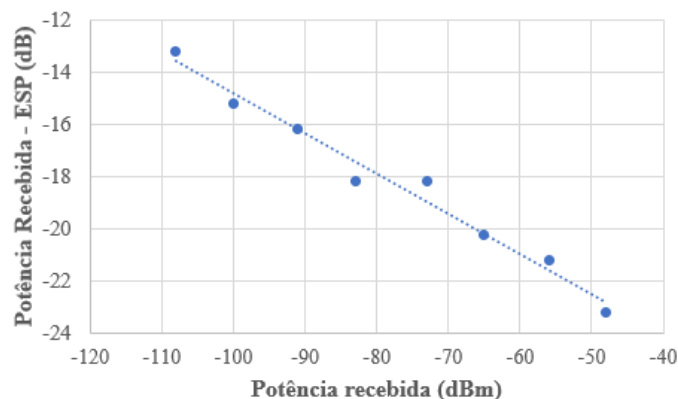


Figura 3.13 - Verificação da precisão do ESP.

Na prática, para obter um valor de RSSI mais preciso, é necessário aplicar uma equação de calibração que ajusta os valores brutos obtidos do rádio. A equação de calibração utilizada foi $y = 1,153x + 30,162$, onde y representa o valor de RSSI calibrado e x o valor de RSSI bruto.

Adicionalmente, a biblioteca RadioHead apresenta uma particularidade na disponibilização do valor do RSSI. A biblioteca não disponibiliza o RSSI, mas sim um valor aproximado do ESP, somando o SNR com o RSSI quando o valor de SNR é inferior a zero. Esta soma distorce ainda mais a leitura do RSSI, já que o SNR negativo deveria ser considerado de forma independente. Portanto, para obter o valor real do RSSI quando o SNR é negativo, é necessário remover o valor do SNR adicionado ao valor de RSSI. Esta correção é crucial para assegurar que o RSSI refletido nos cálculos seja o correto e útil para avaliar a qualidade do *link* de comunicação.

Para avaliar a precisão do sistema de medição RSSI em dispositivos LoRa, foram conduzidas experiências num ambiente aberto que se aproximasse do espaço livre. O local de teste foi o terraço da Universidade da Madeira, onde os dispositivos LoRa foram posicionados em suportes a uma elevação de cerca de 5 metros acima do solo. No equipamento recetor, utilizou-se o monopolo Astron V8600 com um ganho de 1,3 dB, enquanto no emissor foi empregue a antena monopolo Seeed com um ganho de 0,5 dB. Na figura 3.14 está representado o esquema utilizado para a avaliação do RSSI.

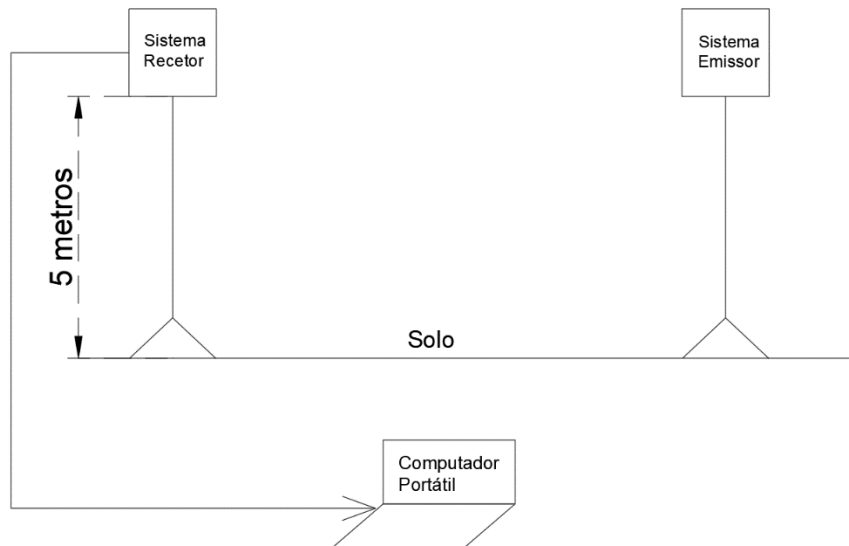


Figura 3.14 - Esquema utilizado para a avaliação do RSSI.

Durante a transmissão LoRa, para cada ponto, foram enviados vários pacotes de modo a obter uma média do sinal recebido. A separação entre as antenas foi aumentada gradualmente, de um em um metro, começando em 5 metros e até uma distância máxima de 14 metros.

O teste foi realizado definindo a potência de transmissão para 14 dBm e utilizando um SF de 12. As médias de RSSI observadas foram então comparadas aos resultados previstos pela fórmula de Friis. Na figura 3.15 estão representados os dados recolhidos e a comparação com o resultado teórico.

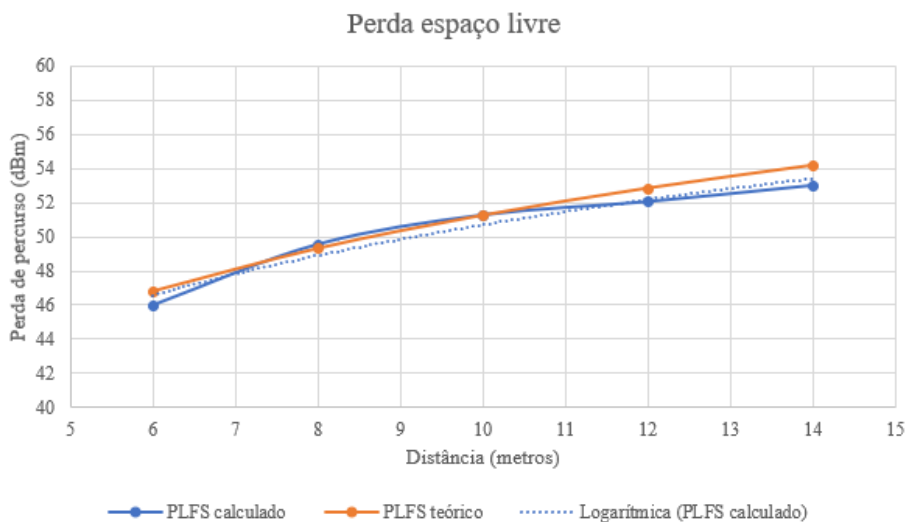


Figura 3.15 - Comparação de dados obtidos com teóricos.

Analisando o gráfico da figura 3.15, é possível concluir que após o processo de calibração, as perdas de espaço livre medidas (PLFS calculado) estão em concordância com as perdas teóricas previstas. A diferença média entre os valores medidos e os teóricos é de -0.49 dB, com um desvio padrão de 0.54 dB, refletindo uma pequena variação. Além disso, o erro quadrático médio (RMSE) é de 0.73 dB, o que sugere que, em média, as

estimativas calculadas estão dentro desta faixa de erro em relação aos valores teóricos. A curva de PLFS calculado segue a tendência da curva teórica com uma discrepância mínima, o que indica uma calibração bem-sucedida.

3.4 Ensaios preliminares

Nesta secção, são abordados uma série de ensaios de propagação com o objetivo de aferir o comportamento do sinal em diferentes ambientes e configurações. Inicialmente, explorou-se a propagação em linha de vista num parque de estacionamento, para estabelecer uma base de comparação. Posteriormente, examinou-se o impacto do diagrama de radiação em cenários controlados, seguido de ensaios conduzidos no terraço da Universidade da Madeira, tanto com linha de vista como sem linha de vista, permitindo assim compreender a influência de obstruções e o desempenho do sinal em condições menos ideais.

3.4.1 Medições em linha de vista com antenas à mesma altura

No âmbito do primeiro ensaio, selecionou-se o parque de estacionamento da Universidade da Madeira, ilustrado na figura 3.16, com o intuito de aferir a perda em espaço livre. Este cenário específico é marcado pela presença considerável de veículos, um fator que poderá potencialmente introduz reflexões e atenuações adicionais ao sinal.



Figura 3.16 - Ambiente em que foram recolhidos os dados.

Para a realização deste ensaio, o recetor (*gateway*) foi posicionado numa das extremidades do parque de estacionamento, em frente a uma árvore, enquanto o emissor foi deslocado em treze locais distintos, espaçados de quinze metros, iniciando a uma distância de quinze metros e estendendo-se até cento e noventa e cinco metros. Importa salientar que tanto o emissor como o recetor foram colocados a uma altura de três metros acima do solo, de forma a simular condições realistas de propagação do sinal. Os pontos selecionados para a recolha dos dados estão devidamente indicados na figura 3.17.



Figura 3.17 - Pontos para os quais foram recolhidos dados no estacionamento.

Os parâmetros utilizados para a comunicação do sistema de medição encontram-se na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros do sistema de medição para teste no estacionamento.

Frequência	868,2 MHz
Largura de Banda	125 kHz
CR	4/5
Potência de transmissão	14,3 dBm
Ganho da antena emissora	0,5 dB
Ganho da antena recetora	1,3 dBi
Spreading Factor	12

A perda de percurso é obtida pela seguinte equação:

$$PL_{FS} = ESP + P_t + G_r + G_t \quad (3.1)$$

3.4.2 Medições e impacto do diagrama de radiação na atenuação do sinal

O presente ensaio foi concebido com o propósito de investigar a influência do diagrama de radiação da antena na atenuação do sinal em condições de linha de vista, com a antena em alturas diferentes. A figura 3.18 ilustra o ambiente no qual os dados foram recolhidos, especificamente a região situada a uma distância de dez metros do edifício, de forma a permitir uma análise da interação entre a configuração de radiação da antena e as características do sinal propagado, na figura E.1 do anexo E está uma fotografia do ambiente real.

No contexto deste ensaio, procedeu-se à colocação do emissor no topo do edifício, ao passo que o recetor foi disposto em três localizações distintas na base da estrutura, a 10, 20 e 30 metros de distância, respetivamente. É de notar que tanto o emissor como o recetor foram montados em suportes com 3 metros de altura, de modo a assegurar

condições de propagação do sinal similares às reais. As posições designadas para a obtenção de dados estão delineadas na figura 3.18. Os parâmetros adotados para a comunicação no sistema de medição mantiveram-se inalterados relativamente ao ensaio anterior.

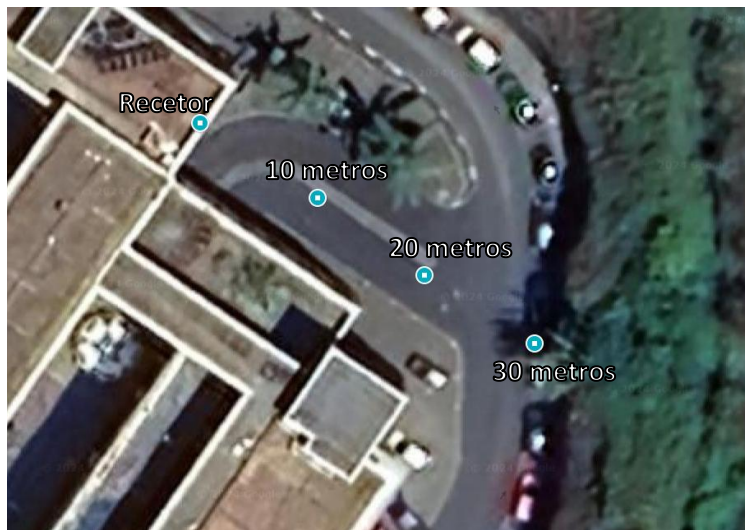


Figura 3.18 - Pontos para o teste da afetação do diagrama de radiação.

Considerando a necessidade de conhecer os ângulos de incidência tanto para o recetor quanto para o emissor na análise da propagação do sinal, procedeu-se à dedução das equações pertinentes para o cálculo dos mesmos, com recurso ao esquema representado na figura 3.19. Esta abordagem permitiu uma caracterização dos parâmetros angulares envolvidos no estudo em questão.

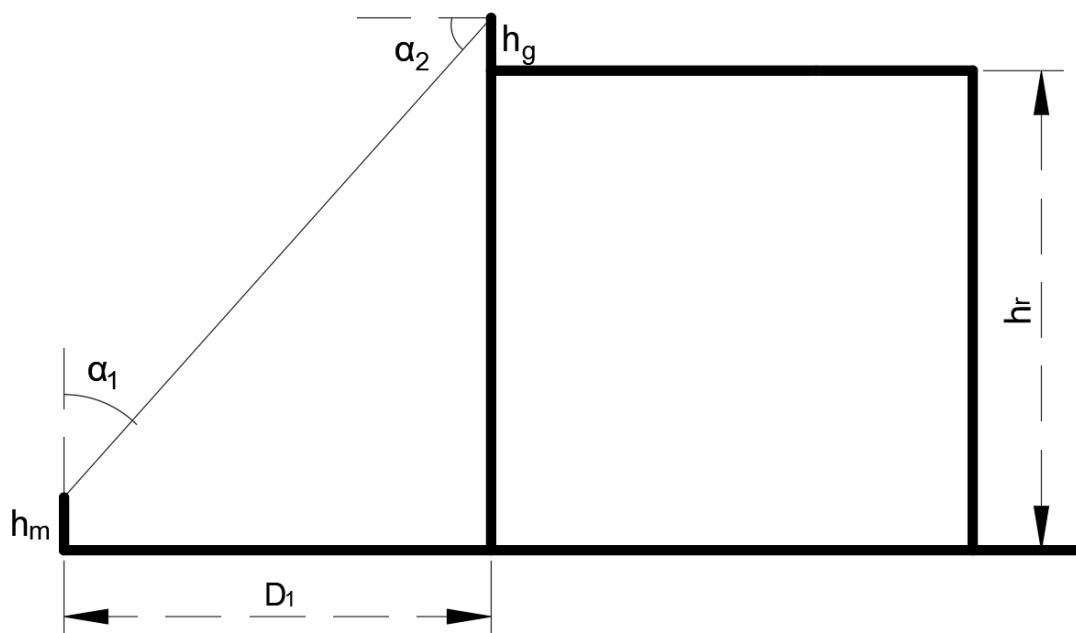


Figura 3.19 - Desenho para o cálculo dos ângulos de incidência.

Os ângulos de incidência podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{D_1}{h_r + h_b - h_m}\right) \quad (3.2)$$

$$\alpha_2 = 90 - \alpha_1 \quad (3.3)$$

Para calcular a perda devido ao diagrama de radiação utiliza-se a seguinte equação:

$$PL_{diagrama} = -10\log_{10}(\sin^2(\alpha_1)) \quad (3.4)$$

onde o termo $\sin^2(\alpha_1)$ vem do facto que a intensidade do campo irradiado variar com o quadrado do seno do ângulo e o fator $10\log_{10}$ usado para converter em potência. Por fim, a perda de percurso total é dada pela equação:

$$PL_1 = PL_{FS} + PL_{diagrama} \quad (3.5)$$

3.4.3 Medições sem linha de vista para análise do método da ponta de faca

O propósito deste ensaio incide sobre a análise da atenuação do sinal em vários pontos com a antena situada no topo do edifício, operando sob condições onde a linha de vista não se verifica, com o intuito de avaliar a aplicabilidade do modelo da ponta da faca na previsão da atenuação do sinal. Para a realização deste estudo, o emissor foi colocado no topo da estrutura, enquanto o recetor foi instalado na sua base a aproximadamente 26 metros do edifício, com ambos os dispositivos elevados a uma altura de 3 metros por meio de hastes. Os locais selecionados para a recolha de dados estão ilustrados na figura 3.20, estendendo-se desde os 5,8 metros do beiral do edifício até alcançar um afastamento de 32 metros. As distâncias representadas na figura indicam a distância do ponto ao recetor.

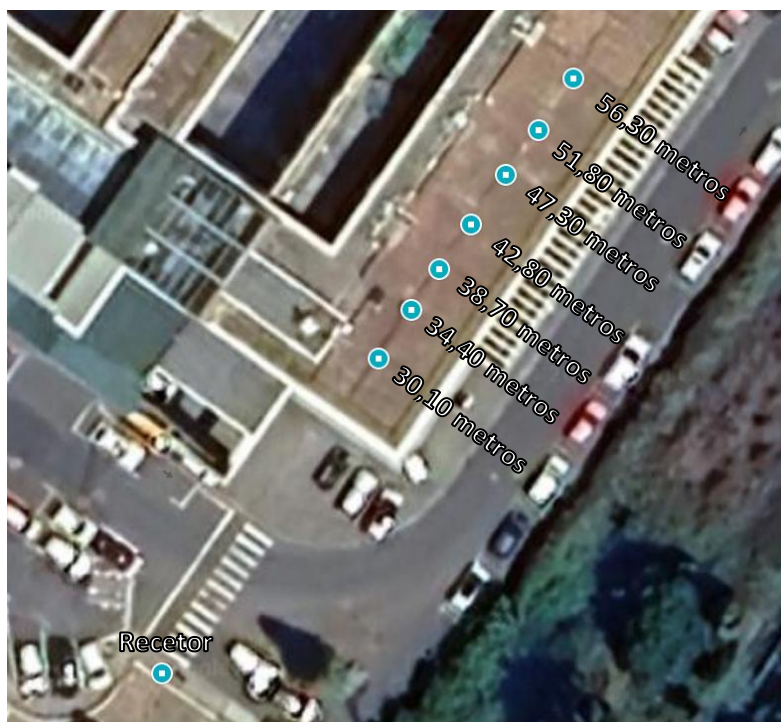


Figura 3.20 - Pontos para o teste do terraço sem linha de vista.

Na fase de parametrização do problema em estudo, recorreu-se ao uso de uma fita métrica para aferir com precisão a distância entre a antena e cada um dos pontos de medição. Adicionalmente, utilizou-se um dispositivo capaz de determinar o ângulo formado entre a antena e o topo do edifício, permitindo o cálculo da direção do raio direto envolvido.

Considerando que os valores inicialmente apresentados não se adequavam à aplicação direta do modelo da ponta da faca, devido à ausência de referência ao raio direto, tornou-se imperativo estabelecer as distâncias e ângulos necessários para a correta implementação do modelo. Tal processo foi efetuado por meio da elaboração de um desenho geométrico detalhado, o qual é devidamente ilustrado na figura 3.21. Esta abordagem permitiu a obtenção precisa dos parâmetros requeridos para a aplicação efetiva do modelo da ponta da faca.

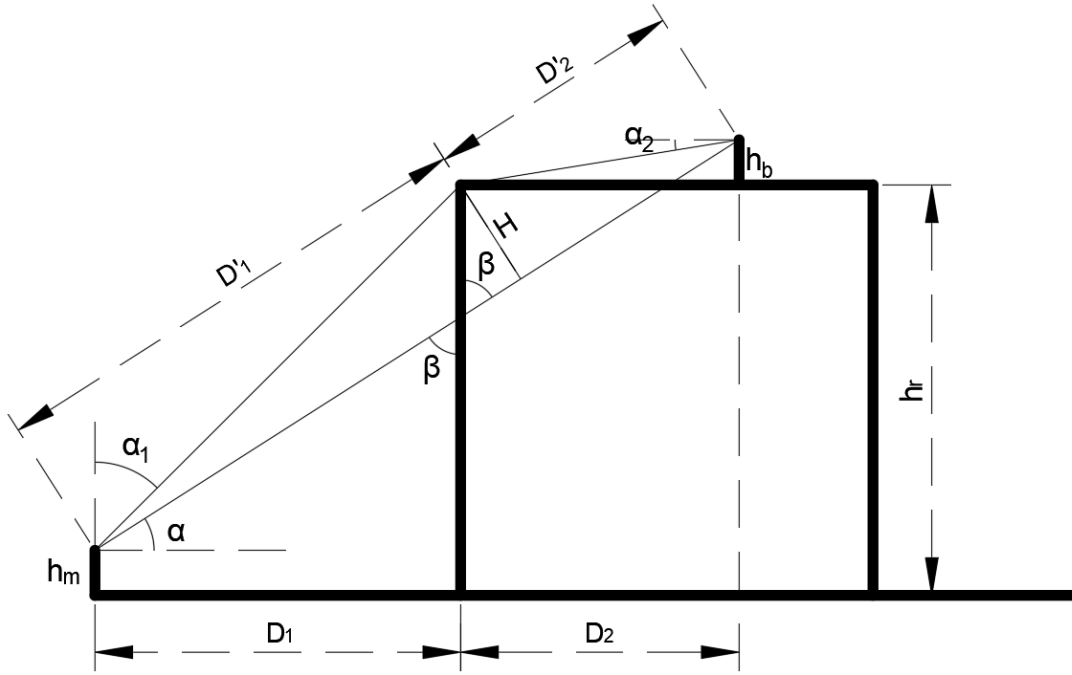


Figura 3.21 - Geometria para o obstáculo em ponta de faca.

A determinação dos ângulos necessários para o modelo da ponta da faca pode ser feita através das seguintes equações:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{h_r + h_b - h_m}{D_1 + D_2} \right) \quad (3.6)$$

$$\beta = 90 - \alpha \quad (3.7)$$

Para a determinação das distâncias D'_1 e D'_2 são utilizadas as seguintes equações:

$$D'_1 = \frac{D_1}{\cos(\alpha)} + \{(h_r - h_m) - (D_1 \tan(\alpha))\} \cos(\beta) \quad (3.8)$$

$$D'_2 = \frac{(h_r + h_b - h_m)}{\sin(\alpha)} - D'_1 \quad (3.9)$$

$$H = \{(h_r - h_m) - [D_1 \tan(\alpha)]\} \sin(\beta) \quad (3.10)$$

As distâncias registadas para cada ponto específico encontram-se devidamente catalogadas na tabela 3.3, proporcionando uma base de dados essencial para a análise subsequente. De notar que os valores de $h_m = 3$, $h_r = 27,3$, $D_1 = 24,3$ são fixos para todos os pontos.

