

## Recolha de Dados Meteorológicos Utilizando LoRa

PROJETO DE MESTRADO

**Francisco José Correia Sardinha**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

fevereiro | 2023

# **Recolha de Dados Meteorológicos Utilizando LoRa**

PROJETO DE MESTRADO

**Francisco José Correia Sardinha**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTAÇÃO

Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo



**Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia**

## **Recolha de dados meteorológicos utilizando LoRa**

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

**Orientador:** Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Francisco José Correia Sardinha

2023



## Resumo

Atualmente, é cada vez mais importante a recolha de dados meteorológicos, para fins de estudo das alterações climáticas e evolução do clima para efeitos de agricultura, aviação, entre outros.

Neste trabalho foi desenvolvida uma pequena estação meteorológica com a finalidade de recolher vários parâmetros como temperatura, humidade, precipitação, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento de zonas remotas. A tecnologia utilizada foi o LoRa, uma vez que permite um alcance de vários quilómetros. Os dados eram transmitidos para uma *gateway* LoRa, havendo a necessidade de estudar o efeito do meio de propagação na potência recebida. Para efetuar a comunicação dos dados, esta tecnologia tem por base várias peças chave: baixo consumo energético; baixa taxa de transmissão; elevada sensibilidade do recetor; comunicação a longas distâncias.

De modo a averiguar a tecnologia LoRa, foi desenvolvido um sistema de medição capaz de aferir os parâmetros de qualidade da uma ligação ponto a ponto. Este sistema serviu para realizar vários ensaios de propagação de modo a avaliar o comportamento da atenuação do sinal em vários tipos de ambientes de propagação tais como: linha de vista; obstrução por colina; vegetação; regiões montanhosas. Os resultados destes ensaios foram avaliados para tratamento estatístico e comparação com os modelos teóricos e empíricos.

Por fim, foi testado o funcionamento da estação meteorológica na recolha dos dados e realizada uma comparação com sistemas de referência de duas estações meteorológicas mais próximas, pertencentes ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

## Palavras chave

Estação meteorológica; gateway; tecnologia LoRa; ensaios de propagação; modelos teóricos e empíricos



## **Abstract**

Currently, it is increasingly important to collect meteorological data, in order to study climate change and climate evolution for the purposes of agriculture, aviation, among others.

In this work, a small meteorological station was developed so that it would be possible to collect various parameters such as temperature, humidity, precipitation, atmospheric pressure, wind speed and direction in remote areas. The technology used was LoRa, as it allows a range of several kilometers. The data was transmitted to a LoRa gateway, with the need to study the effect of the propagation medium on the received power. To carry out data communication, this technology is based on several key elements: low energy consumption; low transmission rate; high sensitivity of the receiver; communication over long distances.

To verify the LoRa technology, a measurement system capable of measuring the quality parameters of a point-to-point connection was developed. This system served to carry out several propagation tests to evaluate the signal attenuation behavior in several types of propagation environments such as: line of sight; hill obstruction; vegetation; mountainous regions. The results of these tests were evaluated for statistical treatment and comparison with theoretical and empirical models.

Finally, the operation of the meteorological station was tested in data collection and a comparison was made with the reference systems of two nearest meteorological stations, belonging to the Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

## **Key words**

Weather station; gateway; LoRa technology; propagation tests; theoretical and empirical models





## **Agradecimentos**

O meu muito obrigado ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Azevedo, pela dedicação, conselhos, apoio moral e dos seus conhecimentos ao longo de toda a elaboração desta tese.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram no meu percurso académico, juntamente com o apoio moral e auxílio nas medições efetuadas neste trabalho.

O meu muito obrigado ao meu colega e grande amigo José Gonçalves por todo o apoio e ajuda ao longo da realização deste projeto.

Agradeço ao meu amigo e colega José Oliveira pela sua ajuda e apoio durante as várias etapas da elaboração desta tese.

Agradecer ao Engenheiro Filipe Santos pela assistência fornecida nos ensaios de propagação, conselhos, confiança e amizade.

Agradecer a todos os meus docentes que contribuíram para a minha formação académica, juntamente com toda a comunidade académica que, de alguma forma, contribuiu para o meu desenvolvimento.



# Índice

Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Estrutura do documento .....	2
Capítulo 2 - Estado da Arte .....	3
2.1 Estação meteorológica .....	3
2.2 Sistema de comunicação.....	4
2.2.1 LoRa .....	4
2.2.1.1 Sistema LoRa .....	4
2.2.1.2 Formato da trama LoRa.....	6
2.2.1.3 Tempo no Ar .....	7
2.2.2 Parâmetros de qualidade do sistema LoRa .....	8
2.2.2.1 SNR .....	8
2.2.2.2 Sensibilidade .....	9
2.2.2.3 RSSI e ESP .....	10
2.2.2.4 Taxa de entrega de pacotes .....	10
2.3 Modelos de propagação.....	10
2.3.1 Conceitos básicos .....	11
2.3.2 Propagação em espaço livre.....	12
2.3.3 Difração por “ponta de faca” .....	13
2.3.4 Modelo “Log-Normal” .....	15
2.3.5 Modelos de vegetação .....	16
2.3.5.1 Modelo Weissberger .....	16
2.3.5.2 Modelo ITU-R .....	16
2.3.5.3 Modelo “Fitted ITU-R” .....	17
2.3.5.4 Modelo “Lateral ITU-R” .....	17
2.3.5.5 Modelo de “Chen and Kuo “ .....	17
2.3.5.6 Modelo COST-235 .....	17
2.3.6 Modelos celulares aplicados ao LoRa.....	18
2.3.6.1 Modelo Okumura-Hata .....	18
2.3.6.2 Modelo COST-231Hata.....	19
2.3.6.3 Modelo SUJ.....	19
2.3.6.4 Modelo Ericsson .....	20
2.3.6.5 Modelo 3GPP.....	21

2.3.7 Estudos na área .....	22
Capítulo 3 - Desenvolvimento .....	29
3.1 Verificação da potência de transmissão .....	29
3.2 Medição dos ganhos das antenas .....	30
3.3 Calibração do RSSI .....	32
3.4 Sistema de medição .....	35
3.4.1 Componentes do sistema.....	35
3.4.1.1 LoRa .....	35
3.4.1.2 Módulo GPS.....	36
3.4.1.3 Arduíno UNO .....	36
3.4.1.4 Raspberry Pi 3.....	37
3.4.2 Sistema .....	37
3.5 Ensaios de propagação.....	41
3.5.1 Obstáculo por colina .....	41
3.5.2 Cenário de linha de vista .....	44
3.5.3 Ensaio em vegetação.....	48
3.5.4 Ensaios na Serra .....	50
3.6 Estação meteorológica .....	53
3.6.1 Arquiteturas do sistema .....	53
3.6.2 Sensores meteorológicos .....	53
3.6.2.1 Medição da temperatura e humidade .....	54
3.6.2.2 Direção do vento .....	55
3.6.2.3 Velocidade do vento .....	56
3.6.2.4 Medição da precipitação.....	57
3.6.2.5 Pressão atmosférica .....	57
3.6.2.6 Luminosidade .....	58
3.6.3 Alimentação da estação meteorológica.....	59
3.6.4 Arquitetura da estação meteorológica .....	59
3.6.5 Programa da estação meteorológica .....	61
3.6.6 Consumo energético .....	63
3.6.7 Gateway .....	64
3.6.8 Local de testes.....	67
Capítulo 4 - Resultados.....	69
4.1 Obstáculo por colina .....	69
4.2 Cenário de linha de vista .....	73
4.3 Ensaio em vegetação.....	76

4.4 Ensaaios na Serra .....	82
4.5 Estação meteorológica .....	91
Capítulo 5 - Conclusão.....	97
5.1 Conclusões.....	97
5.2 Trabalhos futuros .....	98
Referências.....	99
Anexo A – Códigos dos sistemas de medição .....	103
Anexo B – Interface gráfica de recolha de dados.....	113
Anexo C – Código do programa de recolha dos parâmetros de qualidade da ligação e representação gráfica .....	115
Anexo D - Placa de circuito impresso da estação meteorológica .....	119
Anexo E – Código da estação meteorológica .....	121
Anexo F – Código da <i>gateway</i> .....	129
Anexo G – Programa da <i>gateway</i> para recolha de dados .....	133
Anexo H – Gráfico da velocidade do vento média e de rajada da estação meteorológica implementada .....	135



# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Estação meteorológica pertencente à Estradas de Portugal situada na Serra da estrela.....	3
Figura 2.2 - Estrutura da Trama LoRa.....	6
Figura 2.3 - Gráfico do tempo no ar e taxa de transmissão em função do SF para as larguras de banda de 125 kHz e 250 kHz, o coding rate de 4/5 e o tamanho da payload de 10 bytes. ....	8
Figura 2.4 – Processo de obtenção da sensibilidade de um sistema LoRa [4].....	9
Figura 2.5 – Atenuação do sinal em função da distância, em que a linha azul representa a atenuação média do sinal e o traçado a verde a flutuação em torno do valor médio imposto pelo desvanecimento. ....	11
Figura 2.6 – Primeiro elipsoide de Fresnel.....	12
Figura 2.7 – Cenário de difração por obstáculo em ponta de faca [10].....	13
Figura 2.8 – Ganho de difração em função de $\nu$ [9].....	14
Figura 2.9 – Simulação do modelo Log-Normal Shadowing [13]. ....	16
Figura 2.10 – Comparação dos resultados obtidos com os modelos de referência [23]. ....	22
Figura 2.11 – Comparação entre resultados experimentais e modelos considerados [18].....	23
Figura 2.12 Exemplo do perfil de elevação entre a gateway e nó para duas zonas distintas de medição [25]. ....	25
Figura 2.13 – (a)Comparação entre o modelo proposto e os modelos empíricos (b) Função de distribuição acumulada (CDF) do efeito de sombreamento ( <i>shadowing</i> ) para o modelo proposto e os modelos empíricos [25].....	26
Figura 2.14 – RSSI adquirido no procedimento experimental com o seu respetivo gráfico filtrado [26]. ....	27
Figura 2.15 - Comparação dos modelos com a atenuação resultante na experiência em Pau [26]. ....	27
Figura 3.1 – Diagrama de potência para uma potência de transmissão de 2 dBm e SF em 12. .	29
Figura 3.2 – Resultado das medições do método das três antenas.....	31
Figura 3.3 – Sistema para testes em espaço livre. ....	32
Figura 3.4 – Comparação entre a potência esperada e a média do RSSI para cada distância de teste no modo de SF 7.....	33
Figura 3.5 – Comparação entre a potência esperada e a média do RSSI para cada distância de teste no modo de SF 12.....	34
Figura 3.6 – Sistema usado para comparação direta entre as potências de sinal obtidas. ....	34
Figura 3.7 – Módulos LoRa (Esquerda) Dragino SX127x [31] e (Direita) Adafruit RFM95W Radio [32]. ....	36
Figura 3.8 – Módulo GPS da adafruit Ultimate GPS Breakout PA1616S [33].....	36
Figura 3.9 – Arduíno UNO R3 [34].....	37
Figura 3.10 – Raspberry Pi 3 [35]. ....	37
Figura 3.11 – Esquema elétrico do sistema transmissor e recetor para ensaios de propagação. ....	38
Figura 3.12 – Fluxograma dos sistemas emissor e recetor. ....	39
Figura 3.13 - Fluxograma do programa de aquisição, controlo e representação gráfica. ....	40
Figura 3.14 - Perfil de elevação da colina do “Pico da Torre” e sua respetiva zona no mapa. ....	41
Figura 3.15 - Zona parametrizada para os ensaios de propagação para obstáculo por colina...	42
Figura 3.16 - Geometria do obstáculo em ponta de faca. ....	43
Figura 3.17 - Zona parametrizada para os ensaios de propagação para o ensaio em linha de vista. ....	45

Figura 3.18 - Captura de tela do software CloudRF para simulação do ensaio em linha de vista .....	45
Figura 3.19 – Visualização tridimensional dos elipsoides de Fresnel criados para as 6 ligações ponto a ponto.....	46
Figura 3.20 - Atenuador Manual DC-2.2GHz 0-10 dB x 1 dB modelo 50R-019. ....	47
Figura 3.21 - Tipo de vegetação encontrada no jardim da universidade da Madeira. ....	48
Figura 3.22 - Parametrização dos pontos de medição no jardim da universidade da Madeira. ....	48
Figura 3.23 - Zona parametrizada para os ensaios de propagação para o ensaio na Serra do Funchal. ....	50
Figura 3.24 - Sistema de medição no ponto de medição 4 (esquerda) e no ponto de medição 7 (direita).....	51
Figura 3.25 - Perfil de elevação do terreno nos pontos do ensaio na serra do funchal referentes à segunda passagem. ....	52
Figura 3.26 - Diagrama de blocos da estação meteorológica e a <i>gateway</i> . ....	53
Figura 3.27 - Sensor de temperatura e humidade SHT1x [36] (esquerda) e estrutura protetora do sensor (direita). ....	54
Figura 3.28 - Esquemático das ligações do sensor SHT1x a um microcontrolador.....	54
Figura 3.29 - Sensor de posição do vento (esquerda) e esquema elétrico equivalente do sensor [38]. ....	55
Figura 3.30 - Esquema elétrico do circuito de deteção da posição do vento. ....	56
Figura 3.31 - Anemómetro do kit ADS-WS1 Weather Station [37]. ....	56
Figura 3.32 - Esquema elétrico para deteção de mudanças de estado para sensores do tipo <i>reed switch</i> . ....	57
Figura 3.33 - Princípio de funcionamento de um pluviómetro [39]. ....	57
Figura 3.34 - Sensor de pressão atmosférica Grove-DPS310 e seu correspondente <i>pinout</i> [40]. ....	58
Figura 3.35 - Piranómetro SKYE SKS 1110 [41].....	58
Figura 3.36 - Circuito de transimpedância [42].....	58
Figura 3.37 - Carregador Solar MCP73871 [43]. ....	59
Figura 3.38 - Arduino Pro Mini 328 3.3V/8MHz [44]. ....	60
Figura 3.39 - Esquema elétrico da estação meteorológica. ....	60
Figura 3.40 - Fluxograma da função <i>leituraeenvio()</i> da estação meteorológica. ....	62
Figura 3.41 - Fluxograma do programa <i>loop()</i> da estação meteorológica.....	62
Figura 3.42 – Representação grafica dos vários estados de consumo da estação meterológica. ....	64
Figura 3.43 – Arquiteruta da <i>gateway</i> . ....	65
Figura 3.44 – Fluxograma do programa principal da <i>gateway</i> . ....	66
Figura 3.45 – Fluxograma do programa de aquisição de dados. ....	67
Figura 3.46 - Estação meteorológica desenvolvida.....	68
Figura 3.47 – Mapa das localizações geográficas da estação meterológica e <i>gateway</i> . ....	68
Figura 4.1 – Comparação entre a potência esperada e potência média adquirida para os diferentes modos de SF em cada ponto. ....	70
Figura 4.2 - Taxa de entrega de pacotes obtidos para os diferentes pontos de medição para os três modos de SF.....	71
Figura 4.3 – SNR médio obtido para cada ponto de medição nos diferentes SF em estudo.....	72
Figura 4.4 - Potência de sinal adquirida no “Ponto 2” em comparação com as médias para os diferentes modos. ....	72



Figura 4.5 - Relação entre o ESP e o RSSI em função do SNR para todas as medições do ensaio de propagação “obstáculo por colina” .....	73
Figura 4.6 - Comparação entre atenuação obtida no ensaio e o valor esperado. ....	74
Figura 4.7 – Comparação entre o ESP esperado e obtido em função da potência de transmissão. ....	75
Figura 4.8 - Relação entre o ESP e o RSSI em função do SNR para todas as medições do ensaio de propagação.....	76
Figura 4.9 – Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre.....	76
Figura 4.10 - Atenuação do sinal no canal descendente em comparação com a curva de espaço livre.....	77
Figura 4.11 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no ensaio. ....	78
Figura 4.12 – Médias do erro de estimação dos modelos que melhor se aproximam dos resultados obtidos.....	79
Figura 4.13 - Desvios padrões de estimação dos modelos que melhor se aproximam dos resultados obtidos.....	79
Figura 4.14 - Atenuação do sinal no segundo ensaio na vegetação. ....	81
Figura 4.15 – Relação RSSI e ESP em função do SNR obtidos no segundo ensaio na vegetação. ....	81
Figura 4.16 – Taxa de entrega de pacotes para o primeiro ensaio na serra. ....	83
Figura 4.17 - Relação sinal ruído para o primeiro ensaio na serra.....	83
Figura 4.18 - Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre no primeiro ensaio na serra. ....	84
Figura 4.19 - Atenuação do sinal no canal descendente em comparação com a curva de espaço livre no primeiro ensaio na serra. ....	84
Figura 4.20 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no primeiro ensaio na serra no canal ascendente. ....	85
Figura 4.21 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no primeiro ensaio na serra no canal descendente.....	86
Figura 4.22 - Taxa de entrega de pacotes para o segundo ensaio na serra.....	88
Figura 4.23 - Relação sinal ruído para o segundo ensaio na serra.....	88
Figura 4.24 - Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre no segundo ensaio na serra. ....	89
Figura 4.25 - Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre no segundo ensaio na serra. ....	89
Figura 4.26 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no segundo ensaio na serra no canal ascendente. ....	90
Figura 4.27 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no segundo ensaio na serra no canal descendente.....	90
Figura 4.28 – Dados de precipitação recolhidos pelas três estações meteorológicas.....	92
Figura 4.29 – Dados de temperatura recolhidos pelas três estações meteorológicas. ....	92
Figura 4.30 - Dados de humidade relativa do ar recolhidos pelas três estações meteorológicas .....	93
Figura 4.31 - Dados de velocidade do vento média recolhidos pelas estações meteorológicas da Ribeira da Alforra e do Lido.....	94
Figura 4.32 – Percentagem média das direções do vento na estação meteorológica da Ribeira da Alforra.....	94

Figura 4.33 – Dados da pressão atmosférica recolhidos da estação meteorológica implementada. ....	95
Figura 4.34 - Dados da Luminosidade recolhidos da estação meteorológica implementada. ...	95
Figura 4.35 – Dados obtidos da relação sinal-ruído durante o período de estudo. ....	96
Figura 4.36 – Perdas de percurso durante o período de estudo da estação meteorológica.....	96

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Capacidade de detecção e correção de erros do sistema LoRa.....	5
Tabela 2.2 – Gama de limite do SNR para os diferentes Spreading Factor para o módulo LoRa RFM95W [5]. .....	9
Tabela 2.3 – Sensibilidade para o módulo LoRa RFM95W [5] .....	10
Tabela 2.4 – Expoente de atenuação para diferentes ambientes de propagação [12]. .....	15
Tabela 2.5 – Parâmetros numéricos do modelo SUI.....	20
Tabela 2.6 – Parâmetros do modelo Ericsson [21]. .....	21
Tabela 2.7 – Resultados estáticos obtidos através dos dados experimentais para os três modelos em estudo [18]. .....	24
Tabela 3.1 – Comparação dos valores potência de transmissão e recepção no analisador de espectros para diferentes modos de operação. ....	30
Tabela 3.2 – Ganhos das antenas obtidos pelo método das três antenas. ....	32
Tabela 3.3 – Constantes de calibração.....	35
Tabela 3.4 - Distâncias e alturas em metros para os respectivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio para obstáculo por colina. ....	42
Tabela 3.5 - Parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff para os diferentes pontos de medição considerados. ....	43
Tabela 3.6 - Parâmetros do sistema de medição para os ensaios de obstáculo por colina. ....	44
Tabela 3.7 – Alturas, distâncias e raios em metros para os respectivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio em linha de vista .....	46
Tabela 3.8 – Parâmetros do sistema de medição para os ensaios em linha de vista .....	47
Tabela 3.9 - Parâmetros do sistema de medição para a primeira passagem dos ensaios na vegetação do jardim da universidade da Madeira.....	49
Tabela 3.10 - Parâmetros do sistema de medição para a segunda passagem dos ensaios na vegetação do jardim da universidade da Madeira.....	49
Tabela 3.11 - Alturas e distâncias em metros para os respectivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio na serra do Funchal referentes a primeira passagem. ....	51
Tabela 3.12 - Alturas e distâncias em metros para os respectivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio na serra do Funchal referentes à segunda passagem. ....	52
Tabela 3.13 - Parâmetros do sistema de medição para os ensaios na serra do Funchal. ....	52
Tabela 3.14 - Valores das resistências para as diferentes direções do catavento (sendo o norte 0° e incrementos no sentido dos ponteiros do relógio). ....	55
Tabela 3.15 - Gama de valores para os diferentes sensores e o respetivo número de bytes. ....	61
Tabela 3.16 – Parâmetros da comunicação LoRa entre a estação meteorológica e <i>gateway</i> .....	63
Tabela 4.1 - Valores estimados para as perdas por difração e resultante potência recebida para o ensaio de obstáculo por colina. ....	69
Tabela 4.2 – Diferença entre os valores esperados de ESP e o valor médio de ESP para os diferentes pontos e SF em estudo. ....	70
Tabela 4.3 – Potência de sinal esperada em cada ponto de medição. ....	73
Tabela 4.4 - Parâmetros de qualidade obtidos no ensaio em linha de vista. ....	74
Tabela 4.5 - Parâmetros de qualidade obtidos no Ponto 6 para diferentes níveis de potência de transmissão. ....	75

Tabela 4.6 – Resultados estatísticos de aproximação dos modelos de vegetação aos resultados obtidos. ....	78
Tabela 4.7 - Parâmetros de qualidade obtidos do segundo ensaio na vegetação.....	80
Tabela 4.8 - Parâmetros de qualidade obtidos no primeiro ensaio na serra no canal ascendente. ....	82
Tabela 4.9 - Parâmetros de qualidade obtidos no primeiro ensaio na serra no canal descendente. ....	82
Tabela 4.10 – Parâmetros dos modelos celulares utilizados. ....	85
Tabela 4.11 - Resultados estatísticos de aproximação dos modelos empíricos aos resultados obtidos no primeiro ensaio na serra. ....	86
Tabela 4.12 - Parâmetros de qualidade obtidos no segundo ensaio na serra no canal ascendente. ....	87
Tabela 4.13 - Parâmetros de qualidade obtidos no segundo ensaio na serra no canal descendente. ....	87
Tabela 4.14 - Resultados estatísticos de aproximação dos modelos empíricos aos resultados obtidos no segundo ensaio na serra. ....	91

## Lista de Acrónimos

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CLK	<i>Clock</i>
COM	<i>Communication port</i>
CR	<i>Coding rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CS	<i>Chip select</i>
CSS	<i>Chirp spread spectrum</i>
ERP	<i>Effective radiated power</i>
ESIB	<i>Ecole supérieure d'ingénieurs de Beyrouth</i>
ESP	<i>Effective signal power</i>
FEC	<i>Forward error correction</i>
GND	<i>Ground</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ISM	<i>Industrial, scientific, and medical radio band</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
MISO	<i>Master Input Slave Output</i>
MOSI	<i>Master Output Slave Input</i>
NF	<i>Noise floor</i>
PDR	<i>Packet delivery ratio</i>
PG	<i>Process gain</i>
PL	<i>Payload</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RSSI	<i>Received signal strength indicator</i>
SCK	<i>Clock</i>
SF	<i>Spreading factor</i>
SNR	<i>Signal to noise ratio</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SUI	<i>Stanford University Interim</i>
TWI	<i>Two-Wire Interface</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VCC	<i>Voltage Common Collector</i>



# Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo serão referidos as motivações e o contexto do problema em estudo desta dissertação, os objetivos que se pretende atingir e a estruturação do documento.

## 1.1 Motivação

Cada vez mais no nosso dia-a-dia somos dependentes das condições climáticas, desde o planeamento do tipo de vestuário a utilizar, até à prevenção e contenção de possíveis catástrofes naturais. Deste modo, é fulcral a medição de diversos parâmetros do meio ambiente, tais como a temperatura e humidade que estão diretamente relacionados com o aquecimento global, entre outros parâmetros como a quantidade de precipitação que é uma variável de extrema relevância para o abastecimento de água potável e para as produções agrícolas.

Deste modo a obtenção e tratamento dos dados das condições climáticas, devem ser feitos na maior quantidade e no maior número de locais distintos, de modo a aferir as variações nos parâmetros numa larga escala.

Atualmente a relevância destes dados é tão elevada que diversas autoridades governamentais, institutos científicos e entidades privadas dedicam-se à aquisição dos dados com qualidade e, em diversos casos, estudo dos mesmos para tirarem conclusões objetivas sobre os mesmos e disponibilizá-los ao público.

A aquisição de dados meteorológicas na zona montanhosa da Madeira apresenta a dificuldade de dispor de um acesso a uma rede de baixo custo para a monitorização ambiental. Os rádios LoRa (*Long Range*), que proporcionam comunicações a longa distância, apresentam ser uma solução bastante apelativa para implementação de uma ligação de longo alcance para transmissão dos dados.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto consiste na implementação de uma estação meteorológica de baixo custo, para avaliar a possibilidade da recolha de dados meteorológicos através de uma tecnologia recente com um grande potencial de aplicação. Será usado o sistema LoRa para efetuar a comunicação entre os diferentes pontos da rede e serão efetuados estudos de propagação do sistema de modo a aferir o efeito do meio de propagação nesta tecnologia. Por fim, a estação meteorológica será instalada durante um período de teste numa zona sem monitorização.

## 1.3 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se elaborado em cinco capítulos, da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução** – Este capítulo tem como intuito apresentar as motivações do trabalho a efetuar, os objetivos e a estrutura do documento;
- **Capítulo 2 – Estado da arte** – Este capítulo inicia-se com uma breve descrição de uma estação meteorológica, descreve o funcionamento do sistema de comunicação LoRa, apresenta os conceitos básicos de propagação seguido de modelos de propagação e apresenta três estudos de propagação usando LoRa;
- **Capítulo 3 – Desenvolvimento** – Este capítulo descreve toda a fase de implementação, preparação de um sistema de medição, descrição e abordagem sobre os vários ensaios, terminando com a implementação da estação meteorológica;
- **Capítulo 4 – Resultados** – Este capítulo afere os resultados obtidos nos ensaios de propagação e na estação meteorológica, fazendo uma análise de resultados e comparação dos modelos de propagação;
- **Capítulo 5 – Conclusão** – Neste capítulo são apresentadas as conclusões principais recolhidas deste trabalho, juntamente com propostas para trabalhos futuros.



## Capítulo 2 - Estado da Arte

Neste capítulo será feita uma breve apresentação dos principais parâmetros de interesse de um sistema meteorológico, posteriormente será abordado o sistema de comunicação LoRa e os parâmetros de qualidade do mesmo e, por fim, serão descritos os modelos de propagação que podem ser aplicados ao sistema LoRa.

### 2.1 Estação meteorológica

O termo estação meteorológica é normalmente associado a uma instalação com instrumentos e equipamentos para medir as condições atmosféricas de modo a aferir previsões atmosféricas e estudar o tempo e clima. Esta pode ser instalada numa zona remota ou próximo de zonas habitadas. No caso de se encontrar numa zona remota é necessário ter em consideração o envio dos dados para a estação meteorológica localizada numa zona não remota. Dois tipos de exemplos de estações remotas são as estações meteorológicas colocadas em zonas marítimas e zonas florestais ou montanhosas, como é o caso da estação meteorológica da Figura 2.1 situada na Serra da estrela em Portugal.



Figura 2.1 - Estação meteorológica pertencente à Estradas de Portugal situada na Serra da estrela.

Dependendo dos requisitos de projeto da estação meteorológica para a escolha dos diferentes sensores de forma a colmatar as necessidades de monitorização, em termos gerais, os tipos de sensores mais usuais são os seguintes:

- Termómetro com a finalidade de medir a temperatura do ar ou da superfície oceânica;
- Barómetro para aferir a pressão atmosférica;
- Higrómetro utilizado para medir a humidade atmosférica;
- Anemómetro para medir a velocidade do vento;
- Piranómetro efetua a medição da quantidade de radiação solar;
- Pluviómetro têm a finalidade de medir a quantidade de precipitação líquida por unidade de área pré-definida;

- Medidor de direção do vento, também usualmente apelidado de catavento, mede o sentido da direção do vento.

Para além destes sensores típicos, em estações meteorológicas mais sofisticadas também são efetuadas medições do índice de ultravioleta, humidade das folhas, humidade do solo, temperatura do solo, medição da distribuição do tamanho da gota de chuva, medição da distância de visibilidade e determinação da distância a que se encontra o teto das nuvens, sendo estes três últimos bastante importantes para as estações meteorológicas aeroportuárias.

## 2.2 Sistema de comunicação

Como referido anteriormente, as estações meteorológicas remotas necessitam de uma tecnologia de comunicação de modo a ser possível enviar os dados do ponto de medição para a estação base. Deste modo, atualmente existem várias tecnologias capazes de responder a essa necessidade, como a rede celular, o Wi-Fi Long Range, o Bluetooth Low Energy, o Zigbee entre outras. A tecnologia LoRa realça-se perante as demais tecnologias para este tipo de aplicações em que é necessário apenas uma baixa taxa de transmissão de dados, baixo consumo energético e longo alcance, proporcionado pela sua elevada sensibilidade, o que permite a utilização de antenas omnidirecionais.

### 2.2.1 LoRa

O LoRa é uma tecnologia de modulação rádio desenvolvida para aplicações de comunicação de longa distância com baixo consumo energético e baixa transmissão de dados. Esta tecnologia foi criada pela empresa Semtech, que anuncia comunicações de longa distância até 5 quilómetros em meio urbano e 15 quilómetros em meio rural, caso o emissor e recetor se encontrem em linha vista [1] e que a sua topologia é em estrela.

Atualmente a tecnologia LoRa, na região europeia, opera na banda de frequências denominada de ISM (*Industrial, Scientific and Medical Radio Band*), a qual é reservada para uso industrial, científico e médico. Esta banda apresenta vantagens de ser uma banda de livre utilização para qualquer utilizador, podendo ser utilizada sem a necessidade de licença. Em contrapartida, o uso de diversos utilizadores na mesma banda de frequências origina uma elevada interferência e, deste modo, a entidade reguladora do espectro eletromagnético de cada país tem a responsabilidade de regular esta banda. No caso de Portugal, a entidade reguladora ANACOM limita a potência máxima de transmissão a 14 dBm e a um *Duty Cycle* de 1% na banda de frequências 868 MHz [2].

#### 2.2.1.1 Sistema LoRa

O LoRa utiliza um esquema de modulação digital por espalhamento espectral denominado de *Chirp Spread Spectrum* (CSS), sendo caracterizado pela seguinte expressão da equação [3],

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left\{ 2\pi f_c t \pm \pi \left[ u \left( \frac{t}{T_s} \right) - w \left( \frac{t}{T_s} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.1)$$

em que  $E_s$  é a energia de símbolo com a duração  $T_s$ ,  $f_c$  é a frequência da portadora do sinal e as variáveis  $u$  e  $w$  são o desvio em relação à frequência central e a largura do varrimento respetivamente.

Este tipo de modulação usa impulsos de banda larga e a sua frequência varia dependendo da quantidade de símbolos transmitidos, o que permite uma imunidade ao ruído ou a sinais de interferência devido ao espalhamento espectral efetuado.

Juntamente com a vantagem anterior e através do uso destes impulsos *Chirp*, é possível mitigar os efeitos de desvanecimento, o que permite a possibilidade de aumentar o alcance sem necessariamente implicar um aumento na potência de transmissão. O *Chip Rate* pode então ser determinado pela expressão

$$R_c = LB \text{ chips/s} \quad (2.2)$$

No âmbito da correção de erros, este tipo de modulação utiliza uma codificação *Forward Error Correction* (FEC), a qual adiciona bits à trama criada com a finalidade de deteção e correção de erros na trama recebida através de códigos Hamming. O sistema LoRa permite taxas de código (*code rate*) de 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8, os quais caracterizam o número de bits adicionais, ou seja, para o modo 4/6 a trama possui 4 bits de informação útil em 6 bits de dados, sendo os restantes 2 bits utilizados para correção de erros. Assim, cada modo apresenta diferentes capacidades de correção e deteção de erros apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Capacidade de deteção e correção de erros do sistema LoRa.

Code Rate	Capacidade de bits que consegue corrigir	Capacidade de bits errados que consegue detetar
4/5	0	0
4/6	0	1
4/7	1	2
4/8	1	3

Outro parâmetro de relevância é o *Spreading Fractor* (SF). Este parâmetro providencia a possibilidade de utilização do canal por diferentes utilizadores com diferentes sinais com espalhamento espectral no mesmo canal, sem haver degradação da relação sinal-ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*). Assim o aumento do *Spreading Fractor* provoca o aumento do SNR, o que proporciona uma maior sensibilidade do recetor e maior alcance de transmissão. Em contrapartida este aumento origina um aumento do tempo de transmissão da trama.

A taxa de símbolos nesta modulação é dada por

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

É possível concluir que a taxa binária será o produto do *Spreading Factor* pela taxa de símbolos e pelo *Coding Rate*, dado pela equação

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

### 2.2.1.2 Formato da trama LoRa

O formato da trama LoRa é constituído pelo preâmbulo, o cabeçalho da mensagem, campo de dados, também denominado de *Payload*, e *Cyclic Redundancy Check* do campo de dados. Relativamente ao cabeçalho da trama, este só é usado se operar em modo explícito. O formato da trama encontra-se representado na Figura 2.2.

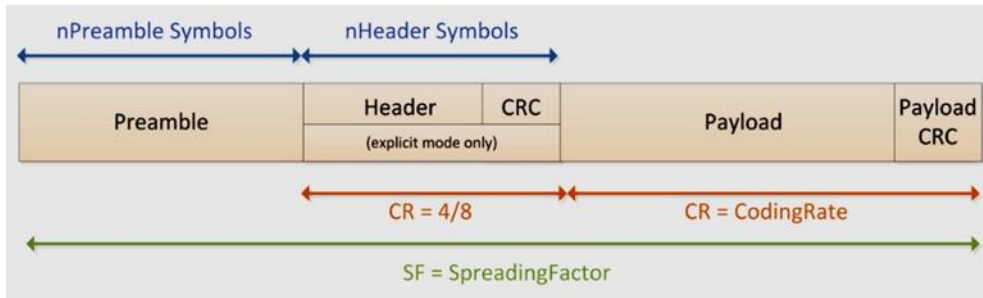


Figura 2.2 - Estrutura da Trama LoRa.

O preâmbulo é o primeiro elemento da trama LoRa, com a finalidade de permitir ao recetor detetar o início do pacote. Este elemento é formado por uma sequência de símbolos, cuja frequência varia ao longo do tempo de *Chirp* de forma crescente (desde a frequência de operação mais baixa até à frequência de operação mais alta), sendo chamado de *up-chirp*. Os últimos 4,25 *chirps* do preâmbulo caracterizam a palavra de sincronização (*sync word*) e o *start frame delimiter*, em que a palavra de sincronização é codificada pelos primeiros dois *chirps*. A palavra de sincronização permite diferenciar redes LoRa que operem na mesma banda, ou seja, um dispositivo configurado com uma determinada palavra de sincronização não irá escutar uma eventual transmissão caso as palavras de sincronização entre os dois sejam diferentes. Ainda relativamente aos 4,25 chips, os últimos 2,25 chips são usados para codificar a informação do *start frame delimiter*.

Deste modo, a dimensão do preâmbulo pode ser expressa através da equação,

$$T_{pre} = (n_{pre} + 4,25)T_{chirp} \quad (2.5)$$

em que  $n_{pre}$  é o número de símbolos de preâmbulo (sendo utilizado o número 8 para a banda EU868), o fator de adição de 4,25 é, como referido anteriormente, os *chips*

para a palavra de sincronização e *start frame delimiter*. O parâmetro  $T_{chirp}$  é a duração do impulso *chirp*.

No que se refere ao cabeçalho da mensagem, o qual apenas está presente no modo de operação explícito, é usada uma codificação 4/8, que corresponde ao máximo de codificação admissível para o protocolo LoRa. O cabeçalho é usado para indicar a dimensão da *payload*, a codificação usada para codificar o restante da trama e a informação de existência de codificação CRC (*cyclic redundancy check*) para os dados da trama bem como um campo de verificação de integridade do cabeçalho. Esta estrutura pode ser confirmada na Figura 2.2.

Como referido anteriormente, existe a possibilidade de se formar a trama sem o cabeçalho da mensagem, o qual só é possível quando o recetor já conhece a dimensão do pacote, taxa de codificação e a presença de campo CRC.

Por fim, a trama é também constituída pelo *payload* e pelo campo de codificação CRC opcional para o *payload*. Relativamente ao *payload*, este tem dimensão variável dependo da quantidade de informação a transmitir, não podendo exceder os 255 bytes. A sua duração depende da codificação usada bem como do modo em que se encontra a operar (modo implícito ou modo explícito) juntamente com outros parâmetros. Deste modo, a duração da *payload* é dada por,

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

sendo a duração de símbolo  $T_s$  em segundos, a dimensão da *payload*  $PL$  em bytes, o fator de espalhamento  $SF$ , que poderá ser um valor entre 7 e 12 dependendo da aplicação, juntamente com o parâmetro *coding rate* ( $CR$ ) que poderá ser um valor entre 1 e 4, o parâmetro CRC se encontrar habilitado  $CRC = 1$  ou  $CRC = 0$  se encontrar desativado, a presença de cabeçalho, ou seja em caso de se encontrar implícito  $H = 1$  ou explícito  $H = 0$  e o parâmetro *LowDataRateOptimize* que quando habilitado  $DE = 1$  permite melhorar a robustez da ligação através de variações na frequência durante a transmissão ou receção.

### 2.2.1.3 Tempo no Ar

Considerando as expressões (2.5) e (2.6), é possível estimar o tempo total de transmissão do pacote LoRa, também apelidado de “Tempo no Ar” (não considerando o tempo de propagação da onda eletromagnética), dado pela equação,

$$ToA = T_{packet} = T_{pre} + T_{payload} \quad (2.7)$$

a qual calcula o “Tempo no Ar” através da soma da duração do preâmbulo  $T_{pre}$  com a duração da *payload*  $T_{payload}$ .

Deste modo, é possível interpretar a influência da alteração dos diferentes parâmetros e o modo em que irão refletir-se no tempo no ar e na taxa de transmissão. Assim, considerando o exemplo prático de uma comunicação LoRa, e

manipulando o fator de espalhamento, é possível obter o gráfico, presente na Figura 2.3.

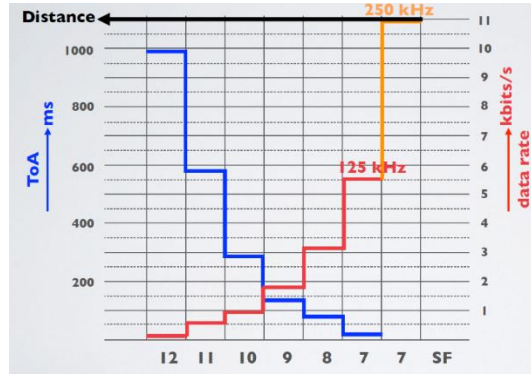


Figura 2.3 - Gráfico do tempo no ar e taxa de transmissão em função do SF para as larguras de banda de 125 kHz e 250 kHz, o coding rate de 4/5 e o tamanho da payload de 10 bytes.

## 2.2.2 Parâmetros de qualidade do sistema LoRa

De modo a aferir a qualidade da ligação, vários parâmetros podem ser observados tais como o SNR (*Signal to noise ratio*), o RSSI (*Received signal strength indicato*), o ESP (*Effective signal power*) e a taxa de entrega de pacotes.

### 2.2.2.1 SNR

O SNR é o rácio entre a potência de sinal recebido e a potência do ruído presente no canal, dado pela seguinte expressão

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \quad (2.8)$$

em dB, este rácio pode ser positivo ou negativo caso a potência do sinal seja superior ou inferior ao limiar de ruído e que pode ser determinada pela seguinte equação [4]

$$Noisefloor = 10\log_{10}(kTB_{1Hz}) + 10\log_{10}(BW_{Rx}) + NF \quad (2.9)$$

em que  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura ambiente em Kelvin que um valor típico destes sistemas é 290 K, juntamente com o resultado

$$10\log_{10}(kTB_{1Hz}) = -174 \text{ dBm/Hz} \quad (2.10)$$

Para uma largura de banda normalizada de 1 Hz e tendo em consideração que a largura de banda do recetor é de 125 kHz e a figura de ruído do recetor típica para um sistema LoRa é de 7, sendo possível determinar através da equação (2.9) que o limiar de ruído se encontrará em cerca de -116 dBm, ou seja, caso a potência de sinal se encontre no limiar de ruído o valor SNR será de 0 dB o que corresponde a uma potência recebida de 50% de potência de sinal e de 50% de potência de ruído.

Para o módulo LoRa RFM95W [5] os valores limite de SNR para os diferentes fatores de espalhamento encontram-se expressos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Gama de limite do SNR para os diferentes Spreading Factor para o módulo LoRa RFM95W [5].

Spreading Factor	SNR limiar (dB)
7	-7,5
8	-10
9	-12,5
10	-15
11	-17,5
12	-20

### 2.2.2.2 Sensibilidade

A sensibilidade do recetor corresponde ao valor mínimo de potência de sinal recebida em que o sistema consegue operar garantindo uma dada taxa de erro BER (*Bit error rate*) e ou dada taxa de erro de pacotes PER (*Packet error rate*).

A sensibilidade do sistema LoRa pode ser determinado tendo em consideração o ganho de processamento dado por [4]

$$PG = 10 \log_{10} 2^{SF} \quad (2.11)$$

em que o ganho de processamento é dado em dB, sendo fortemente dependente do fator de espalhamento. Deste modo, através da adição das equações (2.9) com (2.10) e retirando o ganho de processamento (2.11) é possível obter a equação final da sensibilidade [4]

$$Sensibilidade = 10 \log_{10}(kTB_{1Hz}) + 10 \log_{10}(BW_{Rx}) + NF + SNR - PG \quad (2.12)$$

ou seja, quanto maior o  $SF$  maior será o nível de sensibilidade em que o sistema pode operar.

Um exemplo prático da obtenção da sensibilidade encontra-se ilustrado na Figura 2.4 que para um sinal de banda estreita com um SNR de 14 dB relativos à largura de banda de 125 kHz e com o sistema a operar com  $SF = 7$ , o que corresponde a um ganho de processamento de 21 dB, o que faz com que o SNR medido seja de -7 dB. Assim sendo, colocando estes resultados na equação (2.12) o valor mínimo de sensibilidade será de aproximadamente de -123 dBm.

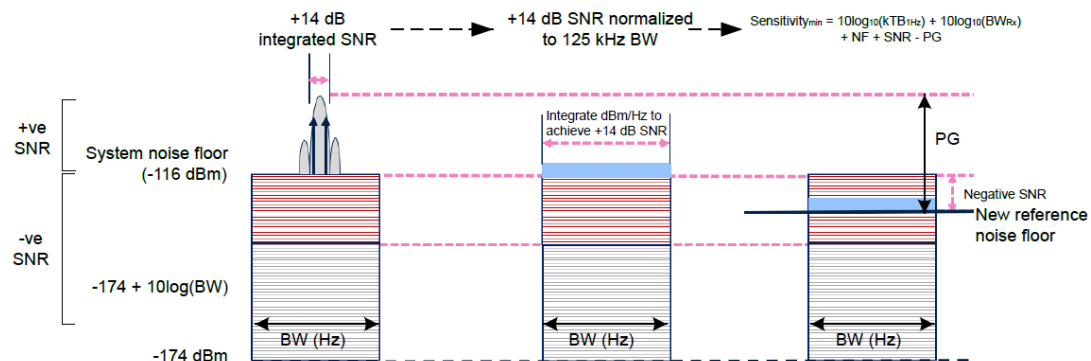


Figura 2.4 – Processo de obtenção da sensibilidade de um sistema LoRa [4]

Para o módulo LoRa RFM95W, os valores limiares de sensibilidade para os diferentes fatores de espalhamento e diferentes gamas de largura de banda, ao qual garantam um *Packet Error Rate* inferior a 1% encontra-se na Tabela 2.3

Tabela 2.3 – Sensibilidade para o módulo LoRa RFM95W [5]

	LB=125 kHz	LB=250 kHz	LB=500 kHz
SF	Sensibilidade (dBm)		
7	-123	-120	-116
8	-126	-123	-119
9	-129	-125	-122
10	-132	-128	-125
11	-133	-130	-128
12	-136	-133	-130

### 2.2.2.3 RSSI e ESP

Para efetuar a medição da potência de sinal recebido pelos sistemas de rádio tipicamente é usado o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Este indicador de potência de sinal só é uma mais-valia para efeitos de medição se o SNR for superior a zero.

Neste caso do LoRa, visto conseguir operar a valores inferiores ao limiar de ruído, o RSSI não é o melhor parâmetro visto estagnar no limiar de ruído. Deste modo, o ESP (*Effective signal power*) tem em consideração o SNR e pode ser determinado por [6]

$$ESP_{dBm} = RSSI_{dBm} + SNR_{dB} - 10 * \log_{10}(1 + 10^{0.1 * SNR_{dBm}}) \quad (2.13)$$

em que, para valores de SNR muito superiores a 0 a potência de sinal ( $ESP_{dBm}$ ) é o próprio RSSI.

### 2.2.2.4 Taxa de entrega de pacotes

Outro parâmetro de relevância para averiguar o bom funcionamento do sistema é a taxa de entrega de pacotes, PDR (*Packet Delivery Ratio*), que pode ser influenciado por diversos fatores como a potência de sinal estar muito perto do limiar de sensibilidade do modo de operação, mas também depressões drásticas na potência de sinal durante a transmissão do pacote, etc.

## 2.3 Modelos de propagação

No âmbito do estudo da propagação da onda eletromagnética, foi necessário ter em consideração os modelos de propagação já existentes de modo a ter uma correlação com a atenuação de sinal no sistema LoRa. Podem ser encontrados modelos teóricos e modelos empíricos dos quais provêm de ensaios de propagação e posteriormente desenvolvido um modelo.



### 2.3.1 Conceitos básicos

Quando se trata de modelar um canal sem fios são mencionados dois aspetos: o valor médio da atenuação do sinal em função da distância e o desvanecimento associado ao efeito multipercurso e ao efeito de sombreamento do sinal. A Figura 2.5 ilustra um exemplo do comportamento da atenuação do sinal [7]

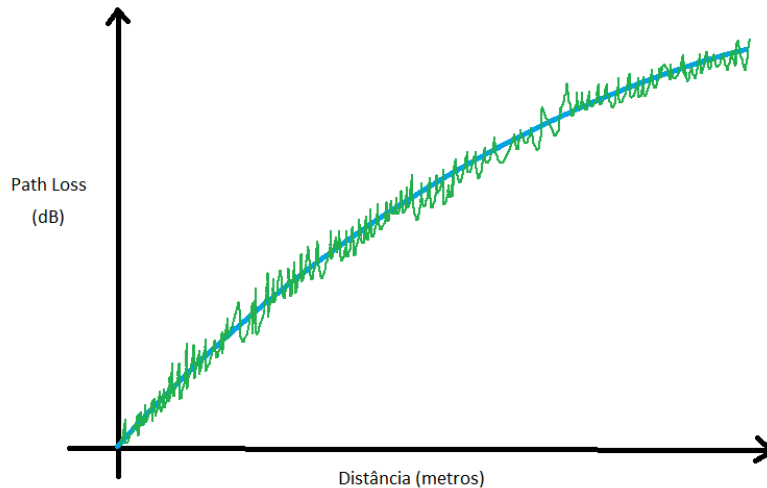


Figura 2.5 – Atenuação do sinal em função da distância, em que a linha azul representa a atenuação média do sinal e o traçado a verde a flutuação em torno do valor médio imposto pelo desvanecimento.

O efeito multipercurso é devido ao facto de ocorrerem múltiplos percursos entre a antena emissora e recetora originadas por reflexões provocadas pela presença de objetos no meio de propagação. Esta componente é bastante significativa em ambientes urbanos em que o sinal sofre reflexões nas fachadas dos edifícios, resultando que o sinal captado seja composto por um somatório de vários sinais com diferentes amplitudes, fases e direções de chegada. Esta aleatoriedade do sinal recebido resulta no desvanecimento rápido que varia ao longo da distância da ordem de um comprimento de onda devido principalmente à mudança nos ângulos de fase das diferentes componentes do sinal. O desvanecimento lento deve-se essencialmente ao efeito de sombreamento provocado pela existência de obstáculos entre o emissor e o recetor

Quando se dimensiona uma comunicação rádio também é importante considerar a zona de Fresnel que é definida como sendo uma região de formato elipsoidal que envolve as antenas nas suas extremidades, dentro da qual a maior parte da energia do sinal se encontra contida de tal forma, estando livre de obstáculos pode ser considerado estar em condições de espaço livre [8]. Na Figura 2.6 se encontra ilustrado o primeiro elipsoide de Fresnel.

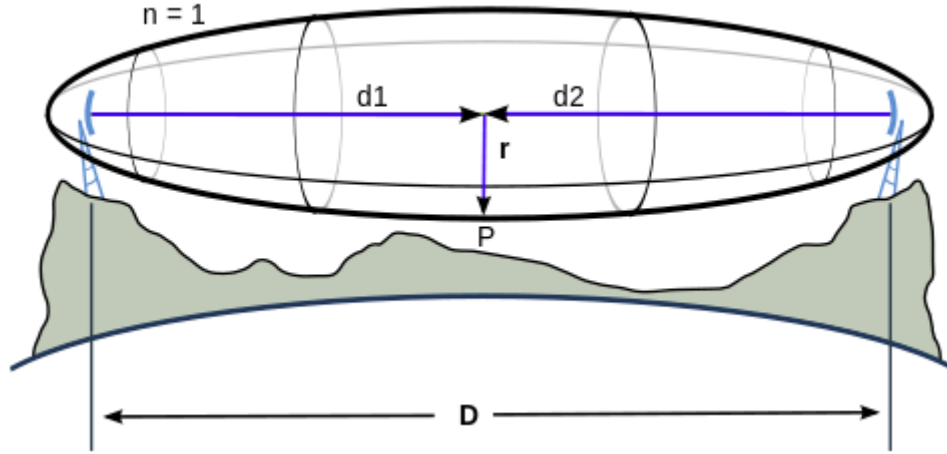


Figura 2.6 – Primeiro elipsoide de Fresnel.

$D$  é distancia em linha de vista entre as antenas,  $d_1$  e  $d_2$  são as distâncias entre as antenas e o ponto  $P$  e  $r$  é o raio do elipsoide de Fresnel dado por [8]

$$r = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.14)$$

No entanto, alguma obstrução das zonas de Fresnel pode, muitas vezes, ser tolerada, como regra geral a obstrução máxima permitida é de 40%, mas a obstrução recomendada é de 20% ou menos.

### 2.3.2 Propagação em espaço livre

O modelo mais simples para as perdas de percurso é dado pela fórmula de Friis, também denominado de modelo de espaço livre e é expresso pela seguinte expressão [9]:

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} G_t G_r \quad (2.15)$$

em que  $P_r$  é potência recebida,  $P_t$  é a potência de transmissão,  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas emissora e recetora e o comprimento de onda em metros dado por  $\lambda$ . Tendo em consideração que  $L$  corresponde ao fator de perdas do sistema, em que para os ganhos unitários das antenas, este fator de perdas pode ser obtido pela divisão da potência de transmissão pela potência recebida,

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.16)$$

esta equação linear pode ser convertida para em dB obtendo a seguinte expressão

$$L_{dB} = 32.4 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \quad (2.17)$$

com a distância expressa em km e a frequência em MHz.

Analisando a expressão (2.17) é possível concluir que as perdas aumentam 20 dB por cada década de aumento tanto em função da distância como em função da frequência, ou seja, caso a distância do emissor aumente 10 vezes, a potência recebida diminui para uma proporção 100 vezes menor.

Apesar de muito simples este modelo apenas se aplica em condições em que a comunicação tenha linha de vista sem obstruções e sem efeitos de reflexões no solo.

### 2.3.3 Difração por “ponta de faca”

O modelo de difração por “ponta de faca” é considerado como uma adição de atenuação do espaço livre, causada por um obstáculo do estilo de ponta de faca que obstrui o raio direto, provocando que o sinal obtido seja captado através de difração. Um exemplo de um caso de estudo é ilustrado na Figura 2.7, em que este modelo foi dimensionado tendo em consideração que as obstruções têm um comprimento infinito na horizontal, que não existe penetração do sinal através do obstáculo e que não existe mudança de polarização da onda durante o processo de propagação. [10]

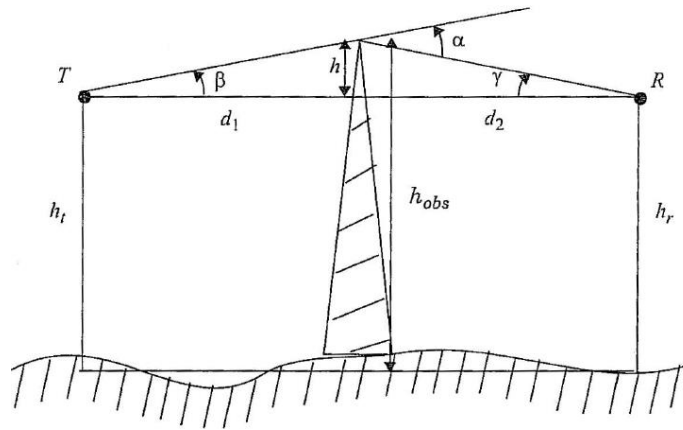


Figura 2.7 – Cenário de difração por obstáculo em ponta de faca [10].

$h_t$  e  $h_r$  são as alturas a que se encontram a antena emissora e recetora em relação ao solo respetivamente,  $h_{obs}$  é altura do obstáculo e  $h$  é a altura do obstáculo a partir da altura do traçado do raio direto, em que o raio direto é considerado duas distâncias ao obstáculo,  $d_1$  para a distância do emissor ao obstáculo e  $d_2$  do obstáculo ao recetor. Em que os ângulos  $\beta$  e  $\gamma$  são obtidos através do percurso do raio difratado e plano horizontal para o transmissor e o recetor, em que por sua vez o ângulo  $\alpha$  pode ser obtido por

$$\alpha = \beta + \gamma, d_1, d_2 \gg h \quad (2.18)$$

Assim é possível obter a diferença entre o percurso difratado e o percurso em linha de vista obtendo o seguinte resultado

$$\Delta = \frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \quad (2.19)$$

que por sua vez resulta numa diferença de fase do percurso dada por

$$\phi = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \quad (2.20)$$

Deste modo é possível obter o parâmetro de Fresnel-Kirchoff através da equação

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.21)$$

Nestes modelos, o campo elétrico normalizado produzido no recetor relativo ao de linha de vista é dado pelo seguinte resultado [9]:

$$\frac{E_d}{E_{LOS}} = F(v) = \frac{1+j}{2} \int_v^\infty \exp(-j \frac{\pi}{2} t^2) dt \quad (2.22)$$

em que  $F(v)$  é apelidado integral complexo de Fresnel que pode ser obtido por um resultado aproximado através do sistema de *Lee* que indica a atenuação provocada pelo obstáculo em ponta de faca em dB [9]

$$|F(v)| = g_{diff} = \begin{cases} 0 & , v \leq -1 \\ 20 \log_{10}(0,5 - 0,62v) & , -1 \leq v \leq 0 \\ 20 \log_{10}[0,5 \exp(-0,95v)] & , 0 \leq v \leq 1 \\ 20 \log_{10} \left[ 0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2} \right] & , 1 \leq v \leq 2,4 \\ 20 \log_{10} \left( \frac{0,225}{v} \right) & , v > 2,4 \end{cases} \quad (2.23)$$

esta aproximação pode ser visualizada no gráfico da Figura 2.8 em função do  $v$

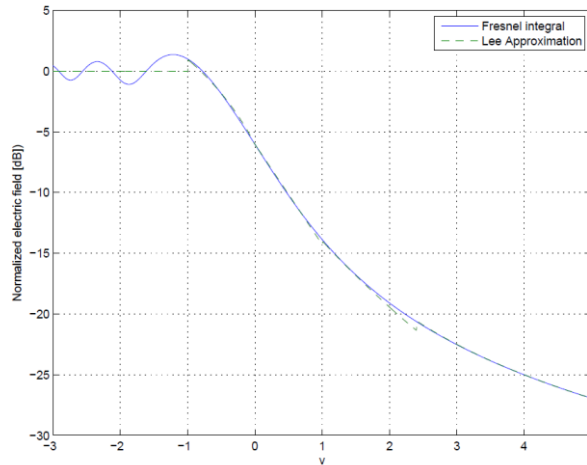


Figura 2.8 – Ganho de difração em função de  $v$  [9].

Analisando a Figura 2.8 o ganho de difração é mais acentuado a partir de valores de Fresnel-Kirchoff superiores a -1, o que corresponde a uma diferença de

um quarto de comprimento de onda entre o topo da obstrução e o percurso em linha de vista.

### 2.3.4 Modelo “Log-Normal”

O modelo “Log-Normal” provém do modelo “Log-Distance”, que nada mais é do que uma extensão da fórmula de Friis, ao que este modelo descreve uma perda de percurso logarítmica com a distância, dada em dB por [11].

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.24)$$

em que  $n$  é o expoente de atenuação,  $d$  a distância entre o emissor e o recetor em metros e  $d_0$  é distância de referência, em que este valor deve ser escolhido de forma que a comunicação se encontre no campo distante da antena emissora. No caso  $PL(d_0)$  pode ser determinado pela expressão (2.17).

Referente ao expoente de atenuação  $n$ , a Tabela 2.4 apresenta alguns valores típicos encontrados na literatura. Esta constante é fortemente dependente do meio de propagação e pode ser determinada de forma empírica.

Tabela 2.4 – Expoente de atenuação para diferentes ambientes de propagação [12].

Ambiente de propagação	Expoente de atenuação (n)
Espaço livre	2
Zona urbana	2,7-3,5
Zona suburbana	3-5
Zona interior com linha de vista	1,6-1,8
Com obstrução de edifícios	4-6
Com obstrução de fábricas	2-3

De forma a obter o modelo “Log-Normal” é necessário adicionar a equação à (2.24) uma variável aleatória Gaussiana de média zero e com desvio padrão  $\sigma$  representada por  $\chi_\sigma$ , ficando

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \chi_\sigma \quad (2.25)$$

Este modelo é adequado para ter em consideração o desvanecimento do sinal. Na Figura 2.9 é ilustrado de forma gráfica como a distribuição gaussiana se aplica a este modelo.

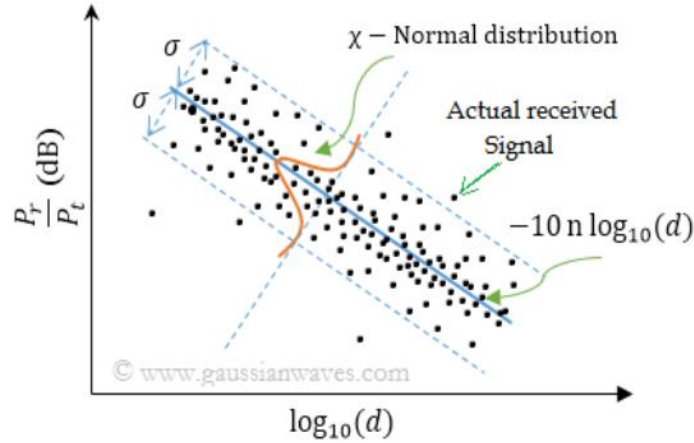


Figura 2.9 – Simulação do modelo Log-Normal Shadowing [13].

### 2.3.5 Modelos de vegetação

No que diz respeito aos modelos de vegetação, estes foram dimensionados empiricamente, ou seja, através de ensaios de propagação para se atingir um modelo final. Estes modelos introduzem uma adição à perda do espaço livre, em que tipicamente os parâmetros que os modelos têm em consideração são a frequência de operação, distância entre as antenas, polarização da onda e por fim se as antenas se encontram ao nível da folhagem ou fora.

#### 2.3.5.1 Modelo Weissberger

Este modelo também apelidado de “Weissberger’s modified exponential decay model” é um modelo que tenta estimar a atenuação devido à presença de uma ou mais árvores entre uma ligação ponto a ponto. Este cobre uma gama de valores de frequência entre os 230 MHz até aos 95 GHz e estima a atenuação até uma distância de 400m [14]. O modelo é expresso pelo seguinte sistema de equações [14]:

$$L_w(dB) = \begin{cases} 0,45f^{0,284}d & d \leq 14 \text{ m} \\ 1,33f^{0,284}d^{0,588} & 14 \text{ m} \leq d \leq 400 \text{ m} \end{cases} \quad (2.26)$$

sendo que a frequência expressa em GHz e a distância em metros.

#### 2.3.5.2 Modelo ITU-R

O Modelo ITU-R provém de uma recomendação do ITU (União Internacional de Telecomunicações) tendo sido desenvolvido através de extensas medições na banda UHF. A aproximação é válida para distâncias pequenas entre o transmissor e o recetor (para distâncias inferiores a 400 metros), para um ambiente típico de um bosque em que a maioria do sinal propaga-se através das árvores. Tipicamente, este modelo é usado para uma gama de frequência entre os 200 MHz até os 95 GHz, dado pela seguinte equação [15]

$$L_{ITU-R}(dB) = 0,2f^{0,3}d^{0,6} \quad (2.27)$$

com frequência em MHz e a distância em metros.

### 2.3.5.3 Modelo “Fitted ITU-R”

O modelo “Fitted ITU-R” parte de base do anterior, mas como o próprio nome indica é “ajustado” ao ambiente de propagação, que neste caso tem em consideração se a propagação ocorre a nível da folhagem ou fora. Para desenvolver este modelo foram feitas medições na gama de frequências de 11,2 GHz até os 20 GHz obtendo empiricamente o seguinte modelo [15]:

$$L_{FITU}(dB) = \begin{cases} 0,39f^{0,39}d^{0,25} & in - leaf \\ 0,37f^{0,18}d^{0,59} & out - of - leaf \end{cases} \quad (2.28)$$

com a frequência em MHz e a distância em metros

### 2.3.5.4 Modelo “Lateral ITU-R”

O modelo LITU surge de uma otimização do modelo ITU-R para a gama de frequência das bandas VHF e UHF, em que os dados adquiridos foram obtidos através de estudo nos 240 MHz e os 700 MHz. A denominação “lateral” é devido à componente lateral do sinal que se propaga no topo das árvores, sendo definido por [15]

$$L_{LITU}(dB) = 0,48f^{0,43}d^{0,13} \quad (2.29)$$

a frequência é dada em MHz e a distância em metros. Este modelo é apenas válido para propagações ao nível da folha, visto que as medições efetuadas para atingir este modelo foram numa plantação de palmeiras.

### 2.3.5.5 Modelo de “Chen and Kuo “

O modelo “Chen and Kuo” diferencia-se dos restantes modelos de vegetação, visto a consideração do tipo de polarização da onda que é expressa pelo seguinte sistema de equações [16]:

$$L_{CK}(dB) = \begin{cases} (0,001f + 0,2)d + 0,5f + 3 & vertical \\ ((0,0002f + 0,2)d + 0,03f + 2 & horizontal \end{cases} \quad (2.30)$$

com a frequência em GHz e a distância em metros.

### 2.3.5.6 Modelo COST-235

O modelo Cost-235 à semelhança do modelo FITU, tem em consideração se a propagação do sinal ocorre ao nível da folhagem ou fora. Cobre uma gama de valores de frequência entre os 200 MHz até os 95 GHz e estima a atenuação até uma distância mais curta em comparação com os outros modelos, até 200m [17].

O modelo é descrito por

$$L_{COST235}(dB) = \begin{cases} 15,6f^{-0,009}d^{0,26} & in - leaf \\ 26,6f^{-0,2}d^{0,5} & out - of - leaf \end{cases} \quad (2.31)$$

com frequência em MHz e a distância em metros.

### 2.3.6 Modelos celulares aplicados ao LoRa

O nome modelos celulares provém do desenvolvimento e utilização deste tipo de modelos no planeamento das redes celulares. Como a estrutura de uma rede LoRaWAN segue os princípios base de uma estrutura celular, a biográfica aponta para a comparação deste tipo de modelos com o mesmo sistema.

Neste tipo de modelos a previsão da atenuação do sinal é influenciado por diversos fatores como altura das antenas, meio de propagação, distância e frequência de operação, entre outros parâmetros.

#### 2.3.6.1 Modelo Okumura-Hata

O modelo Okumura-Hata, também conhecido por “Hata Model”, permite facilitar a aplicação do modelo Okumura, que tem por base a extrapolação gráfica de parâmetros. O modelo apenas pode ser aplicado a frequências compreendidas entre os 150 MHz e os 1500 MHz, distâncias de 1 km até 20 km, a colocação da antena emissora a uma altura de 30 m até 200 m do solo e antena recetora bastante próxima ao solo de 1 m até 20 m [7].

As expressões matemáticas para os três diferentes tipos de áreas que o modelo abrange são, para as áreas urbanas [7]

$$L_{h_{urbano}}(dB) = 69,55 + 26,16 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_t) - a(h_r) + [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_t)] \log_{10}(d) \quad (2.32)$$

para áreas suburbanas

$$L_{h_{suburbano}}(dB) = L_{h_{urbano}}(dB) - 2 \left[ \log_{10} \left( \frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (2.33)$$

para áreas abertas

$$L_{h_{aberto}}(dB) = L_{h_{urbano}}(dB) - 4,78 [\log_{10}(f)]^2 + 18,33 \log_{10}(f) - 40,94 \quad (2.34)$$

em que a frequência  $f$  é expressa em MHz a distância em km e a altura da antena emissora em metros. A expressão  $a(h_r)$  é denominada de fator de correlação da altura da estação móvel, sendo para cidades pequenas e médias dado por

$$a(h_r) = [1,1 \log_{10}(f) - 0,7] h_r - [1,56 \log_{10}(f) - 0,8] \quad (2.35)$$

No caso de ser em grandes cidades o fator passa a ser expresso por

$$a(h_r) = \begin{cases} 8,29 [\log_{10}(1,54 h_r)]^2 - 1,1 & f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2 [\log_{10}(11,75 h_r)]^2 - 4,97 & f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (2.36)$$

A altura da antena recetora é expressa em metros.



### 2.3.6.2 Modelo COST-231Hata

Este modelo COST-231 Hata provém de uma extensão do modelo anterior, o qual consegue abranger uma gama um pouco maior de frequências desde 500 MHz até 2 GHz, para uma distância de previsão entre 1km e 20 km. A antena emissora tem de estar entre 30 e 200 metros do solo e a antena recetora tem de estar entre 1 e 10 metros.

A expressão matemática que descreve do modelo COST-231 é

$$L_{COST-231} = 46,3 + 33,9 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_t) - ah_r + [44,9 - 6,55 \log_{10}(h_t)] \log_{10}(d) + c_m \quad (2.37)$$

onde  $f$  é a frequência de operação em MHz,  $d$  a distância entre as antenas expressa em km e as alturas das antenas emissora e recetora são  $h_t$  e  $h_r$  em metros. A variável  $c_m$  é dependente do meio de propagação, caso a aplicação do modelo seja em meio urbano ou suburbano esta variável é nula, em ambiente urbano o valor passa a ser de 3 dB. O fator de correlação  $ah_r$  também depende do meio de propagação em que se encontra, em que em ambiente urbano é dado pelo resultado da equação [18]

$$ah_r = 3,20[\log_{10}(11,75h_r)]^2 - 4,97 \quad (2.38)$$

e para os ambientes suburbanos por

$$ah_r = [1,1 \log_{10}(f) - 0,7]h_r - [1,56 \log_{10}(f) - 0,8] \quad (2.39)$$

### 2.3.6.3 Modelo SUI

O modelo SUI empírico foi desenvolvido pela *Stanford University* ao qual foi denominado por SUI que corresponde à abreviatura de *Stanford University Interim*. Foi dimensionado para estimar a atenuação do sinal para frequências inferiores a 11 GHz e parametrizado para três tipos de terreno A, B e C, em que o terreno A corresponde a um terreno de maior atenuação e o C de menor atenuação. O terreno A é caracterizado por ser um terreno montanhoso com uma densidade de árvores moderada a elevada. O terreno B é maioritariamente plano com uma densidade de árvores moderada a elevada ou um terreno maioritariamente montanhoso, mas com uma densidade de vegetação baixa. No que diz respeito ao terreno do tipo C é caracterizado como sendo plano e com pouca vegetação [19].

A equação do modelo com os seus fatores de correlação é [20]

$$L_{SUI}(dB) = A + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s, \quad d > d_0 \quad (2.40)$$

onde  $d$  é a distância entre antenas expresso em metros,  $d_0$  é a distância de referência,  $s$  é o expoente de atenuação da *Lognormal* ao qual é usado para ter em consideração o efeito desvanecimento devido às árvores e outros objetos, sendo este valor ponderado entre 8,2dB e 10,6 dB

Os restantes parâmetros são expressos por

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2.41)$$

$$\gamma = a - bh_t + \frac{c}{h_t} \quad (2.42)$$

O parâmetro  $h_t$  corresponde à altura da antena emissora em relação ao solo, devendo estar entre os 10 e os 80 metros. As constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são dependentes do tipo de terreno em que os valores se encontram na Tabela 2.5

Tabela 2.5 – Parâmetros numéricos do modelo SUI.

Parâmetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
$a$	4,6	4,0	3,6
$b \text{ (m}^{-1}\text{)}$	0,0075	0,0065	0,005
$c \text{ (m)}$	12,6	17,1	20

O fator de correlação para a frequência de operação é determinado através de

$$X_f = 6,0 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right) \quad (2.43)$$

com a frequência em MHz e o fator de correlação para altura do recetor é dado por

$$X_h = \begin{cases} -10,8 \log_{10} \left( \frac{h_r}{2} \right) & \text{Terreno A e B} \\ -20,0 \log_{10} \left( \frac{h_r}{2} \right) & \text{Terreno C} \end{cases} \quad (2.44)$$

sendo a altura da antena recetora dada em metros.

#### 2.3.6.4 Modelo Ericsson

A empresa *Ericsson* desenvolveu um modelo de modo a facilitar o planeamento redes celulares para os seus engenheiros. Este modelo provém de uma extensão do modelo Hata, o qual foi definido para uma grama de frequências a partir de 150 MHz até 2 GHz e consegue-se adaptar aos três tipos de ambientes de propagação urbano, suburbano e rural. A expressão do modelo é a seguinte [21]:

$$\begin{aligned} L_{ericsson}(dB) = & a_0 + a_1 \log_{10}(d) \\ & + a_2 \log_{10}(h_t) + a_3 \log_{10}(h_t) \log_{10}(d) \\ & - 3,2 \log_{10}(11,75h_r)^2 + g(f) \end{aligned} \quad (2.45)$$

sendo  $d$  é a distância da comunicação em km, compreendida entre os 200 m e 100 km,  $h_r$  e  $h_t$  são as alturas das antenas ao solo em metros, em que a altura da antena recetora se encontra entre 1 até 5 metros e a altura da antena emissora tem de estar entre 20 e 200 metros para se aplicar o modelo.

A função  $g(f)$  é o fator de correção da frequência dada por

$$g(f) = 44,49 \log_{10}(f) - 4,78 \log_{10}(f)^2 \quad (2.46)$$

com a frequência em MHz e dependendo do ambiente de propagação, são utilizados os parâmetros  $a_0, a_1, a_2$  e  $a_3$  que se encontram na Tabela 2.6

Tabela 2.6 – Parâmetros do modelo Ericsson [21].

Parâmetro	Urbano	Suburbano	Rural
$a_0$	36,2	43,2	45,95
$a_1$	30,2	68,93	100,6
$a_2$	-12	-12	-12
$a_3$	0,1	0,1	0,1

### 2.3.6.5 Modelo 3GPP

O modelo 3GPP foi desenvolvido pela entidade 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), tendo sido publicado no seu relatório técnico número 36,814. O modelo abrange vários parâmetros, como o tipo de ambiente de propagação, interior, urbano, suburbano e rural, a altura da estação base e altura da antena do posto móvel, distância de comunicação e parâmetros específicos ao meio como altura média dos edifícios, largura média das ruas e a condição de propagação se encontrar em linha de vista ou não [21]. Para o ambiente urbano e suburbano a frequência deve estar compreendida entre os 2 GHz e os 6 GHz, mas para ambiente rural o modelo admite a estimação da atenuação do sinal a partir dos 450 MHz.

Caso o ambiente de propagação seja o rural e para condições de linha de vista, o modelo é dado por [22]

$$L_{RUA-LOS}(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{40\pi df}{3} \right) + \min(0,03h^{1,72}, 10) \log_{10}(d) - \min(0,044h^{1,72}, 14,77) + 0,002 \log_{10}(h) d \quad (2.47)$$

Esta expressão considera distâncias de comunicação superiores a 10 metros até à distância de “Break Point” que é dependente da altura das antenas expresso por

$$d_{BP} = \frac{2\pi h_{BS} h_{ms} f}{c} \quad (2.48)$$

Para distâncias superiores o modelo passa a ser dado por

$$L_{RUA-LOS}(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{40\pi d_{BP} f}{3} \right) + \min(0,03h^{1,72}, 10) \log_{10}(d_{BP}) - \min(0,044h^{1,72}, 14,77) + 0,002 \log_{10}(h) d_{BP} + 40 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{BP}} \right) \quad (2.49)$$

Válido para distâncias até 10 km. O desvanecimento é compensado por uma variável aleatória Gaussiana de média nula e com desvio padrão de 4 dB para distâncias inferiores ao “Break Point” e de 6 dB para as distâncias superiores. O modelo para as condições sem a linha de vista é dado por

$$\begin{aligned}
 L_{RUa-NLOS}(dB) = & 161,04 - 7,1 \log_{10}(W) + 7,5 \log_{10}(h) \\
 & - \left[ 24,37 - 3,7 \left( \frac{h}{h_{bs}} \right)^2 \right] \log_{10}(h_{bs}) \\
 & + [43,42 - 31 \log_{10}(h_{bs})][\log_{10}(d) - 3] \\
 & + 20 \log_{10}(f) - [3,2(\log_{10}(11,75h_{ms}))^2 - 4,97]
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

o seu desvio padrão é de 8 dB, a distância de comunicação válida está compreendida entre os 10 m e 5 km, a frequência  $f$  é expressa em GHz, o parâmetro  $h$  é a altura média dos edifícios, com valores entre 5 e 50 metros, o valor  $W$  expressa o comprimento médio das ruas, com valores entre 5 até 50 metros, a antena na estação base  $h_{bs}$  tem que se encontrar a uma altura entre os 10 e os 150 metros e a antena na estação movel  $h_{ms}$  têm uma altura compreendida entre 1 e 10 metros.

### 2.3.7 Estudos na área

Um estudo na universidade do Gana [23], teve como motivação avaliar a atenuação de sinal para o sistema LoRaWAN na banda 868 MHz, em que o ambiente de propagação era uma plantação de cacau que se inseria numa floresta densa, com flutuações na elevação do terreno de 25 metros.