Tabela 3.3 - Distâncias e alturas em metros para os respectivos pontos de medição

Ponto	D_2 (m)	D (m)	H (m)
1	5,8	30,10	1,67
2	10,1	34,40	3,93
3	14,4	38,70	5,85
4	18,5	42,80	7,42
5	23	47,30	8,90
6	27,5	51,80	10,17
7	32	56,30	11,26

Para obter o parâmetro de Fresnel-Kirchoff utiliza-se a equação [34]

$$v = H \sqrt{\frac{2(D'_1 + D'_2)}{\lambda D'_1 D'_2}} \quad (3.11)$$

A atenuação provocada pelo obstáculo em ponta de faca é calculada através da equação [34]

$$PL_{PFaca} = \begin{cases} 0, v \leq -1 \\ 20 \log_{10}(0,5 - 0,62 v), -1 \leq v \leq 0 \\ 20 \log_{10}[0,5 \exp(-0,95 v)], 0 \leq v \leq 1 \\ 20 \log_{10} \left[0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2} \right], 1 \leq v \leq 2,4 \\ 20 \log_{10} \left(\frac{0,225}{v} \right), v > 2,4 \end{cases} \quad (3.12)$$

A perda de percurso é dada pela seguinte equação:

$$PL_2 = PL_{FS} + PL_{PFaca} \quad (3.13)$$

3.5 Locais de Teste e características do terreno

Na realização dos ensaios de propagação de sinal, foi necessário selecionar diferentes locais de teste que representassem cenários urbanos típicos, caracterizados por variações em topografia e densidade de edificações. Os locais escolhidos foram selecionados de modo a abranger uma ampla gama de condições ambientais e estruturais, permitindo a análise do impacto de fatores como a presença de edifícios altos, ruas estreitas e terrenos inclinados na qualidade da comunicação LoRa. A seguir, são descritos em detalhe os diferentes cenários de medição, assim como as particularidades de cada um em termos de topografia.

3.5.1 Locais de medição

Para o estudo da propagação do sinal utilizando sistemas LoRa em ambientes urbanos, foram selecionados diversos pontos de teste, conforme ilustrado na figura 3.22. Os pontos de medição estão distribuídos ao longo de diferentes radiais, com a maioria

localizada em zonas o mais homogêneas possível. Estes locais apresentam uma altitude semelhante ao nível do mar, edifícios com alturas idênticas, em média com três andares, e ruas relativamente estreitas, o que garante condições consistentes para a análise do sinal. Já os pontos mais distantes da *gateway* foram selecionados em áreas com altitudes variáveis, com o objetivo de avaliar a influência que a variação de altitude pode ter na propagação do sinal.



Figura 3.22 - Locais possíveis para recolha de dados.

Os testes serão realizados com o sistema LoRa posicionado num tripé de 3 metros de altura, uma escolha estratégica para simular a instalação típica de dispositivos LoRa em fachadas de edifícios. Esta altura é relevante pois representa uma altura mínima prática para a instalação de sistemas de comunicação em fachadas, proporcionando uma boa linha de visão sobre obstáculos menores e diminuindo a interferência do solo.

Em cada posição de medição, os dados serão recolhidos em 9 pontos distintos, com uma separação de 10 cm entre si. Para garantir consistência na recolha dos dados, será utilizada uma estrutura de 20 cm x 20 cm com os 9 pontos devidamente marcados. Este procedimento será replicado em todas as posições, assegurando a uniformidade das medições realizadas.

Na eventualidade de surgir uma obstrução significativa durante a recolha de dados, como a passagem de um autocarro ou camião, os dados relativos a esses pontos serão recolhidos novamente. Esta medida visa minimizar a variabilidade introduzida por obstruções temporárias que não fazem parte do objetivo de estudo, garantindo assim a fiabilidade e a representatividade dos dados obtidos.

Na figura 3.22, os pontos de teste são representados por marcadores amarelos, distribuídos radialmente a partir do ponto central identificado como "*Gateway*", destacado a vermelho. A *Gateway* será instalada no topo de um edifício com aproximadamente 21,3 metros de altura, o que proporciona uma posição elevada privilegiada para a transmissão do sinal, facilitando a análise da sua propagação em diferentes direções e distâncias.

O objetivo desta distribuição é obter uma compreensão detalhada do comportamento do sinal LoRa num ambiente urbano complexo, caracterizado pela presença de múltiplas barreiras físicas como edifícios e outras infraestruturas. A análise dos dados recolhidos nestes pontos permitirá tirar conclusões sobre a viabilidade e a eficiência da implementação de sistemas LoRa em ambiente urbano, contribuindo para o planeamento e a otimização futura de redes de comunicação baseadas nesta tecnologia.

A seguir, será discutido como as características do terreno podem afetar a atenuação do sinal em sistemas de comunicação LoRa. A orografia específica de uma região, como a cidade do Funchal, que apresenta um terreno ascendente, desempenha um papel considerável na propagação do sinal.

A cidade do Funchal é caracterizada pela sua orografia acidentada, com várias elevações e declives. Esta particularidade geográfica implica que determinados pontos da cidade estão situados a altitudes superiores em relação a outros. Essa variação altimétrica pode influenciar a propagação do sinal de maneiras não intuitivas. Por exemplo, é esperado que, em condições ideais e terreno plano, a intensidade do sinal diminua à medida que a distância entre o transmissor e o recetor aumenta. No entanto, no caso de um terreno inclinado como o do Funchal, pode ocorrer o fenómeno oposto.

Quando o sinal é transmitido a partir da *gateway* posicionada no topo de um edifício de 21,3 metros, pode encontrar menos obstáculos na elipsoide de Fresnel ao se propagar para pontos mais elevados da cidade, em comparação com pontos mais próximos, mas situados em altitudes mais baixas e cercados por edificações. Esta situação resulta numa menor atenuação do sinal em distâncias maiores, desde que estas estejam numa linha de vista mais desimpedida, proporcionada pelo terreno elevado.

Portanto, a orografia do terreno pode atuar como um fator mitigador da perda de sinal, oferecendo uma propagação mais eficiente em determinados cenários. Por outras palavras, locais mais distantes, porém em altitudes superiores, podem receber um sinal mais forte do que locais mais próximos, mas com uma linha de vista obstruída por edifícios e outras construções. Este fenómeno ressalta a importância de considerar a orografia do local ao planear e implementar sistemas de comunicação LoRa, garantindo uma cobertura mais eficaz e otimizada para a área de interesse.

3.5.2 Terreno plano com estação móvel entre edifícios

A primeira situação, ilustrada na Figura 3.23, representa um terreno plano onde a estação móvel está posicionada entre edifícios. Neste cenário, a propagação do sinal enfrenta diversos obstáculos, uma vez que os edifícios ao redor da estação móvel bloqueiam parte considerável da linha de vista entre a *gateway* e a estação móvel. A presença de múltiplos edifícios interfere na propagação do sinal, resultando numa maior atenuação e uma intensidade de sinal reduzida. Este cenário é típico de áreas urbanas densamente construídas, onde a proximidade dos edifícios causa bloqueios consideráveis ao sinal de rádio.

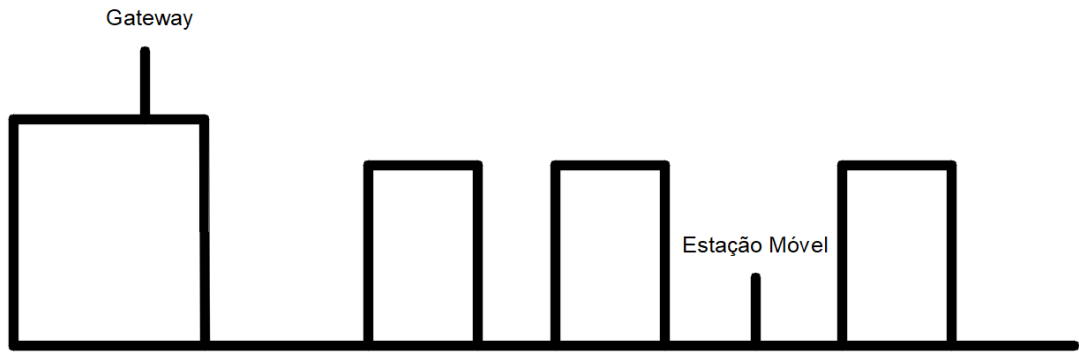


Figura 3.23 - Cenário com terreno plano.

3.5.3 Terreno inclinado

A segunda situação, representada na Figura 3.24, mostra um terreno inclinado. Nesta configuração, a estação móvel está situada numa elevação superior à da gateway. A inclinação do terreno permite diminuir a altura relativa entre a Gateway e a estação móvel, reduzindo a quantidade de obstáculos no caminho do sinal. Como resultado, a atenuação do sinal pode ser menor, e a intensidade do sinal pode ser melhor para distâncias maiores comparativamente a um terreno plano. Este fenômeno ocorre porque a elevação proporciona uma linha de vista mais desobstruída, permitindo uma propagação mais eficiente do sinal. Para a análise de situações em que a estação móvel possa estar num ponto mais alto, será importante considerar uma altura h_{Δ} de modo a avaliar a influência da variação de elevação no comportamento da propagação do sinal e na qualidade da comunicação.

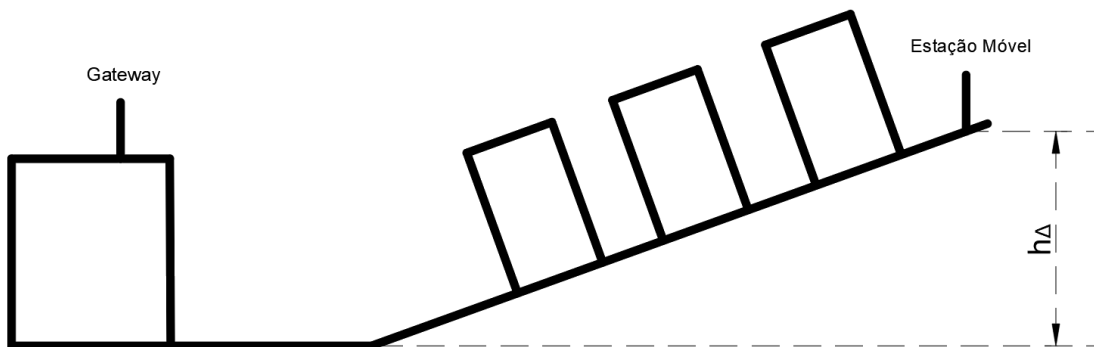


Figura 3.24 - Cenário com terreno inclinado.

3.5.4 Terreno Inclinado e depois plano

Na terceira situação, ilustrada na Figura 3.25, o terreno começa inclinado e depois torna-se plano. Este cenário combina a diminuição da altura relativa entre as antenas apresentada pela elevação inicial com os desafios de um terreno plano subsequente. A qualidade do sinal pode melhorar consideravelmente quando a estação móvel está na parte inclinada do terreno devido à redução de obstáculos. No entanto, à medida que o terreno se torna plano, a propagação do sinal pode enfrentar novamente os desafios das obstruções causadas por edifícios ou outras estruturas no nível do solo.

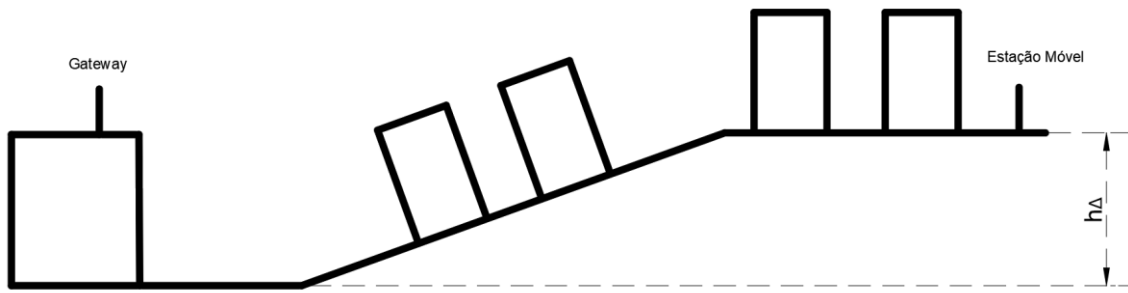


Figura 3.25 - Cenário com terreno inclinado e depois plano.

4 Resultados

O presente capítulo centra-se na análise dos dados recolhidos durante os ensaios realizados em diversos cenários urbanos. Estes ensaios permitiram avaliar o comportamento do sinal LoRa em condições reais, observando variações no desempenho do sistema de acordo com diferentes condições de propagação, como linha de vista, ausência de linha de vista e interferência causada por obstáculos como edifícios. Todos os gráficos e cálculos foram realizados com a ajuda do Excel.

4.1 Medições em linha de vista com antenas à mesma altura

O ensaio inicial, realizado no parque de estacionamento, visou aferir a atenuação característica do meio, que foi determinada por intermédio dos valores de ESP obtidos, após deduzir a potência de transmissão e os ganhos inerentes ao sistema. Na Figura 4.1, estão ilustrados os resultados relativamente à atenuação do sinal em condições de linha de vista.

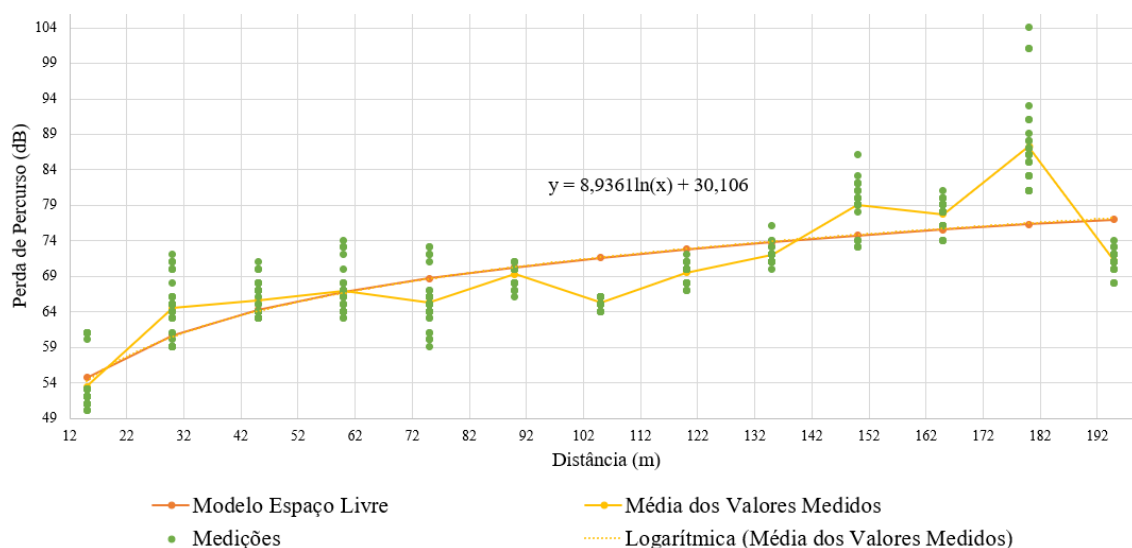


Figura 4.1 - Atenuação do sinal em linha de vista no estacionamento.

O gráfico apresentado na figura 4.1 é um estudo da perda em espaço livre, que representa uma medida da atenuação do sinal conforme se propaga através do ar sem obstáculos. Este tipo de análise ajuda a entender o comportamento das ondas de rádio e prever o desempenho de sistemas de comunicação sem fio.

Através do gráfico observa-se que o penúltimo ponto mostra uma discrepância considerável em relação à linha teórica, indicando uma perda de sinal maior que o esperado. A explicação para esta perda aumentada é que o rádio estava próximo de obstáculos, que podem causar reflexão, difração ou absorção das ondas de rádio.

O último ponto mostra uma melhoria do sinal, mesmo estando mais longe do que os pontos anteriores. Isso deve-se à linha de visão mais desobstruída, o que demonstra a importância da linha de vista na propagação de sinais de rádio.

O gráfico fornece uma representação visual útil da perda em linha de vista das variações experimentais. Destaca a importância de considerar os efeitos ambientais na propagação do sinal e a necessidade de ajustar os modelos teóricos para refletir as condições reais encontradas.

4.2 Medições e impacto do diagrama de radiação na atenuação do sinal

O segundo ensaio visou compreender como o diagrama de radiação pode afetar a atenuação do sinal para distâncias próximas da antena. Na figura 4.2 estão representados os resultados obtidos para a atenuação do sinal.

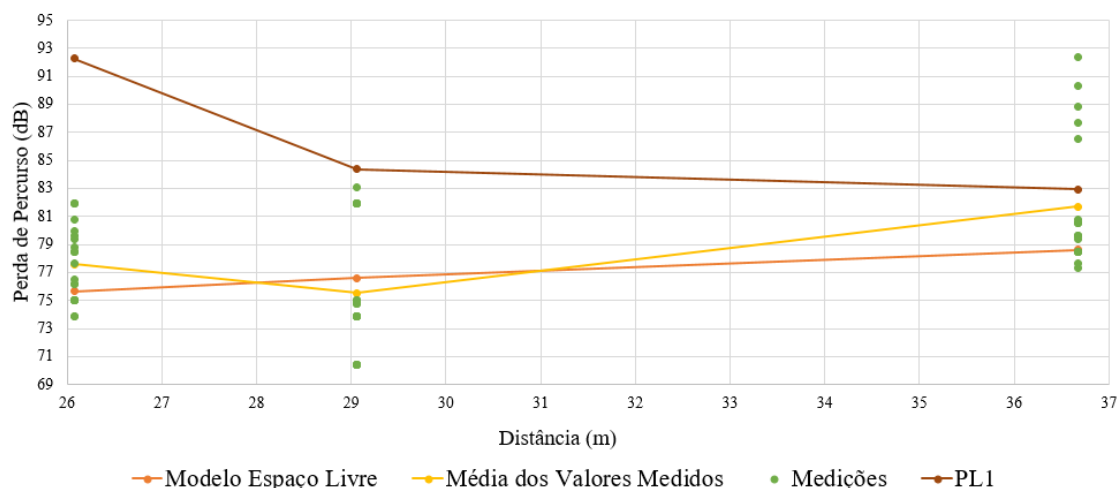


Figura 4.2 - Atenuação do sinal com vista a afetação do diagrama de radiação.

O gráfico apresentado oferece uma visão empírica da perda em linha de vista, sendo de grande importância para a compreensão do comportamento da propagação do sinal. Os dados recolhidos, representados pelos pontos a verde, evidenciam as medições de perda de sinal a diferentes distâncias da antena transmissora. PL1 representa a perda pelo diagrama de radiação, calculado através das equações 3.4 e 3.5.

Ao examinar os resultados obtidos, é relevante destacar o primeiro ponto, localizado a uma distância de aproximadamente 26 metros (10 metros em relação ao edifício). Contrariamente ao esperado teoricamente, onde seria previsível que uma menor distância resultasse numa menor atenuação, observa-se uma perda de sinal superior em comparação com o ponto subsequente, localizado a 29 metros. Este fenómeno pode ser explicado pelas características específicas do lóbulo de radiação da antena. A potência irradiada a 10 metros é inferior devido ao ângulo de incidência, como descrito pela função \sin^2 .

A análise dos dois primeiros pontos do gráfico corrobora a influência do ângulo de incidência no comportamento da recepção do sinal, evidenciando uma diminuição da perda ao aumentar a distância. Contudo, no último ponto, este padrão já não se verifica, sendo provável que outros fatores, como as características do ambiente, estejam a influenciar de forma considerável o sinal do que o diagrama de radiação.

No que concerne aos cálculos teóricos, a atenuação prevista no primeiro ponto é elevada devido à consideração do diagrama de radiação de ambas as antenas, sendo que o efeito de reflexões pode melhorar o sinal em comparação com o valor esperado. Para distâncias muito curtas, o cálculo teórico de PL1 revela-se inadequado, pois considera uma perda excessiva de aproximadamente 8 dB por antena, o que distorce a estimativa real da perda de sinal.

4.3 Medições sem linha de vista para análise do método da ponta de faca

O ensaio da antena no topo de um edifício sem linha de vista para o recetor visa verificar se a aplicação do método da ponta de faca se aplica ao ambiente escolhido para os testes de modo a compreender melhor que tipos de modelo utilizar em determinadas situações. Na figura 4.3 estão representados os resultados obtidos para a perda de propagação utilizando o método da ponta de faca.

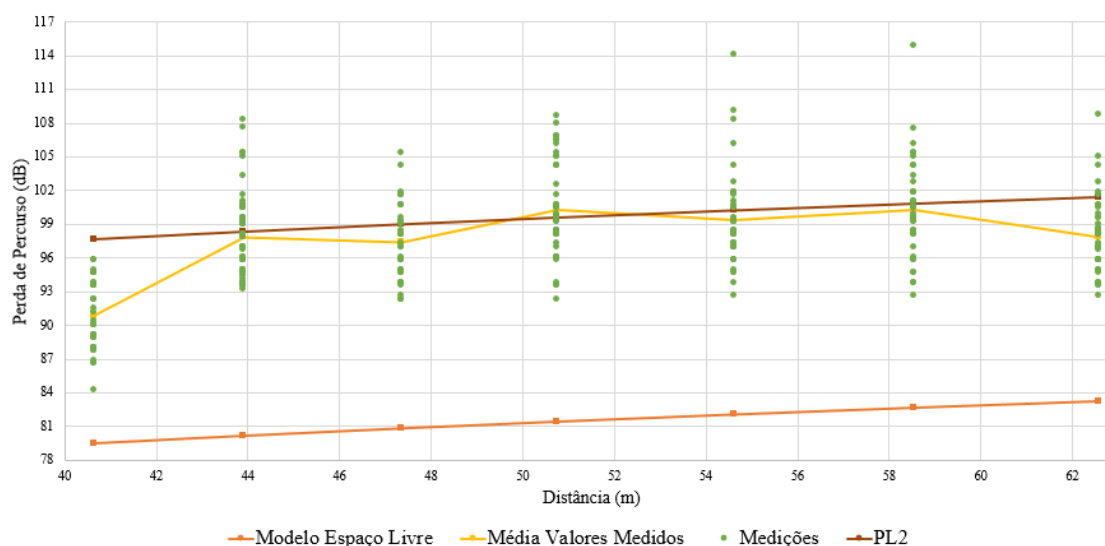


Figura 4.3 - Dados para comparação com o método da ponta de faca.

A linha amarela, que representa a perda de propagação obtida, revela um alinhamento com a linha castanha (PL2), que retrata a perda de propagação prevista pelo método da ponta da faca, um modelo que considera os efeitos de arestas e obstáculos no caminho do sinal. Esta previsão é calculada com base nas equações 3.12 e 3.13. Observa-se, ainda, que para o primeiro ponto, a linha amarela desvia-se ligeiramente da linha castanha, apresentando uma atenuação inferior à esperada.

A concordância geral entre as duas linhas sugere que o método da ponta da faca é adequado para prever a atenuação.

As flutuações nos dados recolhidos destacam a importância de se recolher uma quantidade considerável de dados em ambientes reais, de forma a melhorar a precisão da modelação e a capturar as variações dinâmicas da propagação dos sinais.

4.4 Medições em radiais

Nesta seção são descritos os pontos onde se efetuaram os ensaios de propagação do sinal LoRa em ambiente urbano para avaliar a atenuação do sinal. A seleção dos radiais considerou a proximidade e altura dos edifícios, bem como a largura das ruas. Os restantes pontos para a análise foram escolhidos em zonas homogêneas e em áreas com variações, como em frente a edifícios e nas aberturas entre os mesmos, para verificar a influência das obstruções na intensidade do sinal.

Na figura 4.4 estão representados os pontos escolhidos para fazer uma primeira análise da perda de percurso na cidade.



Figura 4.4 - Pontos escolhidos para a primeira análise.

Na figura 4.5 é possível observar a perda de percurso em função da distância tanto para o *downlink* como para o *uplink*.

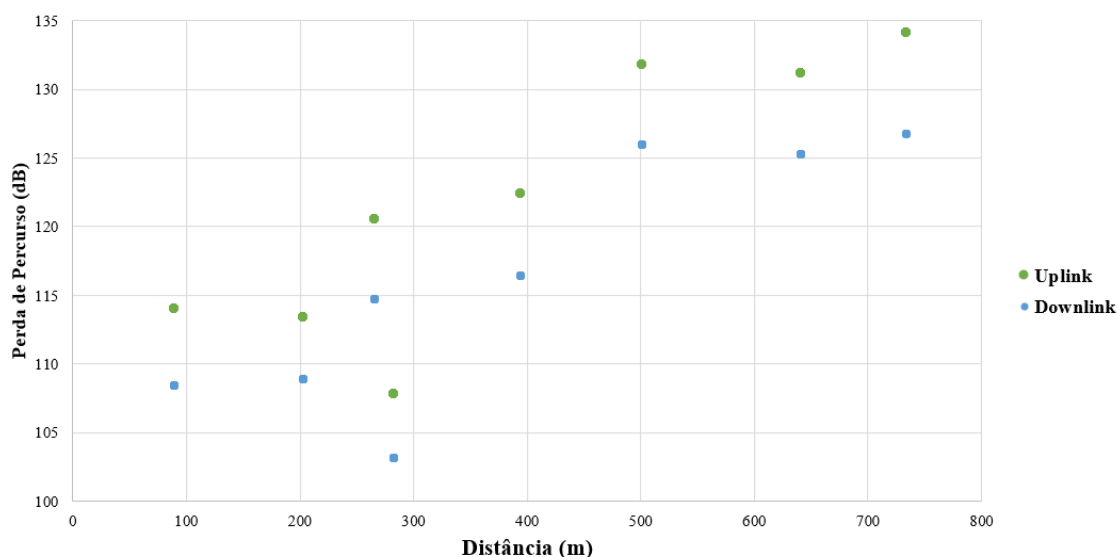


Figura 4.5 - Valores de perda de percurso registados.

Na Figura 4.5 é possível observar a relação entre a perda de percurso e a distância para o *uplink* e *downlink*. Nota-se que a perda de percurso no *uplink* é consistentemente

maior do que no *downlink*, com uma diferença de, em média, 5,7 dB. Apesar da potência de transmissão ser a mesma para ambos os sentidos, essa diferença deve-se principalmente ao facto de os dados no *uplink* serem enviados a partir de uma altura inferior, entre os edifícios, enquanto no *downlink*, os dados são enviados a partir de uma altura acima dos edifícios, o que facilita a propagação do sinal.

Esse fenómeno está relacionado com as condições de propagação em ambientes urbanos. No *uplink*, a presença de múltiplos obstáculos, como edifícios e outras estruturas, provoca maior difração, reflexão e bloqueio, resultando numa maior atenuação do sinal. Por outro lado, no *downlink*, com o sinal a ser emitido a partir de uma altura maior, acima das obstruções, o percurso do sinal é menos afetado por essas interferências, o que explica a perda de percurso menor em comparação ao *uplink*.

Na figura 4.6 está representado o gráfico que relaciona a potência do sinal com o SNR tanto do *uplink* como do *downlink*.

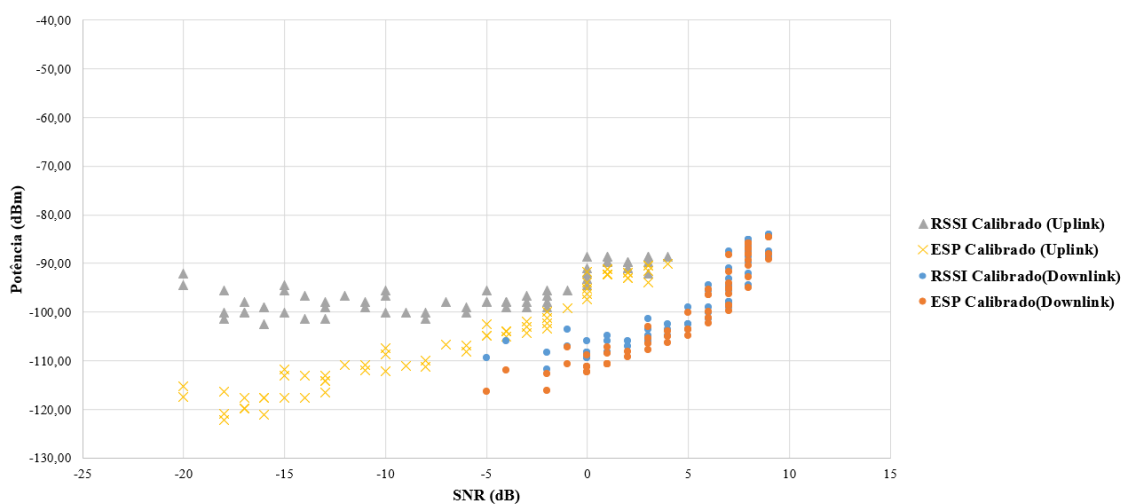


Figura 4.6 - Relação entre SNR e potencia para uplink e downlink.

Ao observar o gráfico da figura 4.6, nota-se que nas medições o SNR observado no *uplink* é consideravelmente superior ao do *downlink*.

Para valores de SNR muito baixos, em torno de -20 dB no *uplink*, o *downlink* apresenta um SNR muito superior, próximo de -5 dB. Este comportamento pode ser explicado pela diferença de altura dos dispositivos envolvidos na transmissão. No *uplink*, os dados são enviados de uma posição mais baixa, entre edifícios, o que influencia a propagação e os efeitos de difração, mas o recetor, posicionado numa altura superior (*gateway*), está menos sujeito a interferências. No *downlink*, por outro lado, o sinal espalha-se mais pelo que facilita o alcance do dispositivo no solo, resultando num SNR inferior.

De forma geral, a análise do gráfico sugere que o *downlink* é menos afetado por perdas relacionadas ao ambiente físico e apresenta um desempenho superior em termos de SNR, enquanto o *uplink* sofre maior degradação devido à propagação do sinal através dos obstáculos urbanos, resultando num menor SNR. Este fenómeno é relevante para a

otimização de redes de comunicação em ambientes urbanos, onde a altura dos dispositivos e a presença de obstáculos devem ser considerados para melhorar o desempenho do sistema.

Dado o que foi descrito anteriormente, observou-se que no *uplink* o SNR é consideravelmente elevado para distâncias relativamente curtas, em comparação com o *downlink*. Esta diferença deve-se às condições específicas de propagação do *uplink*. Dado que os modelos teóricos de propagação foram desenvolvidos principalmente para analisar a perda de percurso no *downlink*, decidiu-se que, nas análises subsequentes, será avaliado apenas o *downlink*. Isto permitirá uma comparação mais direta com os modelos teóricos existentes, que não são adequados para o *uplink* nas condições observadas. Para uma análise mais detalhada do *uplink*, será necessário desenvolver modelos específicos que considerem as características particulares da comunicação *uplink*, nomeadamente a propagação em ambientes urbanos e os efeitos das obstruções ao nível do solo.

De seguida, foram escolhidos dois radiais, conforme representado na figura 4.7. Estes radiais foram selecionados com o objetivo de ganhar sensibilidade em relação à proximidade dos edifícios, altura dos edifícios, largura das ruas e o efeito que essas variáveis têm na atenuação do sinal. Na imagem, os dois radiais são representados por vários pontos, com a *gateway* destacada a vermelho.



Figura 4.7 - Radiais para estudo inicial.

Os pontos ao longo dos radiais foram escolhidos para capturar uma variedade de características urbanas, permitindo uma análise detalhada de como diferentes configurações de ambiente afetam a qualidade do sinal LoRa. Para isso, foram medidas as alturas dos edifícios adjacentes utilizando um aparelho com laser, garantindo precisão nos dados recolhidos.

Esta abordagem permite uma compreensão detalhada das influências urbanas na propagação do sinal, considerando fatores como a proximidade dos edifícios, que pode bloquear ou refletir o sinal, a altura dos edifícios, que pode criar efeito sombra no sinal, e a largura das ruas, que pode afetar a dispersão do sinal. O conhecimento obtido através desta análise será fundamental para otimizar a implementação de sistemas LoRa em áreas urbanas densamente construídas, assegurando uma cobertura mais eficiente e confiável.

Na figura 4.8 está representado como foram determinadas as distâncias necessárias para a utilização do método de ponta de faca.



Figura 4.8 - Obstáculo para o modelo da ponta de faca.

Para a aplicação do método da ponta de faca, como representado na figura 3.21, foram utilizadas as distâncias D_1 e D_2 . Na figura 4.8 a branco está representado a distância D_1 e a vermelho a distância D_2 . O valor D_1 é fixo, dado que para um determinado radial os pontos seguem a mesma direção, enquanto a distância D_2 varia conforme o ponto.

Na figura 4.9 estão representados os dados recolhidos para o radial 1, onde PL2 representa a perda pelo método da ponta de faca, calculado através das equações 3.12 e 3.13.

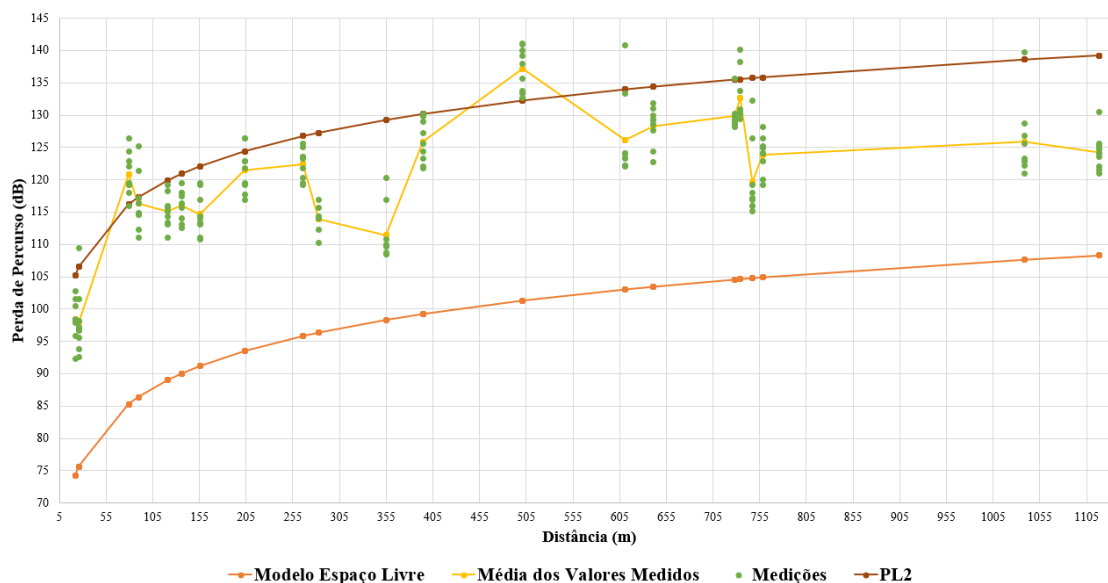


Figura 4.9 - Dados recolhidos para o radial 1.

No radial 1 observa-se uma correlação clara entre o aumento da distância e a atenuação do sinal, conforme ilustrado na figura 4.9. À medida que a distância aumenta, a atenuação do sinal também cresce, o que é esperado em modelos de propagação de rádio. No entanto, nos pontos finais do gráfico, existe uma melhoria notável na qualidade do sinal, o que representa um desvio do comportamento esperado. Esta melhoria pode ser explicada pela topografia do terreno, especificamente, o terreno neste segmento final está a subir, posicionando os pontos de medição numa elevação maior. Estando numa posição mais elevada, os pontos finais têm um percurso de propagação mais desobstruído o que pode ter contribuído para a melhoria do sinal.

Adicionalmente, é importante destacar que alguns dos pontos de medição estão muito próximos uns dos outros. Este detalhe no planeamento do estudo teve como objetivo capturar as variações de sinal quando junto aos edifícios e, em seguida, afastando-se dos mesmos. Esta abordagem permitiu avaliar como a presença de edifícios influencia a atenuação do sinal. Os dados revelam que, ao afastar-se dos edifícios, a atenuação do sinal tende a reduzir.

Ao considerar a média dos valores medidos, pode-se observar uma tendência que reflete melhor o efeito agregado das diversas obstruções no percurso do sinal. Comparando estas medições com o modelo de espaço livre e o modelo PL2, fica evidente que os ambientes urbanos introduzem variabilidade considerável que não é capturada plenamente pelos modelos teóricos simples.

Na figura 4.10 estão representados os dados recolhidos para o radial 2. Neste gráfico observa-se uma tendência semelhante à verificada no primeiro radial, onde a atenuação do sinal aumenta com o aumento da distância. No entanto, assim como no primeiro radial, os pontos mais afastados apresentam uma melhoria na qualidade do sinal.

Esta melhoria pode ser atribuída à topografia do terreno na cidade do Funchal, que se eleva nos pontos mais distantes, proporcionando uma posição mais alta e uma linha de

vista mais limpa, com menos obstruções físicas. PL2 representa a perda pelo método da ponta de faca, calculado através das equações 3.12 e 3.13.

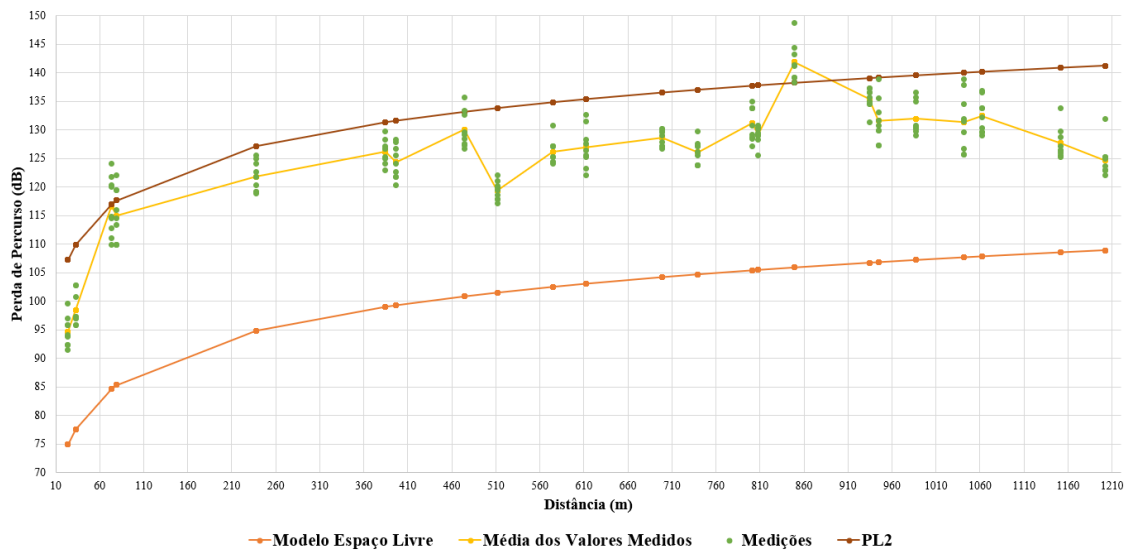


Figura 4.10 - Dados recolhidos para o radial 2.

A análise dos dados da figura 4.10 revela novamente que quando as medições são feitas afastando-se dos edifícios, o sinal tende a melhorar. Em áreas onde a linha de vista é bloqueada por estruturas urbanas, a perda de percurso é maior. Ao mover-se para áreas abertas, onde há menos obstruções, a intensidade do sinal aumenta, demonstrando uma menor atenuação.

No gráfico, isso é evidenciado pelos valores de medição que apresentam uma maior flutuação nos pontos mais próximos aos edifícios e que tendem a se estabilizar e melhorar à medida que se afastam dessas obstruções. A linha que representa a média dos valores medidos proporciona uma visão mais clara desta tendência, comparando-a com os modelos teóricos de espaço livre e PL2.

Por fim, ao sobrepor os dados dos dois radiais, como está representado na figura 4.11, nota-se que as linhas têm uma tendência comum. Isso indica que os ambientes em ambos os radiais são semelhantes em termos de densidade de edifícios, largura das ruas e outras características urbanas. Essa consistência sugere que os padrões de atenuação do sinal são influenciados de maneira similar pelas condições urbanas presentes em ambos os radiais.

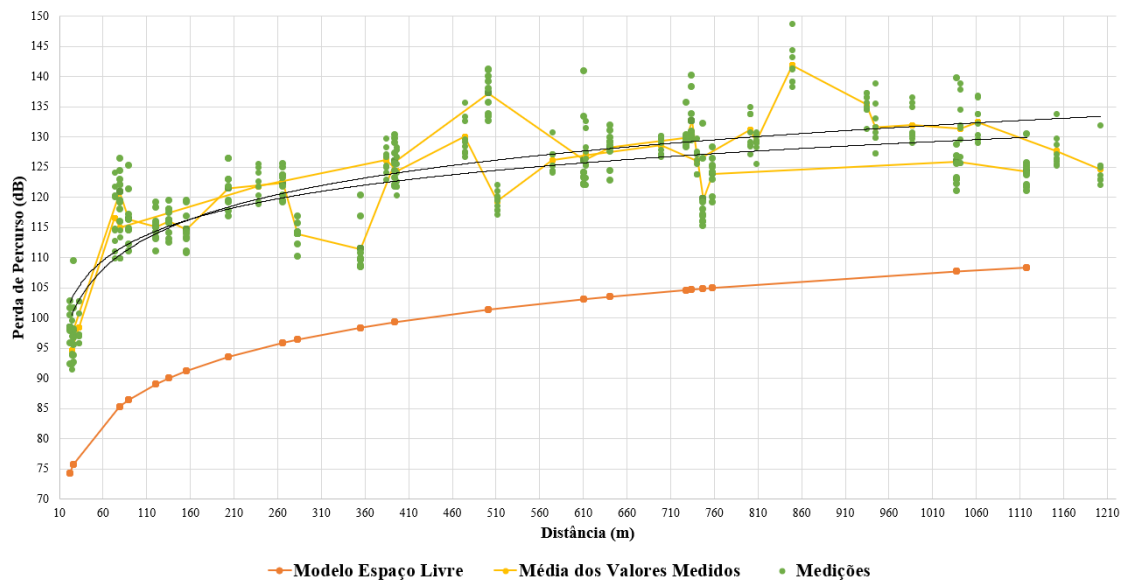


Figura 4.11 - Comparação entre os dois radiais.

É possível verificar uma discrepância entre os 280 e 360 metros, onde o radial 1 apresenta dois pontos com perda de sinal muito menor do que o esperado. Este desvio pode ser explicado pelas condições específicas desses pontos:

- Ponto a 280 metros: Este ponto está localizado numa área mais aberta onde várias ruas se intercetam. A ausência de obstruções consideráveis nesta interseção resulta numa menor atenuação do sinal, permitindo uma propagação mais eficiente.
- Ponto a 360 metros: Aqui, a atenuação é menor devido à presença de um muro relativamente baixo, com cerca de 4 metros de altura, à frente do ponto de medição. Além disso, atrás deste muro, existem ruínas de edifícios, o que significa que a densidade de edifícios é reduzida. Esta menor densidade de obstruções permite que o sinal se propague com menos interferência, resultando numa atenuação mais baixa.

Estas observações destacam a importância de considerar as características específicas de cada local ao analisar a propagação do sinal. A variabilidade encontrada em áreas urbanas pode ter impactos consideráveis na qualidade do sinal, e entender essas nuances é crucial para otimizar a implementação de redes LoRa.