Para a antena recetora a 25 metros do solo e a antena emissora a 2 metros do solo, foram realizadas medições do  $RSSI$  e  $SNR$  em função da distância ao emissor. A potência de sinal foi obtida pela aproximação seguinte, para valores negativos de  $SNR$

$$P_r(dBm) = RSSI + SNR \tag{2.51}$$

Após a recolha dos dados, foi feita a comparação dos dados obtidos com os modelos de atenuação em espaço livre, ITU-R, FITU-R e COST 235. Essa comparação é apresentada na Figura 2.10

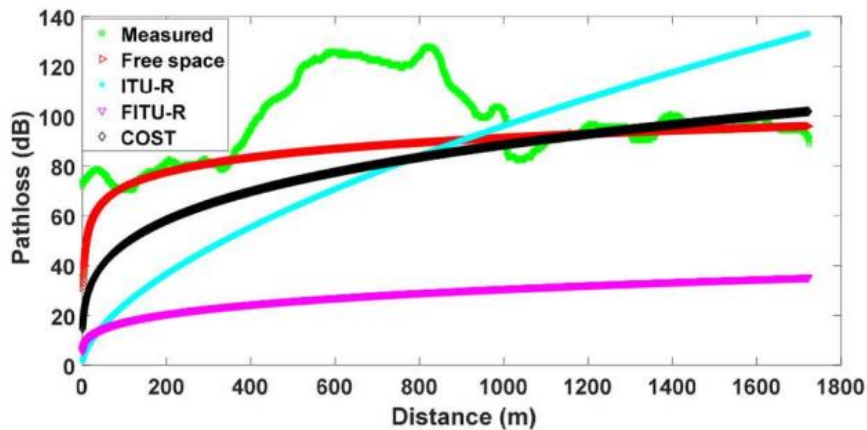


Figura 2.10 – Comparação dos resultados obtidos com os modelos de referência [23].

Observando a figura, é possível tirar diversas conclusões, em que até os 400 m a atenuação tende para uma atenuação de espaço livre, apesar de ser uma área em que a maior parte do sinal se propaga ao nível do tronco das árvores, após os 400 m ocorreu um aumento brusco na atenuação devido à entrada na zona da plantação mais densa conjuntamente com uma depressão do nível do solo. Acima dos 1000 m a vegetação é mitigada ficando em uma zona de espaço aberto. Deste modo, os modelos que mais se aproximam dos valores práticos a partir desta distância são o COST 235 e a atenuação em espaço livre.

Outro estudo decorrido no âmbito da propagação no LoRaWAN na banda 868 MHz, juntou um grupo de investigadores da universidade de Glasgow [24], no Reino Unido, com a finalidade de determinar a existência de uma correlação com os resultados obtidos dos ensaios de propagação na cidade de Glasgow com os modelos propagação típicos para um ambiente urbano da cidade. Para este efeito foram considerados os modelos Okumura-Hata, Cost231-Hata e COST-WI

As medições tiveram como procedimento o nó LoRa (situado a 1 metro do solo) envia aleatoriamente pacotes para uma das três LoRaWAN *gateways* espalhadas pela cidade (no topo de edifícios com altura aproximada de 50 metros), ao qual posteriormente o valor do RSSI é recolhido pela *gateway* tal como a distância a que se encontra o nó LoRa. O gráfico da Figura 2.11 apresenta o RSSI esperado para os três diferentes modelos considerados.

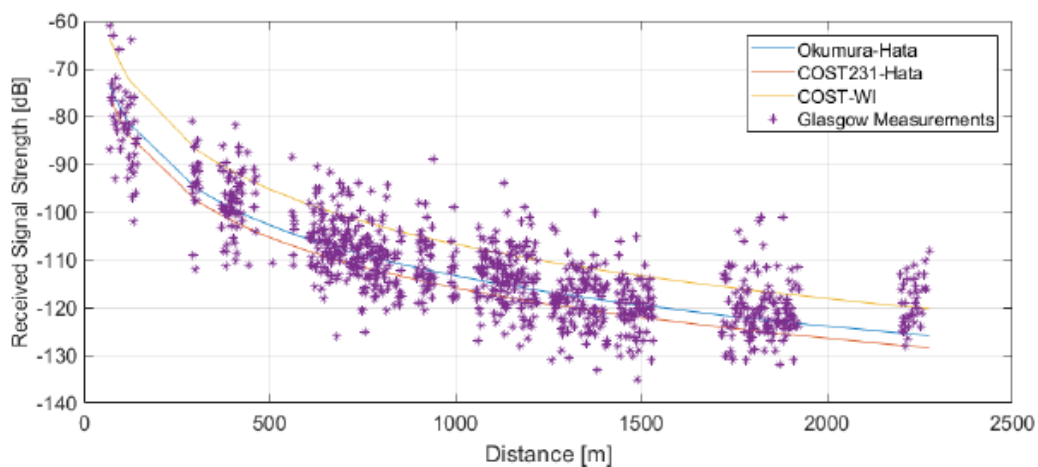


Figura 2.11 – Comparação entre resultados experimentais e modelos considerados [18].

Ao analisar a Figura 2.11 é perceptível a flutuação de sinal para a mesma distância, devido ao facto de ser um ensaio em ambiente urbano em que o fenómeno multipercurso é predominante juntamente com o efeito *Doppler*. Outro destaque na análise dos dados obtidos é a existência de zonas em que não foram recolhidos dados devido à perda de pacotes ser justificada pela atenuação elevada do sinal nessas zonas caracterizadas por um número denso de edifícios altos.

A análise dos resultados escolhida pela equipa foi a média do erro de estimação  $\mu_e$  e o erro absoluto médio de estimação  $|\Delta y|$ , definidos por

$$\mu_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_{yi} \quad (2.52)$$

$$|\Delta y| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta_{yi}| \quad (2.53)$$

em que  $\Delta_{yi}$  é a diferença entre o valor estimado e o valor medido e  $N$  representa o número de amostras recolhidas. Os resultados obtidos para cada modelo encontram na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Resultados estáticos obtidos através dos dados experimentais para os três modelos em estudo [18].

Parâmetro	Okumura-Hata	Cost231-Hata	COST-WI
$\mu_e$	-0,366	-2,915	6,484
$ \Delta y $	5,564	6,131	7,413

Através da análise destes dados, foi possível concluir pela média do erro de estimação que os modelos Okumura-Hata e COST231-Hata subestimam a potência de sinal recebida ao contrário do modelo COST-WI ao qual superestima a potência de sinal recebida. Analisando o erro absoluto foi possível concluir que o modelo que mais se aproximou dos resultados foi o modelo Okumura-Hata (5,564) e o que menos se aproximou dos resultados foi o COST-WI (7,413). Apesar destas conclusões a equipa concluiu que seria necessário um maior volume de dados para aferir melhor estas conclusões.

De forma mais exaustiva uma equipa de investigadores no Líbano [25], procederam a um conjunto de medições em ambientes interiores, exteriores, urbanos e rurais para aplicações do LoRaWAN. Os procedimentos experimentais foram semelhantes aos anteriores, em que em função da distância eram adquiridos parâmetros de qualidade da comunicação como RSSI e SNR, mas em adição foi estudada a influência da altura da antena do nó LoRa, PDR (*Packet delivery ratio*), de modo a aferir a qualidade da comunicação em termos de taxa de perda de pacotes, juntamente com aferição da qualidade da estimação dos modelos e por consequentemente adaptação dos seus dados a um modelo através de estatística.

Nos ensaios de propagação em ambiente exterior, que decorreram nas imediações do campus da universidade ESIB (Ecole supérieure d'ingénieurs de Beyrouth), foi perceptível que o aumento da altura da antena do nó LoRa de 20 cm, para 1,5 m e 3 m, melhorou a potência de sinal recebido. O modelo proposto partiu de base do modelo “Log-Normal”, com a expressão desenvolvida dada por

$$PL(dB) = 10n \log_{10}(d) + PL_0 + L_h \log h_{ED} + X_\sigma \quad (2.54)$$

que tem em consideração à atenuação devido a altura do nó LoRa dado por  $h_{ED}$ . O ajuste dos resultados originou os seguintes valores para os diferentes parâmetros os valores  $n = 3,119$ ,  $PL_0 = 140,7$  e  $L_h = -4,7$ , o que significa um ganho extra de 4,7 dB por cada década de aumento da altura do nó e um desvio padrão de  $\sigma=9,7$  dB para a distribuição gaussiana de média zero.

Nos ensaios em ambiente urbano na cidade Beirut, foram mapeados os pontos de medição até uma distância de 9 km da gateway e durante a recolha foi perceptível que a PDR baixou muito significativamente para alguns pontos de medição devido à presença densa de edifícios e pelo facto da cidade não ter um perfil plano em certos pontos de medição, de modo que a condição de linha de vista não era cumprida como ilustrado na Figura 2.12.

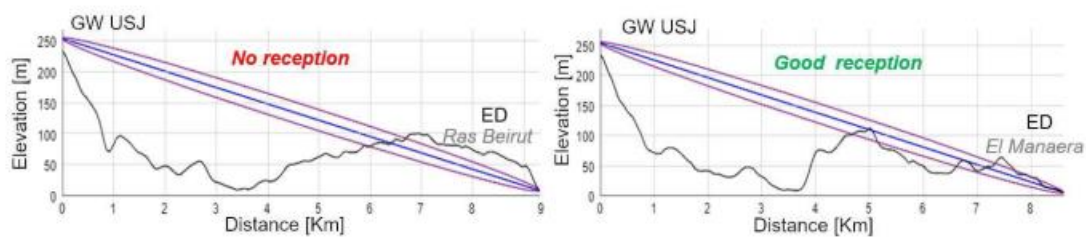


Figura 2.12 Exemplo do perfil de elevação entre a gateway e nó para duas zonas distintas de medição [25].

Usando a expressão (2.54), os parâmetros que melhor se adaptam a este ambiente de propagação foram  $n = 4,18$ ,  $PL_0 = 102,86$ ,  $L_h = -6,3$  dB e um desvio padrão de  $\sigma = 7,2$  dB.

Por fim, os ensaios em meio urbano, foram efetuados no Bekaa Valley ao qual foi parametrizada a zona até 20 km da gateway. À semelhança do ensaio anterior, era recolhida a potência de sinal para as três distâncias ao solo de 20 cm, 1,5 m e 3 m, em que os dados recolhidos foram comparados com os modelos em meio rural de Okumura-Hata e o 3GPP sem linha de vista para dois comprimentos médios das ruas de 20 m e 50 m, em que cada modelo foi aplicado para as três diferentes alturas ao solo que se encontra ilustrado na Figura 2.13, juntamente com o modelo proposto.

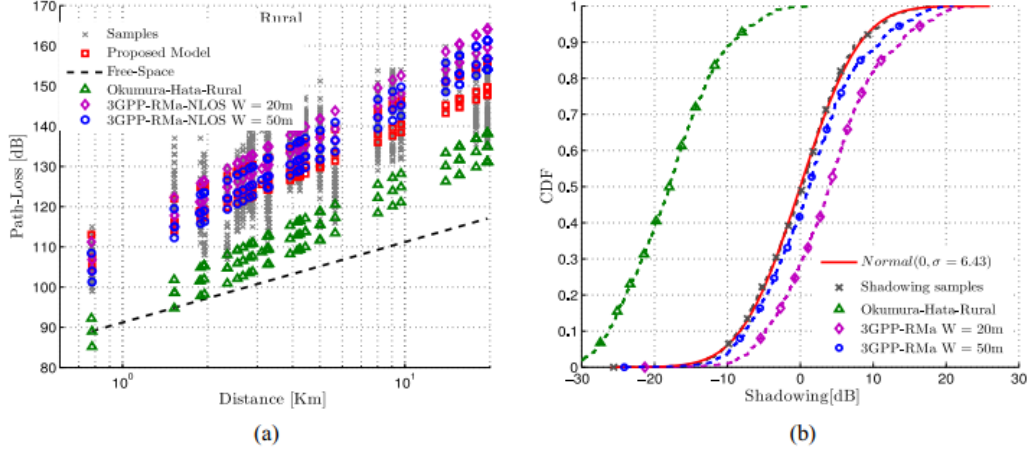


Figura 2.13 – (a) Comparação entre o modelo proposto e os modelos empíricos (b) Função de distribuição acumulada (CDF) do efeito de sombreamento (*shadowing*) para o modelo proposto e os modelos empíricos [25]

Os parâmetros obtidos para o modelo neste ambiente de propagação foram  $n = 3,033$ ,  $PL_0 = 111,75$ ,  $L_h = -6,65$  dB e um desvio padrão de  $\sigma = 6,43$  dB. Em comparação com os resultados dos modelos empíricos o modelo Okumura-Hata subestima a atenuação de sinal visto apresentar uma média do erro de estimação de -17 dB e desvio padrão de estimação de 6,9 dB.

Referente ao modelo 3GPP a aproximação foi melhor quando considerado o comprimento das ruas de 50 m, obtendo uma média do erro de estimação de 1 dB e um desvio padrão de estimação de 6,9 dB.

Novamente foi concluído que quanto menor for a altura ao solo pior é nível de sinal captado, mas um aspeto se realça que para a distância ao solo de 20 cm do nó LoRa, foi obtido um PDR de 24% para um SNR a -2,75 dB, ou seja, a um nível bem superior ao limiar de sensibilidade do equipamento.

Uma equipa da universidade de Pau [26], na França procedeu a medições para aferir o comportamento da atenuação do sinal no âmbito do sistema LoRa europeu, em comparação com o modelo “Log-Distance” e os modelos empíricos Hata, SUI e Ericsson nas vertentes de ambiente urbano com o local escolhido as redondezas da universidade, para posteriormente o modelo que apresentar maior aproximação ser adaptado aos dados obtidos.

A *gateway* encontrava-se colocada no topo da universidade a uma altura de 15,6 m do solo e o nó LoRa recolhia a sua posição através de um módulo GPS (*Global Positioning System*) e envia-a para a *gateway*, a uma cadência de 5 em 5 segundos, de forma a esta adquirir o RSSI e o SNR do pacote recebido. Os resultados obtidos encontram-se ilustrados na Figura 2.14 em conjunto com a aplicação do filtro “Moving Average” de forma a mitigar o fenómeno multipercurso, determinado por [27]

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x[n-i] \quad (2.55)$$



Esta expressão corresponde a uma média acumulativa, ou seja, para um dado ponto  $M$  são somados os valores anteriores e o resultante é dividido por  $M$ .

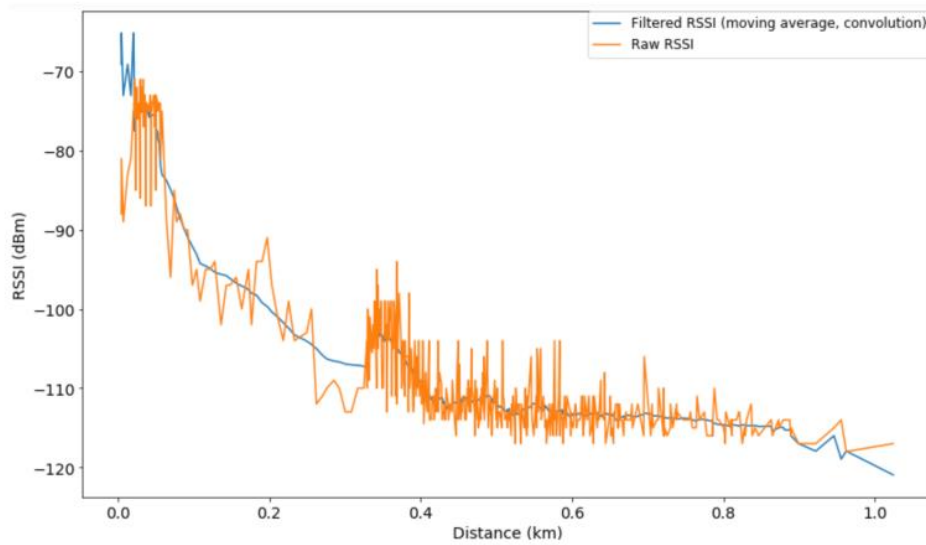


Figura 2.14 – RSSI adquirido no procedimento experimental com o seu respetivo gráfico filtrado [26].

Os dados adquiridos foram comparados com os modelos, tendo-se obtido maior aproximação para o modelo Hata com uma média do erro de estimação de 10,63 dB. O modelo Log-Distance (com um expoente de atenuação de 3,5 e um  $PL(d_0)$  igual ao espaço livre com  $d_0 = 1 \text{ km}$ ) teve a pior aproximação, obtendo-se uma média do erro de estimação de 44,88 dB. As representações gráficas das curvas dos modelos em comparação com a atenuação experimental encontram-se na Figura 2.15.

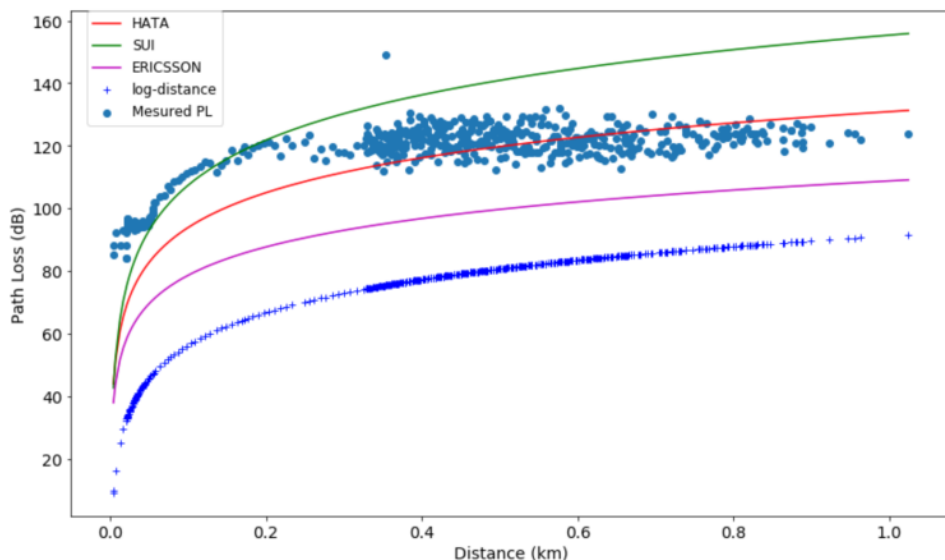


Figura 2.15 - Comparação dos modelos com a atenuação resultante na experiência em Pau [26].

Na Figura 2.15 é possível observar que, com o aumento da distância, as atenuações tendem a estagnar num limite máximo e que diminui número de pacotes

recolhidos a maiores distâncias, sugerindo que o equipamento esteja a atingir o limite da sensibilidade

Deste modo, foi escolhido o modelo Hata para adaptação, resultando no modelo apelidado de HataLoRa cuja aproximação foi obtida através do método mínimos quadrados,

$$L_{HataLoRa}(dB) = 122 + 16 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.56)$$

com a distância  $d$  em metros e a distância de referência  $d_0$  de 1 km.

## Capítulo 3 - Desenvolvimento

Neste capítulo serão abordadas as várias etapas necessárias para desenvolvimento de um sistema baseado no LoRa para aquisição dos sinais de uma estação meteorológica. Considerando a necessidade de realizar estudos de propagação, será descrito o sistema de medição usado em quatro ambientes de propagação para aferir a atenuação introduzida pelo meio. Por fim, será apresentada a implementação da estação meteorológica bem como o sistema de recolha de dados.

### 3.1 Verificação da potência de transmissão

De modo a aferir a potência de transmissão dos rádios LoRa, foi efetuado um procedimento em que um rádio transmitia um sinal a uma cadência de 1 segundo para um analisador de espectros ligado ao conector da antena. A Figura 3.1 apresenta o resultado. Foi utilizada uma resolução de largura de banda de 10 kHz e um *span* de 500 kHz.

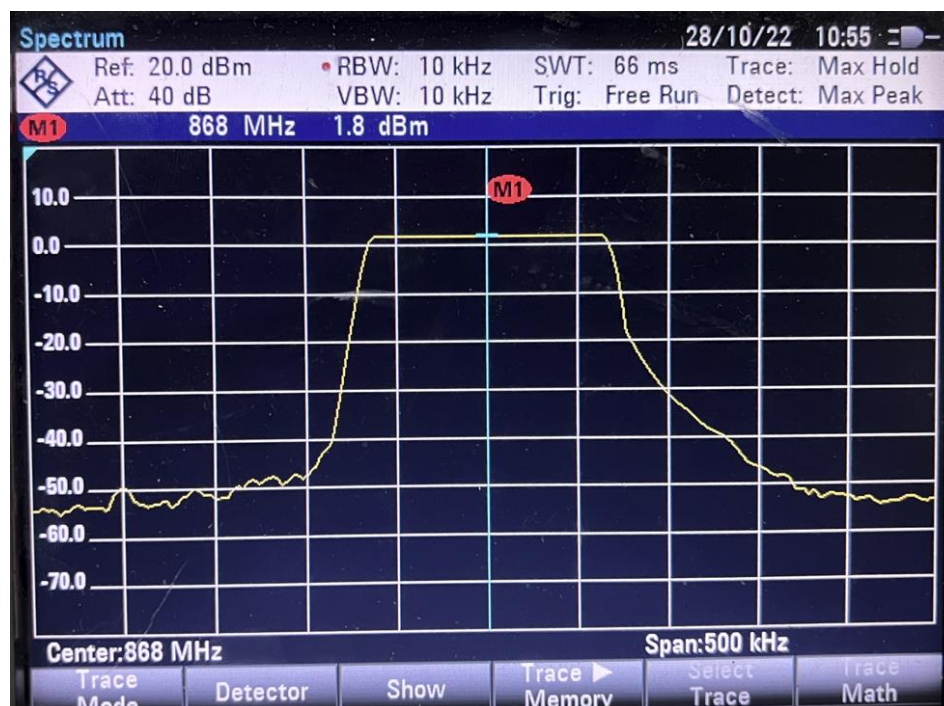


Figura 3.1 – Diagrama de potência para uma potência de transmissão de 2 dBm e SF em 12.

Analisando a Figura 3.1, o valor da potência de sinal para a frequência central é de cerca de 1,8 dBm e a largura de banda do sinal encontrada é de cerca de 125 kHz, para o modo de operação com o SF de 7, os quais estão em conformidade com os valores configurados para 2 dBm de potência de transmissão.

Este procedimento foi efetuado para diferentes valores de SF e valores de potência de sinal obtendo-se os resultados da Tabela 3.1.

### Capítulo 3 - Desenvolvimento

Tabela 3.1 – Comparação dos valores potência de transmissão e recepção no analisador de espectros para diferentes modos de operação.

	SF 7	SF 8	SF 9	SF 10	SF 11	SF 12
Potência de transmissão (dBm)	Potência recebido no analisador de espectros (dBm)					
0	1,3	1,6	1,8	1,8	1,8	1,7
2	1,3	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8
4	3,4	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8
6	5,5	5,9	6,0	6,0	6,0	5,9
8	7,4	8,0	8,0	8,0	8,1	8,0
10	9,7	10,1	10,2	10,2	10,2	10,1
14	13,7	14,1	14,1	14,1	14,1	14,0
16	15,4	15,7	15,8	15,8	15,8	15,7
18	16,7	17,0	17,1	17,1	17,1	17,0
20	17,7	18,0	18,1	18,1	18,1	18,0

Dada análise da Tabela 3.1 é possível concluir que a potência de transmissão mínima é de 2 dBm.

## 3.2 Medição dos ganhos das antenas

Nesta secção serão expostos os procedimentos usados para obter o ganho das antenas que foram usadas para os testes de propagação bem como para a implementação da estação meteorológica.

O método das 3 antenas consiste num sistema de equações com três incógnitas que corresponde aos três ganhos das antenas.

Para aplicar o método, foi usado um gerador de sinais ligado à antena emissora, através de um cabo coaxial de 5,5 m, e um analisador de espectros ligado à antena recetora através de um cabo de 10 metros. A frequência de operação foi de 868 MHz. As antenas foram colocadas no espaço exterior, a uma altura de 5 metros do solo de modo a minimizar as reflexões.

O primeiro passo foi confirmar se as atenuações dos cabos correspondiam aos 0,55 dB/m para um cabo coaxial RJ58 declarados pelo fabricante, tendo-se obtido uma conformidade aproximada, através dos valores de 2,9 dB de atenuação para o cabo de menor dimensão e 5,0 dB de atenuação para o cabo maior.

O passo seguinte foi parametrizar a zona de teste, sendo para isso utilizado o terraço da universidade, onde foram efetuadas medições até 14 metros espaçadas de metro a metro, de modo a efetuar três pares de testes. Para este estudo, foram selecionadas 3 antenas dimensionadas para operar na gama de frequência dos 868 MHz e terem um diagrama de radiação omnidirecional. Quanto à primeira antena, consistia num monopolo do fabricante ASTRON modelo V8600 [28], cujo fabricante declara como tendo um ganho de 2,15 dBi, a segunda antena é um monopolo de menores dimensões que a anterior, a qual é indicada pelo fabricante Seeed [29] como

tendo um ganho de 2,8 dBi. Por fim e, relativamente à última antena em estudo, foi utilizado um monopolo das mesmas dimensões que a anterior, mas o seu fabricante Pycom [30] não apresenta o seu ganho.

Mediante os testes realizados, foram obtidos os resultados presentes no gráfico da Figura 3.2 para os três diferentes ensaios, tendo em consideração que estes valores são referenciados ao valor recebido na antena de receção, ou seja, foi removido a contribuição da atenuação do cabo na receção.

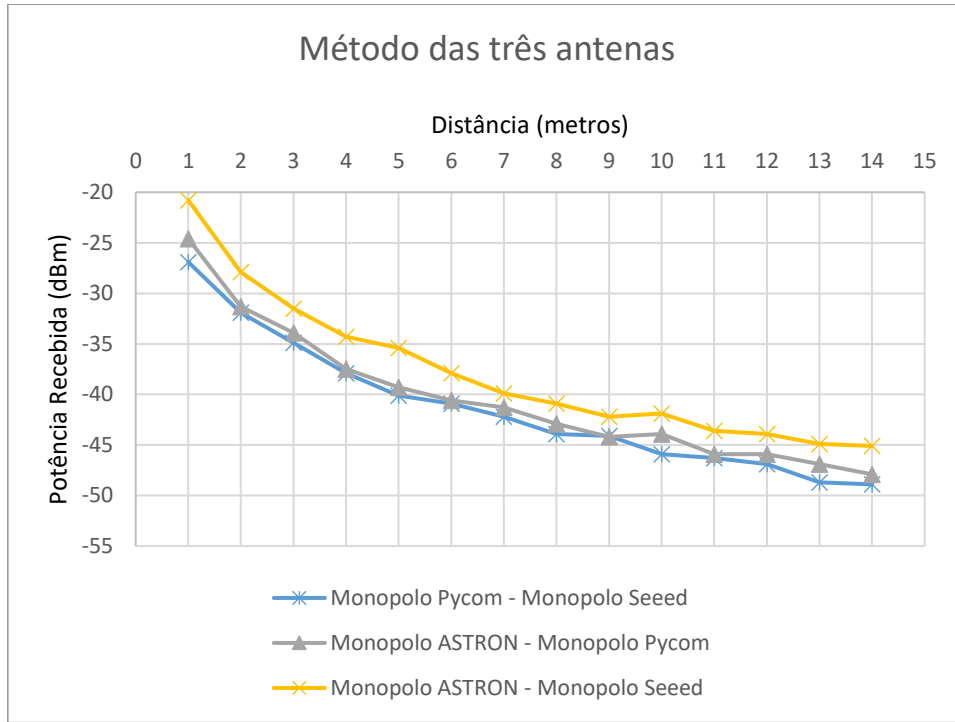


Figura 3.2 – Resultado das medições do método das três antenas.

De modo a determinar os ganhos das antenas e, tendo em consideração que as antenas se encontravam em condição de espaço livre, foi possível descrever o sistema de equações:

$$\begin{cases} Pr_{ab} = P_t - A_{cabotr} + G_a + G_b + 20 \log_{10} \frac{c}{f4\pi d} \\ Pr_{ac} = P_t - A_{cabotr} + G_a + G_c + 20 \log_{10} \frac{c}{f4\pi d} \\ Pr_{bc} = P_t - A_{cabotr} + G_b + G_c + 20 \log_{10} \frac{c}{f4\pi d} \end{cases} \quad (3.1)$$

de modo a determinar o ganho de cada antena.

Através da equação (3.1) foi possível determinar o ganho de cada antena para cada ponto de medição, obtendo para cada distância ganhos diferentes devido ao erro. Deste modo, foi aplicada a média aos resultados obtidos para as diferentes distâncias. Os resultados obtidos para os diferentes ganhos estão ilustrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Ganhos das antenas obtidos pelo método das três antenas.

Antena	Ganho da Antena
Monopolo ASTRON V8600	1,3 dB
Monopolo Seeed	0,5 dB
Monopolo Pycom	-2,0 dB

Com estes resultados foi ponderado que as antenas que dispunham de um ganho maior são os monopolos ASTRON V8600 e o da marca Seeed. Foram utilizadas estas antenas no projeto. Para confirmar os ganhos, fez-se uma nova medição, tendo-se obtido um desvio médio entre ambos os resultados de 0,12 dB, que confirma os ganhos determinados.

### 3.3 Calibração do RSSI

Para efeitos de verificação do sistema de medição do RSSI do LoRa, foram realizadas medições em espaço livre. Para este ensaio foi usado o terraço da universidade da Madeira como ambiente de teste, juntamente com a utilização de suportes que colocavam os rádios LoRa uma altura aproximada de 5 metros do solo. No sistema emissor foi usado o monopolo Astron V8600 e no sistema recetor a antena monopolo Seeed, interligados diretamente aos rádios utilizando conectores apropriados. A montagem do sistema de teste encontra-se representada na Figura 3.3.

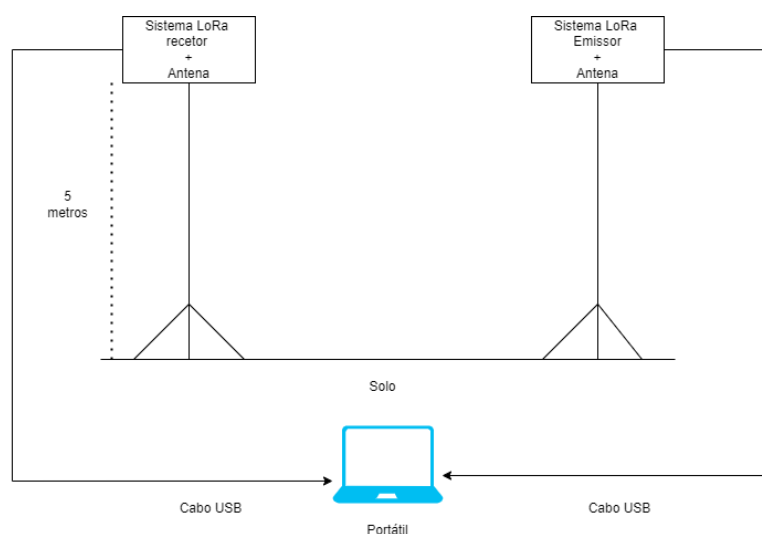


Figura 3.3 – Sistema para testes em espaço livre.

No que diz respeito à comunicação LoRa, era enviado um pacote a cada 4 segundos e em cada ponto de medição era efetuada a média dos valores de RSSI recebidos durante um intervalo de tempo de 5 minutos. As distâncias entre as antenas foram incrementadas de metro a metro até atingir os 9 metros.

O primeiro ensaio foi efetuado com a configuração de potência de transmissão de 10 dBm e um SF de 7 em que as médias de RSSI obtidas eram

comparadas com os resultados da fórmula de Friis (2.15). O gráfico com os resultados obtidos encontra-se na Figura 3.4.

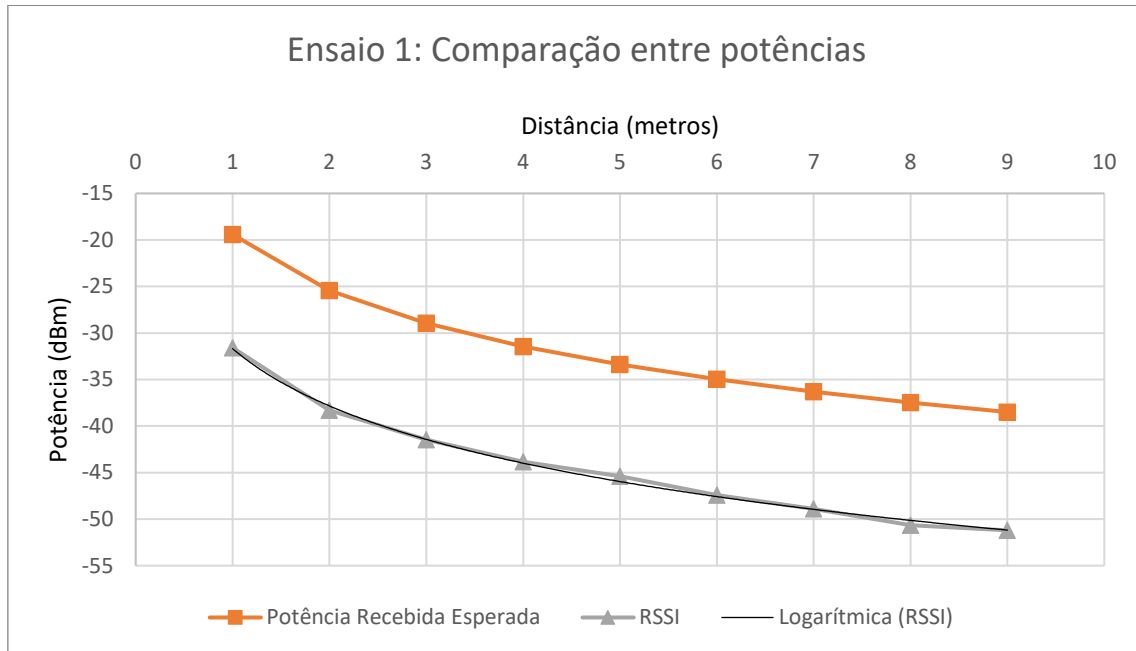


Figura 3.4 – Comparação entre a potência esperada e a média do RSSI para cada distância de teste no modo de SF 7.

Ao analisar os resultados obtidos devido às curvas não se sobreporem é aparente descalibração, ou seja, os valores teóricos são superiores aos experimentais, com uma diferença de pelo menos 10 dB. Aplicando o modelo Log-Distance (2.24) aos resultados obtidos foi determinado um valor de  $n$  de 2,04 muito próximo da curva teórica de valor 2.

No ensaio seguinte foi apenas alterado do modo de operação para o SF de 12, mantendo as restantes condições de teste, obtendo-se os resultados da Figura 3.5.

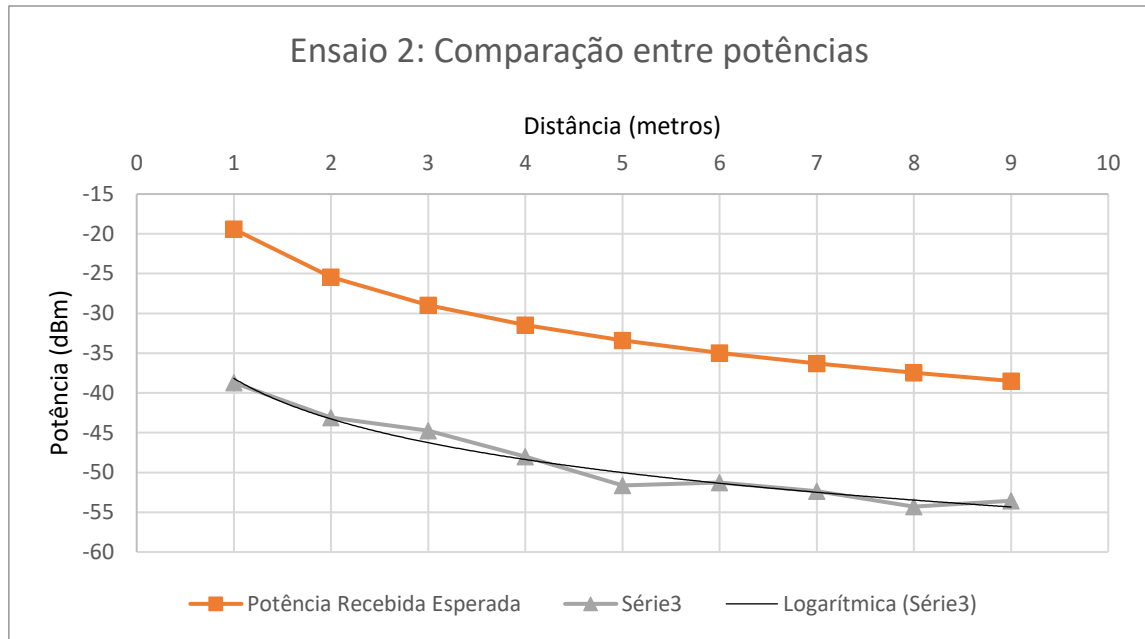


Figura 3.5 – Comparação entre a potência esperada e a média do RSSI para cada distância de teste no modo de SF 12.

As conclusões obtidas foram semelhantes ao ensaio anterior apesar do expoente de atenuação da curva experimental ser de 1,69, a descalibração ser mais severa com diferenças superiores a 15 dB.

De modo a efetuar a calibração do RSSI dos rádios LoRa, foram realizadas medições na câmara anecoica em que o sistema recetor e emissor LoRa eram comparados com um sinal gerado pelo gerador de sinais e captado pelo analisador de espectro, de modo a determinar a comparação entre os dois resultados. Tendo em consideração que os rádios LoRa operam com valores de SNR negativos, foi utilizada a expressão (2.13) de modo a obter o valor do ESP. Foram utilizados atenuadores para reduzir a potência de transmissão até serem obtidos valores recebidos próximos da sensibilidade do recetor. O diagrama do sistema usado encontra-se ilustrado na Figura 3.6.