4.5 Medições com antenas no solo

Neste caso, ambas as antenas foram colocadas a 3 metros do solo, ao contrário do que foi feito anteriormente. Os pontos onde foram recolhidos os dados estão representados na figura 4.12. Esta configuração foi escolhida para verificar o impacto da altura das antenas na atenuação do sinal, é esperado que a atenuação seja maior devido à presença de mais obstáculos entre as antenas, como edifícios e outros elementos do ambiente urbano.



Figura 4.12 - Pontos com antenas no solo.

Na figura 4.13 estão representados os dados recolhidos para o radial 1.

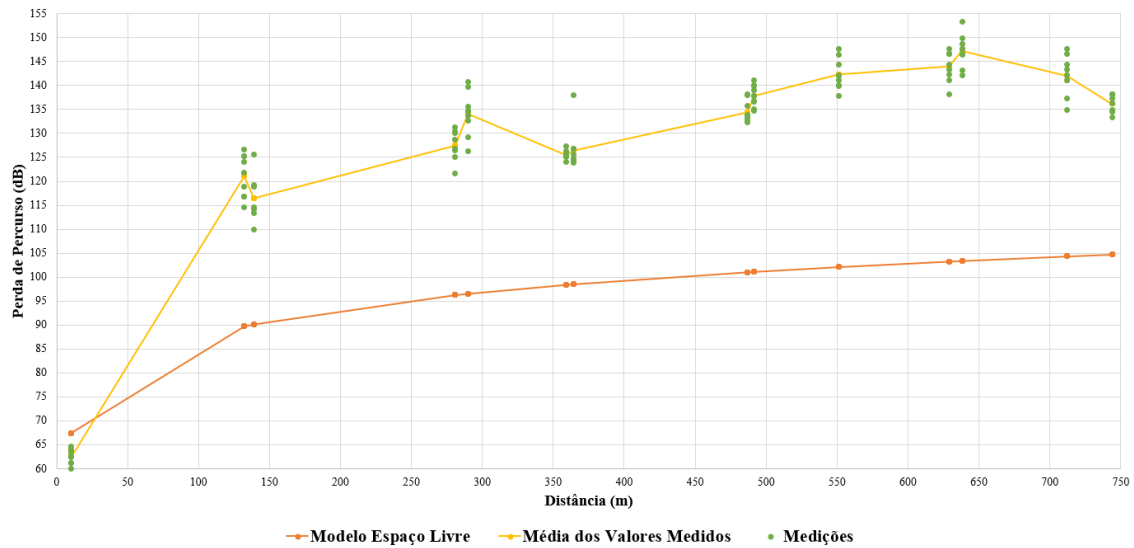


Figura 4.13 - radial 1 antenas no solo.

Como previsto, a atenuação do sinal é consideravelmente superior nesta configuração. Isso ocorre porque, ao reduzir a altura das antenas, aumenta-se a probabilidade de interferências causadas por obstáculos no caminho do sinal.

Outro ponto a destacar é que, ao fim de 650 metros, já se atinge o limiar de sensibilidade, enquanto antes, em distâncias superiores a 1000 metros, este limiar não foi alcançado. Isso reforça a ideia de que a altura das antenas tem um impacto direto na propagação do sinal e na distância máxima efetiva de comunicação.

Na figura 4.14 estão representados os dados recolhidos para o radial 2.

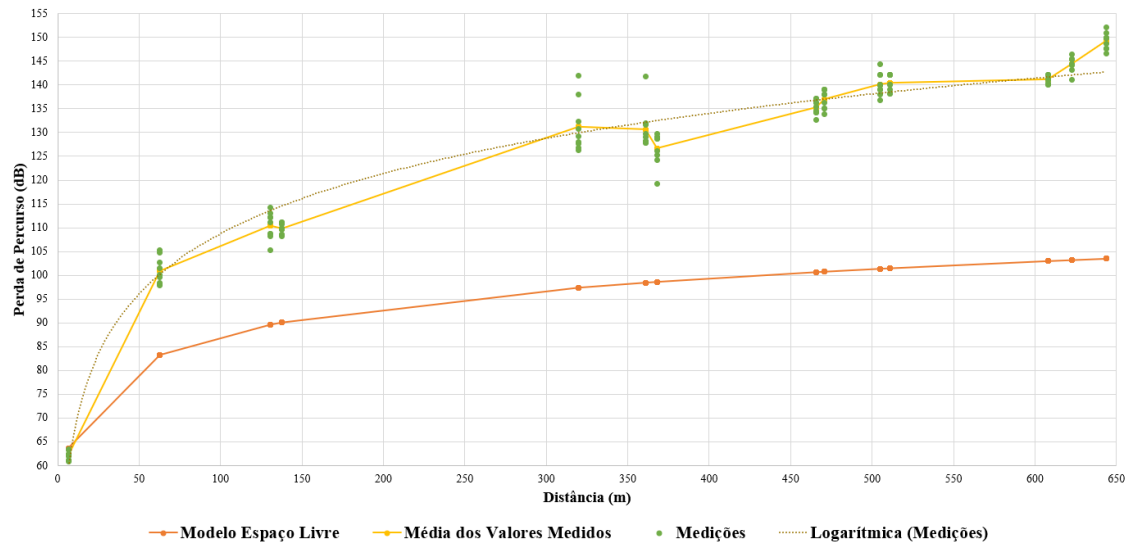


Figura 4.14 - radial 2 antenas no solo.

Observa-se que o radial 2 apresenta perdas de sinal idênticas ao radial 1. Isso deve-se ao fato de que os ambientes em que esses radiais foram realizados são semelhantes, o que resulta em padrões de atenuação parecidos. A simetria dos meios nos quais as medições foram realizadas contribui para a consistência dos resultados entre os dois radiais.

A redução da altura das antenas para 3 metros do solo resulta numa atenuação consideravelmente maior do sinal, conforme esperado devido ao aumento de obstáculos no elipsoide de Fresnell. Além disso, ao atingir o limiar de sensibilidade em distâncias mais curtas reforça a importância da altura das antenas na propagação do sinal LoRa em ambientes urbanos.

4.6 Pontos escolhidos para a análise

Neste estudo tentou-se escolher alguns dos pontos para a recolha de dados em zonas homogêneas, com o intuito de facilitar a análise da propagação do sinal LoRa. Contudo, nem todos os pontos seguiram essa homogeneidade. Alguns pontos foram selecionados em frente a edifícios e posteriormente nas aberturas entre esses edifícios de modo a verificar se a ausência de obstruções melhorava o sinal conforme o esperado.

Na figura 4.15 estão representados os pontos onde foram recolhidos os dados durante o estudo da propagação do sinal LoRa em ambiente urbano. A seleção dos pontos de recolha de dados visa avaliar a influência das características urbanas na atenuação do sinal.

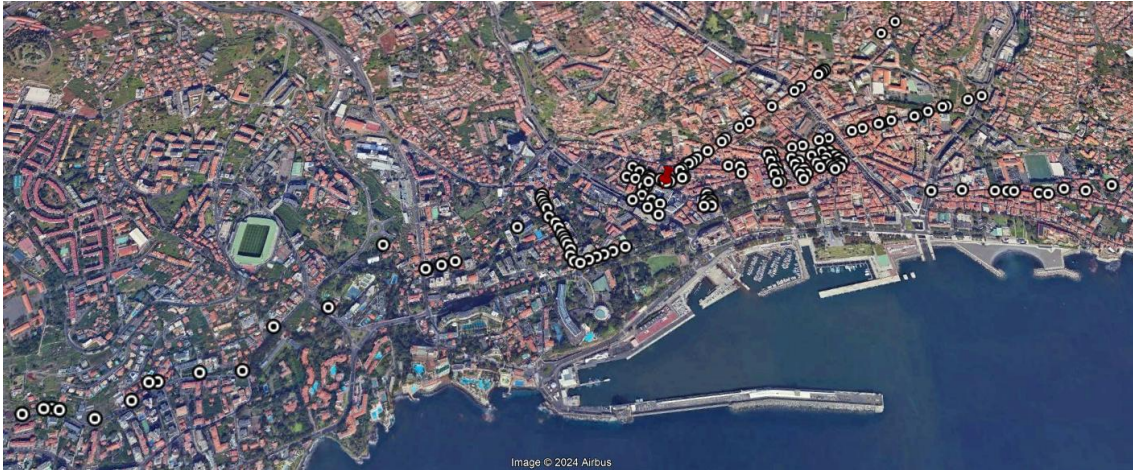


Figura 4.15 - Pontos escolhidos para a recolha de dados.

Do lado direito da imagem, optou-se por não avançar além de determinados pontos, pois o terreno começava a subir.

Para o lado esquerdo, a recolha de dados continuou até atingir o limiar de sensibilidade do sinal, onde os pacotes de dados começaram a se perder. Este ponto marca a distância máxima em que o sinal LoRa pode ser considerado confiável, dadas as condições urbanas presentes. A recolha de dados até este limiar é crucial para entender os limites operacionais do sistema em áreas urbanas densamente construídas.

Esta abordagem permite avaliar a influência da proximidade e altura dos edifícios, largura das ruas e outras características urbanas na propagação do sinal. A análise dos dados recolhidos nestes pontos ajudará a determinar estratégias para a implementação de sistemas LoRa, garantindo uma cobertura confiável e eficiente em ambientes urbanos.

4.6.1 Análise dos parâmetros influentes na atenuação do sinal

De seguida será feita a análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios. Esta análise é essencial para compreender como as diferentes elevações das construções urbanas afetam a propagação do sinal LoRa.

As alturas dos edifícios foram determinadas de duas maneiras diferentes. Primeiro foram medidas as alturas com a ajuda de um aparelho laser, nomeadamente as alturas dos edifícios nos pontos representados na figura 4.7, de modo a ganhar alguma sensibilidade a altura dos mesmos. Posteriormente foi utilizada uma estimativa de cerca de 3 metros por andar para determinar a altura dos restantes edifícios.

Os gráficos apresentados nas figuras 4.16 e 4.17 segmentam os dados de atenuação do sinal em quatro categorias de altura de edifícios: 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 15 m, 15 - 20 m e 20 - 25 m. A amarelo está representada a perda em espaço livre.

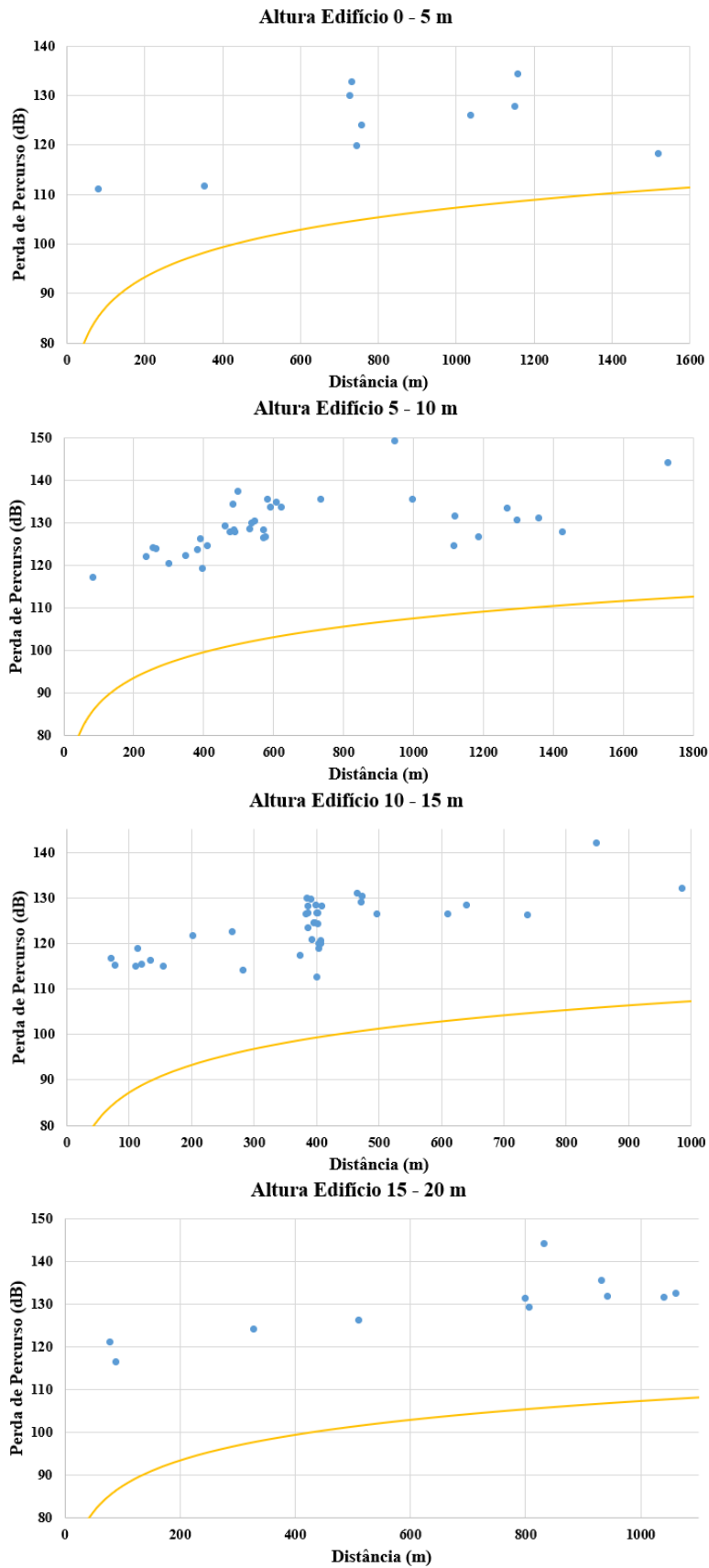


Figura 4.16 - Dados segmentados por altura de edifícios (0 – 20 m).

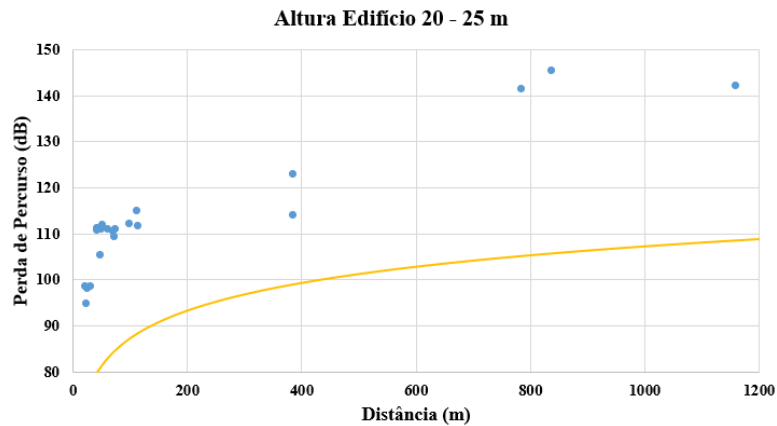


Figura 4.17 - Dados segmentados por altura de edifícios (20 – 25 m).

Ao analisar os gráficos da figura 4.16 e 4.17, é possível identificar algumas tendências claras. Em geral, observa-se que a atenuação do sinal tende a aumentar com a distância em todas as categorias de altura dos edifícios, o que é consistente com os modelos teóricos de propagação do sinal. No entanto, a magnitude e a dispersão dos dados variam entre as diferentes categorias de altura.

Tendência geral:

- A tendência de aumento da atenuação com a distância é evidente em todas as categorias.
- Em edifícios com alturas menores (0 - 5 m e 5 - 10 m), observa-se uma maior dispersão dos dados, indicando que a atenuação do sinal é mais variada e menos previsível.
- Para edifícios mais altos (10 - 15 m, 15 - 20 m e 20 - 25 m), a tendência é mais clara e os dados são relativamente menos dispersos, sugerindo que a altura elevada dos edifícios tem um efeito mais consistente na atenuação do sinal.

Variações fora da tendência:

- Em todas as categorias existem pontos que se desviam da tendência média. Estas variações indicam que há outros fatores além da altura dos edifícios que influenciam a atenuação do sinal.
- Por exemplo, em algumas medições, a atenuação do sinal é consideravelmente menor do que a esperada, o que pode ser atribuído a áreas mais abertas ou a uma menor densidade de edificações.

A análise dos gráficos sugere que, embora a altura dos edifícios seja um parâmetro importante, não é suficiente para explicar todas as variações na atenuação do sinal. Para obter uma compreensão mais completa, é necessário incluir outros parâmetros na análise, como a largura da rua, ângulo da rua em relação a direção do sinal e proximidade ao edifício.

4.6.2 Análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e o ângulo

Aqui será feita a análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios, agora incluindo mais um parâmetro de análise: o ângulo que a rua faz com a direção do sinal. Esta abordagem visa compreender como a orientação das ruas em relação ao trajeto do sinal LoRa afeta a atenuação.

Os gráficos apresentados nas figuras 4.18 e 4.19 segmentam os dados de atenuação do sinal em cinco categorias de altura de edifícios: 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 15 m, 15 - 20 m e 20 - 25 m, além de considerar três intervalos de ângulo: 0 - 30°, 30 - 60° e 60 - 90°.

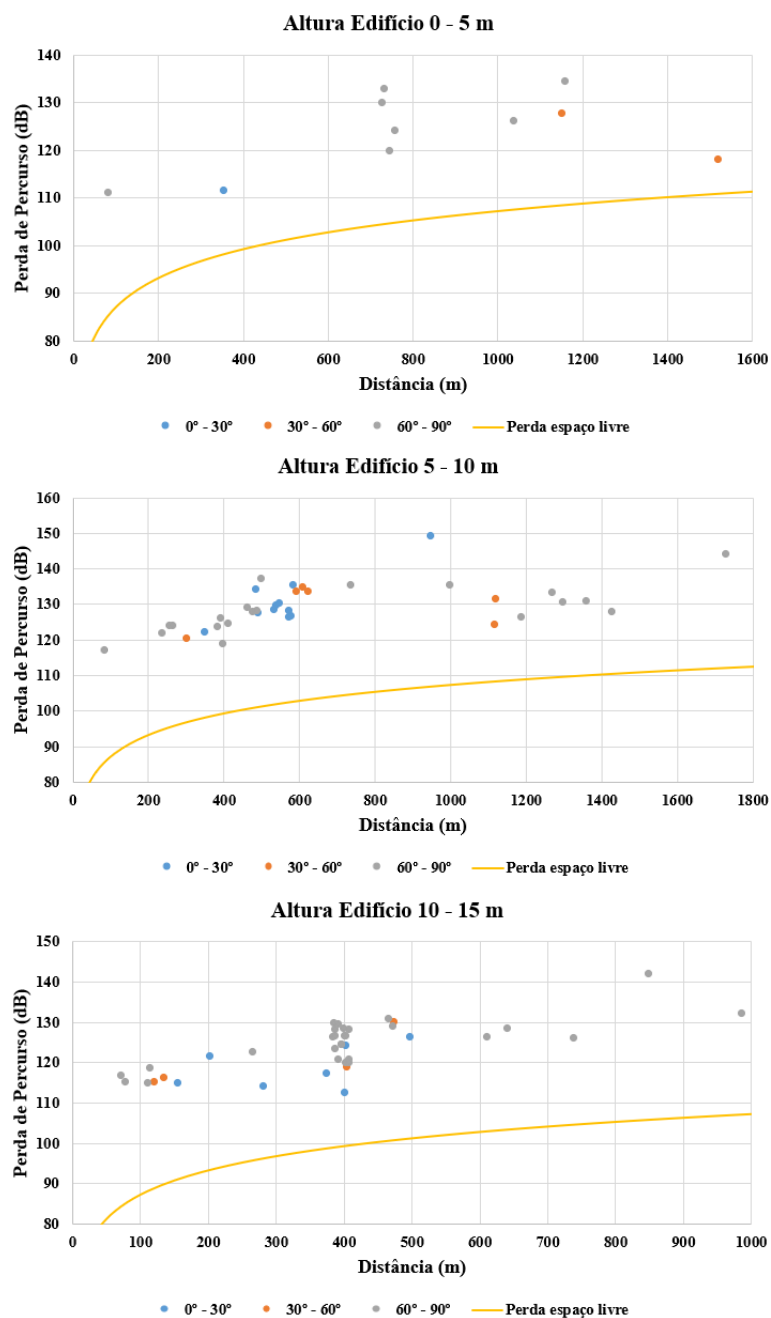


Figura 4.18 - atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e o ângulo da rua (0 – 15 m).

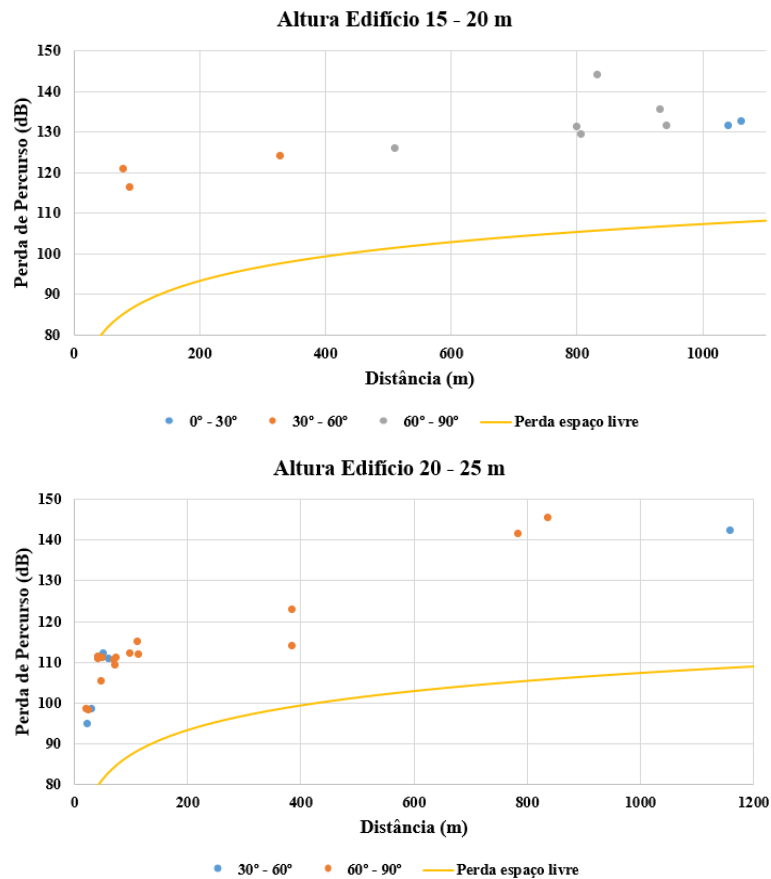


Figura 4.19 - atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e o ângulo da rua (15 – 25 m).