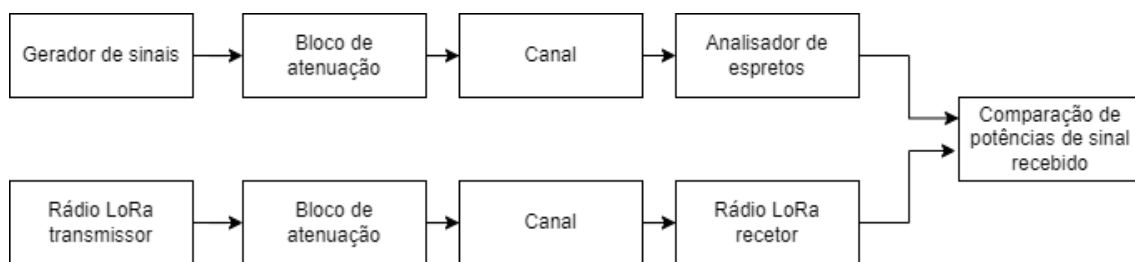


Figura 3.6 – Sistema usado para comparação direta entre as potências de sinal obtidas.

Foi possível chegar à conclusão de que efetivamente existe um desvio entre os valores extraídos do rádio com o sistema de referência, que também variava com o modo de SF de operação. Mediante os testes realizados o valor de ESP calibrado pode ser obtido por uma aproximação de uma reta ao valor de ESP medido dado pela expressão



$$ESP_{Calibrado} = A * ESP_{medido} + B \quad (3.2)$$

as constantes  $A$  e  $B$  encontram-se na Tabela 3.3, para os diferentes valores de SF.

Tabela 3.3 – Constantes de calibração.

SF	A	B
7	1,042	14,4
8	1,053	16,0
9	1,065	17,8
10	1,078	19,9
11	1,094	22,1
12	1,111	24,4

### 3.4 Sistema de medição

De modo a ser possível efetuar os ensaios de propagação, foi necessário implementar um sistema de medição capaz de transmitir pacotes de um ponto para outro, de modo a aferir parâmetros de qualidade da comunicação.

Para este efeito, o sistema teria de ser capaz de cumprir os seguintes objetivos:

- Tanto o transmissor como o recetor terão de ter autonomia para a duração de todo o ensaio de propagação;
- Ser possível configurar ambos os lados da comunicação à distância;
- Aferir os parâmetros de qualidade da comunicação.

#### 3.4.1 Componentes do sistema

O sistema é constituído por vários componentes, que serão descritos a seguir.

##### 3.4.1.1 LoRa

O rádio LoRa, tem as funções de modulação, desmodulação, transmissão e receção da trama LoRa em que o chip usado é o RFW95W [5], que permite a comunicação com um microcontrolador através de uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*), o qual se destaca por ser uma comunicação *Full Duplex*, síncrona e do género Mestre-Escravo. Para a interligação de componentes a operar neste padrão de comunicação é necessário o sinal de relógio “CLK”, o seletor de escravo também apelidado de *Chip Select* “CS” e duas linhas dedicadas para a comunicação Mestre para o Escravo “MOSI” e Escravo para o Mestre “MISO”.

De modo a facilitar as interligações entre os componentes foram usadas as placas da Figura 3.7 que incorporam o Chip RFW95W, como a Shield da Dragino SX127x [31], desenhada para ser facilmente acoplado ao Arduino, e o RFW95W Radio da Adafruit [32]. Em ambos os componentes estão embutidos reguladores para 3,3 V, que é a tensão de operação do RFW95W, juntamente com “Logic Level

Shifters” para operação na mesma tensão na sua comunicação e conetores para colocação de antenas externas.

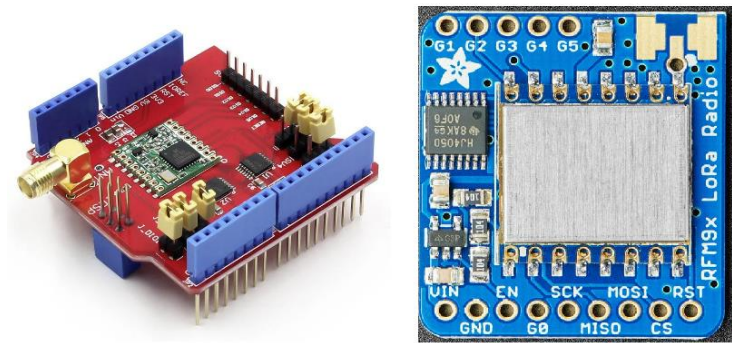


Figura 3.7 – Módulos LoRa (Esquerda) Dragino SX127x [31] e (Direita) Adafruit RFM95W Radio [32].

### 3.4.1.2 Módulo GPS

O módulo escolhido para determinar as coordenadas GPS foi o da Adafruit Ultimate GPS Breakout PA1616S [33] ilustrado na Figura 3.8, o qual permite uma fácil interligação a um microcontrolador através da comunicação série, a qual apenas necessita de duas ligações, uma para a ligação ascendente e outra para a ligação descendente entre o módulo e o microcontrolador.

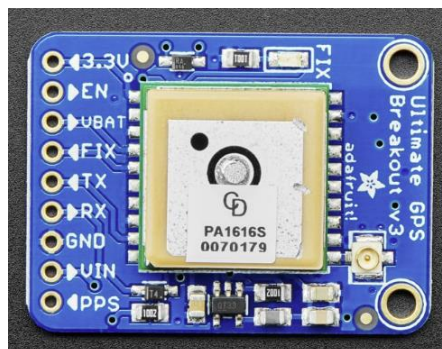


Figura 3.8 – Módulo GPS da adafruit Ultimate GPS Breakout PA1616S [33].

### 3.4.1.3 Arduíno UNO

O Arduíno UNO, na Figura 3.9 é um microcontrolador baseado no processador Atmega328P [34]. Contém 14 pinos digitais, os quais podem ser usados como saídas ou entradas (6 destes pinos podem ser usados para funções de PWM “Pulse Width Modulation”), 6 entradas analógicas, um cristal de 16 MHz e uma memória Flash de 32 kB onde podem ser gravados os programas desenvolvidos pelo utilizador, através da porta USB-B.

Este microcontrolador permite a utilização de vários protocolos de comunicação, com os diferentes módulos como comunicação série UART (*Universal asynchronous receiver-transmitter*), SPI (*Serial Peripheral Interface*), I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*) e TWI (*Two-Wire Interface*).



Figura 3.9 – Arduíno UNO R3 [34]

#### 3.4.1.4 Raspberry Pi 3

O Raspberry Pi 3 [35] da Figura 3.10 é uma placa capaz de se comportar como um computador, constituído por um processador de quatro núcleos Broadcom BCM2837 de 64 bits a 1,2 GHz, com uma memória RAM de 1 GB e memória ROM, com entrada para cartão Micro SD com a finalidade de carregar o sistema operativo e guardar dados, com conectividade sem fios através de Wi-Fi e Bluetooth proporcionada pelo chip BCM43438, com 40 pinos GPIO, 4 portas USB (*Universal Serial Bus*), saída de áudio e saída de vídeo através da porta HDMI. O sistema pode ser alimentado por uma fonte de 5 V até 2,5 A pela porta micro USB.



Figura 3.10 – Raspberry Pi 3 [35].

### 3.4.2 Sistema

O sistema implementado para cumprir os requisitos necessários, encontra-se ilustrado no esquema da Figura 3.11.

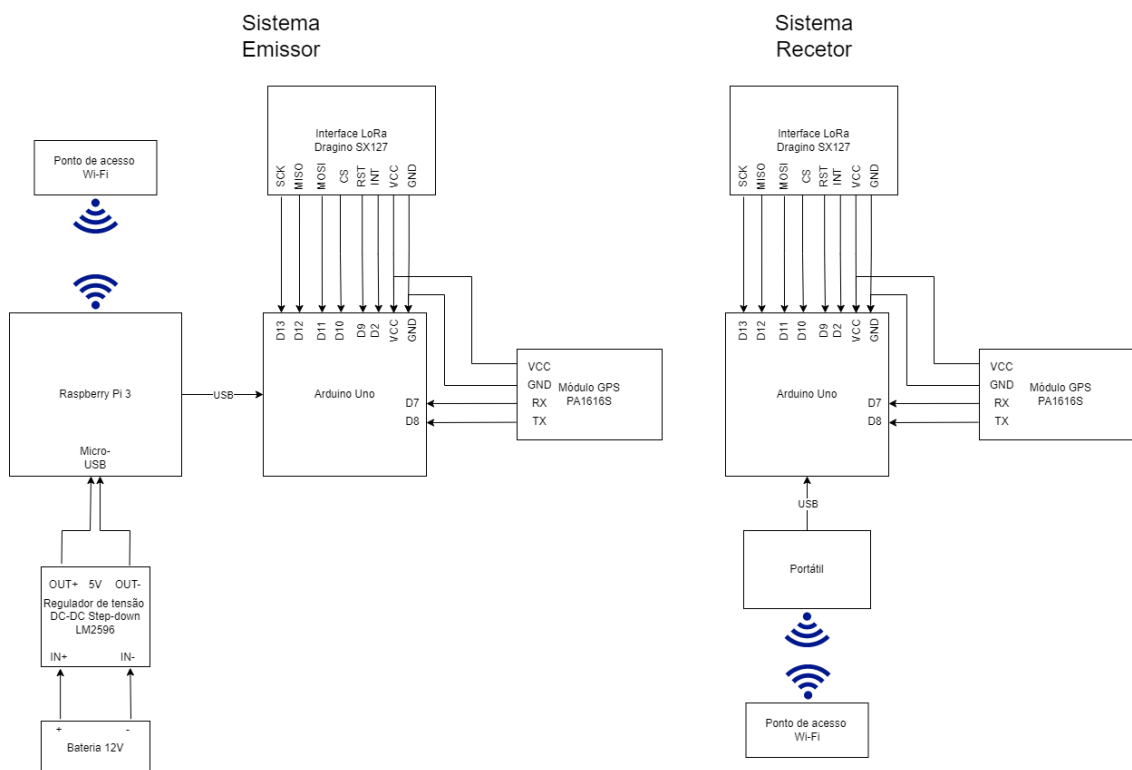


Figura 3.11 – Esquema elétrico do sistema transmissor e recetor para ensaios de propagação.

O sistema emissor é composto por um Raspberry Pi 3 com a função de programar o Arduino UNO, através de controlo remoto proporcionado pelo ponto de acesso Wi-Fi. O Arduino UNO encontrava-se conectado ao módulo GPS e à interface LoRa. Para a alimentação do sistema emissor foi utilizada uma bateria de chumbo de 12V com a capacidade 7,2 Ah em que a sua tensão era regulada para 5V através de um conversor *step-down* para alimentar o sistema.

O sistema recetor responsável pela aquisição dos dados também é composto por um Arduino UNO ligado à interface LoRa e um módulo GPS. A alimentação, a programação do Arduino UNO e o registo dos valores adquiridos pela porta COM (*Communication port*), ficaram à responsabilidade do portátil no recetor. O portátil também tinha a função de aceder ao Raspberry Pi 3 através de controlo remoto, visto estar ligado por um ponto de acesso Wi-Fi.

A utilização de dois módulos GPS deve-se à necessidade de ter uma noção da distância e diferença de altura que os dois sistemas se encontravam aproximadamente.

Os pontos de acesso Wi-Fi foram a solução encontrada para contornar o problema que os módulos LoRa não permitem a alteração dos seus parâmetros ao longo da execução do código. Deste modo, têm de ser programados novamente para admitir os novos parâmetros da comunicação. Assim, o portátil no sistema recetor tem a possibilidade de programar os dois sistemas para operar com os mesmos parâmetros de comunicação.

Na Figura 3.12 encontra-se o fluxograma dos códigos que foram utilizados no sistema emissor e recetor (os seus respetivos códigos encontram-se no anexo A), em

que foi tido em consideração na sua implementação, por exemplo o sistema GPS poder ser desativado caso não seja possível captar sinal GPS, juntamente com o envio da tensão da bateria e a particularidade de ser possível a troca do emissor com o recetor, caso seja necessário o estudo da bidirecionalidade.

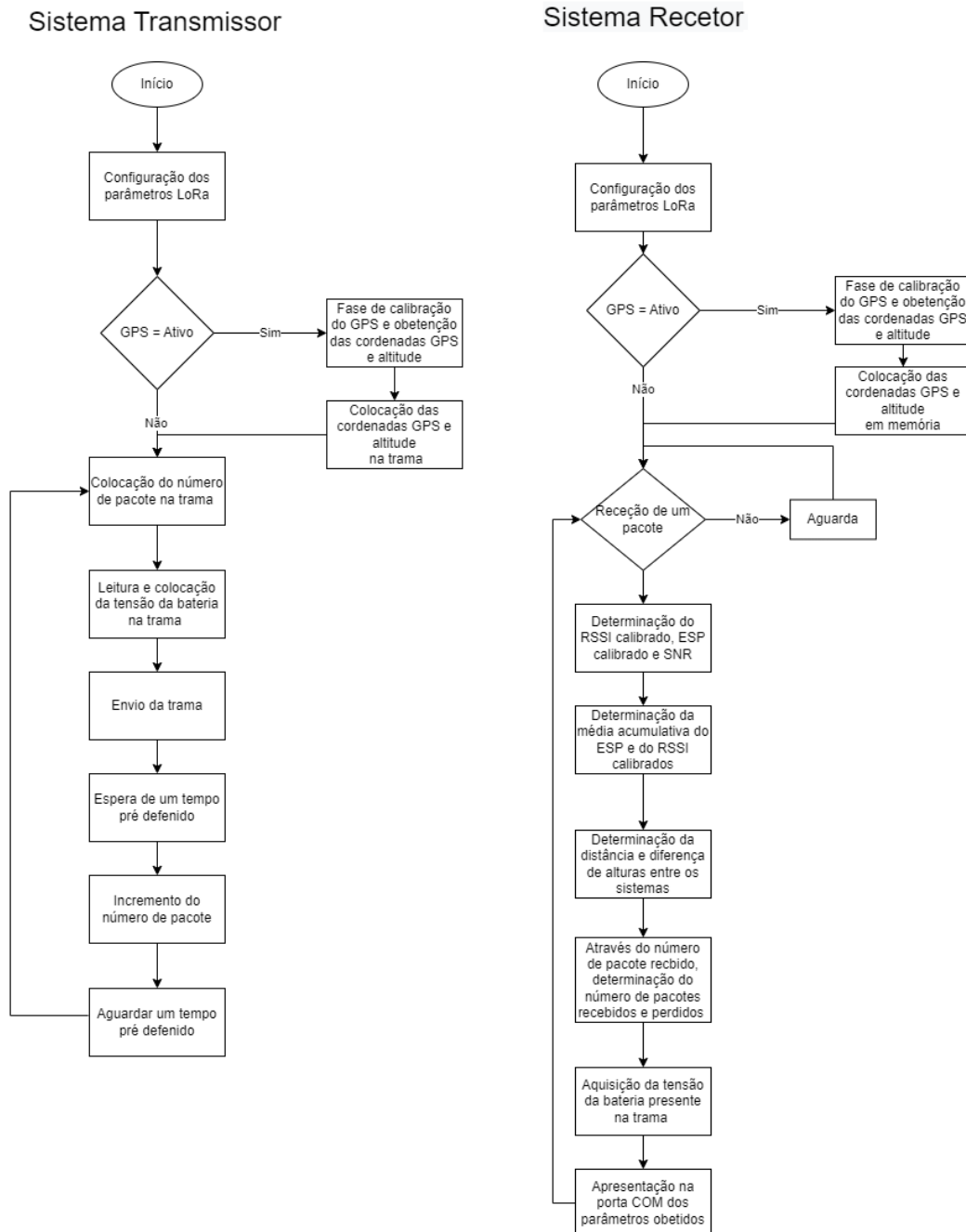


Figura 3.12 – Fluxograma dos sistemas emissor e recetor.

A trama é composta por 14 bytes, com os primeiros 2 bytes usados para transmitir o número do pacote, para a latitude e longitude foram usados 4 bytes cada, 2 bytes para a altitude e 2 bytes para a tensão da bateria.

O recetor, a cada pacote recebido, envia para a porta COM uma sequência de valores para posteriormente ser usado num programa desenvolvido em linguagem Python. Esta linha é composta pelo RSSI não calibrado e calibrado, o SNR adquirido,

o número do pacote recebido, contador de pacotes perdidos, contador de pacotes recebidos, contador de pacotes perdidos desde a última receção, média acumulativa do RSSI calibrado, o ESP calibrado, a média acumulativa do ESP calibrado, latitude do transmissor, longitude do transmissor, latitude do recetor e longitude do recetor, distância entre o recetor e o emissor e a diferença de altura entre os mesmos.

O programa Python tem três funções principais, a representação gráfica (consta no anexo B) em tempo real de alguns valores de interesse, guardar os valores num ficheiro para posterior análise e temporizar o tempo de execução do programa. Este último serve para averiguar a taxa de sucesso de entrega de pacotes, de modo a que o programa ao ser executado durante um período de tempo específico permita receber um número específico de pacotes, ou seja, caso o utilizador delimite que o ensaio é a recolha de 100 pacotes é determinado o tempo que os 100 pacotes demoraram a chegar ao recetor através da expressão de “Tempo no ar” (2.7) juntamente com os intervalos entre envios e ao fim desse tempo é terminada a contagem. O programa criado segue o fluxograma que se encontra na Figura 3.13 e o código do programa encontra-se no anexo C.

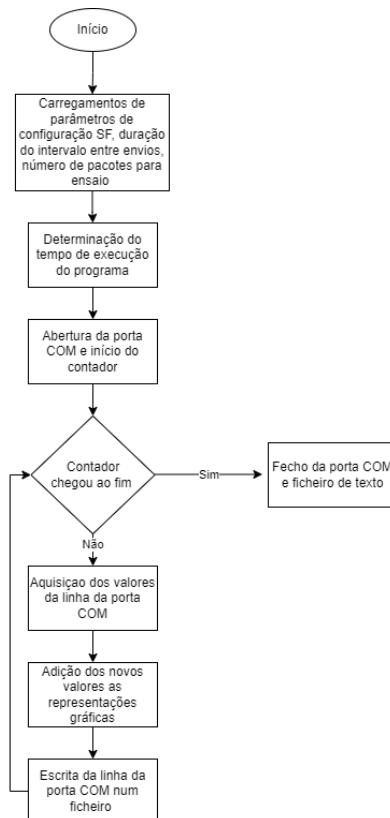


Figura 3.13 - Fluxograma do programa de aquisição, controlo e representação gráfica.

A autonomia do sistema de medição emissor foi de 36 horas, visto que o seu consumo médio ser de 200 mA, para uma bateria de 7,2 Ah. Do lado do recetor a limitação de autonomia ficou limitada pelo do portátil, de aproximadamente 15 horas de autonomia.



### 3.5 Ensaios de propagação

Nesta secção serão abordados os ensaios de propagação elaborados para diferentes cenários de propagação, os quais são obstáculo por colina, cenário de linha de vista, propagação na vegetação e ensaios na serra.

#### 3.5.1 Obstáculo por colina

Para o primeiro ensaio foi usado uma colina para avaliar o modelo do obstáculo em ponta de faca. O local escolhido foi o “Pico da Torre”, situada em Câmara de lobos, cuja imagem encontra-se na Figura 3.14 com o seu respetivo perfil de elevação do terreno.

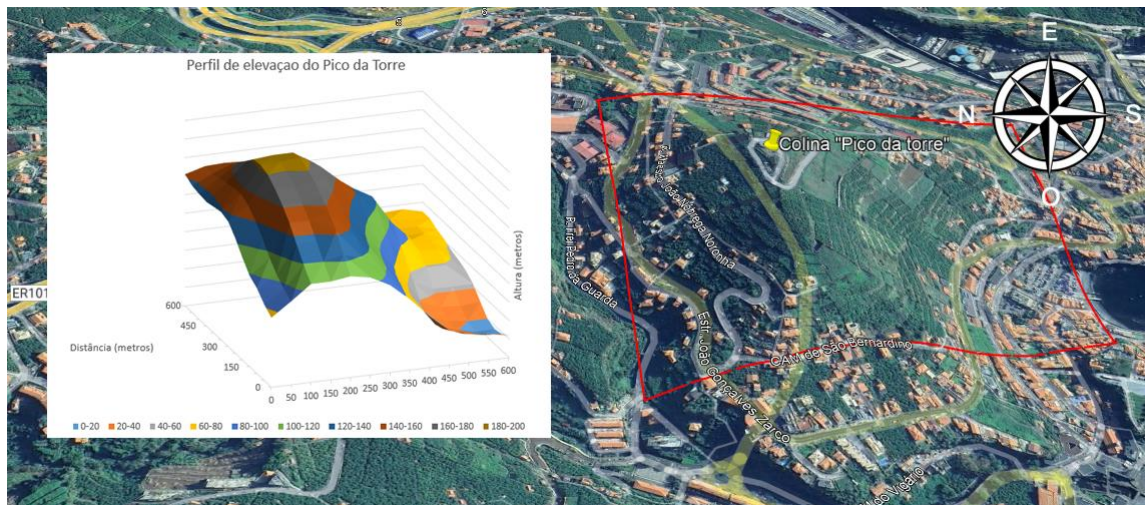


Figura 3.14 - Perfil de elevação da colina do “Pico da Torre” e sua respetiva zona no mapa.

Esta colina apresenta várias características para os ensaios de propagação:

- O formato regular da colina apresentando apenas um único cume, com uma cota de 180 metros;
- Várias vias de acesso (ruas, estradas e veredas) a nordeste, norte e noroeste do cume da montanha, o que facilita a parametrização das zonas de medição;
- Declive bastante acentuado a sudoeste do cume da colina.

O emissor foi colocado a sudoeste do cume da colina, na zona do “Ilhéu” de Câmara de lobos e para o recetor foram escolhidos 9 pontos a nordeste do emissor, dos quais 8 (Pontos 2 a 9) o sinal captado teria de provir por difração devido a obstrução da colina e um ponto de verificação do sistema (Ponto 1) em que o emissor se encontrava no cume da colina em linha de vista com o emissor. Os pontos selecionados encontram-se representados no mapa da Figura 3.15 de ordem crescente de distância ao emissor.

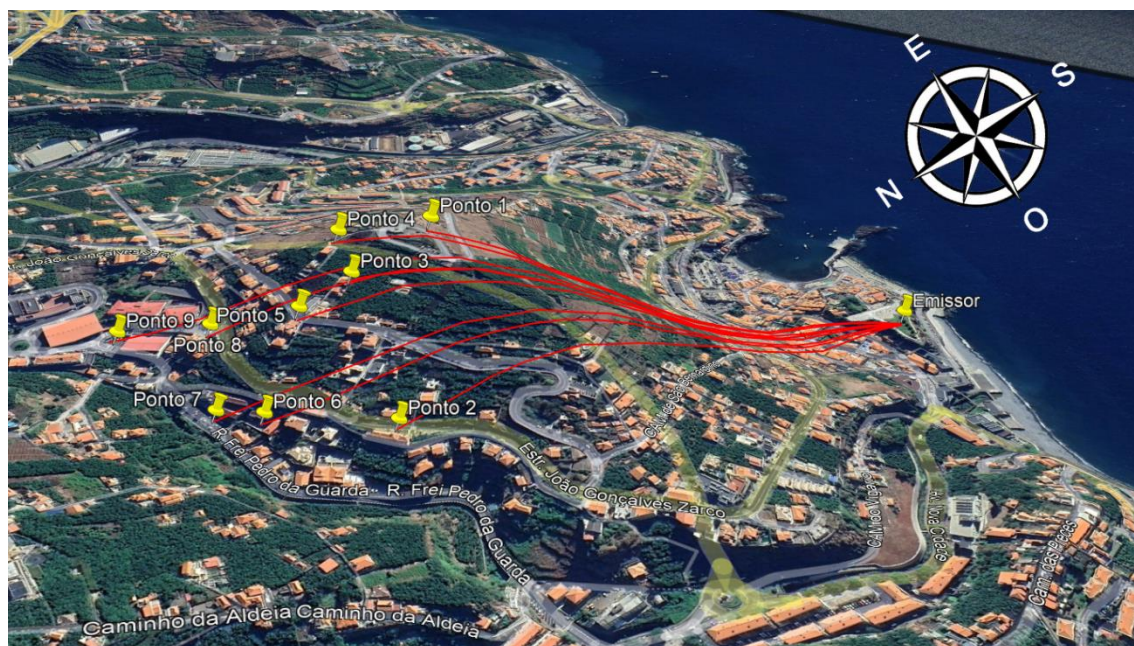


Figura 3.15 - Zona parametrizada para os ensaios de propagação para obstáculo por colina.

Para a parametrização foi necessário recorrer ao software “Google Earth Pro” para recolher os níveis de elevação do perfil do terreno para cada linha entre o ponto de medição e o emissor, adquirindo-se a altura do emissor  $h_t$ , altura do recetor  $h_r$ , altura do obstáculo  $h_p$  e as respetivas distâncias do emissor ao obstáculo  $D_1$ , do obstáculo ao recetor  $D_2$  e do emissor ao ponto  $D$ . Estas distâncias e alturas encontram-se determinadas na Tabela 3.4

Tabela 3.4 - Distâncias e alturas em metros para os respetivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio para obstáculo por colina.

	$h_t$	$h_r$	$h_p$	$D_1$	$D_2$	$D$
Ponto 1	28	182	-	-	-	607
Ponto 2	28	117	144	525	158	683
Ponto 3	28	174	180	630	54	684
Ponto 4	28	184	185	600	95	695
Ponto 5	28	158	178	622	113	735
Ponto 6	28	122	157	570	211	781
Ponto 7	28	119	162	570	245	815
Ponto 8	28	135	182	637	185	822
Ponto 9	28	126	184	644	265	909

Mas os valores apresentados não podem ser diretamente aplicados ao modelo de ponta de faca, visto não estarem referenciadas ao raio direto entre as antenas. Deste modo, foi necessário determinar os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ , as distâncias  $D'_1$  e  $D'_2$  juntamente a altura equivalente do obstáculo  $H$ . A geometria do problema está representada na Figura 3.16.



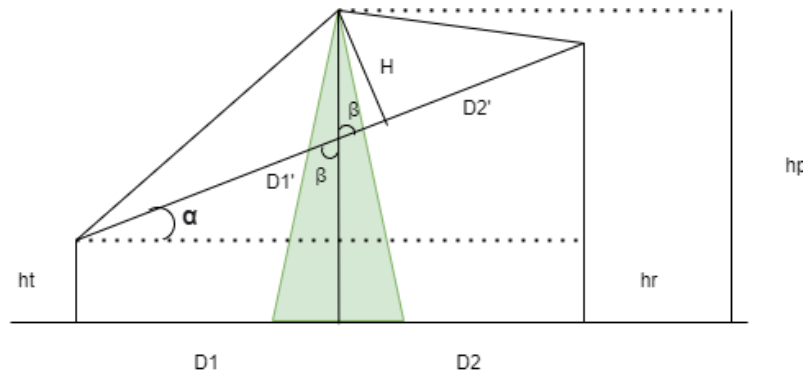


Figura 3.16 - Geometria do obstáculo em ponta de faca.

O ângulo  $\alpha$  pode ser determinado por

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{h_r - h_t}{D_1 + D_2} \right) \quad (3.3)$$

O ângulo  $\beta$  determinado pelo somatório dos ângulos internos de um triângulo. No que diz respeito às distâncias  $D_1'$  e  $D_2'$ , estas são determinados por

$$D_1' = \frac{D_1}{\cos(\alpha)} + \{(h_p - h_t) - [D_1 \tan(\alpha)]\} \cos(\beta) \quad (3.4)$$

$$D_2' = \frac{(h_r - h_t)}{\sin(\alpha)} - D_1' \quad (3.5)$$

A altura equivalente do obstáculo é dada por

$$H = \{(h_t - h_p) - [D_1 \tan(\alpha)]\} \sin(\beta) \quad (3.6)$$

Para os diferentes pontos foi possível determinar o parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff através de (2.21) obtendo-se os resultados da Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff para os diferentes pontos de medição considerados.

	Parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff
Ponto 1	-
Ponto 2	10,40
Ponto 3	5,97
Ponto 4	5,84
Ponto 5	9,86
Ponto 6	11,71
Ponto 7	12,93
Ponto 8	14,36
Ponto 9	15,23

Neste ensaio foram usados os parâmetros do sistema de medição presentes na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Parâmetros do sistema de medição para os ensaios de obstáculo por colina.

Frequência	868 MHz
Largura de banda	125 kHz
CR	4/5
Potência de transmissão	4 dBm
Ganho da antena emissora	1,3 dBi
Atenuação do cabo no transmissor	0,6 dB
Ganho da antena recetora	0,5 dB
Atenuação do cabo no recetor	0,8 dB

Em cada ponto de medição era dado ao sistema o tempo necessário para receber 100 pacotes provenientes do emissor, que se encontrava continuamente a transmitir de modo a aferir o PDR. Para cada ponto de medição foi alterado o fator de espalhamento para três modos diferentes: SF7, SF9 e SF12. As antenas foram colocadas em hastes metálicas para que ficassem a 3 metros do solo.

Um procedimento tido em consideração durante o decorrer do ensaio foi a oscilação propositada da antena recetora (de aproximadamente 5° sobre o seu eixo vertical) de modo a obter a flutuação do sinal captado.

#### 3.5.2 Cenário de linha de vista

O ensaio em linha de vista tinha como objetivo verificar o comportamento da atenuação do sinal em que a propagação se encontrava em condições de linha de vista. Foram ponderados vários miradouros que servissem de ponto de partida para este ensaio, tendo como critérios a sua visibilidade a longas distâncias e não se encontrassem obstruções nas imediações do miradouro como edifícios altos, que contribuíssem com um obstáculo predominante ao primeiro episódio de Fresnel.

Deste modo, o miradouro escolhido foi o miradouro do “Pico de Barcelos”, situado no Funchal devido a vários fatores:

- Situado a um ponto alto de aproximadamente no formato de uma colina de 350 metros de altura em relação ao nível do mar e livre de obstáculos nas suas imediações.
- Visibilidade até 6 km a Este do miradouro.
- Visibilidade da orla do Funchal que se encontra a nordeste do miradouro.

Com estes fatores, foram ponderados 6 pontos de medição cada vez mais distanciados do emissor, cujas suas localizações se encontram representadas no mapa da Figura 3.17.



Figura 3.17 - Zona parametrizada para os ensaios de propagação para o ensaio em linha de vista.

A verificação da desobstrução do primeiro elipsoide de Fresnel foi feita através de dois métodos. O primeiro método consistiu na utilização de uma ferramenta de planeamento celular “CloudRF” através da indicação da zona onde se encontra o emissor, frequência de operação e altura das antenas emissora e recetora. Através da orografia do terreno consegue parametrizar as zonas em que a condição de linha de vista é verificada. Configurando as alturas das antenas a 3 metros e a frequência dos 868 MHz, obtém-se na Figura 3.18 a verde a condição do elipsoide Fresnel estar pelo menos 60% desobstruído, em que devido à utilização gratuita do *software* restringe o raio de estudo até 5 km do emissor. Apesar desta limitação, foi possível verificar os pontos 1, 2 e 3.

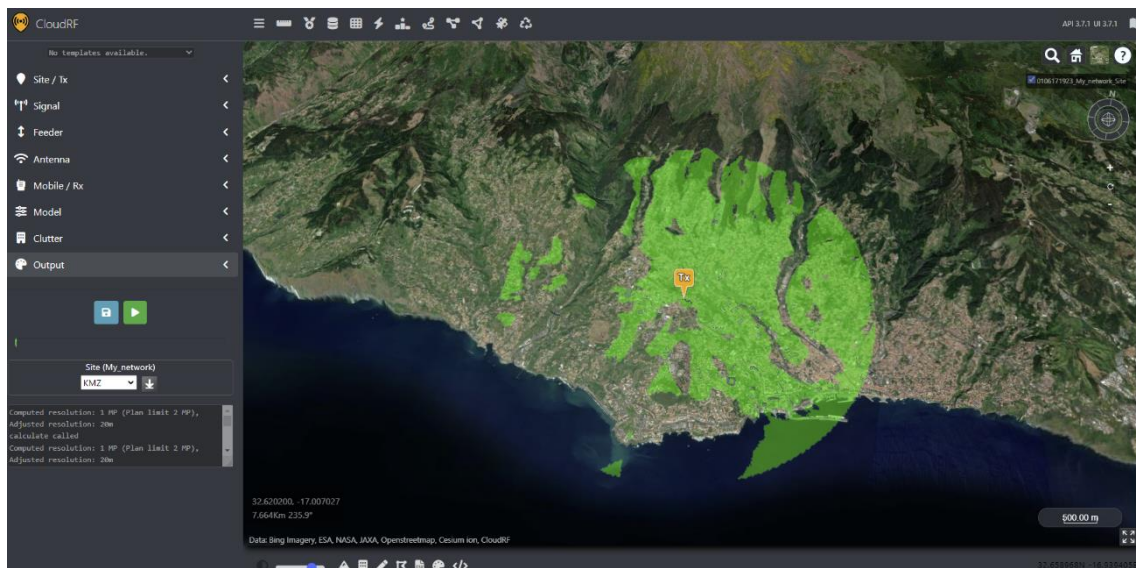


Figura 3.18 - Captura de tela do software CloudRF para simulação do ensaio em linha de vista

Juntamente com esta funcionalidade é possível extrair ficheiros .kmz que podem ser abertos no *software* Google Maps Pro de modo a verificar a elipsoide criada pela ligação ponto a ponto os quais se encontram representados para as 6



ligações previstas na Figura 3.19. Através da visualização a três dimensões foi possível comprovar que efetivamente há ausência de obstruções, devido à orografia do terreno em todos os pontos de medição.

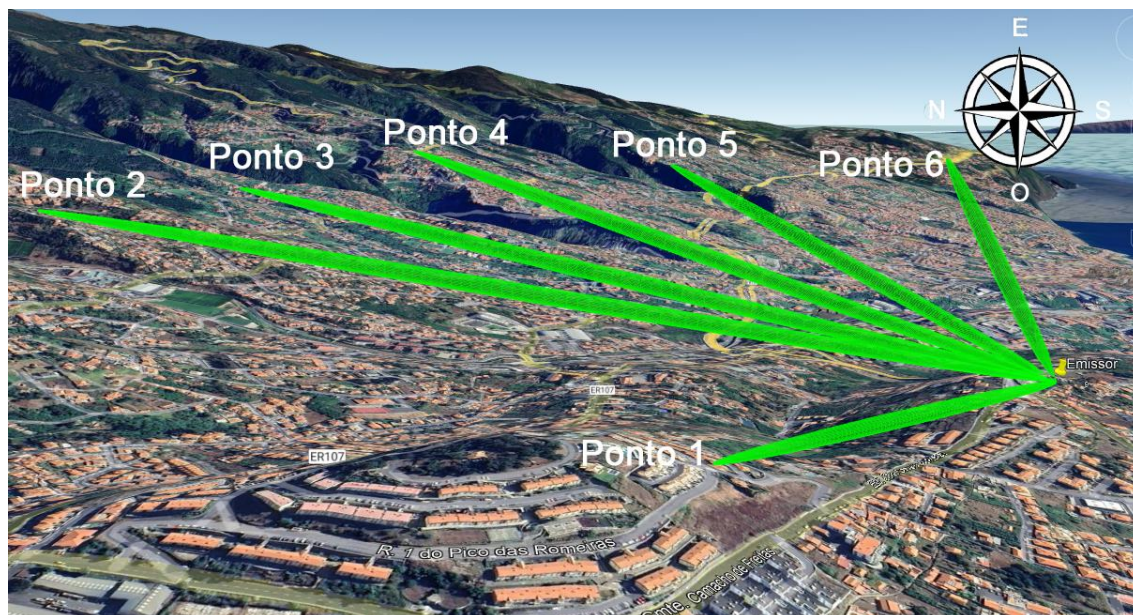


Figura 3.19 – Visualização tridimensional dos elipsoides de Fresnel criados para as 6 ligações ponto a ponto.

O outro método de verificação da desobstrução foi através da determinação do raio da elipsoide de Fresnel no ponto central. Para tal efeito foi necessário obter várias distâncias e alturas através do perfil de elevação das ligações ponto a ponto os quais são a altura do emissor,  $h_t$ , as alturas dos pontos de medição,  $h_r$ , e a distância entre o emissor e o recetor,  $D$ , em que estes valores são referentes ao nível do mar, ao qual é necessário determinar a distância do raio direto  $D'$  para posteriormente determinar o raio  $r$  através de (2.14). Os dados obtidos encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Alturas, distâncias e raios em metros para os respetivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio em linha de vista

	$h_t$	$h_r$	$D$	$D'$	$r$
Ponto 1	340	399	677	680	15
Ponto 2	340	447	1890	1893	26
Ponto 3	340	404	2460	2461	29
Ponto 4	340	494	3230	3234	33
Ponto 5	340	371	4470	4470	39
Ponto 6	340	345	6330	6330	47

O raio máximo da elipsoide foi verificado nos perfis de elevação para cada ligação ponto a ponto. Os parâmetros do sistema usado neste ensaio encontram-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Parâmetros do sistema de medição para os ensaios em linha de vista

Frequência	868 MHz
Largura de banda	125 kHz
CR	4/5
Potência de transmissão	7 dBm
Ganho da antena emissora	1,3 dBi
Atenuação adicionais no transmissor	5,09 dB
Ganho da antena recetora	0,5 dB
Atenuação do cabo no recetor	0,8 dB
<i>Spreading Factor</i>	12

O procedimento do ensaio de propagação consistiu no emissor, que se encontrava no “Pico dos Barcelos”, constantemente a transmitir pacotes a cada 2 segundos e o sistema recetor nos pontos de medição efetuava a recolha dos parâmetros de qualidade do sistema, em que o sistema parava a recolha após o tempo estipulado para a recolha de 100 pacotes. Foi tida em consideração a oscilação da antena durante o processo de recolha a semelhança do ensaio anterior.

Outro estudo consistiu em utilizar o ponto mais distante do emissor e reduzir a potência de transmissão até que a potência recebida atingisse o limiar de sensibilidade. Esta atenuação foi proporcionada por atenuadores (Figura 3.20) dimensionados para atenuar sinais até 2,2 GHz. Cada atenuador pode variar a sua atenuação de 0 dB até 10 dB. De modo a perfazer uma maior atenuação foram interligados três atenuadores em série, através de pequenos cabos coaxiais de modo perfazer uma atenuação até 30 dB, o bloco criado encontrava-se interligado entre o rádio LoRa no emissor e a antena.



Figura 3.20 - Atenuador Manual DC-2.2GHz 0-10 dB x 1 dB modelo 50R-019.

Através do auxílio de um utilizador que se encontrava nas imediações do sistema de emissor, foi realizado o ensaio no ponto 6 com o decremento da potência de transmissão em passos de 5 dB em que para cada medição era efetuado o registo dos parâmetros de qualidade para o mesmo intervalo de tempo.



### 3.5.3 Ensaio em vegetação

De modo a verificar o comportamento da atenuação do sinal num ambiente com vegetação, foi usado como local de testes o jardim da universidade da Madeira, sendo caracterizada por ser uma área com vegetação irregular, constituída por árvores de média a grande dimensão, como se pode ver pela Figura 3.21.



Figura 3.21 - Tipo de vegetação encontrada no jardim da universidade da Madeira.

O emissor foi colocado num ponto fixo do jardim e o recetor foi distanciado em incrementos de 5, 10 e 20 metros dependendo da densidade da vegetação. Para as antenas colocadas a 3 metros de altura, a Figura 3.22 mostra os locais de medição.



Figura 3.22 - Parametrização dos pontos de medição no jardim da universidade da Madeira.

Neste estudo foi também averiguado o comportamento bidirecional da atenuação neste tipo de ambiente, ou seja, se existe uma diferença de atenuação entre o canal ascendente e descendente.

O procedimento experimental constituiu-se na colocação do sistema emissor na zona de 0 metros e o sistema recetor a se distanciar, em que a recolha dos parâmetros de qualidade era efetuado à semelhança dos ensaios anteriores, ao qual era estipulado um período de funcionamento do sistema necessário para a recolha de 100 pacotes com uma cadência de transmissão de 2 segundos, para o canal ascendente e, posteriormente para o canal descendente.

No que se refere aos parâmetros da comunicação, estes encontram-se na Tabela 3.9. É de salientar a mudança da banda de frequência de operação de modo a evitar interferências com um sistema existente a operar na banda 868 MHz.

Tabela 3.9 - Parâmetros do sistema de medição para a primeira passagem dos ensaios na vegetação do jardim da universidade da Madeira

Frequência	868,2 MHz
Largura de banda	125 kHz
CR	4/5
Potência de transmissão	14 dBm
Ganho da antena emissora	1,3 dBi
Atenuação do cabo no emissor	0,93 dB
Ganho da antena recetora	0,5 dB
Atenuação do cabo no recetor	0,8 dB
<i>Spreading Factor</i>	12

Após as medições anteriores, os parâmetros do sistema foram mudados de modo a aferir a perda de pacotes numa gama mais próxima da sensibilidade do equipamento. Para este efeito foi baixada a potência de transmissão com um auxílio de um bloco de atenuadores no sistema emissor que se encontrava estacionário no ponto 0 metros, juntamente com a mudança do modo SF de 12 para 7 o qual tem um valor de sensibilidade menor de modo a atingir esse limiar durante este ensaio. Os parâmetros do sistema estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Parâmetros do sistema de medição para a segunda passagem dos ensaios na vegetação do jardim da universidade da Madeira.

Frequência	868,2 MHz
Largura de banda	125 kHz
CR	4/5
Potência de transmissão	-18 dBm
Ganho da antena emissora	1,3 dBi
Atenuação adicionais no emissor	5,42 dB
Ganho da antena recetora	0,5 dB
Atenuação do cabo no recetor	0,8 dB
<i>Spreading Factor</i>	7



### 3.5.4 Ensaaios na Serra

O sistema LoRa foi dimensionado para longas distâncias e a sua colocação em zonas remotas levanta questões sobre o seu comportamento em ambiente real condições de propagação não facilmente controláveis, ou seja, o sistema pode encontrar-se com linha de vista, mas alguma obstrução, pode não ter linha vista, pode existir obstrução pela presença de vegetação, entre outros fatores.

O sistema LoRa emissor foi colocado no terraço da universidade da Madeira e pretendeu-se efetuar uma comunicação com um nó LoRa que se encontrava na Serra do Funchal para aferir a qualidade da ligação em ambos os sentidos da ligação. A orografia e a vegetação impôs diversas dificuldades ao sistema LoRa. Neste estudo foram escolhidos 17 pontos situados na zona montanhosa. Foram realizados dois ensaios nos pontos 1 até 8 da Figura 3.23 referem-se ao primeiro percurso e os restantes ao segundo percurso.

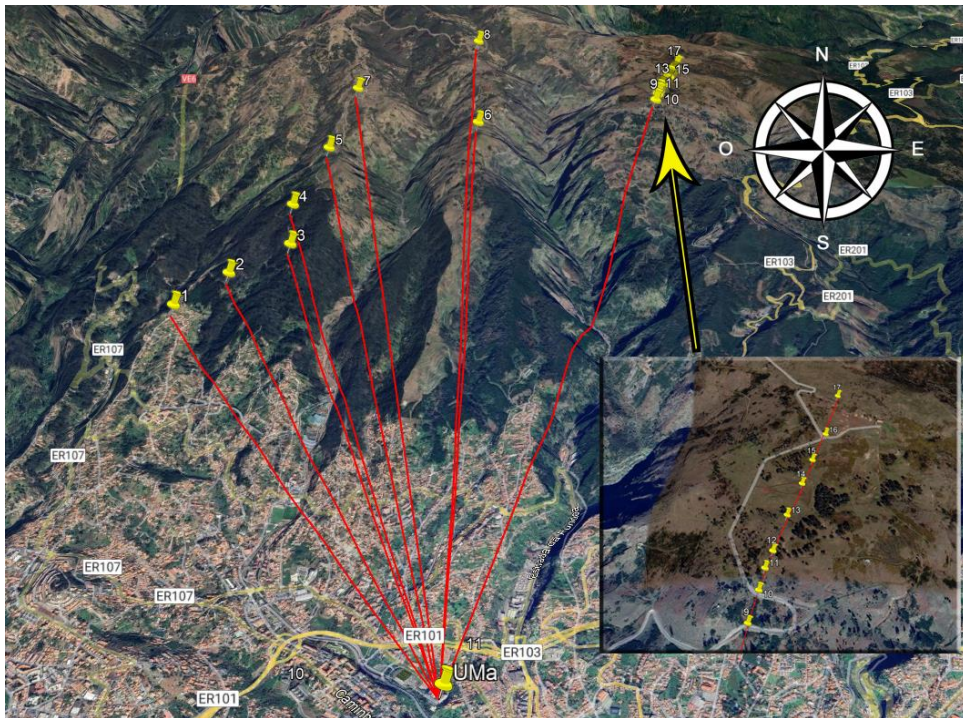


Figura 3.23 - Zona parametrizada para os ensaios de propagação para o ensaio na Serra do Funchal.

À medida que o número do ponto de medição aumentava também a sua distância de comunicação aumentava. Visto a altura dos sistemas estarem em patamares diferentes foi necessário determinar a distância do raio direto,  $D'$ , para cada ponto de medição através do perfil de elevação das ligações ponto a ponto, os quais a altura do emissor é  $h_t$ , as alturas dos pontos de medição  $h_r$  e a distância entre o emissor e o recetor é  $D$  em relação ao nível do mar. As distâncias para os pontos do primeiro percurso estão representadas na Tabela 3.11.



Tabela 3.11 - Alturas e distâncias em metros para os respectivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio na serrado Funchal referentes a primeira passagem.

	$h_t$	$h_r$	$D$	$D'$
Ponto 1	157	755	3870	3916
Ponto 2	157	833	4020	4076
Ponto 3	157	937	4130	4203
Ponto 4	157	1047	4630	4715
Ponto 5	157	1222	5350	5455
Ponto 6	157	1324	5400	5525
Ponto 7	157	1398	6350	6470
Ponto 8	157	1535	7080	7213

O ponto 1 tem linha de vista com a universidade da Madeira. Os pontos 2 a 4 estão fora da linha de vista devido à existência de árvores de grande porte e o perfil de elevação que cada vez mais contribuía para a obstrução do raio direto. Para os restantes pontos a vegetação é bastante rasteira com poucas árvores de pequeno e médio porte, mas com obstrução provocada pelo perfil de elevação do terreno. Estes dois tipos de ambiente encontram-se ilustrados nas imagens da Figura 3.24. De salientar que os pontos 5 e 6 estavam em condições de propagação semelhantes.



Figura 3.24 - Sistema de medição no ponto de medição 4 (esquerda) e no ponto de medição 7 (direita).

O segundo percurso, constituído pelos pontos de 9 a 17, era caracterizado por vegetação rasa com árvores de médio e pequeno porte bastante espaçadas entre si. O fator predominante foi a elevação do terreno que no ponto 9 permitiu linha de vista com a universidade da Madeira, mas à medida que a distância aumentava para os pontos seguintes perdeu-se a linha de vista devido à elevação do terreno, estabilizando-se com o aumento da distância. O comportamento do perfil de elevação encontra-se na Figura 3.25, sendo a distância entre os pontos de medição pequena de modo a verificar o comportamento desta obstrução.

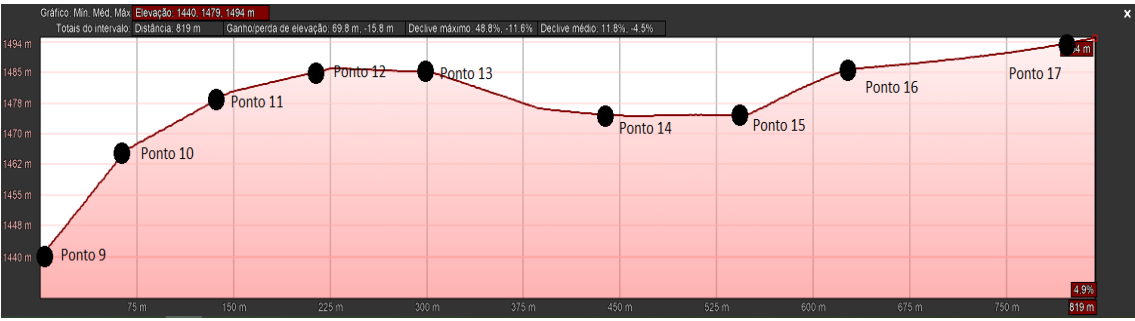


Figura 3.25 - Perfil de elevação do terreno nos pontos do ensaio na serra do funchal referentes à segunda passagem.

À semelhança do primeiro percurso, foi necessário determinar as alturas dos sistemas e a distância em relação ao nível do mar para determinar a distância do traçado direto entre os mesmos. Na Tabela 3.12 encontram-se as respectivas alturas e distâncias.

Tabela 3.12 - Alturas e distâncias em metros para os respectivos pontos de medição retirados do perfil de elevação do terreno para os pontos parametrizados do ensaio na serra do Funchal referentes à segunda passagem.

	$h_t$	$h_r$	$D$	$D'$
Ponto 9	157	1439	5940	6077
Ponto 10	157	1468	6020	6161
Ponto 11	157	1478	6080	6222
Ponto 12	157	1483	6130	6272
Ponto 13	157	1484	6250	6389
Ponto 14	157	1475	6370	6505
Ponto 15	157	1475	6470	6603
Ponto 16	157	1485	6570	6703
Ponto 17	157	1493	6740	6871

Em relação ao sistema de medição, foi usado o mesmo procedimento experimental, à semelhança do ensaio na vegetação, de modo a aferir a bidirecionalidade. O sistema emissor encontrava-se na universidade da Madeira, a transmitir pacotes com uma cadência de 2 segundos e o sistema recetor encontrava-se nos pontos de medição para efetuar a recolha dos parâmetros de qualidade do sistema para um tempo estipulado de recolha de 100 pacotes. As funções dos sistemas foram trocadas para estudar o comportamento no sentido descendente. Os parâmetros do sistema encontram-se na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Parâmetros do sistema de medição para os ensaios na serra do Funchal.

Frequência	868,2 MHz
Largura de banda	125 kHz
CR	4/5
Potência de transmissão	14 dBm
Ganho da antena emissora	1,3 dBi
Atenuação do cabo no emissor	0,93 dB
Ganho da antena recetora	0,5 dB
Atenuação do cabo no recetor	0,8 dB
Spreading Factor	12

### 3.6 Estação meteorológica

Nesta secção será descrita a implementação da estação meteorológica e a *gateway*.

#### 3.6.1 Arquiteturas do sistema

A arquitetura do sistema segue dois blocos principais denominados de estação meteorológica e a *gateway* com funções distintas. A estação meteorológica tem as seguintes funções:

- Recolha dos parâmetros meteorológicos, provenientes dos diferentes sensores;
- Funcionamento de forma autónoma e não estar dependente de fonte externa para o seu funcionamento;
- Envio dos dados meteorológicos recolhidos através da tecnologia LoRa respeitando os critérios legais da comunicação.

A *gateway* tem como função base recolha dos dados meteorológicos para posterior análise. As arquiteturas dos sistemas encontram-se na Figura 3.26. A estação meteorológica é constituída por um Arduino Pro mini que se encontra interligado aos sensores ambientais e à interface LoRa, sendo alimentado por um bloco de alimentação. Na *gateway* a interface LoRa encontra-se conectado a um Arduino UNO que efetua uma comunicação por cabo USB ao computador para a recolha dos dados.

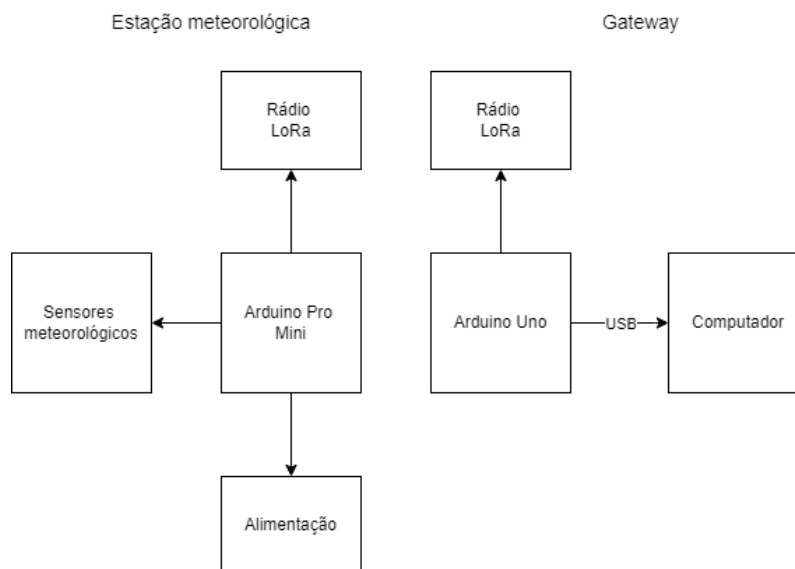


Figura 3.26 - Diagrama de blocos da estação meteorológica e a *gateway*.

#### 3.6.2 Sensores meteorológicos

Com o objetivo de aferir uma gama de parâmetros ambientais típicos de uma estação meteorológica, foram selecionados os seguintes parâmetros ambientais:

temperatura e humidade; velocidade e direção do vento; pluviosidade; pressão atmosférica; luminosidade.

#### 3.6.2.1 Medição da temperatura e humidade

O sensor usado para aferir a temperatura e humidade é o sensor SHT15 [36], que permite obter estas duas medições em simultâneo, que se encontra ilustrado na Figura 3.27, em conjunto com a estrutura que envolve o sensor de modo a proteger das condições ambientais que possam interferir com os resultados do sensor.

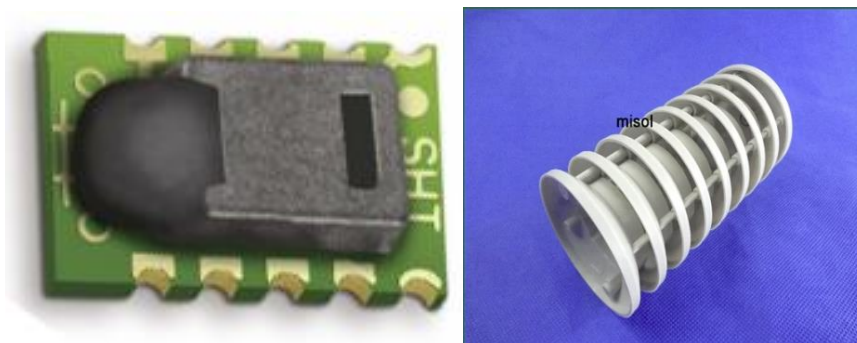


Figura 3.27 - Sensor de temperatura e humidade SHT1x [36] (esquerda) e estrutura protetora do sensor (direita).

O sensor de humidade é composto por duas películas, constituindo um condensador na sua forma mais básica, que absorvem a humidade, o que faz com a capacidade varie consoante a humidade adquirida através de uma ADC (*Analog-to-digital converter*) de 12 bits, permitindo a representação da humidade relativa do ar entre 0% e 100% com uma precisão típica de  $\pm 2\%$ . A medição da temperatura é feita através de uma resistência variável com a temperatura adquirida por uma ADC de 14 bits, que apresenta uma precisão  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  na gama de temperatura típica de  $10^\circ\text{C}$  até  $40^\circ\text{C}$ . Admite uma tensão de operação entre 2,4 V e 5,5 V apresentando um consumo típico de  $28\ \mu\text{A}$ , mas podendo atingir picos de 0,55 mA no processo de medição. A comunicação com Arduino é realizada por uma comunicação série, constituída por duas ligações, uma se destina ao sinal de relógio SCK e a outra para o transporte de dados denominada DATA, em que o fabricante aconselha a colocação de uma resistência de *pull-up* de  $10\ \text{k}\Omega$  e um condensador de  $100\ \text{nF}$  entre o pino de alimentação e o *ground* com o esquema de ligações a um típico microcontrolador que se encontra ilustrado na Figura 3.28.

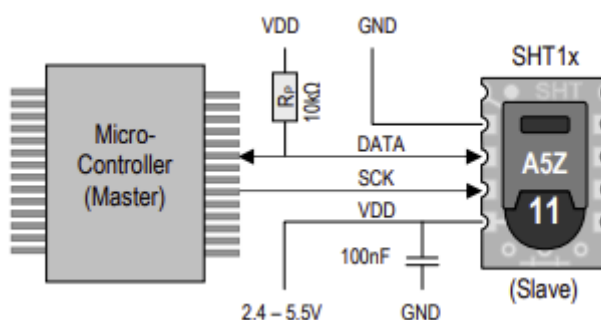


Figura 3.28 - Esquemático das ligações do sensor SHT1x a um microcontrolador.

### 3.6.2.2 Direção do vento

O sensor usado para detecção da direção do vento é o catavento do kit ADS-WS1 Weather Station [37]. O seu princípio de funcionamento tem por base uma resistência variável. Dependendo da direção do vento, a variação da impedância é proporcionada por interruptores do tipo *reed switch* que permutam a resistência que é apresentada aos seus terminais. O sensor e o seu esquema elétrico equivalente encontram-se na Figura 3.29.



Figura 3.29 - Sensor de posição do vento (esquerda) e esquema elétrico equivalente do sensor [38].

O catavento usado possui 16 resistências que são permutadas com incrementos de  $22,5^\circ$  que segundo o *datasheet* [38] do componente as resistências apresentadas aos dois terminais do sensor dependendo da direção encontram-se na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Valores das resistências para as diferentes direções do catavento (sendo o norte  $0^\circ$  e incrementos no sentido dos ponteiros do relógio).

Direção (graus)	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5
Resistência (ohms)	33k	6,57k	8,2k	891	1k	688	2,2k	1,41k
Direção (graus)	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
Resistência (ohms)	3,9k	3,14k	16k	14,12k	120k	42,12k	64,9k	21,88k

Com o intuito de acoplar o sensor à estação meteorológica, foi necessário um circuito para converter o valor destas resistências em um valor de tensão que possa ser lido pela ADC do Arduino. Consiste no divisor resistivo esquematizado na Figura 3.30 e, considerando uma resistência  $R_1$  de  $3,9\text{ k}\Omega$  e uma tensão de VCC (*Voltage Common Collector*) de  $3,3\text{ V}$  é possível determinar a tensão equivalente à direção do vento.

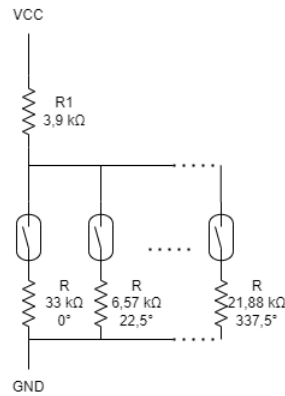


Figura 3.30 - Esquema elétrico do circuito de detecção da posição do vento.

#### 3.6.2.3 Velocidade do vento

A velocidade do vento é medida usando o anemômetro do kit ADS-WS1 Weather Station [37] da Figura 3.31, cujo princípio de funcionamento consiste num conjunto de pás semicirculares, que rodam sobre um eixo em função da velocidade do vento. Que de modo a detetar cada rotação é colocado um íman no eixo giratório que aciona um *reed switch* que se encontra na parte fixa do anemômetro.



Figura 3.31 - Anemômetro do kit ADS-WS1 Weather Station [37].

Segundo o fabricante cada volta completa do anemômetro corresponde ao equivalente a uma velocidade do vento de 2,4 km/h. Deste modo, é necessário a contagem de número de rotações durante um intervalo de tempo para determinar a média da velocidade do vento. O circuito criado tem por base o esquema representado na Figura 3.32, em que a cada fecho do *reed switch* o circuito que estava num estado HIGH passa para o estado LOW durante o fecho do *reed switch*, possibilitando, através de interrupções do Arduíno, ser contabilizada essa mudança de estado.

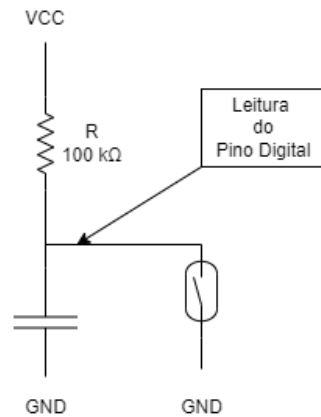


Figura 3.32 - Esquema elétrico para detecção de mudanças de estado para sensores do tipo *reed switch*.

### 3.6.2.4 Medição da precipitação

De forma a determinar a quantidade de precipitação, foi usado o pluviómetro do kit ADS-WS1 Weather Station [37], em que o princípio de funcionamento encontra-se representado na Figura 3.33. É constituído por um funil que recolhe a chuva que é direcionada para um balde desbalanceado com dois compartimentos. À medida que a precipitação aumenta, fazendo encher um compartimento, o transbordar ativa um *reed switch* devido ao íman no balde, repetindo o processo para o outro compartimento. A quantidade de precipitação é indicada pelo número de vezes que o balde transbordou num determinado intervalo de tempo. Para este pluviómetro, cada transbordar de água compõe a uma precipitação de 0,2794 mm [38].

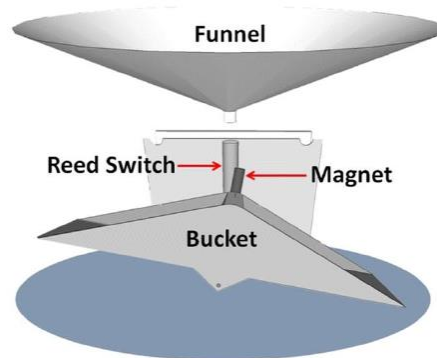


Figura 3.33 - Princípio de funcionamento de um pluviómetro [39].

Visto o funcionamento do pluviómetro ser idêntico ao da medição da velocidade do vento, foi replicado o circuito de modo a contabilizar o número de passagens do íman pelo *reed switch*.

### 3.6.2.5 Pressão atmosférica

A pressão atmosférica foi adquirida através do sensor Grove-DPS310 [40] do fabricante Seeed, ilustrado na Figura 3.34, que mede com uma precisão de  $\pm 0,002$  hPa na gama de medição entre os 300 e os 1200 hPa. Apresenta baixo consumo



energético, uma tensão de alimentação entre 3,3 V e 5 V e efetua a comunicação com o microcontrolador pelo protocolo SPI ou I<sup>2</sup>C.

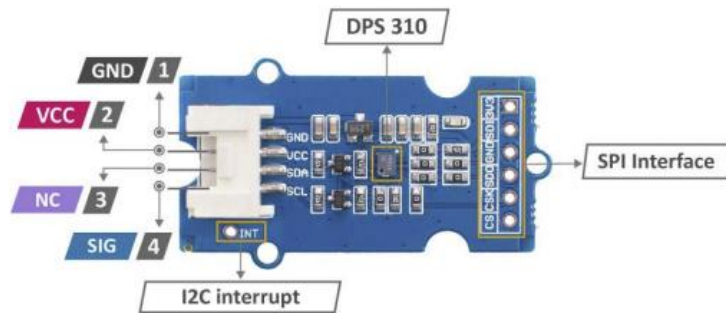


Figura 3.34 - Sensor de pressão atmosférica Grove-DPS310 e seu correspondente *pinout* [40].

#### 3.6.2.6 Luminosidade

A luminosidade foi detetada através do piranómetro SKS 1110 [41] da Figura 3.35, em que na sua parte superior se encontra um prisma com a função de concentrar a radiação solar proveniente de vários ângulos de incidência num fotodíodo, ao qual comporta-se como uma fonte de corrente proporcional à radiação solar.



Figura 3.35 - Piranómetro SKYE SKS 1110 [41].

É necessário um circuito de transimpedância, de modo a converter a corrente proveniente do fotodíodo numa tensão equivalente, em que o circuito criado para efeito encontra-se ilustrado na Figura 3.36.

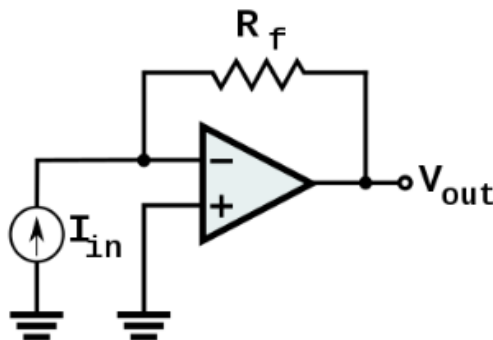


Figura 3.36 - Circuito de transimpedância [42].



A tensão de saída,  $V_{out}$  a ser captada pela ADC do Arduino, pode ser expressa por

$$V_{out} = -I_{in}R_f \quad (3.7)$$

A corrente  $I_{in}$  é equivalente à corrente gerada pelo fotodíodo e  $R_f$  é a resistência de referência, tendo-se usado o valor de 50 k $\Omega$  visto que a corrente máxima adquirida pelo fotodíodo foi de 40  $\mu A$ , promovendo que a tensão máxima à saída seja de 2 V. De modo a obter uma correspondência entre a tensão de saída e a luminosidade, foi utilizado um dia de sol para efetuar a recolha dos valores obtidos por um luxímetro para calibrar os valores de luminosidade. Com os dados obtidos foi feita uma aproximação pela equação

$$\text{Lux} = \begin{cases} 0 & V_{out} = 0 \\ 36502V_{out} - 102,62 & V_{out} > 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

### 3.6.3 Alimentação da estação meteorológica

A alimentação de todo o sistema foi realizada por uma bateria de lítio de 3,7 V, em que o seu carregamento foi controlado por um carregador solar MCP73871 do fabricante Adafruit da Figura 3.37, que possibilita o carregamento de baterias de lítio com tensões compreendidas de 3,7 V e 4,2 V. A taxa de carregamento pré-definida é de 50 mA, mas pode ser ajustada desde 50 mA até 1 A conforme as necessidades. Este carregamento será proporcionado por um painel solar que opera a uma tensão nominal de 6 V.

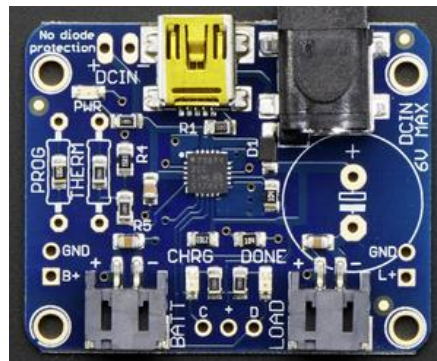


Figura 3.37 - Carregador Solar MCP73871 [43].

### 3.6.4 Arquitetura da estação meteorológica

O primeiro fator a considerar na arquitetura da estação meteorológica foi a escolha do microcontrolador capaz de interligar todos os sensores da estação meteorológica e o módulo LoRa RFM95W juntamente com o fácil acoplamento ao sistema de alimentação. A escolha recaiu na utilização do Arduino Pro Mini 328 da Figura 3.38, que é um microcontrolador baseado no ATmega328 que funciona a uma frequência de 8 MHz, no qual consta uma entrada RAW dedicada a alimentação, em que pode ser entregue uma tensão compreendida entre 3,4 V e 12 V, que regula a sua tensão de operação para os 3,3 V. À semelhança do Arduino UNO contém 14 entradas e saídas digitais, das quais 6 têm possibilidade de serem usadas como pinos

### Capítulo 3 - Desenvolvimento

PWM, 6 entradas analógicas, memória Flash de 32 kB, juntamente com a fácil adaptação de diferentes protocolos de comunicação como UART, SPI, I<sup>2</sup>C e TWI. Uma vantagem em comparação ao Arduino UNO é o seu menor consumo energético e a facilidade de alimentação através de uma bateria de lítio.



Figura 3.38 - Arduino Pro Mini 328 3.3V/8MHz [44].

A arquitetura da estação meteorológica encontra-se representada na Figura 3.39.

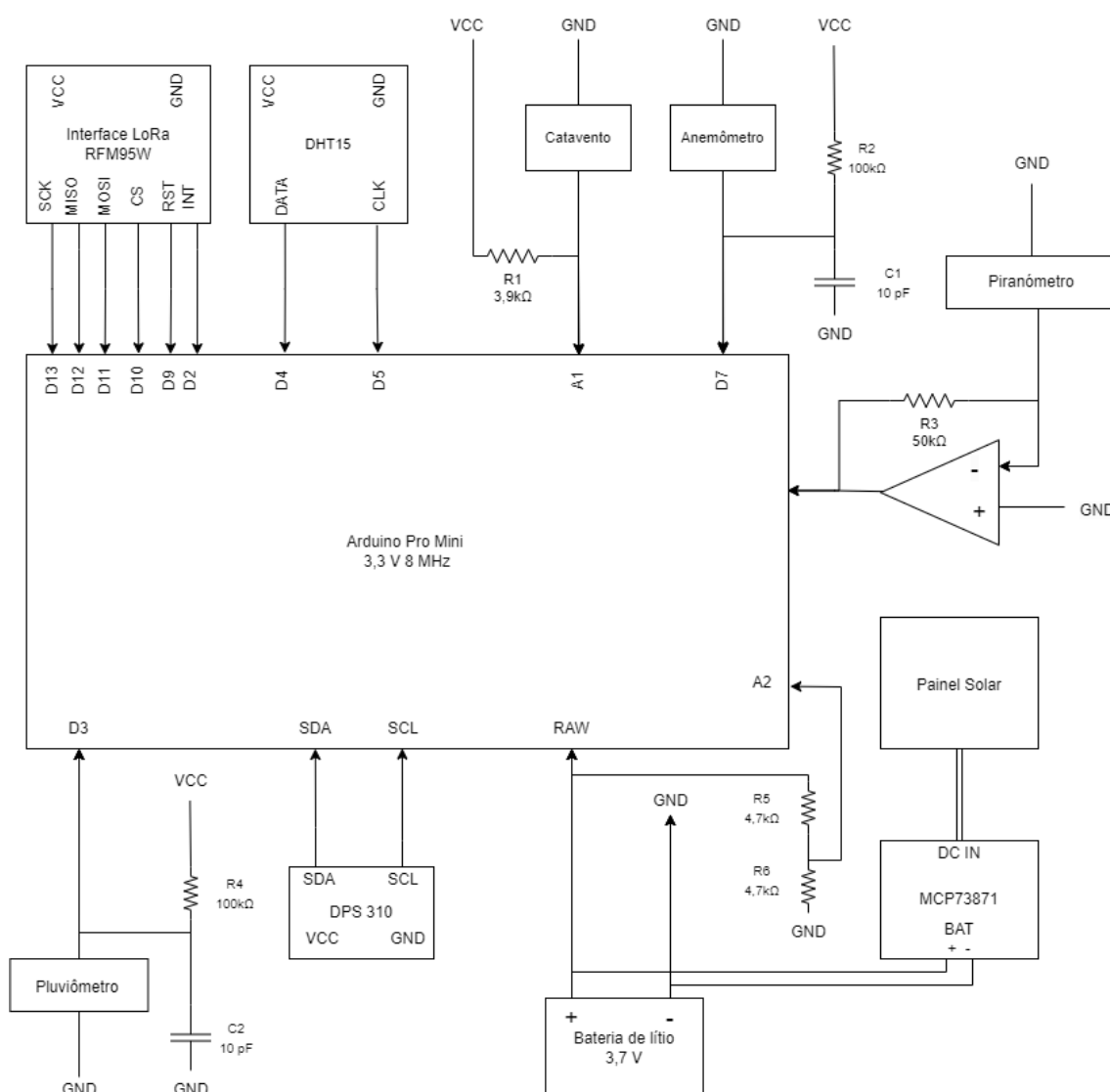


Figura 3.39 - Esquema elétrico da estação meteorológica.

De forma a facilitar interligação dos componentes foi desenhado uma placa de circuito impresso cujo seu *layout* se encontra no anexo D.

### 3.6.5 Programa da estação meteorológica

De forma a desenvolver um programa que vá ter em conta as necessidades da estação meteorológica, foi necessário ponderar o número de bytes requeridos para transferir toda a informação na trama LoRa. Foram utilizados 16 bytes para transferir toda a informação dentro das gamas de variação de cada parâmetro que se encontram na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Gama de valores para os diferentes sensores e o respetivo número de bytes.

Sensor	Luminosidade	Pressão	Direção do vento	Temperatura	Humidade	Anemómetro	Rajada	Pluviómetro	Bateria	Nº pacote
Variação	0,00-3,30	300-1200	1 -16	0,00-50,00	0-100	0-65535	0-65535	0-65535	2,0-5,0	1-255
Conversão para inteiro	0-330	300-1200	1 -16	0-5000	0-100	0-65535	0-65535	0-65535	20-50	1-255
Bytes necessários	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1

Os valores medidos foram convertidos para inteiros visto a introdução dos valores na trama ser em hexadecimal. Foi utilizado a biblioteca RadioHead [45] que se torna transparente na utilização do protocolo LoRa, o qual já inclui funções pré-definidas para criação da trama, executar o envio da mesma com parâmetros pré-definidos, funções de escuta e recolha da trama LoRa em que processam a integridade da mensagem recolhida.

O programa desenvolvido para estação meteorológica, que se encontra no anexo E tem por base três possíveis estados: adormecido; recolha de parâmetros e envio da trama.

No estado adormecido o Arduino e o rádio LoRa encontram-se num estado de baixo consumo. Durante o tempo de adormecimento, o Arduino apenas tem de efetuar as contagens referentes ao anemómetro e ao pluviómetro, em que a saída deste estado é ditado por contadores internos à frequência de relógio do Arduino em que o utilizador pode definir o tempo de adormecimento. Posteriormente passa para as funções de recolha dos parâmetros e o envio da trama para nó LoRa endereçado. Este processo é executado pela função `leituraeenvio()` que segue o fluxograma da Figura 3.40. De realçar que o incremento do número de pacote ocorre num ciclo de 1 até 255.

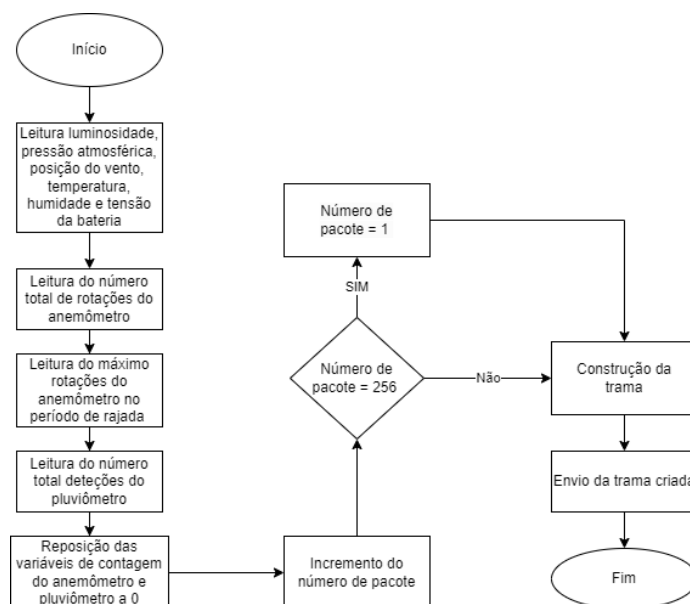


Figura 3.40 - Fluxograma da função leituraeenvio() da estação meteorológica.