Tendência geral:

- A tendência de aumento da atenuação com a distância é evidente em todas as categorias de altura dos edifícios.
- Observa-se que, em geral, ângulos menores (0 - 30°) tendem a apresentar uma atenuação menor, enquanto ângulos maiores (60 - 90°) resultam numa maior atenuação do sinal.

Influência do ângulo:

- Para edifícios com alturas entre 0 - 5 m e 5 - 10 m, os dados mostram que os ângulos menores têm uma atenuação mais baixa. Isso deve-se ao facto de que a direção do sinal se alinhar com a orientação da rua, resultando em menos reflexões e bloqueios.
- Nas categorias de altura de edifícios 10 - 15 m e 15 - 20 m, a tendência mantém-se, com ângulos maiores apresentando maior atenuação. Isso sugere que a altura combinada com o ângulo de incidência contribui consideravelmente para a perda de sinal.
- Para a categoria de altura 20 - 25 m, embora os dados sejam mais limitados, a tendência de maior atenuação em ângulos maiores continua a ser evidente.

A inclusão do ângulo da rua como um parâmetro adicional na análise da atenuação do sinal, além da altura dos edifícios, proporciona uma compreensão mais completa das variações observadas. Estes fatores combinados oferecem uma visão mais detalhada da propagação do sinal em ambientes urbanos, facilitando a otimização das redes LoRa para obter melhor desempenho em diferentes cenários.

4.6.3 Análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e a largura da rua

De seguida, será feita a análise da atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e a largura da rua. Esta abordagem visa compreender como a combinação destes dois parâmetros afeta a propagação do sinal LoRa em ambientes urbanos.

Os gráficos apresentados nas figuras 4.20 e 4.21 segmentam os dados de atenuação do sinal em cinco categorias de altura de edifícios: 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 15 m, 15 - 20 m e 20 - 25 m, além de considerar várias faixas de largura da rua: 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 15 m, 15 - 20 m, 20 - 25 m, 25 - 30 m, 30 - 35 m e 35 - 40 m.

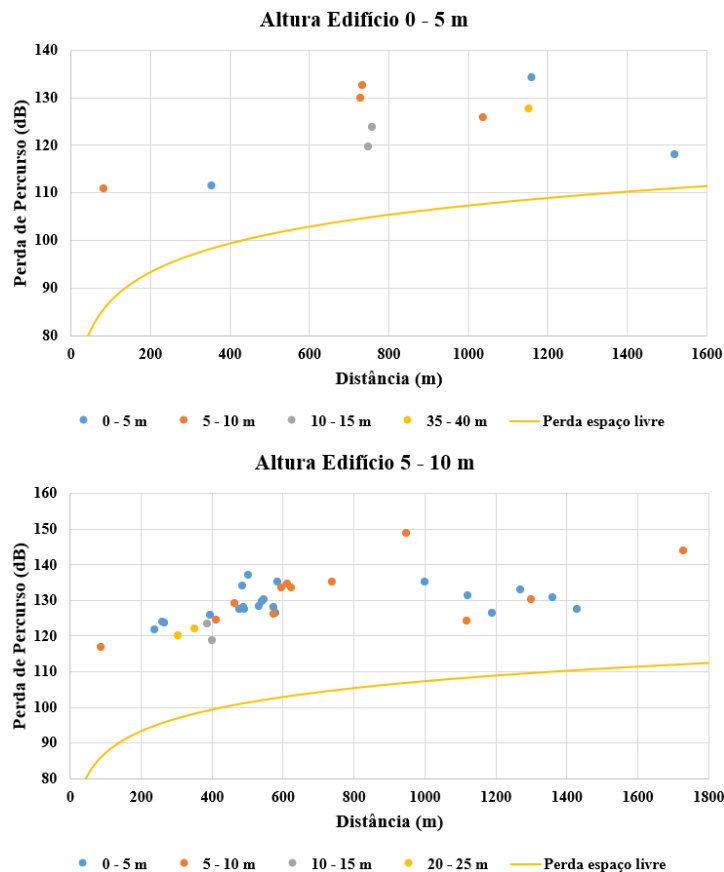


Figura 4.20 - atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e a largura da rua (0 – 10 m).

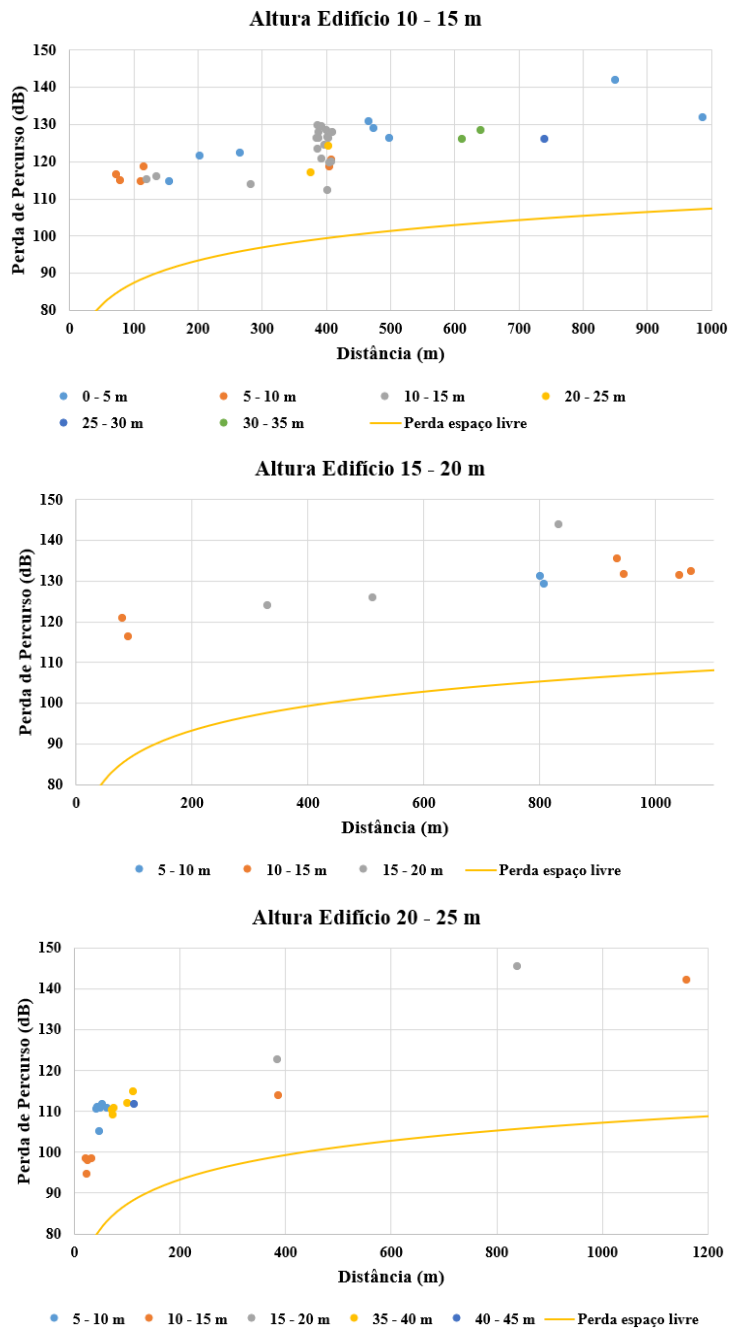


Figura 4.21 - atenuação do sinal considerando a altura dos edifícios e a largura da rua (10 - 25 m).

Tendência geral:

- A tendência de aumento da atenuação com a distância é evidente em todas as categorias de altura dos edifícios.
- Em geral, ruas mais estreitas (0 - 5 m e 5 - 10 m) tendem a apresentar maior atenuação do sinal devido à maior obstrução lateral.

Influência da largura da rua:

- Para edifícios com alturas entre 0 - 5 m e 5 - 10 m, os dados mostram que ruas mais largas tendem a apresentar menor atenuação. Isso pode ser atribuído ao facto

de que ruas mais largas oferecem menos obstáculos laterais, permitindo uma melhor propagação do sinal.

- Nas categorias de altura de edifícios 10 - 15 m, 15 - 20 m e 20 - 25 m, a tendência mantém-se, com ruas mais largas resultando em menor atenuação. Isso sugere que a largura da rua combinada com a altura dos edifícios contribui para a perda de sinal.

A inclusão da largura da rua como um parâmetro adicional na análise da atenuação do sinal, além da altura dos edifícios, proporciona uma compreensão mais completa das variações observadas.

4.6.4 Análise da atenuação do sinal relacionando altura dos edifícios com largura da rua e ângulo

Nesta seção serão analisados os gráficos que relacionam a perda de percurso com a altura dos edifícios com a largura da rua e o ângulo da rua em relação à direção do sinal. O objetivo é identificar e justificar variações inesperadas na atenuação do sinal, considerando a interação entre esses parâmetros.

4.6.4.1 Altura edifício 0 – 5 m

Analisando os gráficos da figura 4.22 que relacionam a altura dos edifícios entre 0 - 5 metros com a largura da rua e o ângulo da rua, pode-se identificar e justificar variações específicas na atenuação do sinal, considerando os pontos circundados a verde e vermelho.

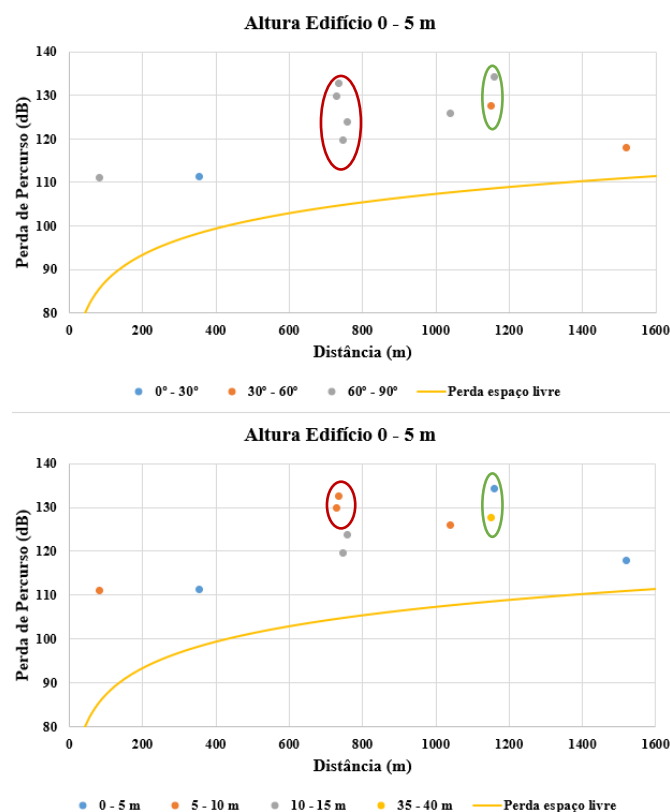


Figura 4.22 - Atenuação para edifício com altura entre 0 e 5 metros.

No gráfico da figura 4.22 que relaciona a altura do edifício com o ângulo (circundado a vermelho), pode-se observar quatro pontos em que o ângulo está entre 60 e 90 graus. No entanto, existe uma grande diferença entre o par de pontos inferior e o par superior, o que não pode ser justificado apenas pelo ângulo da rua.

Ao olhar para o gráfico que relaciona a altura do edifício com a largura da rua, vê-se que os pontos com maior atenuação, circundados a vermelho, estão numa rua com largura de 5 a 10 metros. Em contrapartida, os pontos com menor atenuação estão numa rua com largura de 10 a 15 metros. Portanto, neste caso, consegue-se justificar que, embora ambos estejam no mesmo intervalo de ângulo, os pontos com maior atenuação estão em uma rua mais estreita, como era de esperar. Esta relação só é evidente ao analisar ambos os gráficos simultaneamente.

Em seguida, circundados a verde, embora já esteja justificado que o ponto com maior atenuação esteja em um ângulo de 60 a 90 graus e o ponto com menor atenuação esteja em um ângulo de 30 a 60 graus, como seria de esperar, também é possível justificar tal diferença olhando para o outro gráfico. Este gráfico mostra que o ponto com maior atenuação está numa rua com largura de 0 a 5 metros, enquanto o ponto com menor atenuação está em uma rua com largura de 35 a 40 metros.

A análise dos gráficos para edifícios com altura entre 0 - 5 m revela que a largura da rua é um fator importante para justificar as variações na atenuação do sinal observadas no gráfico de altura *versus* ângulo. Pontos com maior atenuação em ângulos similares estão geralmente localizados em ruas mais estreitas, enquanto pontos com menor atenuação estão em ruas mais largas. Esta interação entre a largura da rua e o ângulo da rua destaca a importância de considerar múltiplos parâmetros ao analisar a propagação do sinal LoRa em ambientes urbanos.

4.6.4.2 Altura edifício 5 – 10 m

Na figura 4.23 observa-se um conjunto de pontos em que o intervalo do ângulo é o mesmo, mostrando a necessidade de utilizar outro parâmetro de modo a justificar as variações na atenuação do sinal.

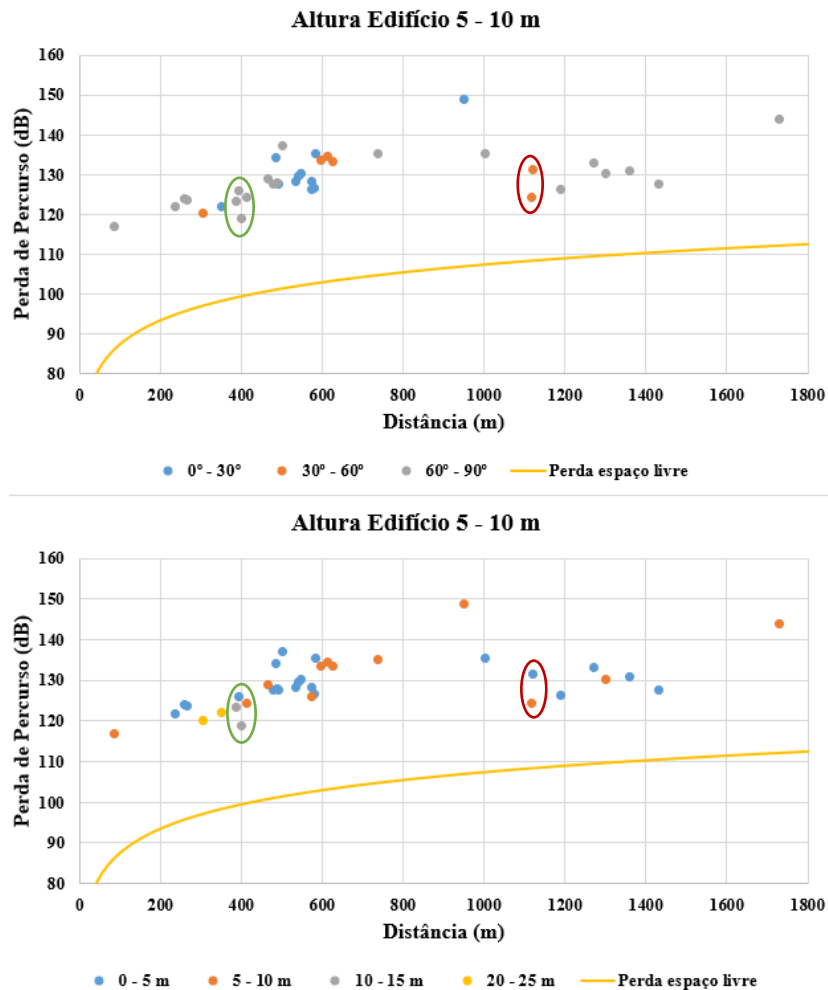


Figura 4.23 - Atenuação para edifício com altura entre 5 e 10 metros.

No gráfico da figura 4.23 que relaciona a altura do edifício com o ângulo (circundado a verde), verifica-se um conjunto de pontos em que o intervalo do ângulo é o mesmo. No entanto, ao olhar para o gráfico que relaciona a altura do edifício com a largura da rua, é possível identificar os mesmos pontos circundados a verde. Neste caso, consegue-se observar que os pontos com menor atenuação estão em ruas com largura de 10 a 15 metros, enquanto o ponto com maior atenuação está numa rua com largura de 0 a 5 metros. O ponto entre esses dois está em uma rua com largura de 5 a 10 metros. Isso justifica que, quanto mais estreita a rua, maior a atenuação do sinal.

Circundados a vermelho, observa-se o exemplo de dois pontos que estão no grupo de ângulo entre 30 e 60 graus, não podendo, novamente, usar apenas este parâmetro para justificar a atenuação. No gráfico que relaciona a altura do edifício com a largura da rua, pode-se observar que o ponto com maior atenuação está em uma rua com largura de 0 a 5 metros, enquanto o ponto com menor atenuação está em uma rua com largura de 5 a 10 metros. Isto justifica novamente que ruas mais estreitas resultam numa maior atenuação do sinal.

A análise dos gráficos para edifícios com altura entre 5 - 10 m revela que a largura da rua é um fator importante para justificar as variações na atenuação do sinal observadas no gráfico de altura *versus* ângulo.

4.6.4.3 Altura edifício 10 – 15 m

Para edifícios com alturas entre 10 e 15 metros, a figura 4.24 apresenta uma série de pontos com o mesmo intervalo de ângulos, o que indica que o ângulo, por si só, não justifica completamente as variações observadas na atenuação do sinal. No entanto, ao examinar o gráfico que relaciona a altura do edifício com a largura da rua, é possível identificar que os pontos com menor atenuação estão em ruas de 10 a 15 metros de largura, enquanto o ponto com maior atenuação situa-se em uma rua de 0 a 5 metros de largura. Este padrão reforça a conclusão de que a largura da rua exerce um impacto considerável sobre a atenuação, com ruas mais estreitas contribuindo para uma maior perda de sinal.

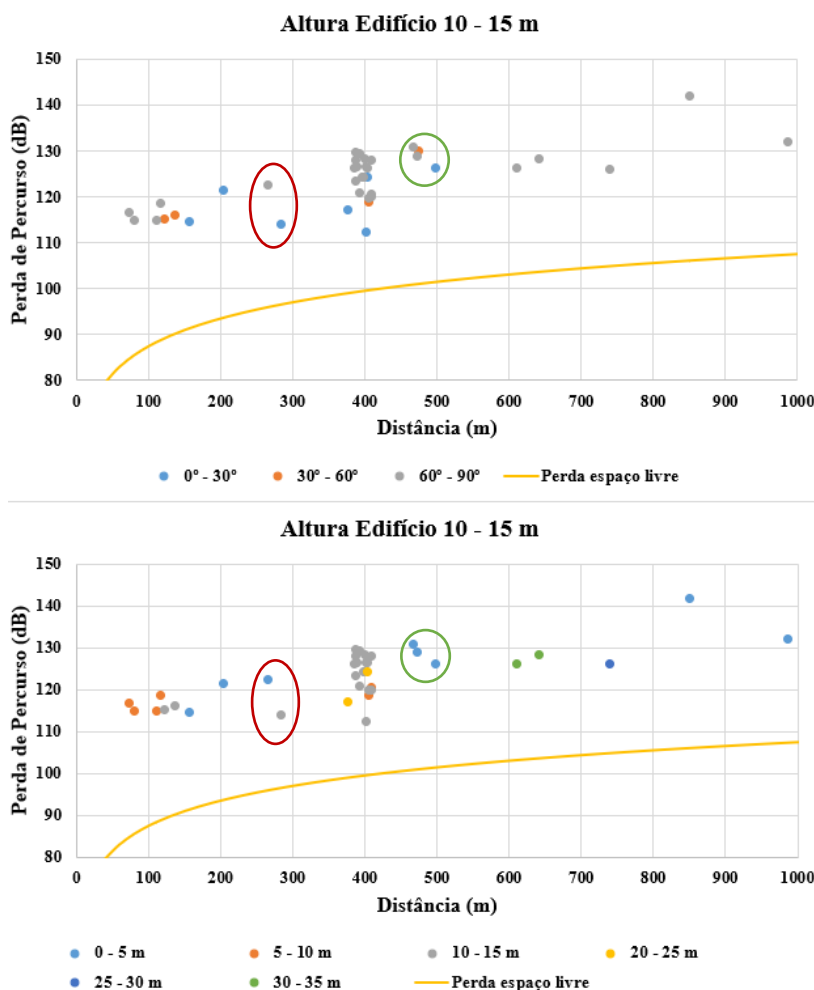


Figura 4.24 - Atenuação para edifício com altura entre 10 e 15 metros.

Na figura 4.24, circundados a vermelho, tem-se o exemplo de dois pontos que estão no grupo de ângulo entre 30 e 60 graus. No gráfico que relaciona a altura do edifício com a largura da rua, pode-se ver que o ponto com maior atenuação está numa rua com

largura de 0 a 5 metros, enquanto o ponto com menor atenuação está em uma rua com largura de 5 a 10 metros. Isso justifica novamente que ruas mais estreitas resultam em maior atenuação do sinal.