Após a execução da função leituraeenvio() retorna ao ciclo loop() que corresponde ao ciclo principal da estação meteorológica, no qual decorrem dois contadores em simultâneo. O primeiro dedicado à contabilização do valor máximo do número de rotações do anemómetro em intervalos pré-definidos para o tempo de rajada e o segundo contador dedicado a acordar o Arduino para efetuar o envio dos dados. O fluxograma do programa principal encontra-se na Figura 3.41

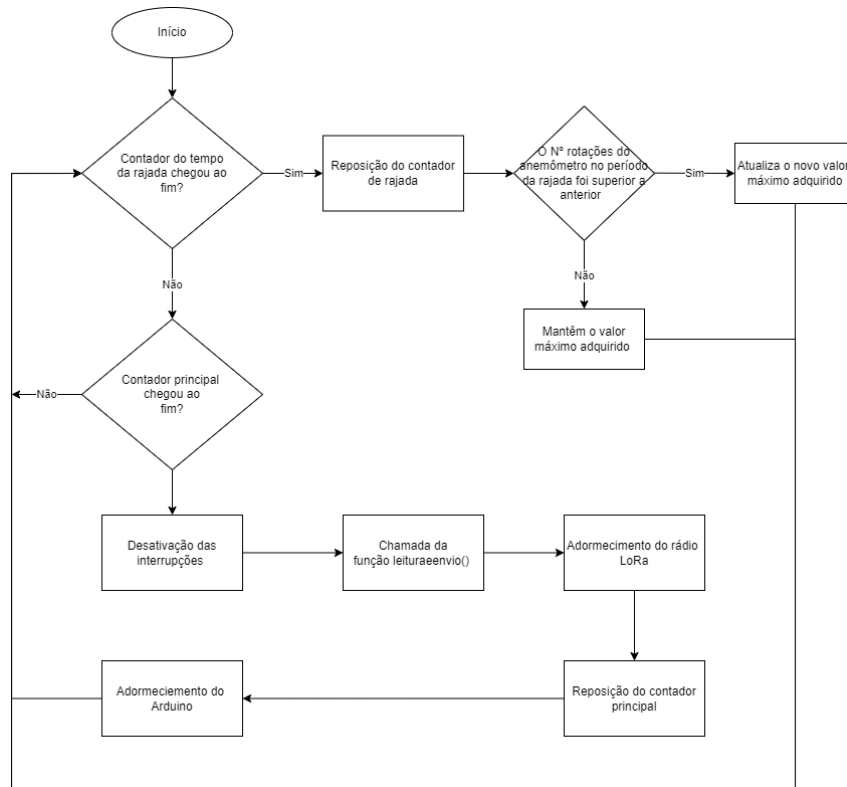


Figura 3.41 - Fluxograma do programa loop() da estação meteorológica.

Os contadores temporais usados na estação meteorológica são proporcionados por interrupções de 0,032768 segundos, que executam uma função que incrementa as variáveis do contador principal e o contador de rajada. De modo a estipular o tempo de cada contador, apenas é necessário determinar o total de incrementos parciais de modo a atingir o tempo desejado. Este incremento temporal por cada interrupção temporal provém da configuração do timer2, visto ser um timer de 10 bits, o que corresponde à divisão da frequência de relógio por  $2^{10}$  impondo que a nova frequência de relógio seja de 7812,5 Hz, sendo a interrupção ativada quando passarem 256 períodos deste mesmo relógio.

### 3.6.6 Consumo energético

O consumo de energia da estação meteorológica está diretamente relacionado com o número de transmissões por intervalo de tempo os quais têm de ser ponderados juntamente com os critérios legais de *duty cycle* da entidade reguladora. Sabendo que os parâmetros de configuração dos rádios LoRa para a comunicação entre estação meteorológica e a *gateway* se encontram na Tabela 3.16, é possível determinar através da equação (2.6) o tempo no ar da comunicação que equivale a 51,5 ms. De modo a cumprir com os padrões legais de *duty cycle* de 1%, a transmissão seguinte tem de ser no mínimo espaçada de 5,09 segundos. Com este valor foi ponderado o espaçamento entre transmissões de 2 em 2 minutos, o que equivale estar dentro dos parâmetros legais em conjunto com a configuração da deteção de rajada máxima de 10 em 10 segundos.

Tabela 3.16 – Parâmetros da comunicação LoRa entre a estação meteorológica e *gateway*.

SF	7
Largura de banda	125 kHz
Tamanho da <i>payload</i>	16 bytes
<i>Cyclic redundancy check</i>	Ligado
Coding rate	4/5
Cabeçalho	Explícito
<i>Low data rate optimize</i>	Desligado
Número de preâmbulos	8

Após a montagem dos componentes da estação meteorológica com a respetiva programação em execução, foi efetuado a medição do consumo da mesma através da colocação de uma resistência de 1  $\Omega$  em série com uma bateria de lítio carregada de 3,7 V, de modo a aferir de forma indireta o consumo através da queda aos terminais da resistência. A variação da tensão ao longo do tempo encontra-se ilustrado pela captura do ecrã do osciloscópio na Figura 3.42.

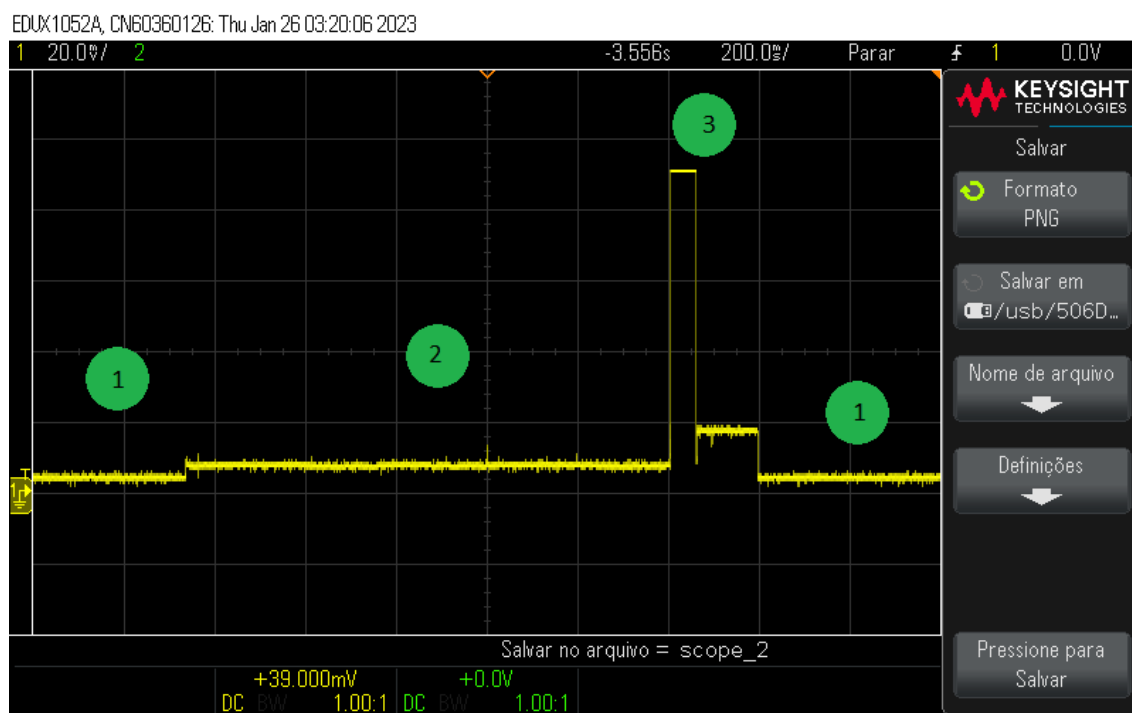


Figura 3.42 – Representação grafica dos vários estados de consumo da estação meteorológica.

Analisando a figura é possível encontrar 3 fases de consumo do sistema. A primeira é o estado de baixo consumo em que o rádio LoRa e o Arduino se encontram adormecidos, que consome uma corrente média 3,38 mA. Na fase 2 a corrente aumenta devido ao Arduino ser acordado para efetuar a recolha dos parâmetros dos sensores em que durante esta fase o valor médio da corrente é de 6,87 mA durante cerca de 1,07 segundos. Após esta fase observa-se o aumento do consumo devido à transmissão dos dados, com a corrente média a passar para 38,1 mA durante 0,248 segundos. Posteriormente volta ao consumo do modo adormecido.

Sabendo que o sistema foi dimensionado para 30 transmissões por hora, para uma tensão de operação 3,7 V equivale a um consumo de 12,89 mWh. Visto a disponibilidade de material, foi usada uma bateria de lítio com a capacidade de 4000 mAh o que oferecia uma autonomia do sistema de aproximadamente de 19 dias, mas esta autonomia foi estendida com a utilização de um painel de 2 W [46] que efetuava o carregamento da bateria no período solar.

### 3.6.7 Gateway

A *gateway* tem como funções a recolha e o armazenamento dos dados provenientes da estação meteorológica. A solução encontrada foi utilizar um Arduino UNO conectado ao rádio LoRa e a comunicação pela porta COM para a recolha dos dados por um programa desenvolvido em linguagem *Python*. O esquema de ligações da *gateway* encontra-se na Figura 3.43.

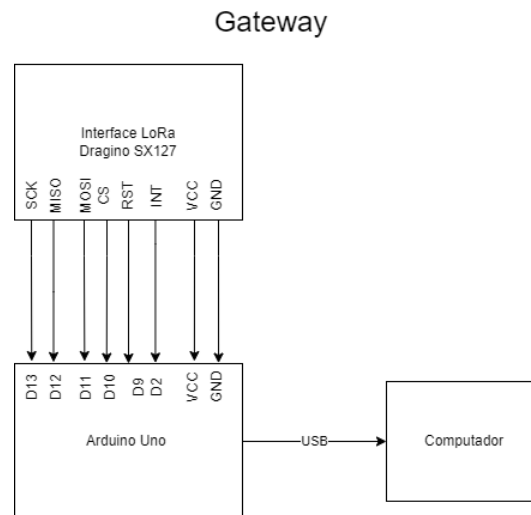


Figura 3.43 – Arquitetura da *gateway*.

O diagrama de blocos do programa do Arduino da *gateway* é apresentado na Figura 3.44, em que o respectivo código pode ser encontrado no anexo F, com função principal de recolha dos parâmetros que se encontram nas posições específicas da trama e a conversão para a grandeza correta, para posterior envio para a porta COM.

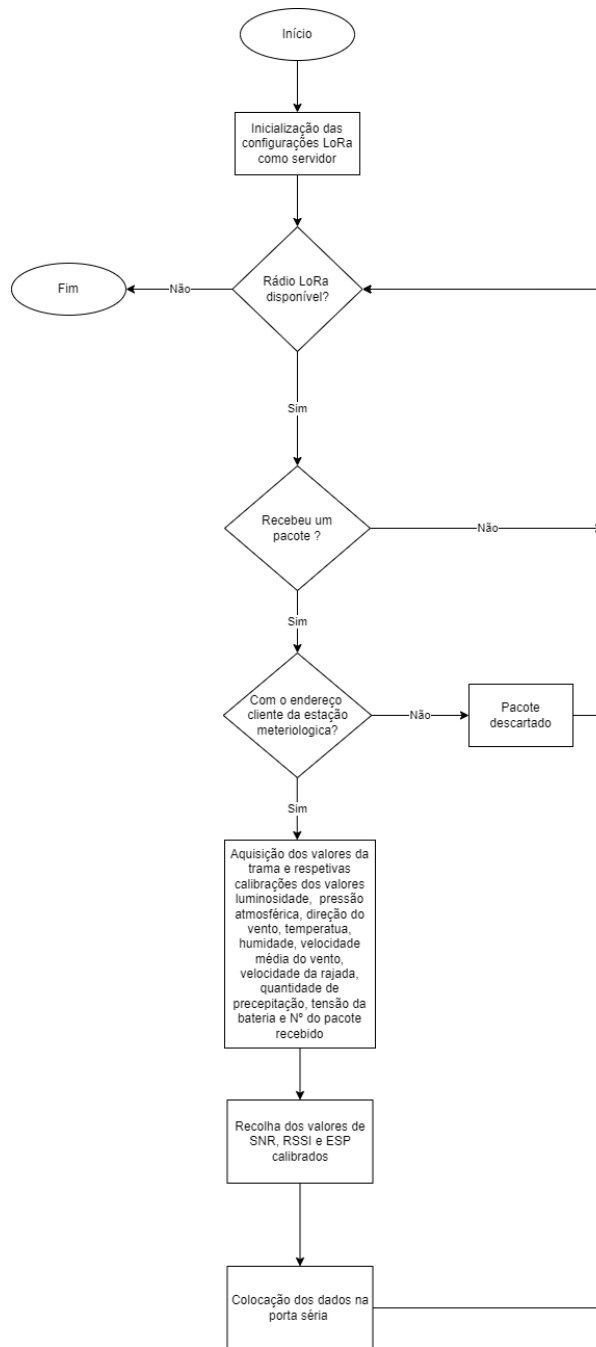


Figura 3.44 – Fluxograma do programa principal da *gateway*.

Os dados provenientes da porta COM eram recolhidos e adicionados com a data e hora da receção do pacote, para posteriormente serem armazenados em ficheiros de texto gerados diariamente, de modo ser possível a posterior análise e tratamento dos dados recolhidos. O fluxograma do programa *Python* desenvolvido encontra-se na Figura 3.45 e seu código encontra-se no anexo G.



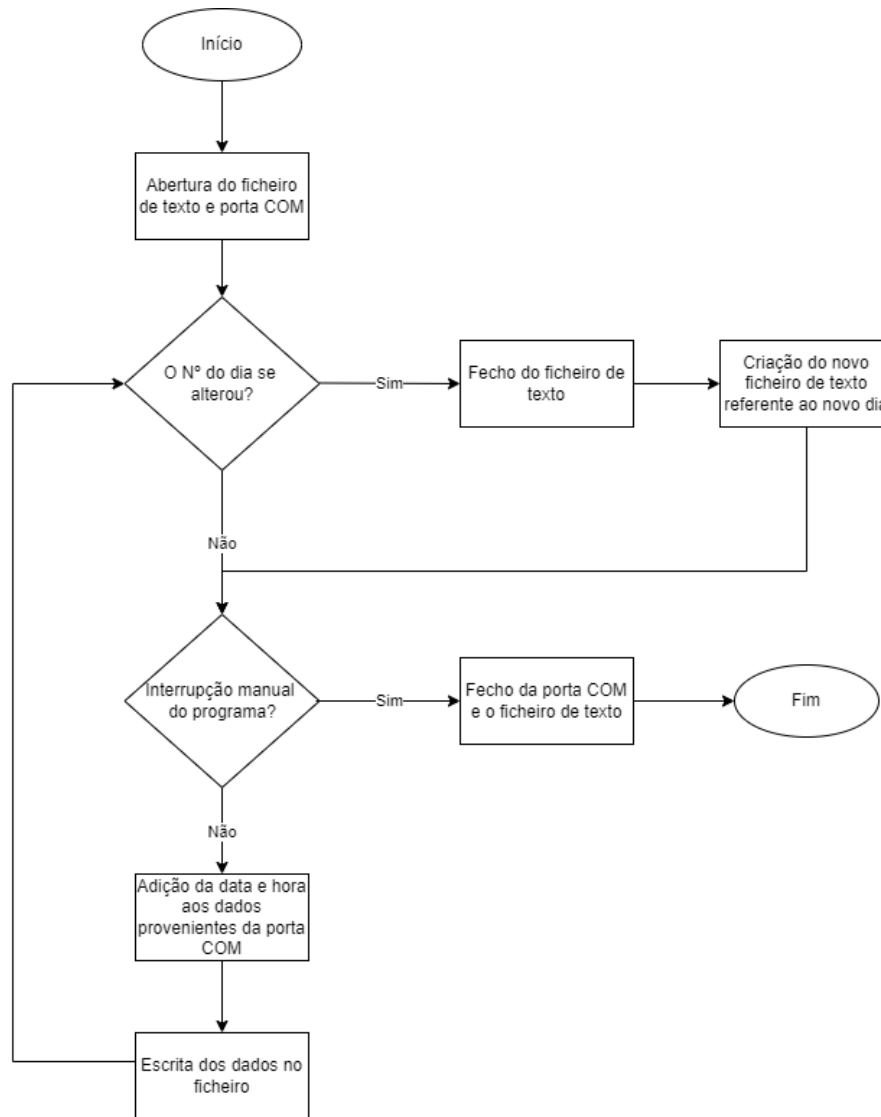


Figura 3.45 – Fluxograma do programa de aquisição de dados.

### 3.6.8 Local de testes

A estação meteorológica foi instalada para realização de testes no terraço de uma casa situada na zona da Ribeira da Alforra em Câmara de Lobos. Foi instalada numa haste metálica de 4 metros, com os sensores espaçados de forma que a medição de um sensor não interferisse com outra medição e a eletrónica foi protegida e vedada por uma caixa para aplicações exteriores. Uma imagem do protótipo final da estação meteorológica desenvolvida encontra-se na Figura 3.46.



Figura 3.46 - Estação meteorológica desenvolvida.

Os dados eram transmitidos para a *gateway* que se encontrava a 1,2 km de distância. A localização de ambos os sistemas encontram-se ilustrado na Figura 3.47.

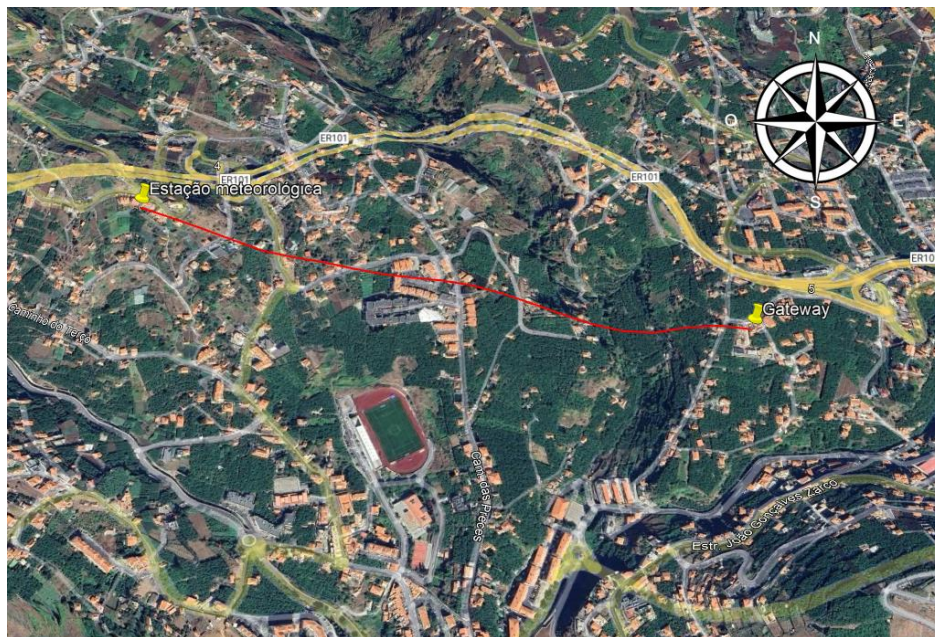


Figura 3.47 – Mapa das localizações geográficas da estação meteorológica e *gateway*.

## Capítulo 4 - Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os diferentes ensaios de propagação, bem como a comparação dos resultados dos modelos de propagação. Também serão apresentados os parâmetros ambientais recolhidos pela estação meteorológica durante um período de teste, em comparação com dois sistemas de referência mais próximos da localização da estação meteorológica

### 4.1 Obstáculo por colina

A potência esperada em cada ponto de medição foi determinada através da atenuação devido ao espaço livre, dado por (2.17), adicionado a contribuição das perdas de difração determinadas pelo parâmetro de difração de Fresnel-Kirchhoff determinado na Tabela 3.5 aplicando a equação (2.23). Para os parâmetros do sistema apresentados na Tabela 3.6 é possível prever a potência captada em cada ponto de medição, em que os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores estimados para as perdas por difração e resultante potência recebida para o ensaio de obstáculo por colina.

	Distância do traçado direto (metros)	Perdas por difração (dB)	Potência recebida esperada (dBm)
Ponto 1	626	0	-82,75
Ponto 2	689	-33,30	-116,87
Ponto 3	699	-28,47	-112,18
Ponto 4	712	-28,29	-112,16
Ponto 5	746	-32,84	-117,11
Ponto 6	787	-34,33	-119,06
Ponto 7	820	-35,19	-120,28
Ponto 8	829	-36,10	-121,28
Ponto 9	914	-36,61	-122,64

Os resultados de potência recebida esperada foram comparados com as potências médias adquiridas, para os três modos de SF em estudo e para cada ponto. Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 4.1. Através de uma análise a cada ponto de medição é possível avaliar o erro cometido na determinação da potência usando o método de difração.

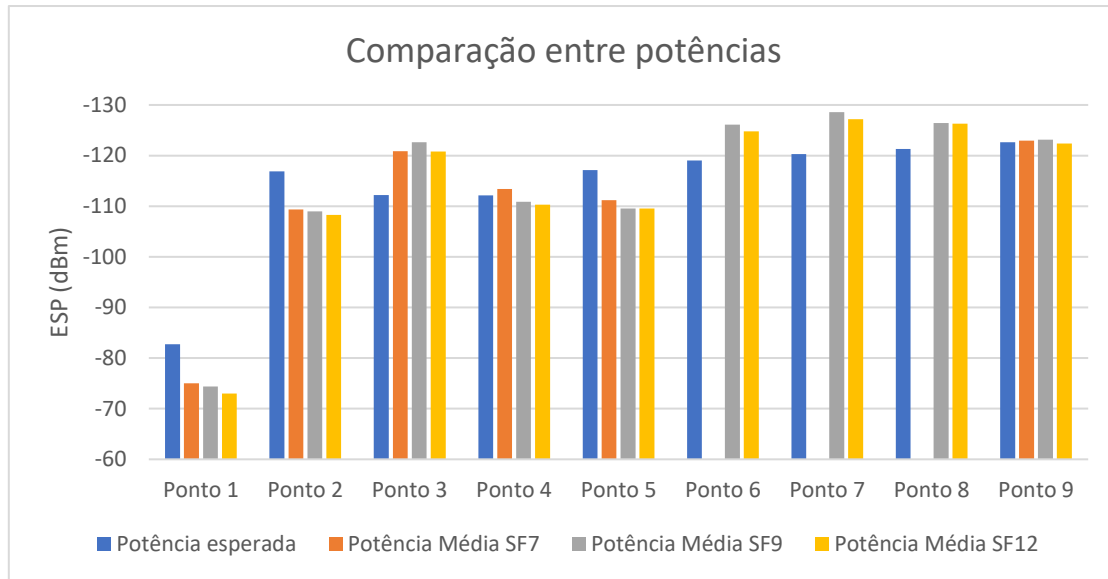


Figura 4.1 – Comparação entre a potência esperada e potência média adquirida para os diferentes modos de SF em cada ponto.

A diferença entre os resultados esperados e os resultados obtidos,  $\Delta_{yi}$ , está representada na Tabela 4.2. A média do erro de estimação  $u_e$  é de 1,09 dB, 3,79 dB e 2,65 dB para os modos de fator de espalhamento 7, 9 e 12, respetivamente. No que se trata aos desvios padrões de estimação,  $\sigma_e$ , tem-se 6,12 dB, 7,28 dB e 7,04 dB para os modos de fator de espalhamento 7, 9 e 12, respetivamente. Estes resultados demonstraram uma aproximação ao modelo de obstáculo em formato de ponta de faca, mas com um erro de estimação de cerca de 7 dB tendo em consideração que foram obtidos num ambiente semiurbano, ao qual nas imediações dos pontos de medição existiam edifícios, estradas e plantações que contribuem para a ocorrência de outros fatores de propagação para além da difração como a refração e reflexão. Também é de considerar que, para a colina em estudo, a altura do cume não é constante em toda a sua largura.

Tabela 4.2 – Diferença entre os valores esperados de ESP e o valor médio de ESP para os diferentes pontos e SF em estudo.

	$\Delta_{yi} \text{ (dBm)}$		
	SF 7	SF 9	SF 12
Ponto 1	-7,76	-8,36	-9,76
Ponto 2	-7,55	-7,93	-8,60
Ponto 3	8,69	10,45	8,65
Ponto 4	1,21	-1,29	-1,86
Ponto 5	-5,90	-7,59	-7,57
Ponto 6		7,07	5,74
Ponto 7		8,29	6,92
Ponto 8		5,17	5,01
Ponto 9	0,33	0,48	-0,26

Outro estudo tido em consideração neste ensaio foi a influência do limiar de sensibilidade do sistema para os diferentes modos de operação em comparação com

PDR. Os resultados obtidos para os diferentes modos em cada um dos pontos de teste encontram-se na Figura 4.2.

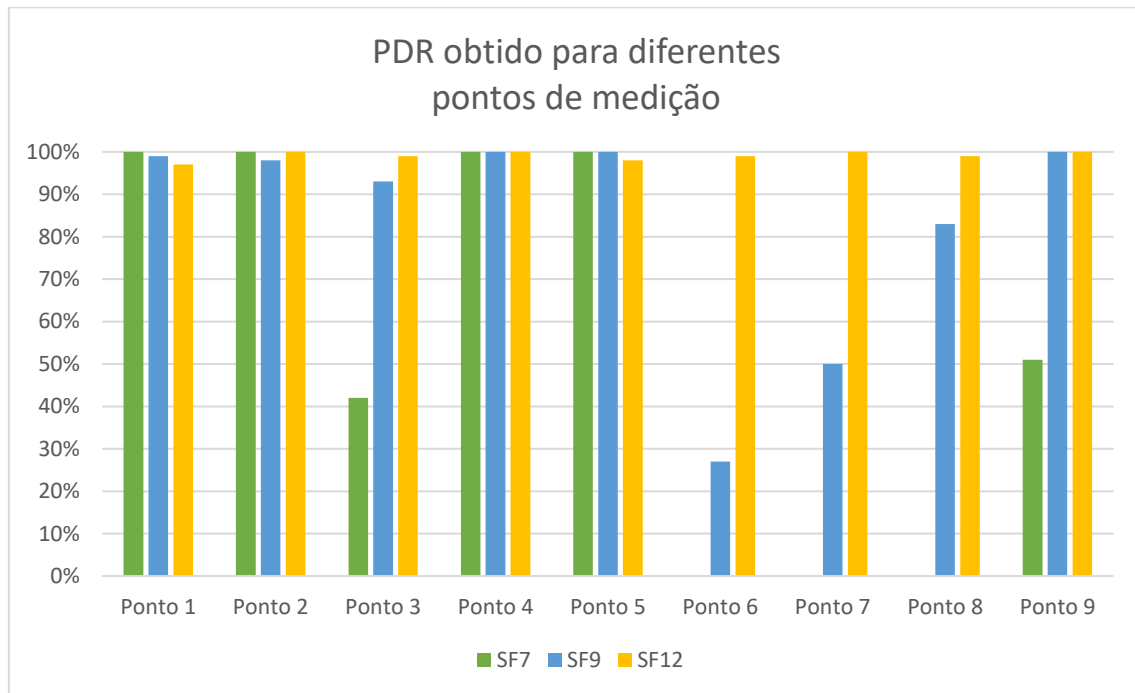


Figura 4.2 - Taxa de entrega de pacotes obtidos para os diferentes pontos de medição para os três modos de SF.

Tendo em consideração a sensibilidade do rádio LoRa apresentada na Tabela 2.3, em que para a largura de banda de 125 kHz a sensibilidade para os diferentes modos de operação é -123 dBm para o modo SF7, -129 dBm para o modo SF9 e -136 dBm para modo SF12, da Figura 4.1 e a Figura 4.2, os Ponto 3 e 9 são pontos em que o recetor se encontra no limiar de sensibilidade para o modo SF7 o qual consegue adquirir pacotes mas com taxas de entrega de pacotes a rondar os 42% e os 51%. Visto que a flutuação de sinal na zona de medição abrange valores inferiores à sensibilidade no presente modo, nos pontos 6, 7 e 8 não é possível obter comunicação no modo SF7. Para estes mesmos pontos, o modo SF9 apresenta-se no limiar de sensibilidade, que apesar de a potência de sinal estar bastante próxima nos três pontos de medição, a taxa de entrega de pacotes difere de 27% para o ponto 6 e 83% para o ponto 8, cuja explicação deve-se à variação do sinal para as diferentes zonas de medição, visto que o valor de potência de sinal só é captado para valores superiores à sensibilidade, indicando uma falsa tendência de atenuação do sinal se comportar identicamente nos três pontos. No que diz respeito ao modo SF12 existiram pequenas perdas de pacotes durante todo o ensaio, a rondar no máximo 3% em alguns pontos. Uma possível explicação é visto ser o modo de maior tempo de transmissão, uma rápida depressão do sinal durante o decorrer da transmissão poderá ter sido um fator para estas perdas que se encontram bem distantes do limiar de sensibilidade do modo. A perda de pacotes também está diretamente associada aos limiares de sensibilidade do SNR de cada modo de operação como é possível observar na Figura 4.3.

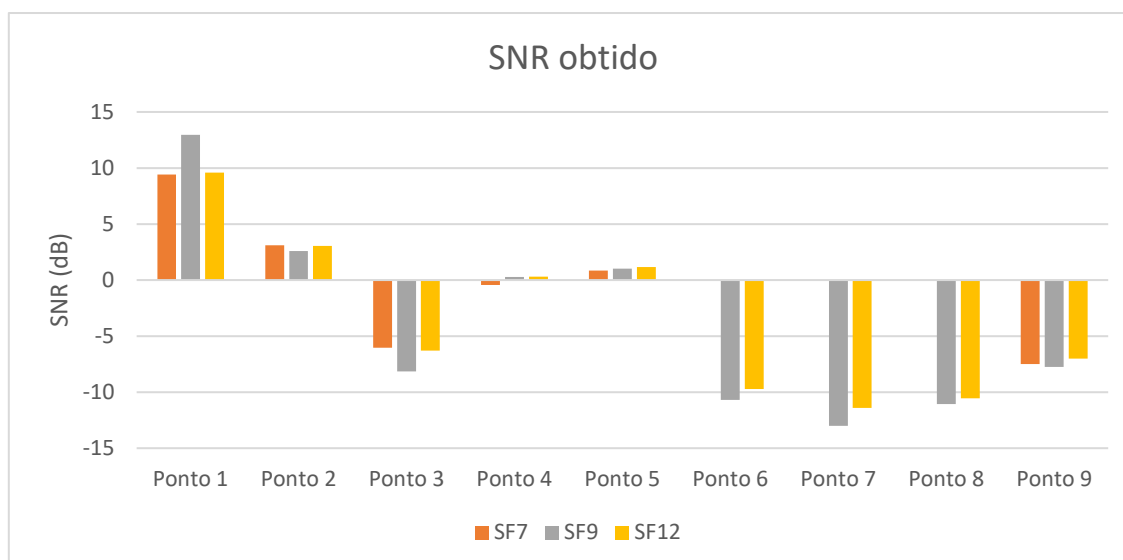


Figura 4.3 – SNR médio obtido para cada ponto de medição nos diferentes SF em estudo.

Outra análise em consideração foi avaliar os resultados obtidos num ponto de medição, para os diferentes SF, estando um exemplo dos valores adquiridos do ponto 2 presentes na Figura 4.4. É possível verificar uma proximidade de resultados dos três modos, com uma média de -108,84 dBm e um desvio padrão de todas as amostras dos diferentes modos de 1,27 dB.

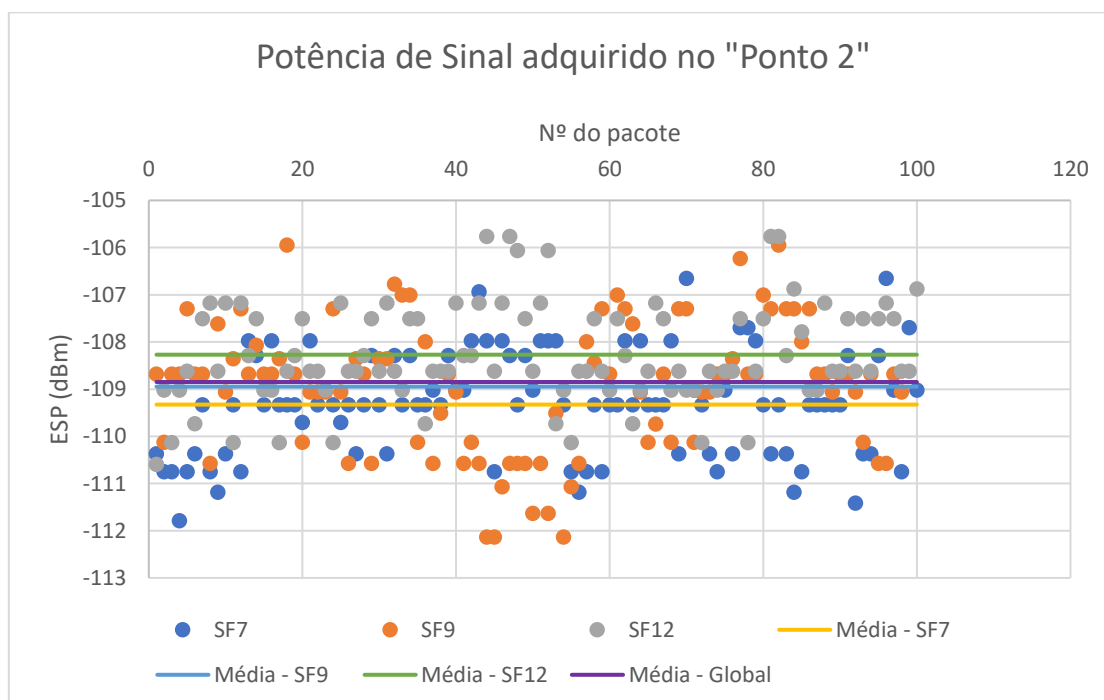


Figura 4.4 - Potência de sinal adquirida no "Ponto 2" em comparação com as médias para os diferentes modos.

Os valores de RSSI e ESP de cada medição em função do SNR encontram-se ilustrados na Figura 4.5, na qual é possível visualizar a sobreposição dos diferentes modos tanto no RSSI como no ESP, juntamente com os valores obtidos estarem no limiar das curvas teóricas o que indicia uma boa calibração do sistema.

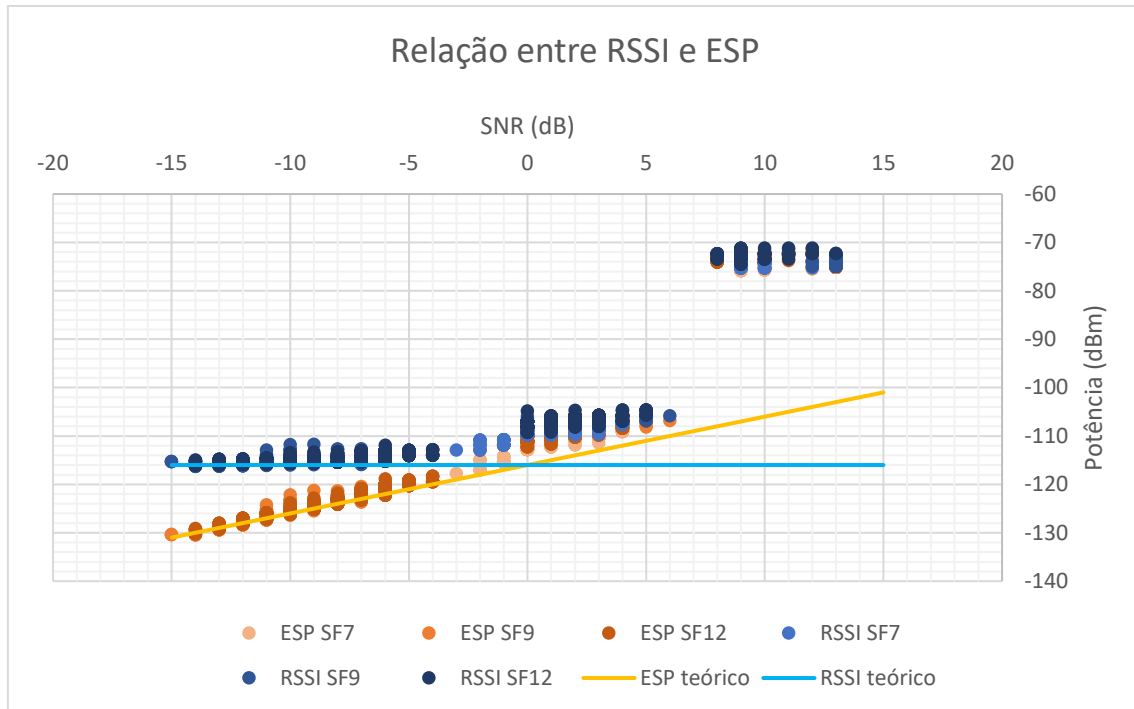


Figura 4.5 - Relação entre o ESP e o RSSI em função do SNR para todas as medições do ensaio de propagação “obstáculo por colina”

## 4.2 Cenário de linha de vista

Para o cenário de linha de vista, foi necessário estimar a potência de sinal esperado em cada ponto de medição, tendo em consideração os parâmetros do sistema que se encontram na Tabela 3.8 e a atenuação devido ao espaço livre dada pela expressão (2.17). Os resultados encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Potência de sinal esperada em cada ponto de medição.

	Distância de linha de vista (metros)	ESP esperado (dBm)
Ponto 1	680	-84,95
Ponto 2	1893	-93,85
Ponto 3	2461	-96,12
Ponto 4	3234	-98,50
Ponto 5	4470	-101,31
Ponto 6	6330	-104,33

Para o ensaio de propagação foram aferidos os resultados para os diferentes pontos de medição apresentados na Tabela 4.4.

## Capítulo 4 - Resultados

Tabela 4.4 - Parâmetros de qualidade obtidos no ensaio em linha de vista.

	Distância (metros)	ESP médio obtido (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR médio obtido (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
Ponto 1	680	-84,27	4,42	8	0,93	95
Ponto 2	1893	-92,26	2,69	7	0,77	96
Ponto 3	2461	-92,11	4,08	8	1,32	94
Ponto 4	3234	-95,70	1,48	9	0,90	96
Ponto 5	4470	-99,19	1,66	6	0,86	96
Ponto 6	6330	-102,03	0,93	4	0,75	94

Através dos valores da potência de sinal média de cada ponto e conhecendo os ganhos e atenuações do sistema, foi possível comparar a atenuação devido ao meio de propagação com a atenuação em espaço livre para todos os pontos de medição. Os resultados encontram-se na Figura 4.6, no qual é perceptível a sobreposição dos dados estimados e obtidos.

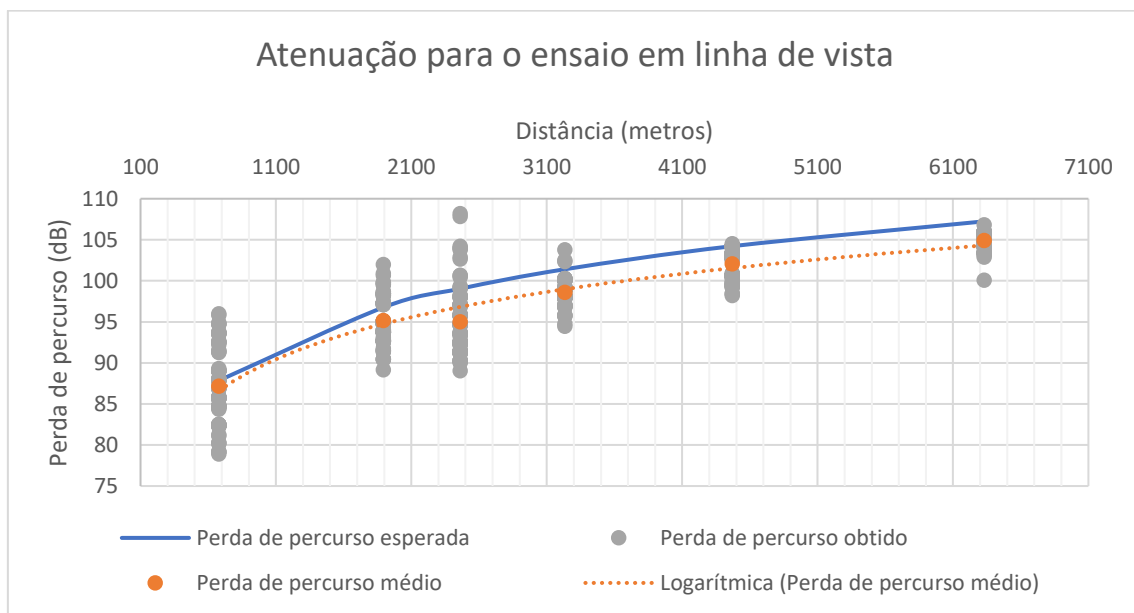


Figura 4.6 - Comparação entre atenuação obtida no ensaio e o valor esperado.

Na aproximação dos pontos médios por uma linha de tendência logarítmica é possível obter para uma distância de referência de 100 metros um valor de  $PL(d_0)$  de 71,4 dB e um expoente de atenuação  $n$  de 1,82, cujo qual correspondem a uma boa aproximação aos valores padrão para as perdas de espaço livre, ou seja, um  $PL(d_0)$  de 71,2 dB e um  $n$  de 2. Em termos estatísticos é possível concluir que foi obtida uma boa aproximação aos dados da atenuação em espaço livre, com um erro médio de estimação de 2,25 dB e um desvio padrão de estimação de 1,03 dB.

No segundo ensaio, em que para o ponto mais distante (ponto 6) foi efetuada a atenuação da potência de transmissão em incrementos de 5 dB até que não fosse



possível a comunicação, em que o limiar foi atingido a uma potência de transmissão de -18 dBm. Os resultados estão expostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros de qualidade obtidos no Ponto 6 para diferentes níveis de potência de transmissão.

Potência de transmissão (dBm)	ESP esperado (dBm)	ESP obtido (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR Médio (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
7	-104,33	-102,03	0,93	4	0,75	94
2	-109,33	-106,38	0,83	1	0,70	97
-3	-114,33	-112,69	0,9	-3	0,86	97
-8	-119,33	-117,44	0,95	-7	0,68	95
-13	-124,33	-123,54	1,01	-13	0,75	92
-18	-129,33	-129,1	1,09	-18	0,82	75

A relação entre o decréscimo da potência de sinal captada em função da atenuação da potência de transmissão apresenta um comportamento aproximadamente linear, como é ilustrado na Figura 4.7. À medida que o ESP obtido se aproximava do limiar de sensibilidade, a taxa de entrega de pacotes também diminui atingindo o mínimo de 75% para o valor mais próximo da sensibilidade do recetor no presente modo de operação, tendo o SNR atingindo um limiar de -18 dB de média.

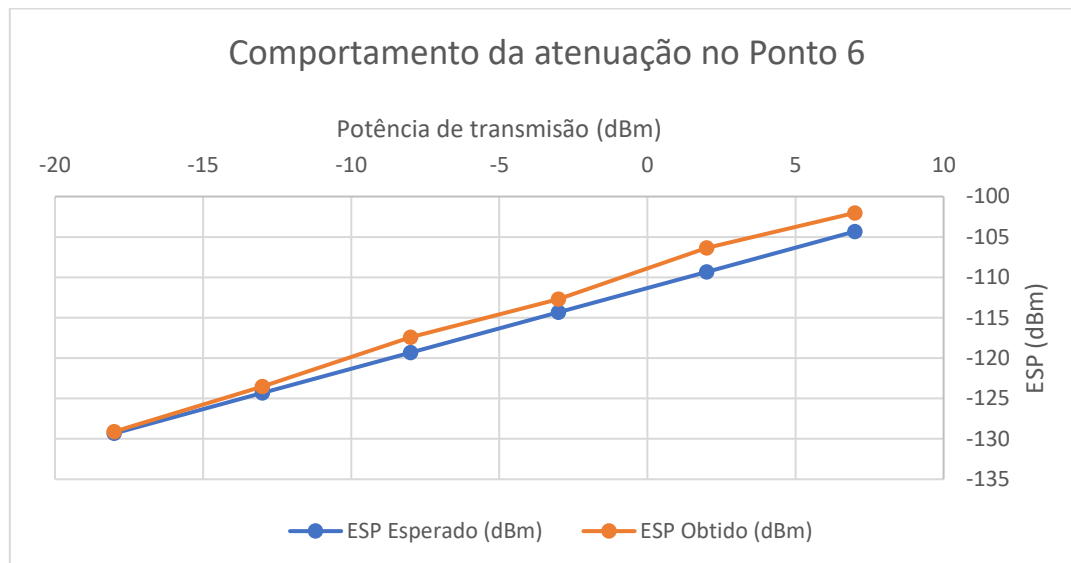


Figura 4.7 – Comparação entre o ESP esperado e obtido em função da potência de transmissão.

Outro estudo tido em consideração com os dados adquiridos foi a relação entre o RSSI e o ESP, representado no gráfico da Figura 4.8. É possível, concluir que, para uma elevada de potência de sinal, a relação sinal-ruído tende a saturar devido à limitação física do *hardware* ao qual não consegue adquirir o real de SNR de banda larga [47]. No entanto, este fator não afeta a análise na aquisição da potência de sinal visto que, para valores elevados de SNR, o valor de ESP é dado pelo próprio valor do RSSI (ver expressão (2.13)). Por outro lado, RSSI tende a estagnar à medida que o SNR é inferior a 0, obtendo-se o valor mínimo de -113 dB, visto ser um valor

coerente devido ao facto do limiar de ruído teórico do sistema determinado pela equação (2.9) ser de -116 dB. Devido a este facto, o ESP como tem em consideração a remoção da potência de sinal induzida pelo ruído, ficando apenas a potência do sinal. O valor mais baixo de ESP adquirido foi de -131 dBm, bastante próximo do limiar de sensibilidade para este modo de operação.

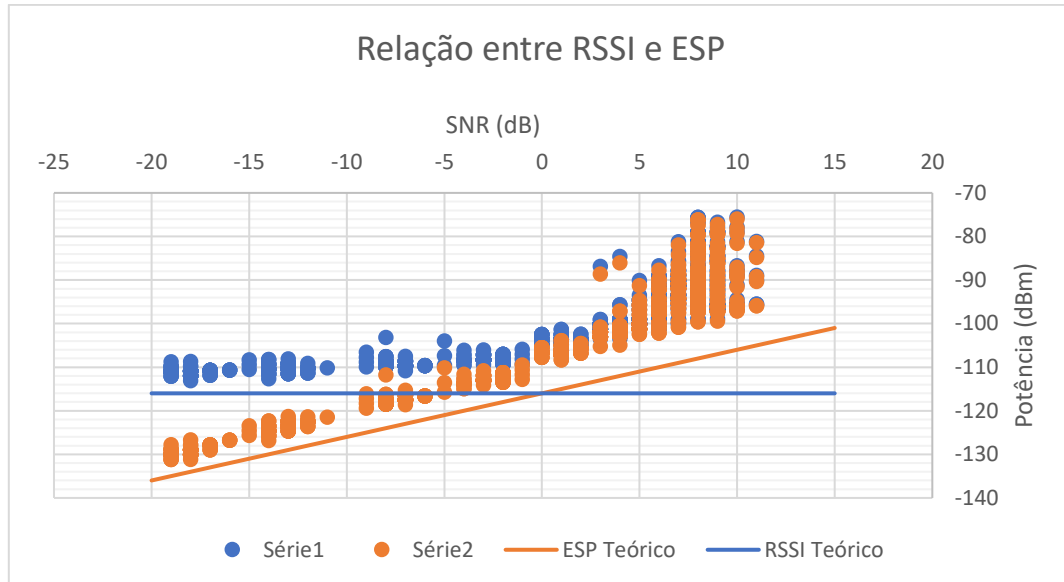


Figura 4.8 - Relação entre o ESP e o RSSI em função do SNR para todas as medições do ensaio de propagação.

### 4.3 Ensaio em vegetação

O primeiro ensaio no jardim teve como objetivo verificar o comportamento da atenuação imposta pelo meio, que foi determinada através dos valores de ESP adquiridos, retirados a potência de transmissão, a atenuação e os ganhos do sistema. Os resultados encontram-se nos gráficos da Figura 4.9 para o canal ascendente e da Figura 4.10 para o descendente.

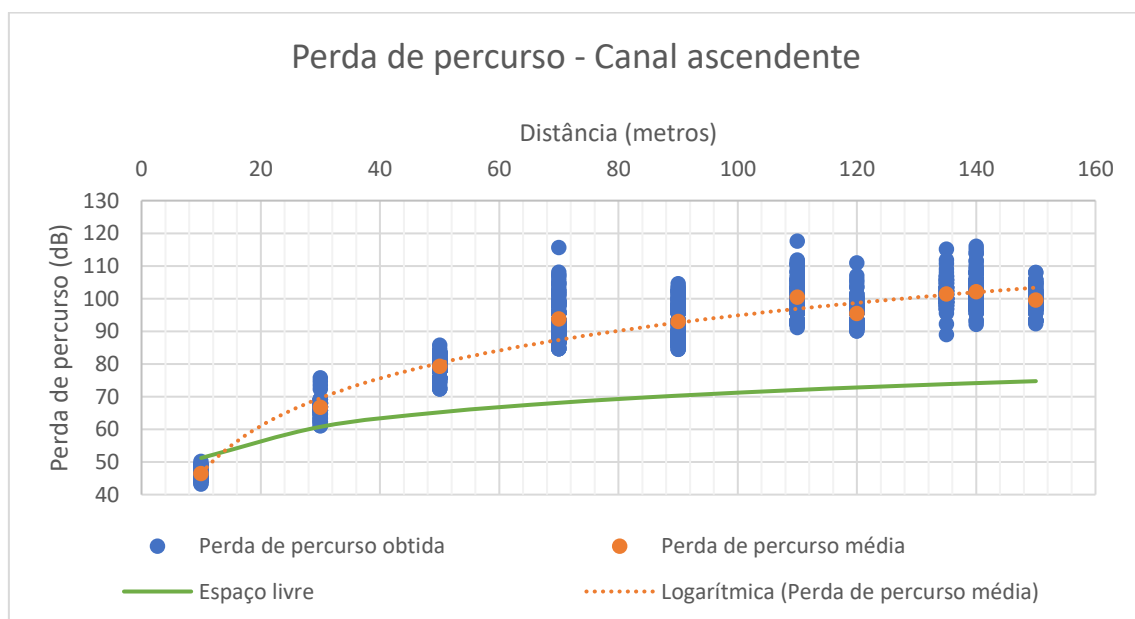


Figura 4.9 – Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre.

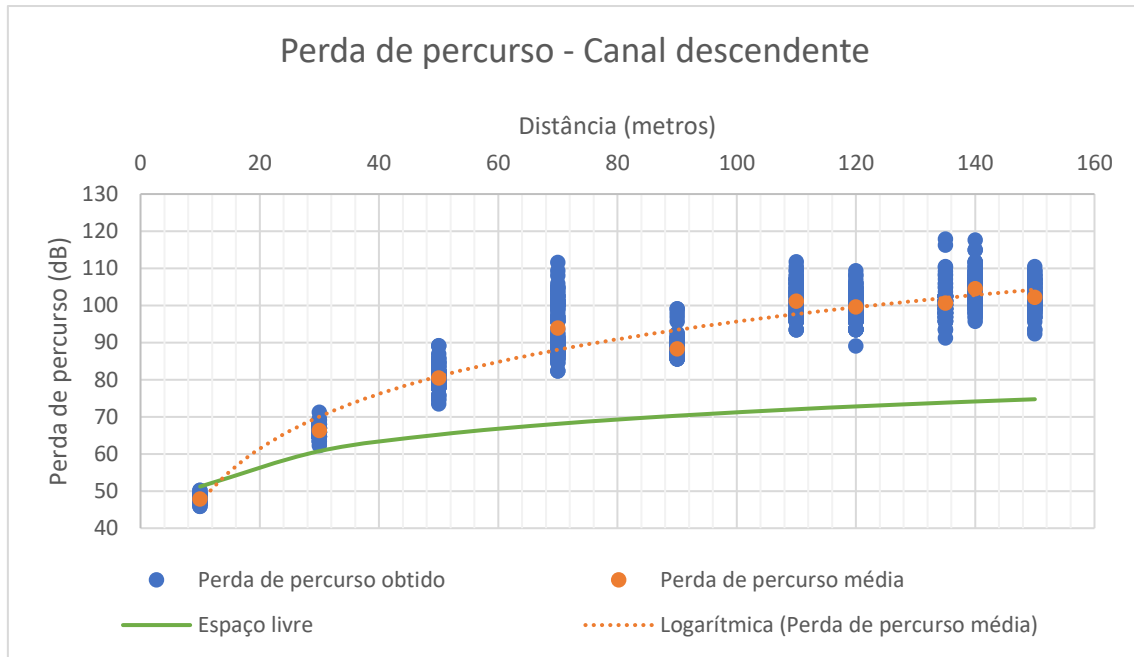


Figura 4.10 - Atenuação do sinal no canal descendente em comparação com a curva de espaço livre.

Ao analisar os gráficos é possível observar que no primeiro ponto a uma distância de comunicação de 10 metros, que os valores obtidos estão bastante próximos da atenuação em espaço livre. Foram obtidos os parâmetros do modelo Log Normal através das linhas de tendência, em que para o canal ascendente, para a distância de referência de 10 metros, foi obtido um  $PL(d_0)$  de 46,46 dB e um expoente de atenuação  $n$  de 4,84. Para o canal descendente foram obtidos valores semelhantes, com um  $PL(d_0)$  de 46,68 dB e  $n$  de 4,90. Estes resultados preliminares indicam um comportamento bidirecional da atenuação semelhante em termos médios.

As curvas dos modelos empíricos de propagação em vegetação em conjunto com a atenuação obtida para ambos os canais encontram-se na Figura 4.11.

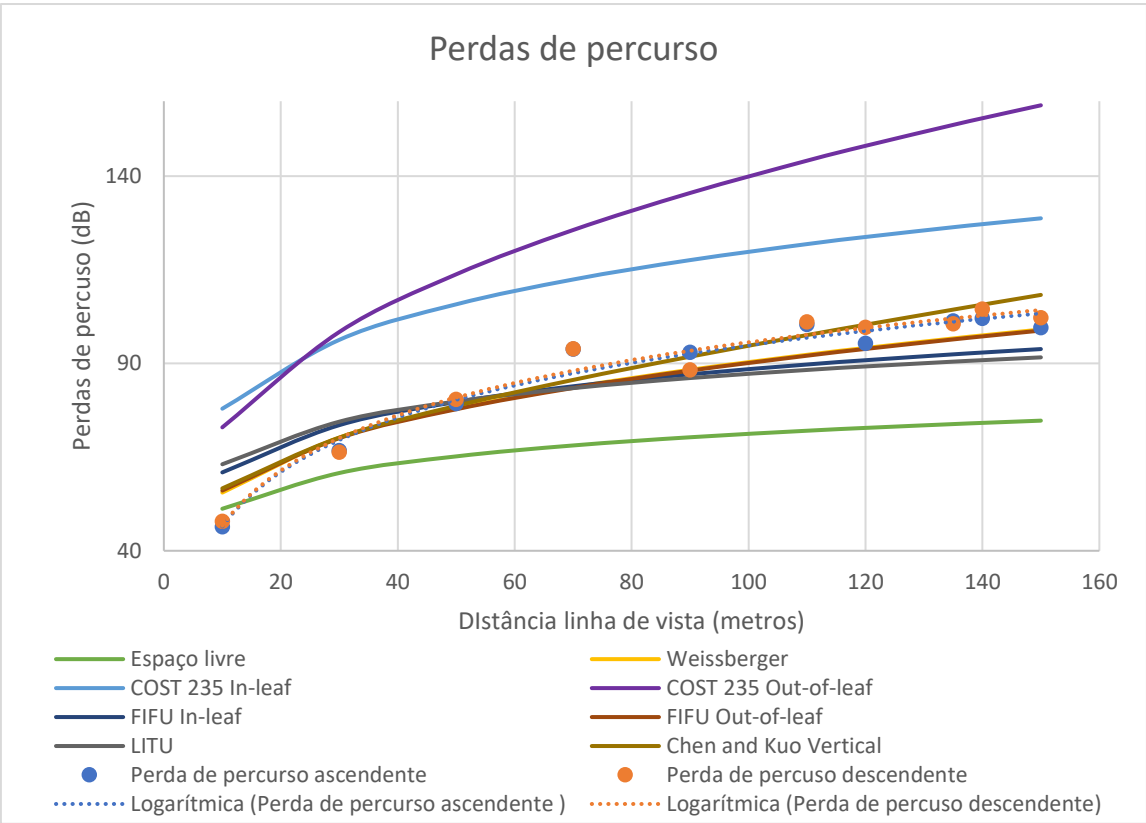


Figura 4.11 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no ensaio.

De modo a averiguar a aproximação foram usadas duas métricas sendo a média e o desvio padrão de estimação, tendo em consideração a diferença entre o valor do modelo e o valor obtido de atenuação. As métricas obtidas para ambos os canais constam na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados estatísticos de aproximação dos modelos de vegetação aos resultados obtidos.

	Weissberger	COST 235 In-leaf	COST 235 Out-of-leaf	FIFU In-leaf	FIFU Out-of-leaf	LITU	Chen and Kuo Vertical	ITU-R
Média ascendente	-2,31	25,96	42,82	-3,34	-2,45	-4,10	2,09	2,23
Média. descendente	-3,01	25,26	42,12	-4,04	-3,16	-4,80	1,39	1,53
Desvio padrão ascendente	5,30	3,71	10,74	7,81	5,47	9,06	5,21	4,56
Desvio padrão descendente	5,29	3,70	10,27	8,01	5,46	9,28	4,71	4,38

Dos resultados o modelo COST-235 sobrestimou demasiado os resultados, obtendo-se valores médios de estimação superiores a 25 dB para ambos os canais para comunicação a nível da folha e fora do nível da folhagem a estimação deteriora-se ainda mais para valores superiores a 42 dB. Os restantes modelos aproximam-se

melhor dos resultados obtidos em termos de média de estimação, como é ilustrado no gráfico da Figura 4.12, em que se destacam os modelos Chen and Kuo e o ITU-R.

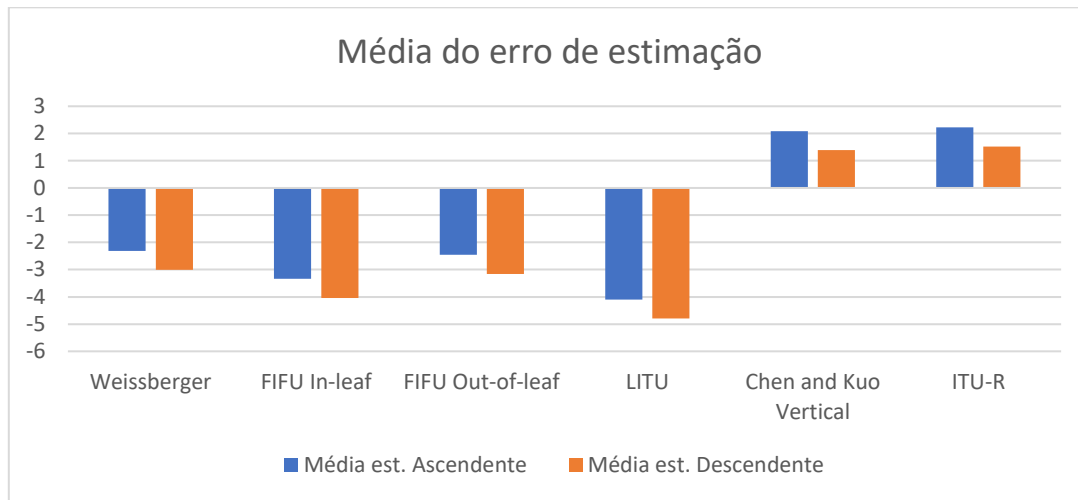


Figura 4.12 – Médias do erro de estimação dos modelos que melhor se aproximam dos resultados obtidos.

Em conjunto com os resultados obtidos dos diferentes desvios padrões de estimação, o gráfico da Figura 4.13 indica o comportamento da flutuação da estimação em torno do valor médio, com os modelos Chen and Kuo e o ITU-R a apresentar as métricas mais baixas, sendo estes modelos os que obtiveram as melhores aproximações.

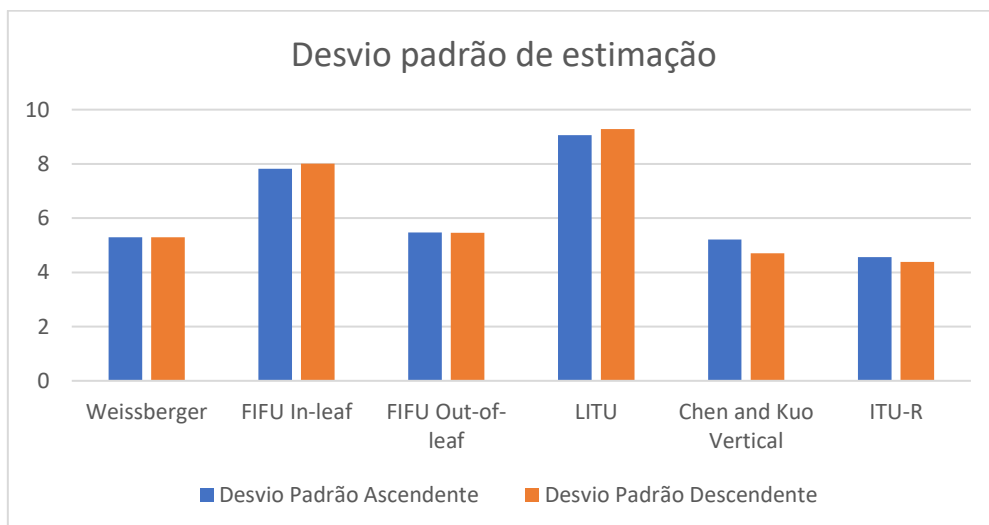


Figura 4.13 - Desvios padrões de estimação dos modelos que melhor se aproximam dos resultados obtidos.

Em relação à taxa de perdas de pacotes, durante este ensaio não se verificou nenhuma perda, devido ao fato de a gama de valores de ESP e SNR estar bastante distante da sensibilidade do equipamento. Deste modo, procedeu-se ao segundo ensaio em que foi mudado o SF para o modo 7 e a diminuição da potência de transmissão de modo a atingir mais facilmente o limiar do sistema neste meio. Os parâmetros de qualidade obtidos neste segundo ensaio constam na Tabela 4.7.

## Capítulo 4 - Resultados

Tabela 4.7 - Parâmetros de qualidade obtidos do segundo ensaio na vegetação.

Distância (metros)	ESP recebido médio (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR médio (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
10	-67,60	1,22	9	0,28	100
30	-86,67	1,29	9	0,17	100
50	-99,27	1,11	7	0,68	100
70	-108,48	2,84	3	2,07	100
90	-107,75	0,63	4	0,89	100
110	-113,47	1,86	-1	0,98	98
120	-117,79	1,20	-5	1,33	92
135	-113,82	2,03	-1	1,00	98
140	-118,66	3,20	-4	2,69	75
150	-121,43	1,62	-6	1,57	70

Sabendo que para o modo SF 7 a sensibilidade do sistema é atingida para valores de ESP inferiores a -123 dBm, fazendo um paralelo entre os valores de ESP recebido em conjunto com o seu desvio padrão e a taxa de entrega de pacotes, é possível constatar que, com o aproximar do valor limiar de sensibilidade, a taxa de entrega de pacotes também diminui. Neste caso, é atingida uma distância de 140 metros, provocando uma perda de pacotes de 25%, deteriorando-se para 30% à distância de 150 metros. À semelhança da utilização do limiar do ESP, é possível tirar as mesmas conclusões referentes à taxa de entrega de pacotes, tendo em consideração que o limiar do SNR para este modo é de -7,5 dB.

No segundo ensaio a atenuação imposta pela propagação na vegetação era de esperar um comportamento semelhante ao do primeiro ensaio visto que o ambiente de propagação não mudou. A comprovar estes resultados foram obtidas as atenuações proveniente do meio de propagação, através da remoção da potência de transmissão, atenuações e ganhos do sistema, dado o gráfico da Figura 4.14. Aplicando uma linha de tendência aos valores médios foi obtido um valor de expoente de atenuação  $n$  de 4,47 e uma atenuação à distância de referência de 10 metros de 44,87 dB.

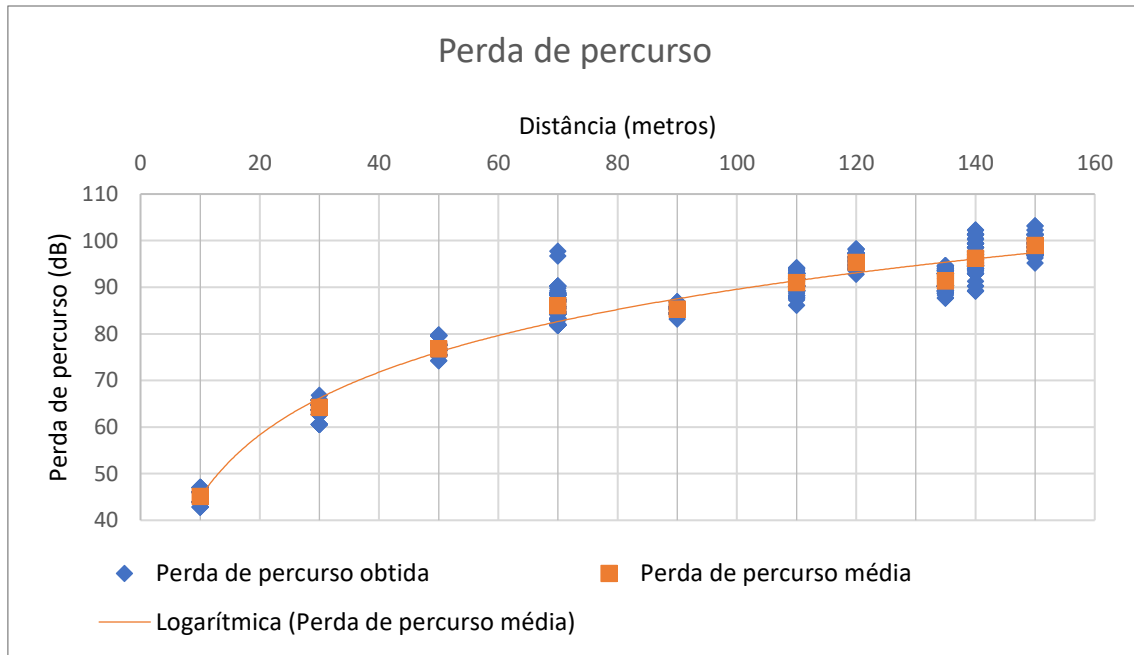


Figura 4.14 - Atenuação do sinal no segundo ensaio na vegetação.

O comportamento do SNR em função dos valores de RSSI e ESP, consta na Figura 4.15. À semelhança dos ensaios anteriores, verifica-se que os valores obtidos encontram-se bastante próximos do valor teórico ou superior, juntamente com estagnação do RSSI no limiar de ruído de -116 dBm e com a saturação do SNR não atingindo valores superiores a 10 dB.

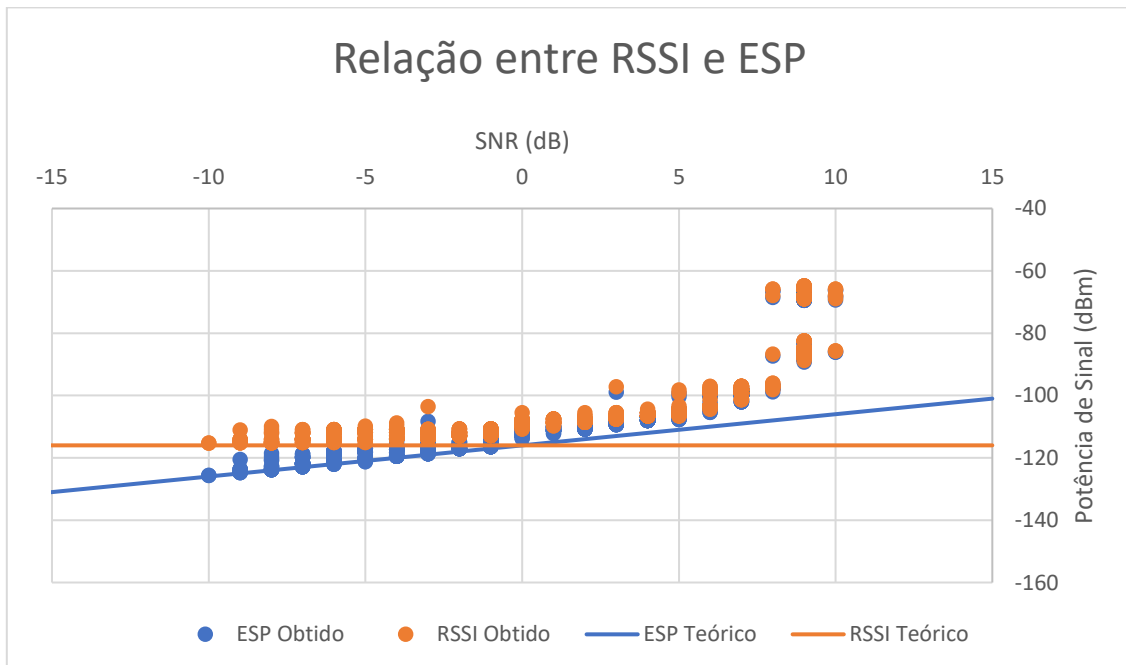


Figura 4.15 – Relação RSSI e ESP em função do SNR obtidos no segundo ensaio na vegetação.

## 4.4 Ensaios na Serra

No primeiro ensaio na serra, em que consistiu na aquisição dos parâmetros de qualidade da comunicação nos oito primeiros pontos em ambos os sentidos da comunicação, os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.8 para o canal ascendente e na Tabela 4.9 para o canal descendente.

Tabela 4.8 - Parâmetros de qualidade obtidos no primeiro ensaio na serra no canal ascendente.

	Distância (metros)	ESP recebido médio (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR médio (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
Ponto 1	3916	-85,53	1,16	9	0,81	99
Ponto 2	4076	-101,52	3,67	7	1,60	100
Ponto 3	4203	-116,96	3,99	-2	3,00	100
Ponto 4	4715	-122,29	4,95	-6	4,69	68
Ponto 5	5455	-124,73	2,74	-10	2,53	97
Ponto 6	5525	-124,19	2,78	-11	3,34	80
Ponto 7	6470	-131,56	1,06	-15	0,96	99
Ponto 8	7213					0

Tabela 4.9 - Parâmetros de qualidade obtidos no primeiro ensaio na serra no canal descendente.

	Distância (metros)	ESP recebido médio (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR médio (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
Ponto 1	3916	-87,54	1,64	7	0,77	99
Ponto 2	4076	-107,78	5,20	-2	3,84	99
Ponto 3	4203	-117,85	3,01	-11	2,98	85
Ponto 4	4715	-124,36	2,21	-15	2,06	70
Ponto 5	5455	-125,98	2,44	-17	1,99	40
Ponto 6	5525	-125,11	2,42	-16	2,19	49
Ponto 7	6470					0
Ponto 8	7213					0

Analisando os resultados obtidos, os valores de ESP medidos são semelhantes nos dois sentidos da comunicação, mas o comportamento não se verifica plenamente bidirecional visto que existem mais perdas de pacotes no canal descendente do que no canal ascendente. Esta comparação encontra-se na Figura 4.16. De realçar que a comunicação no canal descendente foi perdida por completo no ponto 7 e no canal ascendente a perda total da comunicação só foi atingida no ponto 8.



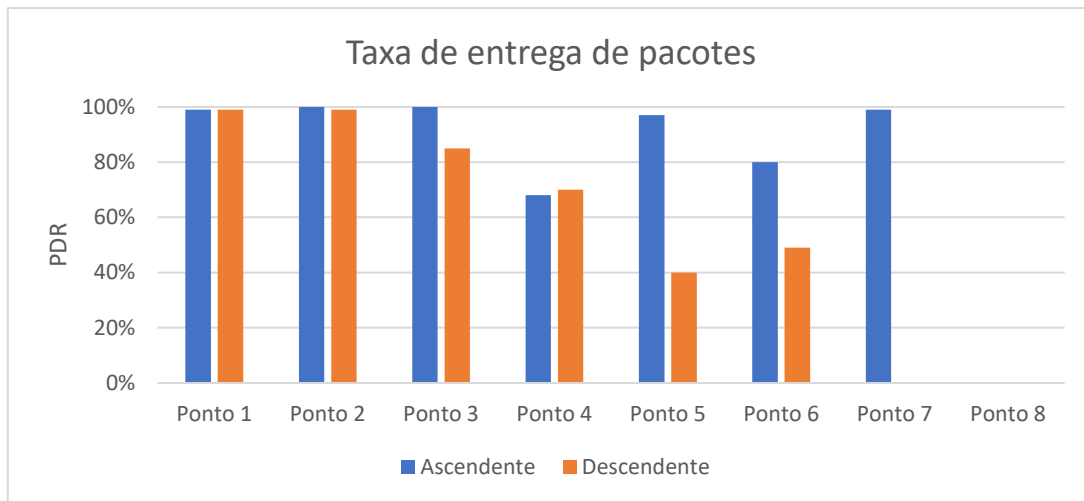


Figura 4.16 – Taxa de entrega de pacotes para o primeiro ensaio na serra.

O valor de PDR está associado com o limiar de sensibilidade do sistema para os parâmetros ESP e SNR, como verificado nos outros ensaios, mas em contrapartida as perdas de pacotes ocorreram para valores distantes da sensibilidade do ESP. Foi possível verificar que o valor de SNR médio adquirido num mesmo ponto é inferior para o canal descendente em comparação com o canal ascendente, como mostra na Figura 4.17, ou seja, limiar de sensibilidade do SNR foi mais rapidamente atingido no canal descendente do que no canal ascendente em função do aumento da distância.

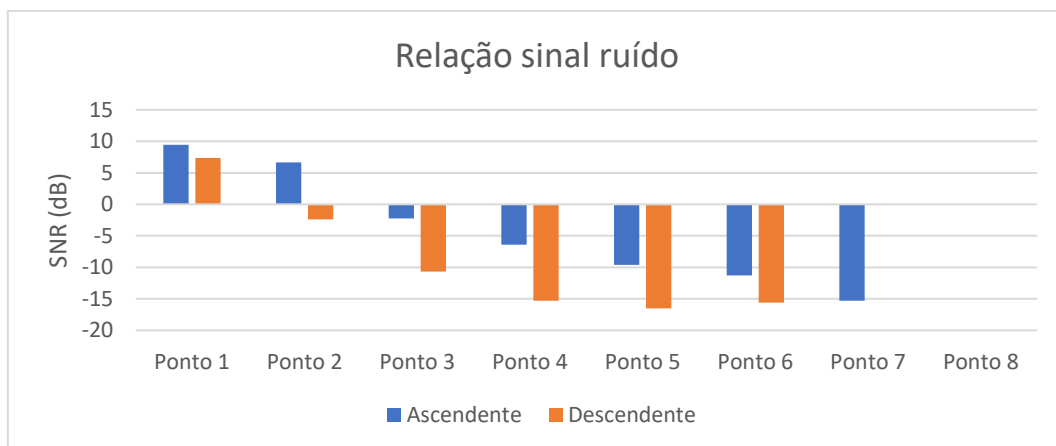


Figura 4.17 - Relação sinal ruído para o primeiro ensaio na serra.