4.6.4.4 Altura edifício 15 – 20 m

Para a zona com edifícios entre 15 e 20 m, observando a figura 4.25, é possível verificar que, para esta altura de edifício, os pontos seguem uma tendência geral de atenuação, com exceção do ponto circundado a vermelho, que apresenta uma atenuação consideravelmente maior do que todos os outros.

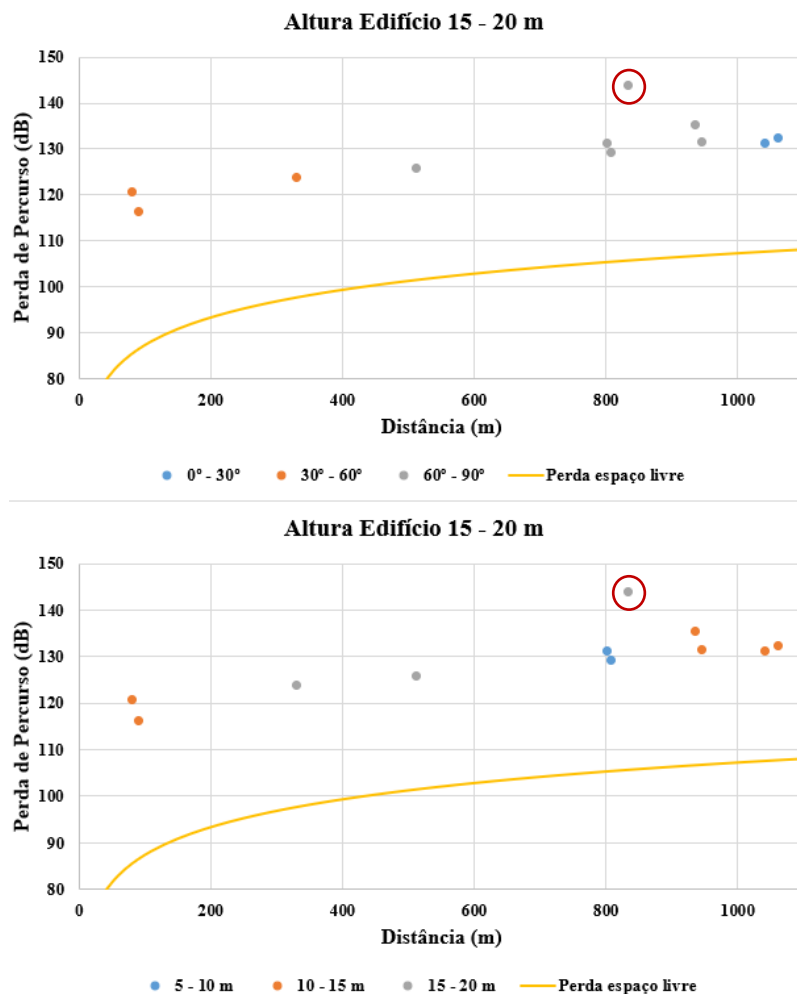


Figura 4.25 - Atenuação para edifício com altura entre 15 e 20 metros.

No gráfico da figura 4.25 que relaciona a altura do edifício com o ângulo da rua, o ponto circundado a vermelho está localizado numa rua com um ângulo entre 60 e 90 graus, o que normalmente implicaria uma atenuação maior. No entanto, ao observar o gráfico que relaciona a altura do edifício com a largura da rua, verifica-se que este ponto está em uma rua com largura entre 15 e 20 metros, uma rua relativamente larga, o que sugeriria que a atenuação deveria ser menor.

Dado que a combinação de um ângulo maior com uma rua larga não justifica a atenuação elevada observada, é possível concluir que outro fator, não analisado nestes

gráficos, pode estar a influenciar este aumento na atenuação. Esse fator pode estar relacionado a outros aspetos do ambiente urbano, como a presença de interferências, materiais de construção, ou outros obstáculos que não foram considerados nesta análise.

4.6.4.5 Altura edifício 20 – 25 m

Neste caso, apesar de se observar alguma tendência geral nos gráficos da figura 4.26, existem limitações que dificultam a obtenção de conclusões mais concretas. Por um lado, não há pontos suficientes para distâncias superiores a 150 metros, o que impede uma análise robusta para essas distâncias. Por outro lado, os pontos que estão muito próximos do edifício onde a antena emissora está instalada sofrem de outros fenômenos de propagação que não podem ser explicados pelos parâmetros escolhidos para esta análise, como a altura do edifício, o ângulo da rua e a largura da rua.

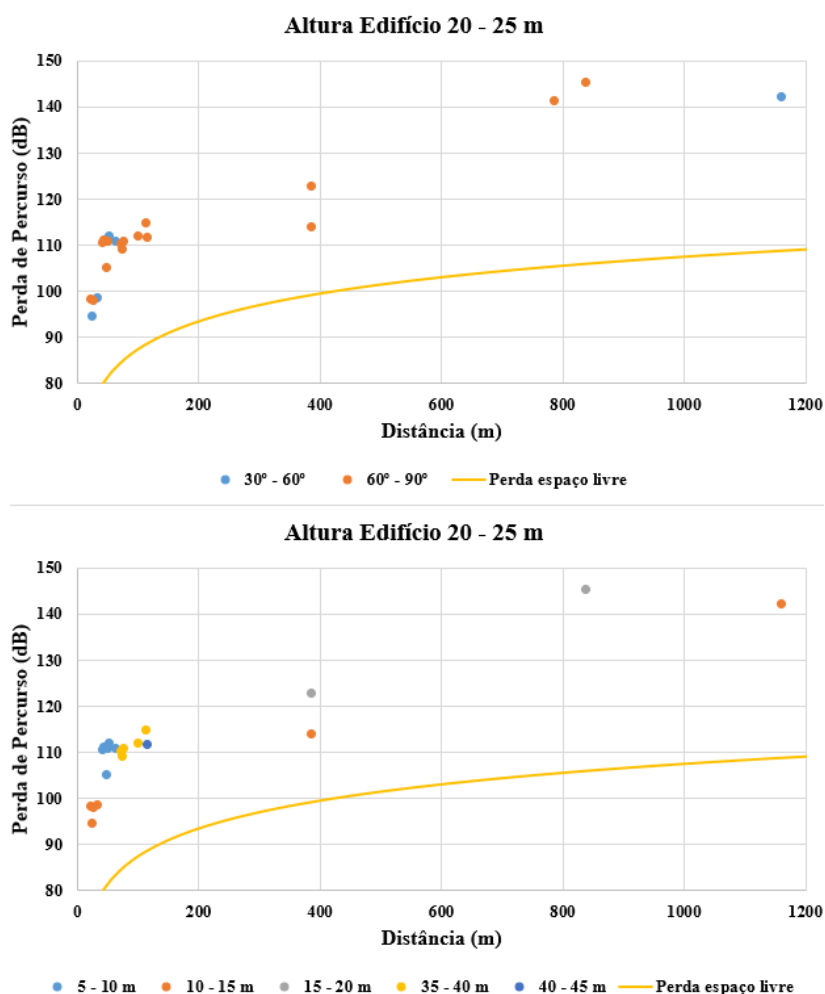


Figura 4.26 - Atenuação para edifício com altura entre 20 e 25 metros.

A análise dos gráficos da figura 4.26 para edifícios com altura entre 20 - 25 m demonstra que, apesar de haver uma tendência, a falta de pontos para distâncias maiores e a influência de fenômenos de propagação em áreas próximas ao transmissor limitam a capacidade de tirar conclusões mais concretas. Isso sugere que, para uma análise

completa, seria necessário considerar outros parâmetros ou realizar medições adicionais em distâncias maiores para entender melhor a propagação do sinal neste cenário.

4.7 Comparação com modelos teóricos

Na figura 4.27 observa-se uma tendência logarítmica na atenuação do sinal em relação à distância. No entanto, em torno dos 1300 metros, é possível identificar tanto uma tendência decrescente quanto uma tendência ascendente.

A tendência decrescente, que se verifica até aproximadamente 1300 metros, pode ser atribuída à elevação do terreno nesses pontos. Como já foi explicado anteriormente, os dados foram recolhidos em áreas onde a altitude era maior, resultando em menos obstáculos entre o recetor e o emissor. Esta condição facilita a propagação do sinal e diminui a atenuação.

Por outro lado, a tendência ascendente que aparece após os 1300 metros reflete a procura pelo limiar de sensibilidade do sinal numa zona mais plana. Nesta fase, as medições foram realizadas em áreas onde a atenuação do sinal aumentou devido à maior distância e à presença de obstáculos típicos de um ambiente urbano.

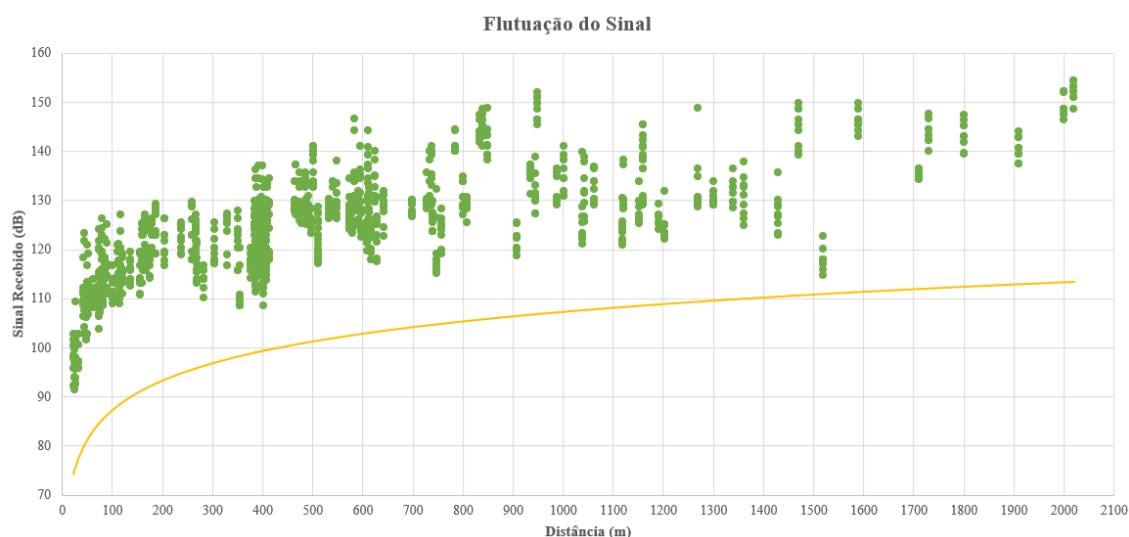


Figura 4.27 - Flutuação do sinal de todos os pontos recolhidos.

Estas observações são consistentes com o comportamento esperado da propagação do sinal LoRa em áreas urbanas, onde as características topográficas e a densidade de edificações influenciam consideravelmente a qualidade do sinal. A análise dos dados permite uma melhor compreensão dos fatores que afetam a propagação do sinal, fornecendo informações valiosas para a otimização e implementação de redes de comunicação LoRa em ambientes complexos.

Na figura 4.28 é apresentada a perda de percurso obtida pela remoção do desvanecimento de pequena escala e ficando a flutuação do sinal para grandes distâncias.

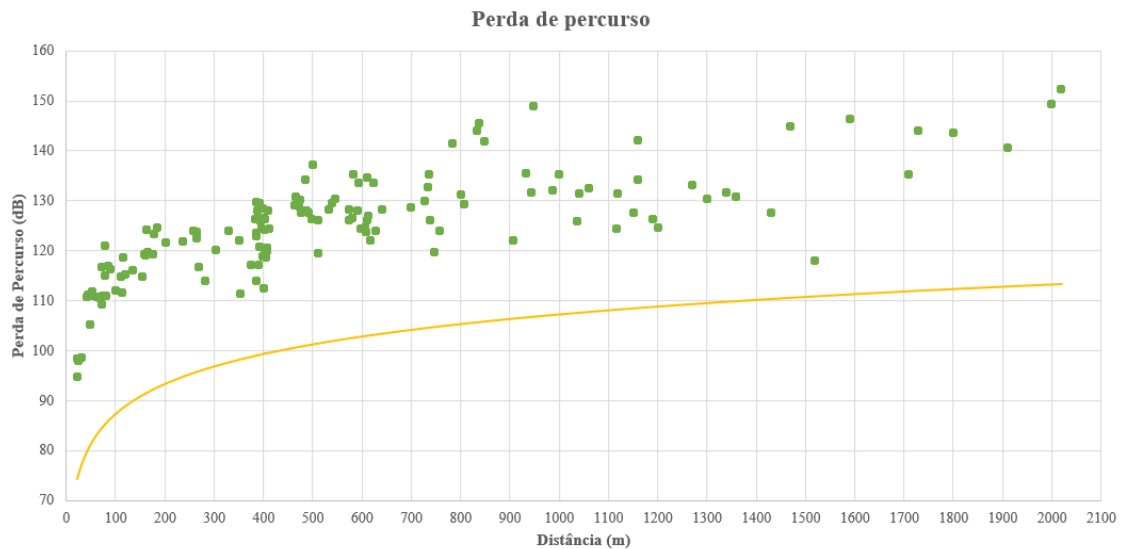


Figura 4.28 - Atenuação média dos dados recolhidos.

Apesar da remoção do desvanecimento de pequena escala, ainda é possível observar que os valores não acompanham de forma consistente a curva Log-distance média ao longo de toda a extensão, resultando em erros que não se limitam a pequenas variações.

Este desvio indica que é necessário considerar outros parâmetros para justificar essas variações na atenuação do sinal.

De seguida, será realizada a comparação dos dados experimentais obtidos com os modelos teóricos de propagação. Na figura 4.29 estão representados os dados obtidos com os modelos teóricos Egli, Okumura-Hata (O-H), COST 231 Hata (C-231-H), Lee, SUI-C, Ericsson, ECC-33 e espaço livre. Estes modelos foram escolhidos dada a sua ampla utilização em diferentes estudos e aplicações relacionadas com a propagação de sinais em ambientes urbanos. Estes modelos foram selecionados com base nas suas capacidades de previsão de atenuação de sinais em diversas condições ambientais e estruturais, tendo em consideração características como a distância, a frequência e a altura das antenas.

Além disso, modelos como o de Lee e o ECC-33 proporcionam uma visão mais empírica, sendo derivados de medições reais em ambientes urbanos, o que lhes confere maior aplicabilidade na previsão de desempenho em áreas com uma alta densidade de edifícios.

Para a análise dos modelos foram fixados os parâmetros de frequência (870 MHz), a altura da estação base (23,3 m) e a altura da estação móvel (3 m).

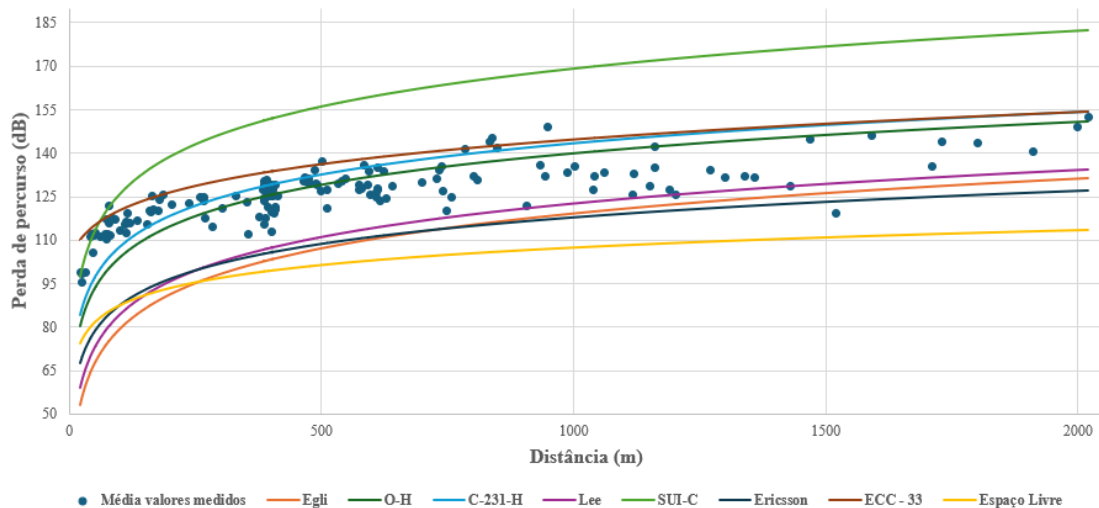


Figura 4.29 - Dados obtidos e modelos teóricos.

Na figura 4.29, é apresentada a perda de percurso em função da distância, comparando os valores medidos com as curvas teóricas dos modelos de propagação referidos anteriormente.

Pela análise do gráfico, verifica-se que os modelos Okumura Hata, COST 231 Hata e o modelo ECC-33, seguem de forma mais próxima a tendência dos valores medidos ao longo da distância. Por outro lado, modelos como o Egli e o SUI-C desviam-se consideravelmente, especialmente em distâncias mais longas, mostrando uma maior discrepância relativamente aos dados empíricos. Nota-se ainda que os modelos Lee e Ericsson apresentam um comportamento semelhante ao modelo Egli, não conseguindo representar adequadamente a tendência dos valores medidos.

De modo a facilitar a análise dos dados em comparação com os modelos teóricos, foram realizados cálculos do RMSE (*Root Mean Square Error*) para cada modelo. Estes valores permitem uma melhor compreensão do erro obtido na aproximação. A tabela 4.1 apresenta os valores de RMSE calculados para todos os modelos analisados, proporcionando uma análise quantitativa do desempenho de cada modelo em relação aos dados experimentais.

Tabela 4.1 - Dados de RMSE para modelos teóricos.

Modelo	Egli	O-H	C-231-H	Lee	SUI-C	Ericsson	ECC-33
RMSE (dB)	25,4	9,2	9,7	21,3	28,4	21,7	10,6

Da análise retira-se que:

- O modelo Okumura Hata apresenta o menor RMSE, com um valor de 9,2, o que o torna o modelo mais ajustado aos dados medidos, embora com um erro ainda relativamente elevado;
- O modelo COST 231 Hata surge em segundo lugar, com um RMSE de 9,7 dB;

- O modelo ECC-33, com um RMSE de 10,6 dB, sendo o terceiro modelo mais próximo dos dados empíricos.

Por outro lado, os modelos SUI-C e Egli, com valores de RMSE de 28,4 dB e 25,4 dB, respetivamente, mostram-se menos adequados para descrever a perda de percurso neste cenário, apresentando desvios consideráveis em relação aos valores medidos.

De seguida os dados serão analisados considerando a altura dos edifícios, as larguras das ruas e os ângulos das mesmas, comparando-os com os modelos teóricos adequados. Para a análise da altura dos edifícios serão utilizados os modelos 3GPP e Bertoni-Walfisch, para a análise da largura da rua os modelos Bertoni-Walfisch (B-W) e 3GPP. Por fim serão analisados os dados relativamente ao ângulo comparando com o modelo COST 231 Walfisch-Ikegami.

A análise dos dados foi segmentada de acordo com o tipo de terreno. Consideraram-se quatro casos distintos: terreno plano $-10 > h\Delta > 10$ m, um caso específico em que $h\Delta < -10$ m, terreno inclinado com $h\Delta > 10$ e por fim terreno inclinado e depois plano. No Anexo F estão as tabelas com os parâmetros utilizados para cada caso, nomeadamente a altura média dos edifícios (h_a), a largura da rua (W), a altura da *gateway* (h_g) e a altura da estação móvel (h_m). Entende-se por altura fixa a utilização dos parâmetros de altura dos edifícios, da *gateway* e da estação móvel sem considerar a variação de terreno, nomeadamente $h_m = 3$ m e $h_g = 23,30$ m. Para a altura variável o valor de $h\Delta$ foi adicionado às alturas das antenas e dos edifícios. Na tabela 4.2 estão representados os valores de RMSE calculados para cada tipo de terreno utilizando os modelos Bertoni-Walfisch e 3GPP organizando os dados por altura de edifício.

Tabela 4.2 - Valores RMSE para cada tipo de terreno organizado por altura de edifícios.

	RMSE (dB)			
	Altura fixa		Altura variável	
	B - W	3GPP	B - W	3GPP
$-10 > h\Delta > 10$	11,15	10,42	12,38	11,00
$h\Delta < -10$	9,30	10,77	5,22	5,87
$h\Delta > 10$	26,41	25,92	9,07	14,04
Inclinado depois plano	11,78	4,11	-	24,25

A análise dos resultados apresentados na Tabela 4.2 revela variações consideráveis no desempenho dos modelos Bertoni-Walfisch e 3GPP para diferentes tipos de terreno, considerando tanto alturas fixas quanto variáveis.

Para o caso de terreno plano ($-10 < h\Delta < 10$), observa-se que a adição da variação do terreno aos dados não resulta em benefícios consideráveis. As variações de terreno

encontram-se dentro de uma amplitude de 10 metros, pelo que não é necessário considerar a variação do terreno para este caso específico. Os valores de RMSE indicam uma ligeira degradação no erro, passando de 11,15 dB para 12,38 dB no modelo Bertoni-Walfisch e de 10,42 dB para 11,00 dB no modelo 3GPP.

No cenário em que a variação do terreno é inferior a -10 metros ($h\Delta < -10$), verifica-se uma melhoria mais considerável nos resultados ao incluir a variação de altura das antenas. Para o modelo Bertoni-Walfisch, o erro diminui de 9,30 dB para 5,22 dB, enquanto no modelo 3GPP, o RMSE é reduzido de 10,77 dB para 5,87 dB. Estes valores evidenciam que a inclusão da variação do terreno nas alturas das antenas contribui de forma considerável para a redução do erro.

No caso de terrenos inclinados, com $h\Delta > 10$ metros, também se registam melhorias. Para o modelo Bertoni-Walfisch, o erro passa de 26,41 dB para 9,07 dB, e no modelo 3GPP, verifica-se uma redução de 25,92 dB para 14,04 dB. De notar que o valor de erro para o modelo Bertoni-Walfisch apenas considera alturas de 15 – 20 m pois acima disso o modelo não aceita os parâmetros. Estes resultados indicam que, em terrenos com inclinações acentuadas, a consideração da variação de altura das antenas e dos edifícios é fundamental para minimizar o erro.

Por outro lado, no caso de terreno inclinado seguido de uma área plana, os resultados não correspondem às expectativas iniciais. Ao introduzir a variação nas alturas das antenas, verifica-se um aumento considerável do erro, sobretudo no modelo 3GPP, onde o RMSE passa de 4,11 dB para 24,25 dB. Para o modelo Bertoni-Walfisch, não é possível efetuar uma comparação direta, uma vez que o modelo não suporta os parâmetros introduzidos neste caso, devido à altura da estação móvel ser superior à altura da *gateway*.

Na tabela 4.3 estão representados os valores de RMSE calculados para cada tipo de terreno utilizando os modelos Bertoni-Walfisch e 3GPP organizando os dados por largura de rua.

Tabela 4.3 - Valores RMSE para cada tipo de terreno organizado por largura de rua.

	RMSE (dB)			
	Altura fixa		Altura variável	
	B - W	3GPP	B - W	3GPP
$-10 > h\Delta > 10$	13,04	10,66	11,39	11,23
$h\Delta < -10$	14,54	12,47	9,84	7,26
$h\Delta > 10$	-	25,77	-	13,32
Inclinado depois plano	16,40	6,09	-	18,73

Ao analisar os resultados da tabela 4.3, para o caso de terreno plano ($-10 > h\Delta > 10$), observa-se que, ao utilizar alturas variáveis, o erro no modelo Bertoni-Walfisch

reduz-se de 13,04 dB para 11,39 dB, enquanto no modelo 3GPP o erro aumenta ligeiramente, passando de 10,66 dB para 11,23 dB.

No cenário onde a variação de terreno é inferior a -10 metros ($h\Delta < -10$), verifica-se uma melhoria nos erros em ambos os modelos ao considerar alturas variáveis. Para o modelo Bertoni-Walfisch, o erro reduz-se de 14,54 dB para 9,84 dB, e para o modelo 3GPP, o erro diminui de 12,47 dB para 7,26 dB, evidenciando uma melhoria considerável quando a variação de terreno é introduzida.

No caso de terreno inclinado, com variações superiores a 10 metros ($h\Delta > 10$), não foi possível obter valores de RMSE para o modelo Bertoni-Walfisch, tanto para alturas fixas como variáveis, uma vez que o modelo não aceitou os parâmetros utilizados. Contudo, no modelo 3GPP, observa-se uma redução substancial no erro, que passa de 25,77 dB com altura fixa para 13,32 dB com altura variável.

Por fim, no caso de terreno inclinado seguido de uma área plana não foi possível obter valores de RMSE para o modelo Bertoni-Walfisch com altura variável, impossibilitando a comparação com o erro obtido para a altura fixa. No entanto, tal como no caso anterior, para o modelo 3GPP, verifica-se um aumento substancial do erro ao considerar alturas variáveis, passando de 6,09 dB para 18,73 dB. Estes resultados indicam que, neste cenário específico, a introdução de alturas variáveis não é vantajosa.

Na tabela 4.4 estão representados os valores de RMSE calculados para cada tipo de terreno utilizando o modelo COST 231 Walfisch-Ikegami organizando os dados por ângulo.

Tabela 4.4 - Valores RMSE para cada tipo de terreno organizado por ângulo.

	RMSE (dB)	
	Altura fixa	Altura variável
	C - 231 - WI	C - 231 - WI
$-10 > h\Delta > 10$	13,04	11,39
$h\Delta < -10$	14,54	9,84
$h\Delta > 10$	-	-
Inclinado depois plano	16,40	-

A análise dos resultados apresentados na tabela permite avaliar o desempenho do modelo COST 231 Walfisch-Ikegami em diferentes cenários de terreno, considerando tanto alturas fixas como variáveis.

No caso de terreno plano ($-10 > h\Delta > 10$), observa-se uma redução ligeira no erro ao utilizar alturas variáveis. Isto sugere uma ligeira melhoria no desempenho do modelo ao considerar a variação do terreno neste tipo de cenário.

Para o cenário em que a variação do terreno é inferior a -10 metros ($h\Delta < -10$), verifica-se uma melhoria mais acentuada. Ao introduzir a variação do terreno, o erro diminui de 14,54 dB para 9,84 dB, indicando que a consideração da variação do terreno tem um impacto positivo neste caso.

No entanto, tanto para o cenário onde a variação do terreno é superior a 10 metros ($h\Delta > 10$) como para o terreno inclinado seguido de uma área plana, não foi possível obter valores de RMSE com alturas variáveis. O modelo não aceitou os parâmetros introduzidos, o que impossibilita a verificação de eventuais melhorias nestes casos específicos.

Os resultados demonstram que a consideração da variação de terreno nos modelos de propagação é particularmente vantajosa em cenários com inclinações acentuadas. Em terrenos com variações negativas ($h\Delta < -10$), todos os modelos analisados beneficiaram da introdução de alturas variáveis, com uma redução considerável dos erros. O mesmo se verifica em terrenos com inclinações positivas elevadas ($h\Delta > 10$), especialmente no modelo 3GPP.

Para terrenos planos ($-10 > h\Delta > 10$), a variação de terreno teve um impacto limitado, não resultando em melhorias consideráveis e, em alguns casos, aumentando o erro. No caso de terrenos inclinados seguidos de áreas planas, a variação de altura foi problemática, levando a um aumento substancial do erro no modelo 3GPP.

Adicionalmente, em alguns cenários, não foi possível adicionar a altura variável, dado que os modelos Bertoni-Walfisch e COST 231 Walfisch-Ikegami não aceitaram os parâmetros introduzidos. Este facto indica a necessidade de futuras adaptações nos modelos para que possam aceitar os parâmetros pretendidos, o que permitirá uma análise mais completa e precisa nestes casos.

Assim, conclui-se que para os terrenos inclinados com variações superiores a 10 metros e inferiores a -10 metros, os modelos tendem a sobrestimar a perda de sinal, pois a perda obtida é consideravelmente inferior ao esperado. Ao adicionar a variação do terreno às alturas das antenas e dos edifícios, o erro diminui, mas ainda assim não é suficiente. Isto ocorre porque os modelos foram desenvolvidos para cidades com características que podem ser diferentes das encontradas no ambiente em estudo. Assim, torna-se necessário adaptar os modelos para melhor representar estas condições específicas de terreno, de forma a melhorar a precisão das previsões.

4.8 Análise de resultados

Foram selecionados pontos específicos que apresentavam as mesmas características ambientais, nomeadamente a altura dos edifícios, a largura das ruas e os ângulos, mas a diferentes distâncias. Para o primeiro grupo, a altura dos edifícios situava-se entre 5 e 10 metros, a largura das ruas entre 0 e 5 metros, e o ângulo entre 60° e 90° . No segundo grupo, a altura dos edifícios variava entre 10 e 15 metros, mantendo-se a largura das ruas entre 0 e 5 metros e o ângulo também entre 60° e 90° . Na Figura 4.30 estão representados

os pontos selecionados, com a figura 4.30a) referente ao grupo 1 e a figura 4.30b) ao grupo 2.

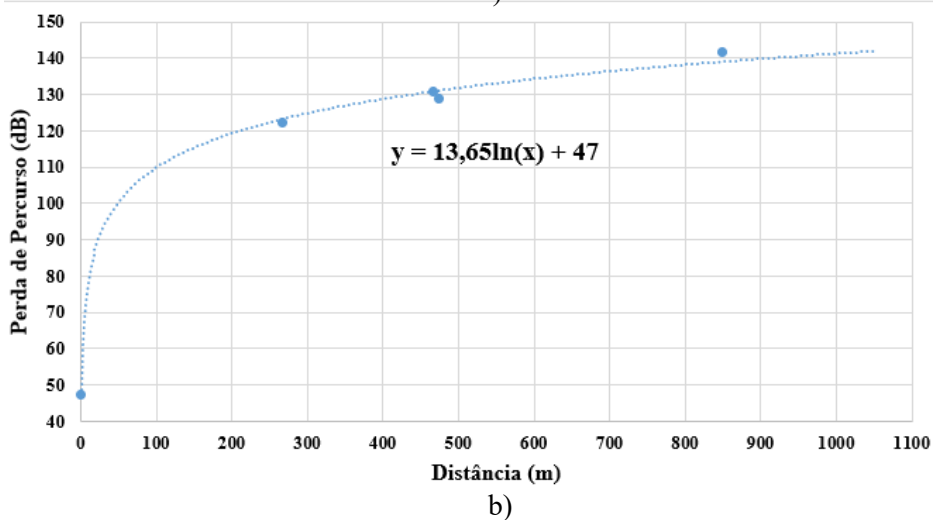
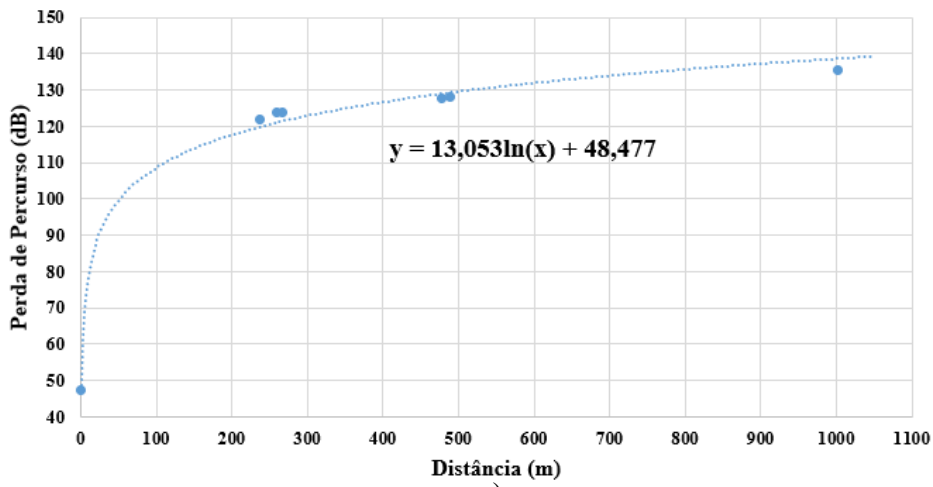


Figura 4.30 - Curvas com os pontos escolhidos. (a) grupo 1. (b) grupo 2.

A análise dos dois gráficos da figura 4.30 permite observar que as curvas obtidas para os dois grupos são bastante semelhantes, refletindo as características ambientais similares entre eles. A única diferença considerável entre os grupos reside no intervalo das alturas dos edifícios: o primeiro grupo apresenta alturas de 5 a 10 metros, enquanto o segundo grupo varia entre 10 e 15 metros. Esta variação não afeta substancialmente a forma da curva, o que sugere que as restantes condições (largura da rua e ângulos) têm uma influência predominante na perda de percurso.

Na tabela 4.5 estão representados os valores de α e β extraídos a partir das equações das curvas nos gráficos apresentados.

Tabela 4.5 - Valores de α e β retirados das equações.

Grupo	α	β
1	48,477	3,01
2	47	3,14

Os valores de α e β da tabela 4.5 são semelhantes entre os dois grupos, o que é esperado, dado que as características dos pontos escolhidos também são bastante semelhantes. No entanto, observa-se que para o grupo 2 o valor de β é ligeiramente superior (3,14 em comparação com 3,01 no grupo 1). Esta diferença pode ser atribuída ao facto de o intervalo de altura dos edifícios no grupo 2 ser ligeiramente superior ao do grupo 1 (10 - 15 metros no grupo 2 contra 5 - 10 metros no grupo 1), o que pode influenciar a perda de percurso em função da distância.

De modo a comparar os resultados obtidos com os modelos teóricos, foram definidos os parâmetros necessários para introdução nos modelos de previsão de perda de percurso. Na Tabela 4.6 são apresentados os parâmetros utilizados, nomeadamente a largura da rua (W), a altura média dos edifícios (h_a), a altura da *gateway* (h_g) e a altura da estação móvel (h_m).

Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados nos modelos teóricos.

GRUPO	W	h_a	h_g	h_m
1	4,46	7,71	30,30	3,00
2	4,43	14,61	25,80	4,75

Após a introdução dos parâmetros da Tabela 4.6 nos modelos teóricos, foi calculado o RMSE para cada modelo. Esses valores foram então comparados com o modelo de Log-distance, utilizando os parâmetros extraídos das equações das retas obtidas. Na Tabela 4.7 e 4.8 estão representados os valores de RMSE para os diferentes modelos, permitindo uma análise comparativa entre as previsões dos modelos empíricos e os dados experimentais ajustados pelas equações.

Tabela 4.7 - Valores RMSE calculados (C-231-WI, Lee, SUI-C, Ericsson, ECC-33).

Grupo	RMSE (dB)				
	C - 231 - H	Lee	SUI-C	Ericsson	ECC-33
1	3,7	19,9	46,0	21,4	7,4
2	2,6	20,8	45,8	23,2	5,5

Tabela 4.8 - Valores RMSE calculados (Log-distance, B-W, 3GPP, C-231-WI, Egli, O-H).

RMSE (dB)						
Grupo	Log-distance	B - W	3GPP	C - 231 - WI	Egli	O - H
1	2,3	5,3	5,1	25,4	24,2	3,8
2	1,8	12,1	1,7	22,1	25,0	3,1

Os modelos Lee, SUI-C, Ericsson, COST 231 Walfisch-Ikegami, Egli apresentam erros demasiado elevados para serem considerados para a análise. Os modelos que apresentam menor erro são os COST 231 Hata, ECC-33, Bertoni–Walfisch, 3GPP, Okumura-Hata e Log-distance.

Comparando o modelo Log-distance com os modelos COST 231 Hata, ECC-33 e Okumura-Hata, observa-se que o modelo COST 231 Hata apresenta uma diferença de 1,4 dB no grupo 1 e de 0,8 dB no grupo 2, sendo o modelo com desempenho mais próximo do Log-Distance. O ECC-33, por outro lado, apresenta uma diferença considerável de 5,1 dB no grupo 1 e de 3,7 dB no grupo 2. Por fim, o modelo Okumura-Hata apresenta uma diferença de 1,5 dB no grupo 1 e de 1,3 dB no grupo 2.

A figura 4.31 [35] mostra por que motivo o modelo de Okumura-Hata tem um erro pequeno. A gama de variação do parâmetro β deste modelo encontra-se em torno de 3.

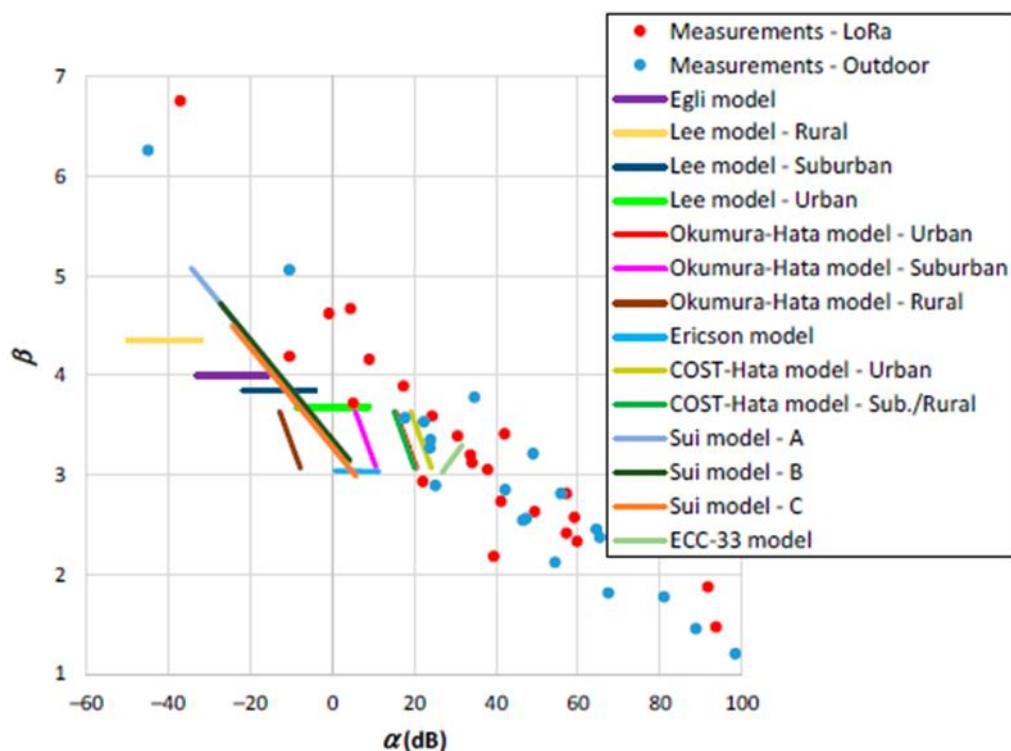


Figura 4.31 - Parâmetro β em função de α para diferentes modelos [35].

Quando se compara o modelo Bertoni-Walfisch com o Log-distance, para o grupo 1 observa-se uma diferença de 3 dB, enquanto no grupo 2 essa diferença aumenta para 10,3 dB, indicando um desempenho inferior do modelo Bertoni-Walfisch, sobretudo no segundo grupo. Já ao comparar o 3GPP com o Log-distance, a diferença no grupo 1 é de 2,8 dB, enquanto no grupo 2 é de apenas 0,1 dB, o que sugere que o modelo 3GPP tem um desempenho muito próximo ao do Log-distance no grupo 2. No entanto, seria necessário analisar mais pontos para obter conclusões mais robustas sobre o desempenho do 3GPP neste contexto.

De forma geral, ao analisar ambos os grupos, verifica-se que a abordagem do Log-distance apresenta o menor erro, sugerindo que, neste cenário, este modelo fornece previsões mais precisas em comparação com os outros modelos teóricos.

Conclui-se que, ao ajustar a curva utilizando pontos com características ambientais idênticas, tais como a altura dos edifícios, a largura das ruas e os ângulos, e ao extrair os valores de α e β das equações obtidas, é possível alcançar aproximações mais precisas. Este ajuste permitiu reduzir consideravelmente o RMSE, proporcionando previsões mais fiáveis, especialmente no caso do modelo Log-distance, que se revelou mais adequado para os cenários analisados.

Assim, a utilização de características locais do ambiente de forma adequada constitui uma abordagem eficaz para melhorar a precisão dos modelos de propagação, particularmente em ambientes urbanos complexos. No entanto, para obter resultados ainda mais robustos, seria recomendável ampliar a análise com mais pontos de medição e explorar outras variações nos parâmetros ambientais, de modo a adaptar melhor os modelos às diversas condições encontradas nas cidades.

5 Conclusão e trabalhos futuros

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, com base na análise dos resultados obtidos e na comparação dos dados empíricos com os modelos teóricos de propagação de sinal.

Adicionalmente, são sugeridas direções para trabalhos futuros, focando em áreas que podem beneficiar de investigações complementares ou de maior profundidade. As sugestões propostas visam a melhoria dos modelos de propagação, a recolha de dados em novos cenários e o desenvolvimento de técnicas que possam contribuir para o avanço da tecnologia LoRa em aplicações futuras.

5.1 Conclusões

Com a realização desta dissertação, demonstrou-se a aplicabilidade e eficácia da tecnologia LoRa para a transmissão de dados em ambientes urbanos, através de ensaios de propagação concretos e análise de modelos teóricos. Inicialmente, foi efetuada uma revisão abrangente dos modelos de propagação existentes, fornecendo uma base sólida para a compreensão dos fenómenos envolvidos na propagação de sinais em meios urbanos.

Para avaliar o comportamento da atenuação do sinal no sistema LoRa, foram realizados vários ensaios em diferentes cenários urbanos. O primeiro ensaio focou-se na propagação em linha de vista com antenas à mesma altura, verificando-se que a atenuação do sinal segue a tendência esperada em espaço livre, com um expoente de atenuação próximo do teórico. Foi também analisado o impacto do diagrama de radiação na atenuação do sinal, concluindo-se que a orientação das antenas influencia consideravelmente a qualidade da comunicação.

No estudo das medições sem linha de vista, aplicou-se o modelo da ponta de faca para analisar a atenuação adicional causada por obstáculos. Utilizando o beiral de um edifício como obstáculo equivalente, observou-se que os valores medidos de potência recebida apresentaram diferenças médias de 1,84 dB em relação aos valores previstos teoricamente.

Seguindo estes ensaios iniciais, considerou-se a variação do nível do terreno e o impacto de variáveis estruturais, como a altura dos edifícios e a altura das antenas. Ao introduzir estes parâmetros nos modelos teóricos, como o modelo 3GPP, o modelo Walfisch-Bertoni e o COST 231 Walfisch-Ikegami observou-se uma melhoria na previsão da atenuação em alguns casos. No entanto, verificou-se que alguns modelos não conseguiam acomodar adequadamente os novos parâmetros, mantendo o erro de previsão consideravelmente elevado, sendo necessária uma adaptação dos modelos para a aceitação dos parâmetros pretendidos.

Para mitigar este problema, decidiu-se selecionar pontos de medição com características semelhantes, nomeadamente a largura da rua, a altura dos edifícios e o ângulo. A partir destes pontos, foram extraídos os parâmetros α e β , que foram

introduzidos no modelo Log-distance. Este ajuste permitiu uma melhoria considerável no erro obtido, reduzindo a discrepância entre os valores medidos e os previstos.

Este estudo reforça a utilidade da tecnologia LoRa em ambientes urbanos, destacando a importância de ajustar os modelos de propagação às características específicas de cada cenário. Os resultados obtidos fornecem uma base para futuras implementações de redes LoRa em áreas urbanas, apontando a necessidade de um planejamento cuidadoso e a consideração de variáveis ambientais e estruturais que influenciam a propagação do sinal. Contudo, ainda existem desafios consideráveis que devem ser abordados em investigações futuras, nomeadamente no que toca à precisão dos modelos e na quantidade de dados disponíveis.

5.2 Trabalhos futuros

Nos trabalhos futuros, propõe-se que o aprimoramento dos modelos de propagação seja uma área de investigação prioritária, com foco no ajuste de modelos existentes, como o Log-distance, para incorporar de forma mais eficaz as variáveis estruturais e ambientais. O desenvolvimento de novos modelos que se adaptem melhor a diferentes ambientes urbanos é igualmente crucial, considerando fatores como a altura dos edifícios, a largura das ruas e ângulo, que influenciam consideravelmente a qualidade da propagação em áreas urbanas. Além disso, é fundamental que os novos modelos considerem as variações do terreno, integrando parâmetros como inclinações, depressões e obstáculos naturais. Esta abordagem será particularmente relevante para áreas urbanas com topografias irregulares, assim como em regiões suburbanas e rurais, onde a presença de relevo pode impactar a eficiência da transmissão do sinal.

A recolha de mais dados em diferentes ambientes urbanos também se apresenta como uma linha de investigação importante, permitindo expandir a análise para cenários com diferentes densidades de edificações, larguras de ruas e variadas condições atmosféricas. Tal recolha de dados possibilitará uma melhor generalização dos resultados e maior aplicabilidade dos modelos desenvolvidos a um leque mais amplo de situações urbanas diversificadas.

Adicionalmente, é necessário considerar o desenvolvimento de modelos específicos para *uplink*, que diferem dos modelos de *downlink* devido às características particulares do caminho ascendente da comunicação. O desenvolvimento de modelos dedicados ao *uplink*, capazes de otimizar a transmissão de dados dos dispositivos para as estações base em ambientes urbanos, irá melhorar a eficiência das redes de comunicação, garantindo que as diferenças na propagação dos sinais no *uplink* sejam adequadamente abordadas e ajustadas aos contextos reais de implementação.

6 Referências

- [1] Semtech Corporation, “LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview,” 2019.
- [2] Semtech, “RSSI and SNR for LoRa® modulation on STM32WL Series,” 2021.
- [3] A. Abdelghany, B. Uguen e C. Moy, “On Superior Reliability of Effective Signal Power versus RSSI in LoRaWAN,” 28 th International Conference on Telecommunications, 2021.
- [4] S. Kurt and B. Tavli, "Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks: A review of models and comparative evaluations," 2017.
- [5] [Online]. Disponível: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> [Acedido em 14 de novembro 2023]
- [6] F. J. C. Sardinha, “Recolha de Dados Meteorológicos Utilizando LoRa,” Projeto de Mestrado, fevereiro 2023
- [7] “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things” [Online].Disponível:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5038744/#:~:text=LoRa%20uses%20an%20unconventional%20definition,and%20its%20ease%20of%20decoding> [Acedido em 14 de novembro 2023]
- [8] Semtech, “RSSI and SNR for LoRa® modulation on STM32WL Series,” 2021
- [9] [Online]. Disponível: <https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator> [Acedido em 21 de Novembro de 2023]
- [10] B. da Silva Duarte and M. H. Costa Dias, "Critical analysis of ITU-R P.1812 and Egli propagation models for LoRaWAN Networks," 2022 Symposium on Internet of Things (SIoT), São Paulo, Brazil, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIoT56383.2022.10070230.
- [11] V. S. Anusha, G. K. Nithya and S. N. Rao, "A comprehensive survey of electromagnetic propagation models," *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, India, 2017, pp. 1457-1462, doi: 10.1109/ICCSP.2017.8286627.
- [12] T. J. Phiri, D. B. Davidson and P. G. Wiid, "Propagation modelling for the South African SKA site," *2015 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Turin, Italy, 2015, pp. 1329-1332, doi: 10.1109/APWC.2015.7300210.
- [13] Z. Nadir, "Empirical pathloss characterization for Oman," 2012 Computing, Communications and Applications Conference, Hong Kong, China, 2012, pp. 133-137, doi: 10.1109/ComComAp.2012.6154017.
- [14] Dong Yuan and Dongya Shen, "Analysis of the Bertoni-Walfisch propagation model for mobile radio," 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, China, 2011, pp. 77-80, doi: 10.1109/MACE.2011.5986861.
- [15] H. Maloku, Z. L. Fazliu, M. Ibrani, M. Limani and B. Gashi, "Measurement-based optimized propagation model for urban, suburban and rural environments for UHF bands in Kosovo," 2020

43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Opatija, Croatia, 2020, pp. 518-522, doi: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245243.

[16] Minseok Jeong and Bomson Lee, "Comparison between path-loss prediction models for wireless telecommunication system design," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.01CH37229), Boston, MA, USA, 2001, pp. 186-189 vol.2, doi: 10.1109/APS.2001.959661.

[17] H. Sizon, "Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications," Springer, Paris, France, 2005.

[18] Joram Walfisch and Henry L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 36, no. 12, pp. 1788-1796, December 1988, doi: 10.1109/8.14401.

[19] D. J. Cichon and T. Kürner, "Propagation Prediction Models," in COST231, Chapter 4.

[20] G. Y. Delisle, J.-P. Lefevre, M. Lecours, and J.-Y. Chouinard, "Propagation Loss Prediction: A Comparative Study with Application to the Mobile Radio Channel," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-34, no. 2, June 1985. DOI: 10.1109/T-VT.1985.24041.

[21] V. Erceg et al., "Channel Models for Fixed Wireless Applications," IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, July 17, 2001.

[22] "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-29, no. 3, pp. 317-325, Aug. 1980.

[23] 3GPP, "Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects," 3GPP TR 36.814, pp. 1-104, março 2010.

[24] M. Kumari, T. Yadav, P. Yadav, P. K. Sharma, and D. Sharma, "Comparative Study of Path Loss Models in Different Environments," in International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), vol. 3, no. 4, Apr. 2011.

[25] E. Harinda, S. Hosseinzadeh, H. Larijani e R. M. Gibson, "Comparative Performance Analysis of Empirical Propagation Models for LoRaWAN 868MHz in an Urban Scenario," em 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Glasgow, G4 0BA, UK: Glasgow Caledonian University, 2019.

[26] R. El Chall, S. Lahoud, e M. El Helou, "LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, April 2019, pp. 2366-2377. Digital Object Identifier: 10.1109/JIOT.2019.2906838..

[27] M. Rademacher, H. Linka, T. Horstmann, e M. Henze, "Path Loss in Urban LoRa Networks: A Large-Scale Measurement Study," em 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), 2021, DOI: 10.1109/VTC2021-FALL52928.2021.9625531.

- [28] J. Petäjajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hänninen, e M. Pettissalo, "On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology," in 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), 2015, ISBN: 978-1-4673-9382-9.
- [29] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann, e C. Wietfeld, "Urban Channel Models for Smart City IoT-Networks Based on Empirical Measurements of LoRa-Links at 433 and 868 MHz," TU Dortmund University, Germany, 2017. ISBN: 978-1-5386-3531-5.
- [30] D. Dobrilović, M. Malić, D. Malić, e S. Sladojević, "Analyses and Optimization of Lee Propagation Model for LoRa 868 MHz Network Deployments in Urban Areas," in Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC), vol. 7, no. 1, pp. 55-62, 2017.
- [31] T. Mahjoub, M. Ben Said, e H. Boujemaa, "Experimental Analysis of LoRa Signal in Urban Environment," in 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2022, ISBN: 978-1-6654-6749-0.
- [32] [Online]. Disponível: <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-32u4-radio-with-lora-radio-module/overview> [Acedido em fevereiro 2024]
- [33] [Online]. Disponível: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/index.html> [Acedido em agosto 2024]
- [34] T. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, Nova Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [35] Azevedo, J.A.; Mendonça, F. A Critical Review of the Propagation Models Employed in LoRa Systems. Sensors 2024, 24, 3877. <https://doi.org/10.3390/s24123877>

Anexos

Anexo A – Modelo 3D da caixa

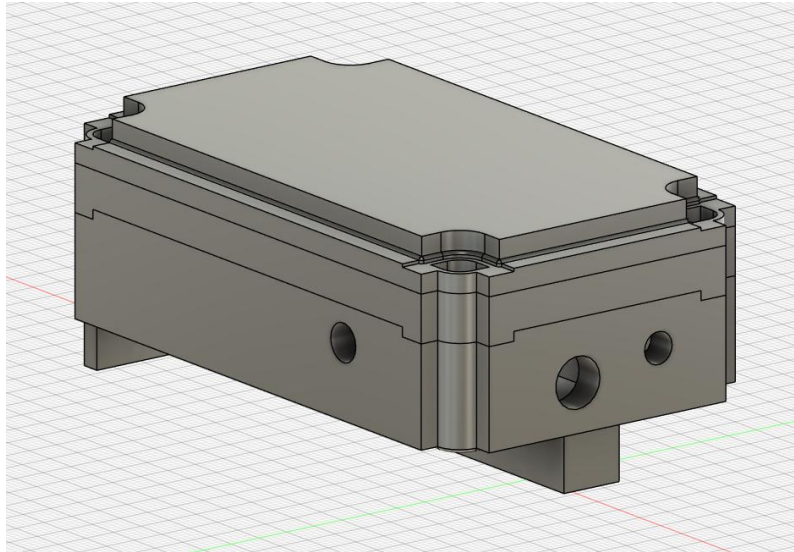


Figura A.1 - Modelo 3D da caixa com vista da parte superior.

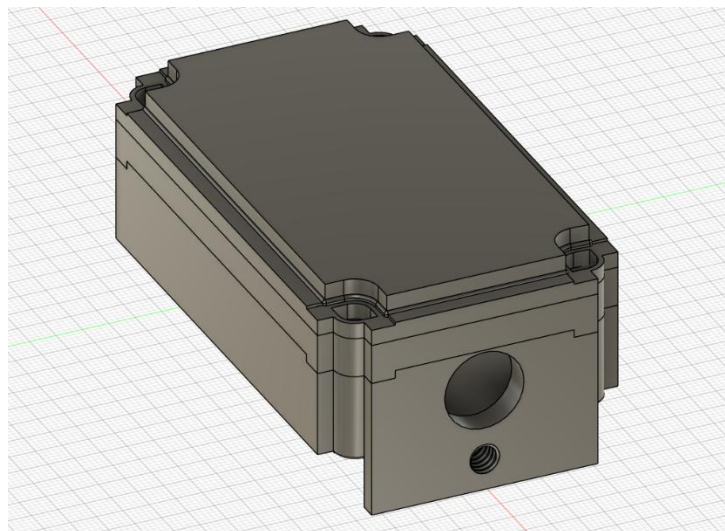


Figura A.2 - Modelo 3D da caixa com vista da parte inferior.

Anexo B – Código estação móvel

```
#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>
#define RFM95_CS 8
#define RFM95_INT 7
#define RFM95_RST 4
#define LED1 12
#define POWER 14
#define LARG_BAND 125000
#define SFact 12
#define COD_RATE 5
#define RF95_FREQ 868.2
```

```

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

void setup() {
  pinMode(LED1, OUTPUT);
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  Serial.begin(115200);
  delay(100);
  Serial.println("Transmissor LoRa - Rodrigo Gonçalves");
  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  while (!rf95.init()) {
    Serial.println("Falha ao inicializar LoRa");
    Serial.println("Uncomment '#define SERIAL_DEBUG' in RH_RF95.cpp for detailed debug info");
    while (1);
  }
  Serial.println("LoRa inicialização OK!");

  if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("Definição de frequência falhada");
    while (1);
  }
  Serial.print("Frequência definida: ");
  Serial.println(RF95_FREQ);

  rf95.setTxPower(POWER, false);
  rf95.setSpreadingFactor(SFact);
  rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND);
  rf95.setCodingRate4(COD_RATE);
}

uint8_t packetnum = 0;

void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  digitalWrite(LED1, HIGH);

  char packet[6] = "#R#";
  itoa(packetnum, packet + 3, 10);

  if (packetnum == 0) { }
  delay(10);
  rf95.send((uint8_t *)packet, sizeof(packet));
  delay(10);
}

```

```

rf95.waitPacketSent();
packetnum++;

uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
uint8_t len = sizeof(buf);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);

if (rf95.waitAvailableTimeout(5000)) {
  if (rf95.recv(buf, &len)) {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    digitalWrite(LED1, HIGH);
    delay(200);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    digitalWrite(LED1, LOW);
    delay(200);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    digitalWrite(LED1, HIGH);
    delay(200);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    digitalWrite(LED1, LOW);

    if (len >= 6 && strcmp((char*)buf, "#R#", 3) == 0) {
      char numStr[3] = {0};
      strncpy(numStr, (char*)&buf[3], 3);
      int receivedPacketNum = atoi(numStr);

      int rssi = rf95.lastRssi();
      int snr = rf95.lastSNR();

      Serial.print("UpLink: ");
      Serial.println((char*)&buf[3]);
      Serial.print("DownLink: ");
      Serial.print(receivedPacketNum);
      Serial.print(", ");
      Serial.print(rssi);
      Serial.print(", ");
      Serial.println(snr, DEC);
      digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
      digitalWrite(LED1, LOW);
    } else {
      Serial.println("Pacote recebido nao começa por'#R#'");
    }
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    digitalWrite(LED1, LOW);
  } else {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    digitalWrite(LED1, HIGH);
    delay(200);
  }
}

```

```

digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
digitalWrite(LED1, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
digitalWrite(LED1, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
}
} else {
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
digitalWrite(LED1, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
digitalWrite(LED1, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
digitalWrite(LED1, HIGH);
delay(200);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
}
delay(15000);
}

```

Anexo C – Código gateway

```

#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>
#define RFM95_CS 8
#define RFM95_INT 7
#define RFM95_RST 4
#define LED1 12
#define RF95_FREQ 868.2
#define POWER 14
#define LARG_BAND 125000
#define SFact 12

```

```

#define COD_RATE 5
float ESP = 0;
RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

void setup() {
  pinMode(LED1, OUTPUT);
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);

  Serial.begin(115200);
  delay(100);
  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  while (!rf95.init()) {
    Serial.println("Falha ao inicializar LoRa");
    while (1);
  }
  Serial.println("LoRa inicialização OK!");

  if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("Definição de frequência falhada");
    while (1);
  }
  Serial.print("Frequência definida: ");
  Serial.println(RF95_FREQ);

  rf95.setTxPower(POWER, false);
  rf95.setSpreadingFactor(SFact);
  rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND);
  rf95.setCodingRate4(COD_RATE);
  Serial.println("Recetor LoRa - Rodrigo Gonçalves");
  Serial.println("Numero do pacote, RSSI, SNR");
}

void loop() {
  if (rf95.available()) {
    uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
    uint8_t len = sizeof(buf);

    if (rf95.recv(buf, &len)) {
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
      digitalWrite(LED1, HIGH);

      if (len >= 6 && strncmp((char*)buf, "#R#", 3) == 0) {
        char numStr[3] = {0};
        strncpy(numStr, (char*)&buf[3], 3);

```

```

int receivedPacketNum = atoi(numStr);

int rssi = rf95.lastRssi();
int snr = rf95.lastSNR();

Serial.print(receivedPacketNum);
Serial.print(" ");
Serial.print(rssi);
Serial.print(" ");
Serial.println(snr, DEC);

char packet[10];
sprintf(packet, "#R#%d,%d,%d", receivedPacketNum, rssi, snr);
Serial.print("Packet to send: ");
Serial.println(packet);

rf95.send((uint8_t *)packet, strlen(packet) + 1);
rf95.waitPacketSent();
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
digitalWrite(LED1, LOW);
} else {
    Serial.println("Pacote recebido nao começa por'#R#");
}
} else {
    Serial.println("Falha na recepção");
}
}
}
}
}

```

Anexo D – Tabelas com dados registados

Tabela D.1 - Valores de RSSI registados.

RSSI obtido (dBm)	RSSI esperado (dBm)
-48	-24,8
-56	-34,8
-65	-44,8
-73	-54,8
-83	-64,8
-91	-74,8
-100	-84,8
-108	-94,8

Anexo E – Fotografias dos locais de recolha de dados



Figura E.1 - Ambiente para teste de diagrama de radiação.



Figura E.2 - Ambiente para teste do modelo da ponta de faca.

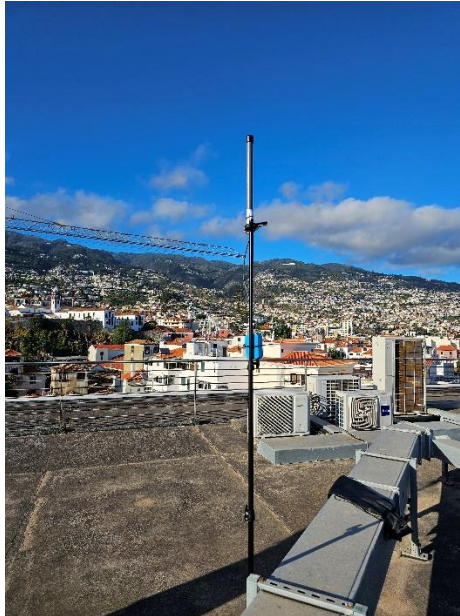


Figura E.3 - Local de instalação da gateway.

Anexo F – Tabelas dos parâmetros utilizados

Tabela F.1 – Parâmetros dos modelos para terreno plano $-10 > h\Delta > 10$ (altura de edifício).

Altura efetiva edifício	W	h_a	h_b	h_m
5 - 10 m	6,57	8,23	26,80	3,59
10 - 15 m	10,32	12,11	26,06	3,84
15 - 20 m	9,11	17,36	24,53	5,85
20 - 25 m	20,35	22,00	23,45	5,20

Tabela F.2 – Parâmetros dos modelos para terreno plano $-10 > h\Delta > 10$ (largura de rua).

Largura rua	W	h_a	h_b	h_m
0 - 5 m	4,30	10,78	25,95	4,92
5 - 10 m	7,94	15,71	25,50	4,55
10 - 15 m	12,28	15,48	25,25	3,45

Tabela F.3 – Parâmetros dos modelos para terreno plano $-10 > h\Delta > 10$ (ângulo).

Ângulo	W	φ	h_b	h_m
0° - 35°	5,68	15,95	26,14	4,32
35° - 55°	12,55	44,44	24,08	4,11
55° - 90°	13,67	77,05	25,32	4,56

Tabela F.4 – Parâmetros dos modelos para $h\Delta < -10$ (altura edifício, largura rua e ângulo)

	W	h_a	φ	h_b	h_m
Altura efetiva edifício 0 - 6 m	9,55	5,57	-	38,80	3,00
Largura rua 0 - 6 m	4,06	5,57	-	38,73	3,00
Ângulo 55° - 90°	9,55	-	76,75	38,80	3,00

Tabela F.5 – Parâmetros dos modelos para terreno inclinado $h\Delta > 10$ (altura edifício).

Altura efetiva edifício	W	h_a	h_b	h_m
15 - 20 m	9,40	17,23	23,30	16,00
20 - 25 m	13,28	24,00	23,30	22,00
30 - 35 m	11,45	33,33	23,30	29,33
35 - 40 m	20,55	39,00	23,30	26,00
40 - 45 m	11,04	43,14	23,30	36,20
45 - 50 m	12,30	49,00	23,30	37,00
50 - 55 m	11,00	51,50	23,30	42,50
55 - 60 m	11,33	56,67	23,30	44,67
60 - 65 m	14,35	61,00	23,30	39,00

Tabela F.6 – Parâmetros dos modelos para terreno inclinado $h\Delta > 10$ (largura rua).

Largura rua	W	h_a	h_b	h_m
5 - 10 m	7,56	33,33	23,30	28,50
10 - 15 m	12,11	44,91	23,30	36,17
15 - 20 m	16,40	61,00	23,30	39,00
20 - 25 m	20,55	34,40	23,30	23,00

Tabela F.7 – Parâmetros dos modelos para terreno inclinado $h\Delta > 10$ (ângulo).

Ângulo	W	φ	h_b	h_m
0° - 35°	16,64	21,88	23,30	29,38
35° - 55°	13,18	40,67	23,30	31,33
55° - 90°	10,80	77,44	23,30	31,88

Tabela F.8 – Parâmetros dos modelos para terreno inclinado e depois plano (altura edifício).

Altura efetiva edifício	W	h_a	h_b	h_m
45 - 50 m	6,80	47,00	23,30	44,00
55 - 60 m	19,15	58,00	23,30	43,00
60 - 65 m	21,63	63,00	23,30	45,00
75 - 80 m	5,60	76,00	23,30	70,00

Tabela F.9 – Parâmetros dos modelos para terreno inclinado e depois plano (largura rua).

Largura rua	W	h_a	h_b	h_m
5 - 10 m	8,94	12,3	23,3	63,8
10 - 15 m	14	64	23,3	46
15 - 20 m	19,1	59	23,3	43

Tabela F.10 – Parâmetros dos modelos para terreno inclinado e depois plano (ângulo).

Ângulo	W	φ	h_b	h_m
0° - 35°	9,60	17,50	23,30	64,67
35° - 55°	9,70	42,00	23,30	68,00
55° - 90°	16,51	76,14	23,30	47,86