Com o objetivo verificar o comportamento da atenuação imposta pelo meio, esta foi determinada através dos valores de ESP adquiridos, retirados a potência de transmissão, as atenuações e os ganhos do sistema, obtendo os gráficos da Figura 4.18 para o canal ascendente e da Figura 4.19 para o descendente em comparação com atenuação devido ao espaço livre.

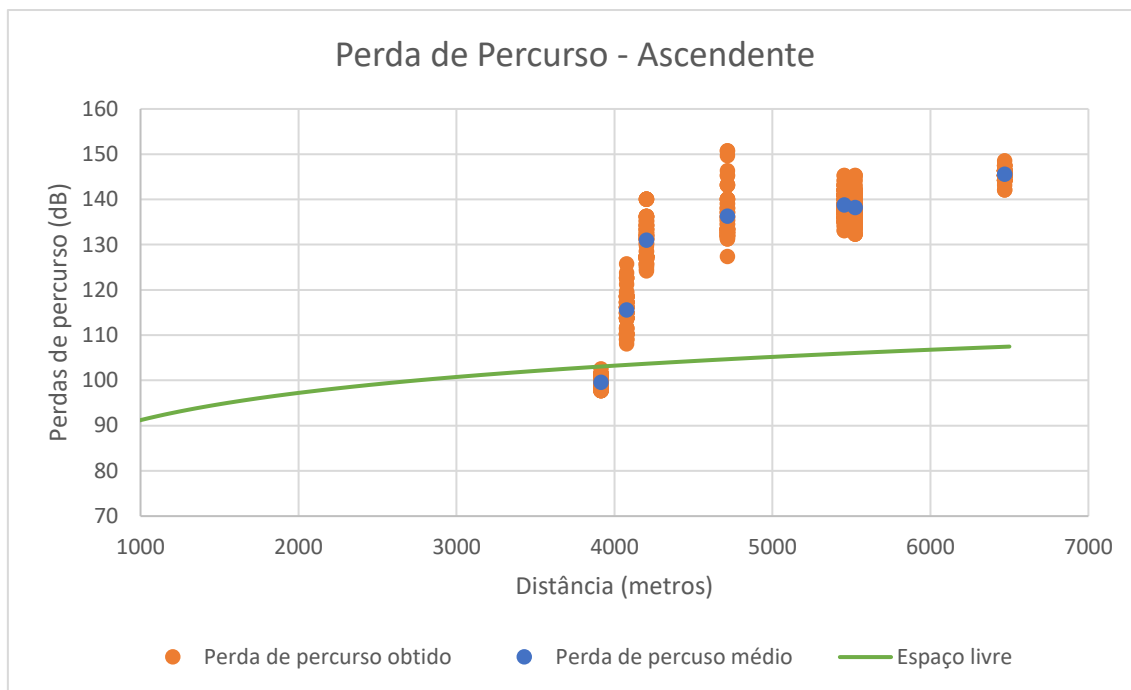


Figura 4.18 - Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre no primeiro ensaio na serra.

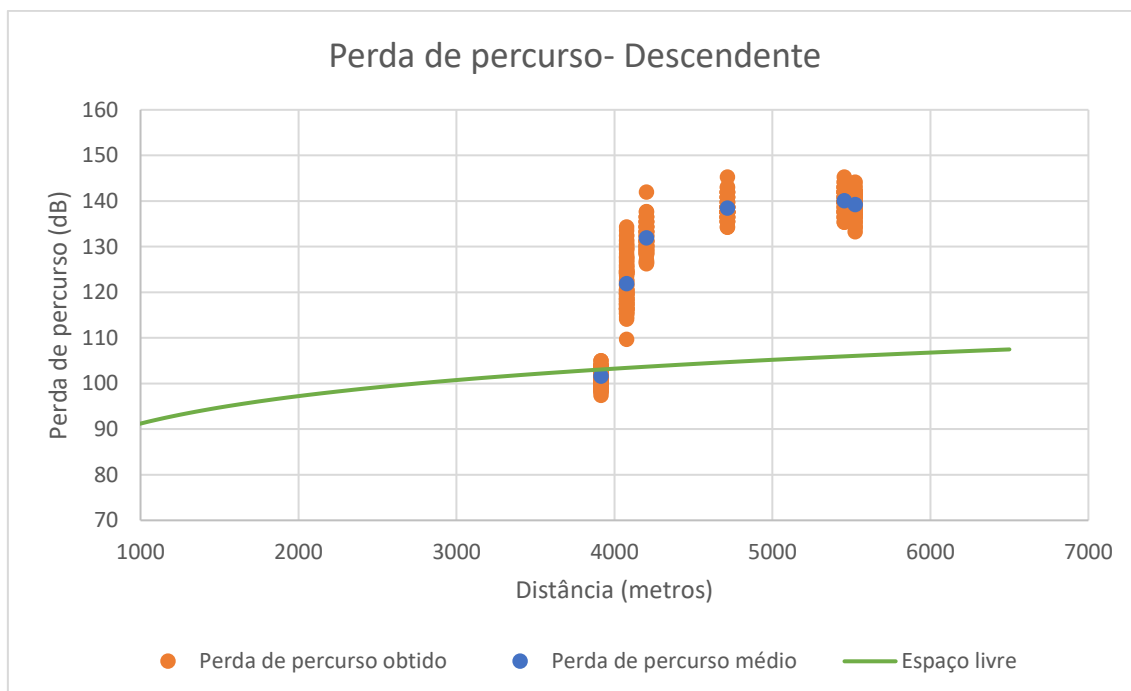


Figura 4.19 - Atenuação do sinal no canal descendente em comparação com a curva de espaço livre no primeiro ensaio na serra.

É possível comprovar que o ponto 1 encontra-se em condições de linha vista e, à medida que a distância aumenta, os valores tendem para um patamar superior de atenuação. Estes valores foram comparados com os estimados pelos modelos Okumura-Hata em ambiente aberto, COST 231 na sua vertente rural, SUI no tipo de terreno B, Ericsson em ambiente rural e o 3GPP rural em condições fora de linha de vista. Para os modelos foi tida em consideração o ambiente de propagação ao qual

se encontravam os pontos do ensaio, juntamente com os parâmetros adicionais apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Parâmetros dos modelos celulares utilizados.

Frequência	868,2 MHz
Altura emissor	30 metros
Altura recetor	3 metros
Altura média dos edifícios	10 metros
Comprimento médio das estradas	20 metros

A sobreposição dos modelos empíricos com as atenuações obtidas para os diferentes pontos pode ser comparadas através dos gráficos das Figura 4.20 e Figura 4.21 correspondentes ao canal ascendente e descendente respetivamente.

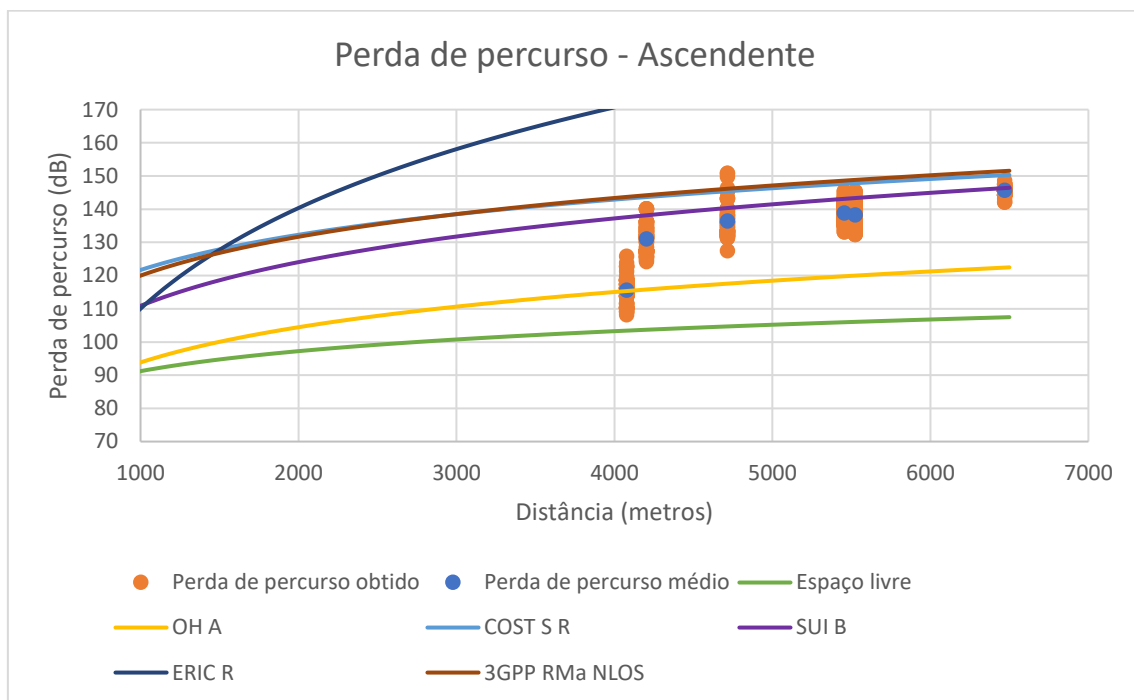


Figura 4.20 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no primeiro ensaio na serra no canal ascendente.

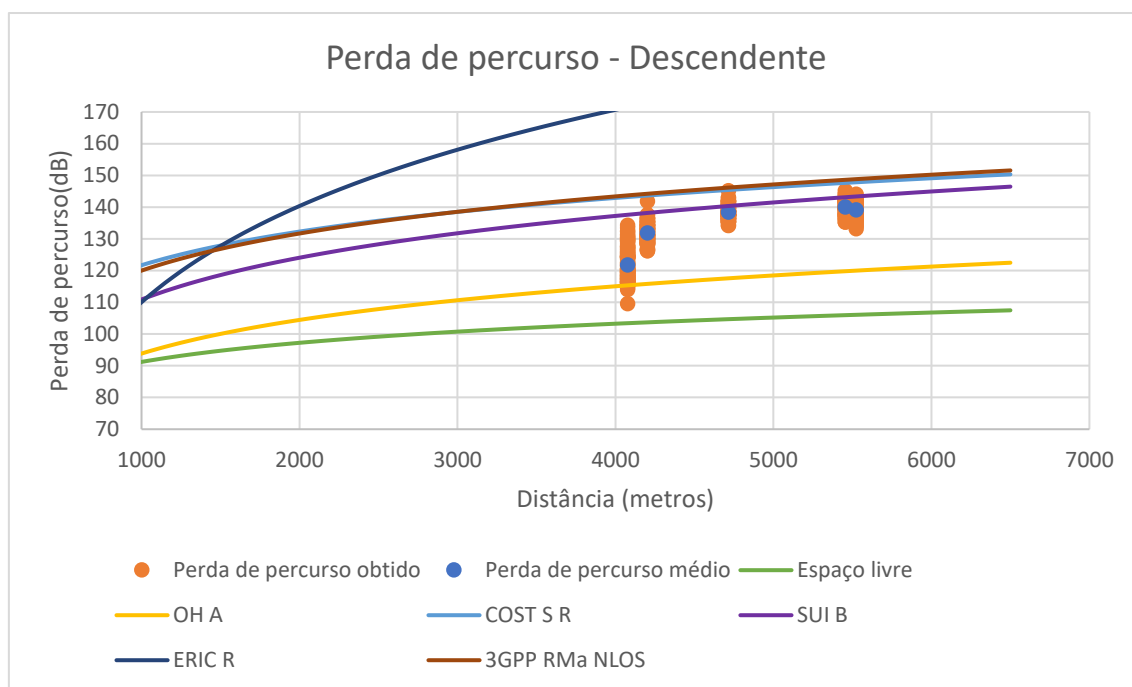


Figura 4.21 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no primeiro ensaio na serra no canal descendente.

Através destes resultados foi feita uma análise estática de modo a aferir o modelo com melhor aproximação aos resultados obtidos, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resultados estatísticos de aproximação dos modelos empíricos aos resultados obtidos no primeiro ensaio na serra.

	OH A	COST R	SUI B	ERIC R	3GPP RMa NLOS
Média ascendente	-15,79	12,05	7,21	46,23	12,89
Média descendente	-16,59	11,26	6,23	43,97	12,01
Desvio padrão ascendente	7,33	7,33	6,88	4,77	7,14
Desvio padrão descendente	5,30	5,30	4,96	3,61	5,15

Analisado os valores da média de estimação, o modelo Ericsson foi o que sobrestimou demasiado os resultados obtidos com valores superiores a 40 dB de média em ambos os canais. Em relação aos restantes modelos, destaca-se o modelo SUI a apresentar os melhores resultados.

Referente aos dados obtidos no segundo ensaio na serra, os parâmetros adquiridos pelo sistema de medição para o canal ascendente se encontram na Tabela 4.12 e para o descendente na Tabela 4.13.

Tabela 4.12 - Parâmetros de qualidade obtidos no segundo ensaio na serra no canal ascendente.

	Distância (metros)	ESP recebido médio (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR médio (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
<b>Ponto 9</b>	6077	-88,71	1,03	8	0,72	99
<b>Ponto 10</b>	6161	-91,96	1,04	8	0,69	100
<b>Ponto 11</b>	6222	-111,79	4,32	1	2,89	99
<b>Ponto 12</b>	6272	-95,28	0,96	5	0,92	95
<b>Ponto 13</b>	6389	-118,85	4,20	-5	3,26	100
<b>Ponto 14</b>	6505	-130,19	2,25	-14	2,06	72
<b>Ponto 15</b>	6603	-124,15	1,04	-8	0,89	100
<b>Ponto 16</b>	6703	-118,90	0,77	-4	0,65	100
<b>Ponto 17</b>	6871	-128,28	0,85	-12	0,79	96

Tabela 4.13 - Parâmetros de qualidade obtidos no segundo ensaio na serra no canal descendente.

	Distância (metros)	ESP recebido médio (dBm)	$\sigma_{ESP}$ (dB)	SNR médio (dB)	$\sigma_{SNR}$ (dB)	PDR (%)
<b>Ponto 9</b>	6077	-89,40	1,10	7	1,42	98
<b>Ponto 10</b>	6161	-92,59	1,50	7	1,35	100
<b>Ponto 11</b>	6222	-110,61	2,97	-4	3,30	97
<b>Ponto 12</b>	6272	-96,16	1,15	4	1,24	98
<b>Ponto 13</b>	6389	-115,76	1,57	-7	1,55	94
<b>Ponto 14</b>	6505	-126,31	1,91	-17	1,44	49
<b>Ponto 15</b>	6603	-126,26	0,91	-17	1,16	78
<b>Ponto 16</b>	6703	-120,39	1,20	-12	1,55	96
<b>Ponto 17</b>	6871	-130,61	0,78	-19	0,86	16

À semelhança dos resultados adquiridos no primeiro ensaio, os valores de ESP são bastante semelhantes em ambos os canais, mas a comunicação não pode ser considerada como bidirecional visto existir maior perda de pacotes no canal descendente do que no canal ascendente, como mostra a Figura 4.22.

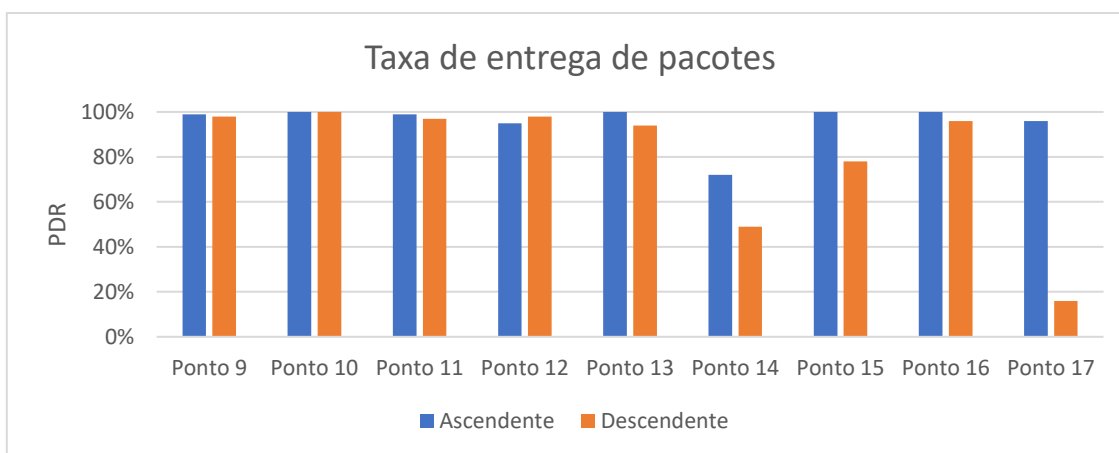


Figura 4.22 - Taxa de entrega de pacotes para o segundo ensaio na serra.

De realçar que foi possível efetuar comunicação até ao ponto 17, equivalente a uma distância de comunicação de 6871 metros, sem condições de linha vista, apesar da baixa taxa de entrega de pacotes no canal descendente.

À semelhança do primeiro ensaio, o SNR do canal ascendente obteve valores superiores ao do descendente para o mesmo ponto de medição, resultando numa perda de pacotes desnivelada entre os canais, como mostra a Figura 4.23, visto o limiar de sensibilidade do sistema do SNR ser mais rapidamente atingido no canal descendente em função da distância.

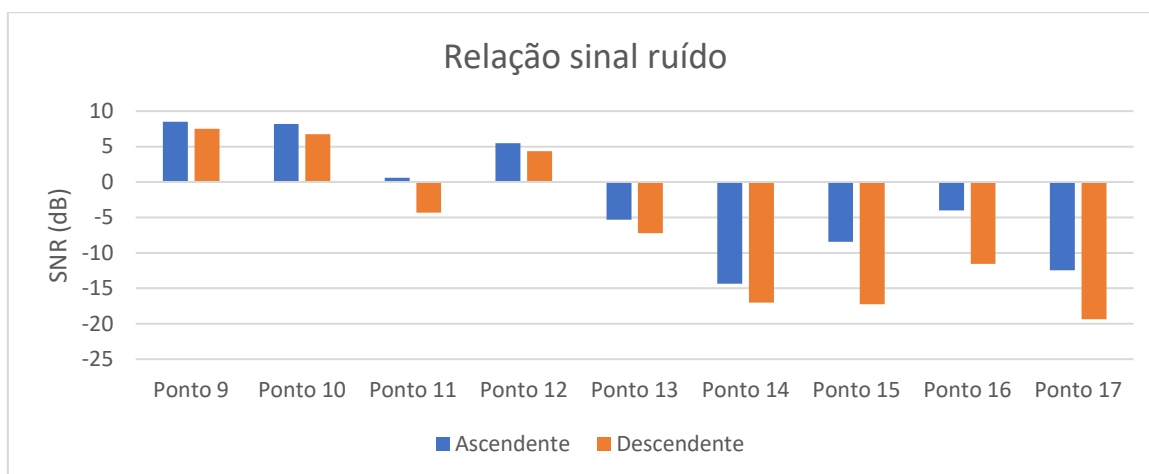


Figura 4.23 - Relação sinal ruído para o segundo ensaio na serra.

De forma a avaliar a atenuação introduzida pelo meio de propagação, foi necessário determinar a atenuação através dos valores de ESP recolhidos e dos parâmetros do sistema, obtendo-se os gráficos da Figura 4.24 para o canal ascendente e da Figura 4.25 para o descendente em comparação com a atenuação devido ao espaço livre.

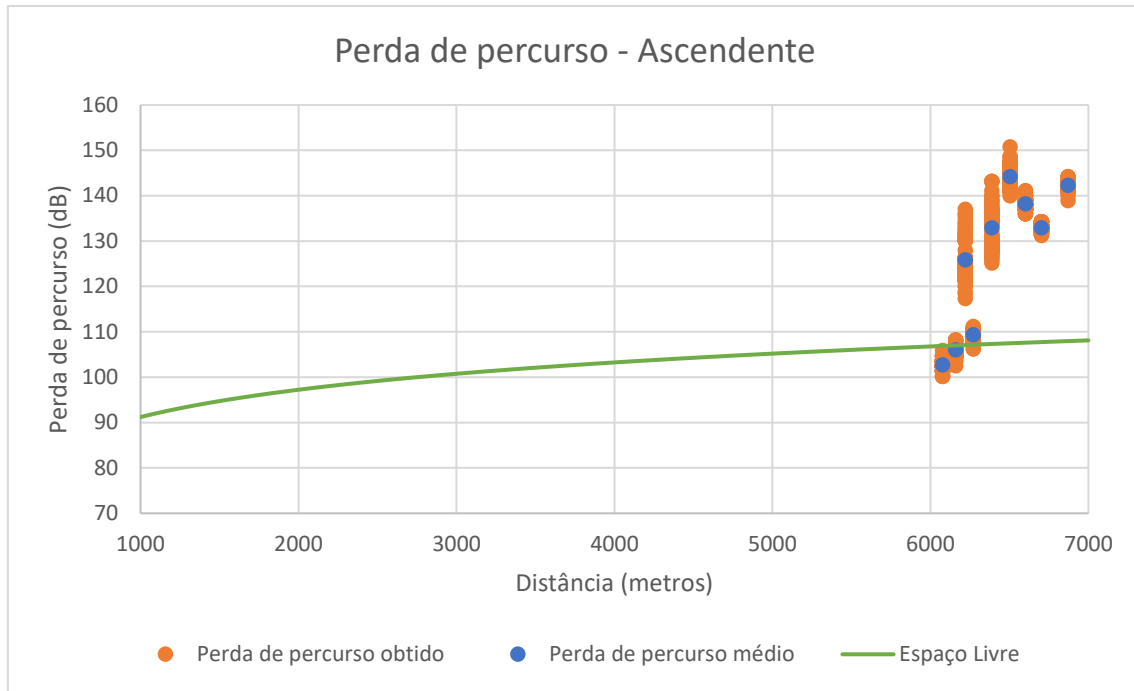


Figura 4.24 - Atenuação do sinal no canal ascendente em comparação com a curva de espaço livre no segundo ensaio na serra.

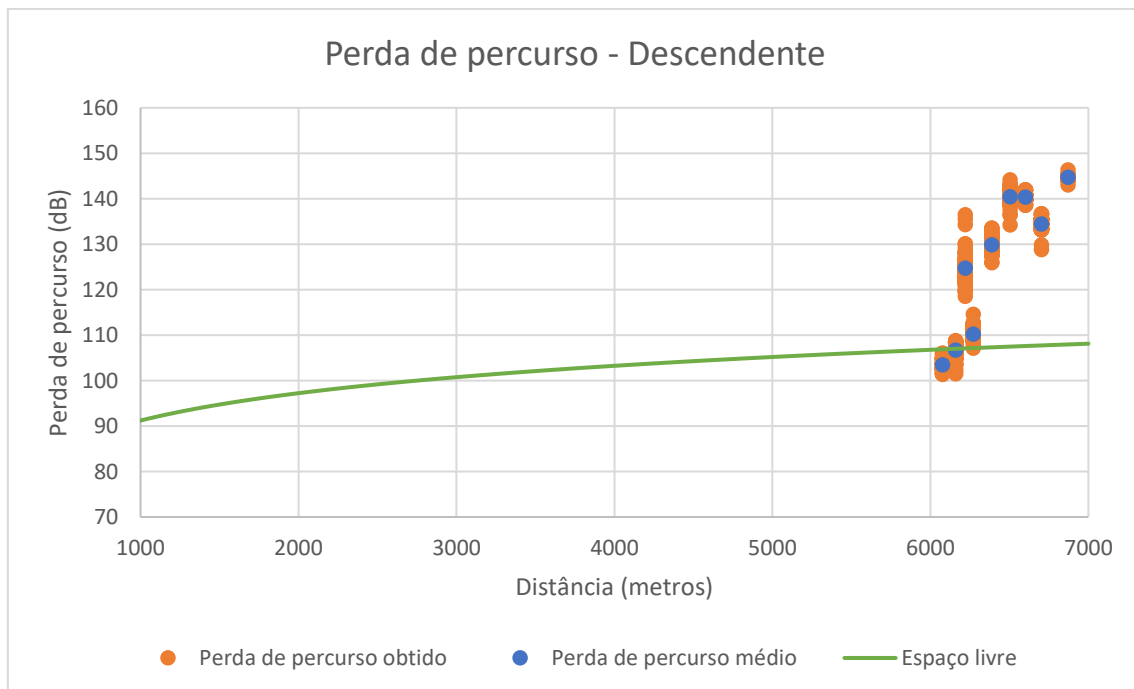


Figura 4.25 - Atenuação do sinal no canal descendente em comparação com a curva de espaço livre no segundo ensaio na serra.

Os pontos um, dois e quatro encontra-se em linha de vista. À medida que a distância aumenta, os valores tendem para um patamar superior de atenuação. Mas é de salientar que o ponto três, apesar de se encontrar intermédio de dois pontos de linha de vista, não tinha esta condição devido à orografia do terreno nessa zona. Estes pontos foram comparados com os modelos empíricos analisados anteriormente nas suas vertentes rurais e no modelo SUI com o tipo de terreno C,

## Capítulo 4 - Resultados

cujos parâmetros dos modelos se mantiveram idênticos aos da Tabela 4.10. As sobreposições das atenuações obtidas em comparação com os modelos empíricos encontram-se nas Figura 4.26 para o canal ascendente e Figura 4.27 para o descendente.

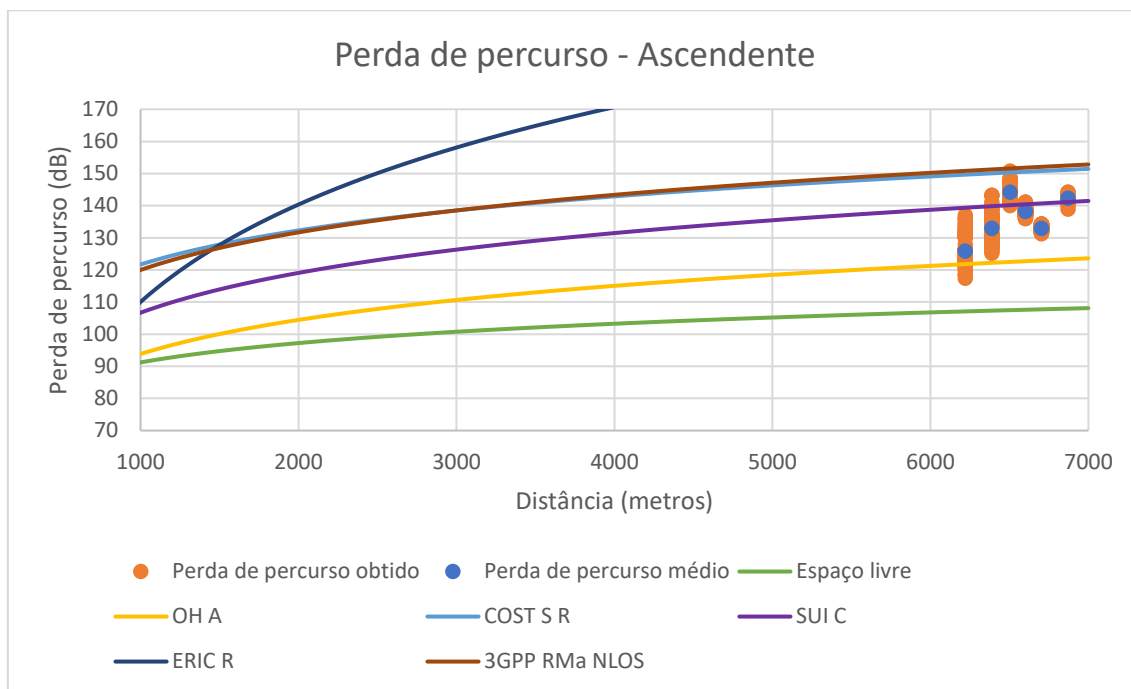


Figura 4.26 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no segundo ensaio na serra no canal ascendente.

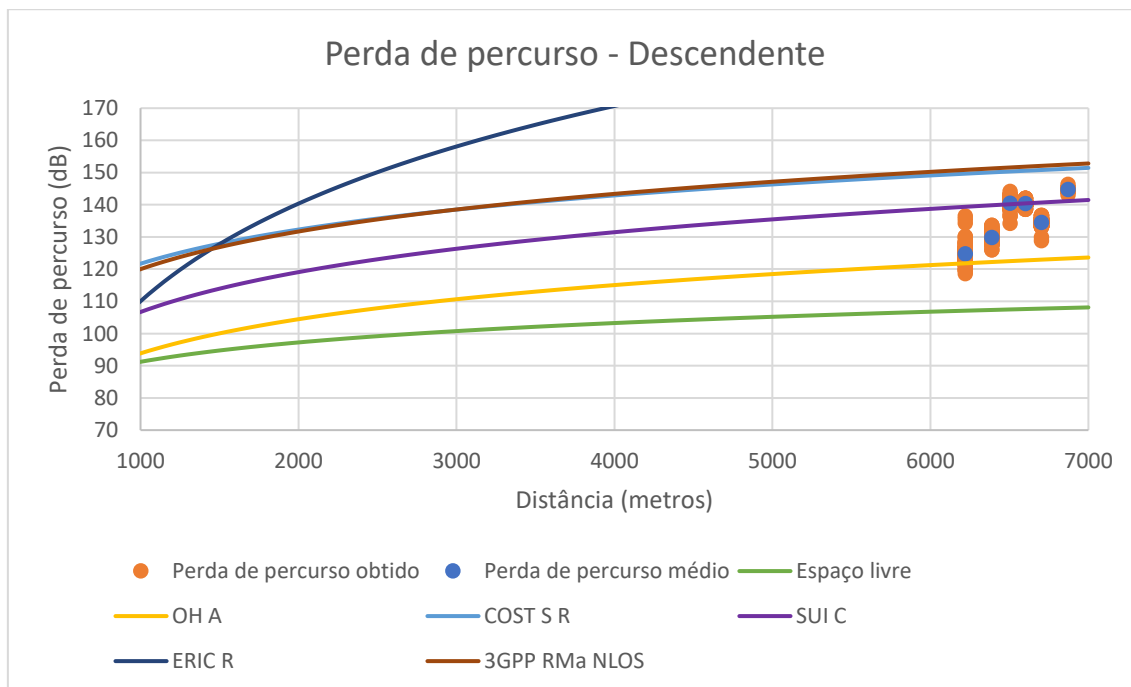


Figura 4.27 – Perda de percurso dos modelos empíricos e da atenuação obtida no segundo ensaio na serra no canal descendente.

Analisando as atenuações médias em comparação com os valores dos modelos é possível efetuar análise estatística dos resultados. A Tabela 4.14



apresenta os resultados obtidos para a média de estimação e o desvio padrão de estimação.

Tabela 4.14 - Resultados estatísticos de aproximação dos modelos empíricos aos resultados obtidos no segundo ensaio na serra.

	OH A	COST R	SUI C	ERIC R	3GPP RMa NLOS
Média ascendente	-13,51	14,34	4,18	56,14	15,59
Média descendente	-13,14	14,71	4,55	56,50	15,96
Desvio padrão ascendente	5,95	5,95	5,90	5,44	5,92
Desvio padrão descendente	6,44	6,44	6,37	5,71	6,40

O modelo Ericsson sobrestimou os resultados, com a média de estimação a rondar os 56 dB para ambos os canais. Por outro lado, o modelo SUI, à semelhança dos resultados obtidos no primeiro ensaio, obteve o melhor resultado.

## 4.5 Estação meteorológica

Os dados da estação meteorológica foram recolhidos durante um período de quinze dias, iniciando-se a 23 de dezembro de 2022. Estes foram comparados com duas estações meteorológicas do IPMA mais próximas: Quinta Grande situada a uma altura de 580 metros e com a distância da estação implementada na Ribeira da Alforra de cerca de 2620 metros; Lido situada a uma altura de 25 metros e distanciada da estação implementada de 5450 metros [48].

Comparando os dados da estação implementada com as outras duas, o resultado obtido para a precipitação, pode-se observar na Figura 4.28. É possível verificar que as deteções da precipitação ocorreram nas mesmas datas à exceção de alguns dias ao qual não foi detetado pela estação implementada, sendo um possível fator a distância entre elas.

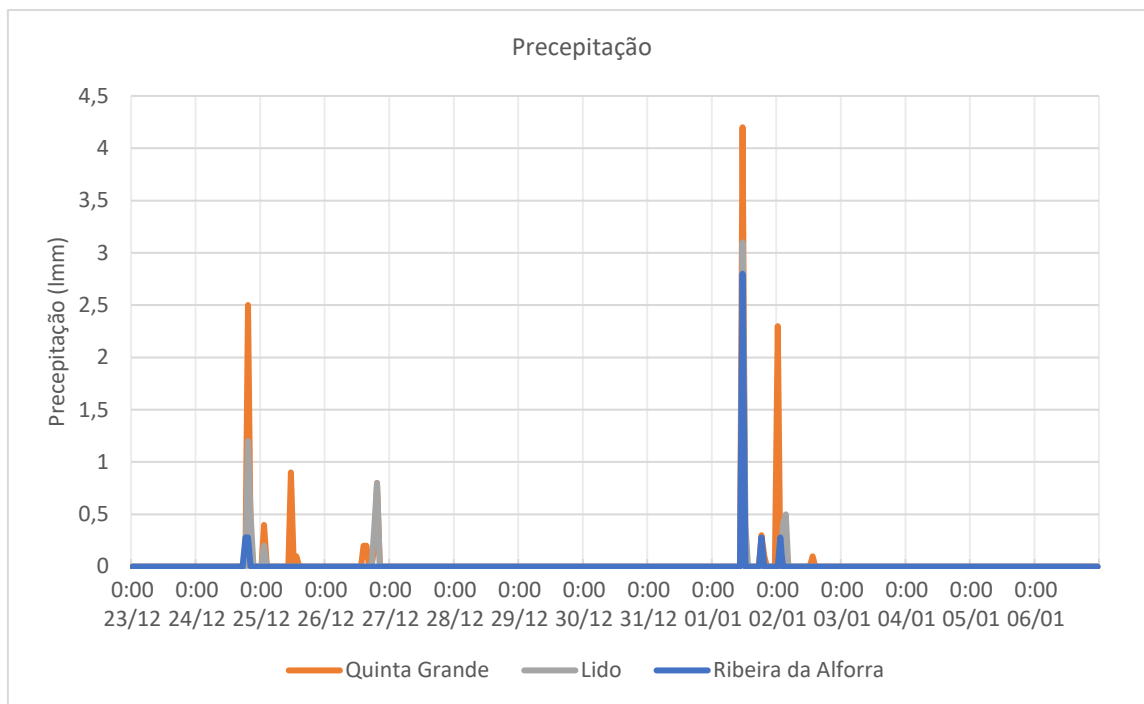


Figura 4.28 – Dados de precipitação recolhidos pelas três estações meteorológicas.

As temperaturas recolhidas das três estações em estudo estão representadas na Figura 4.29, onde é possível observar as diferenças de valores que acompanham uma tendência ao longo dos dias. As temperaturas do Lido encontram-se num patamar superior às da Quinta Grande e num patamar intermédio às da Ribeira da Alforra.

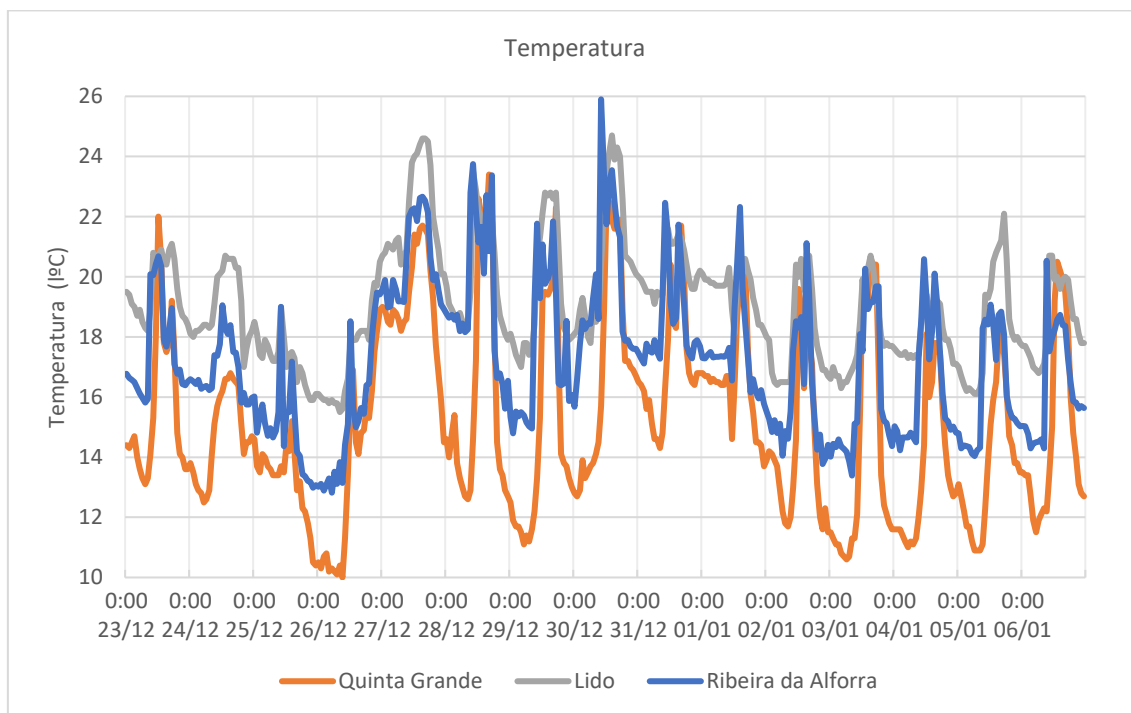


Figura 4.29 – Dados de temperatura recolhidos pelas três estações meteorológicas.

As humidades relativas do ar registadas pelas três estações seguem uma tendência de sobreposição ao longo do período de estudo, como é possível observar na Figura 4.30.

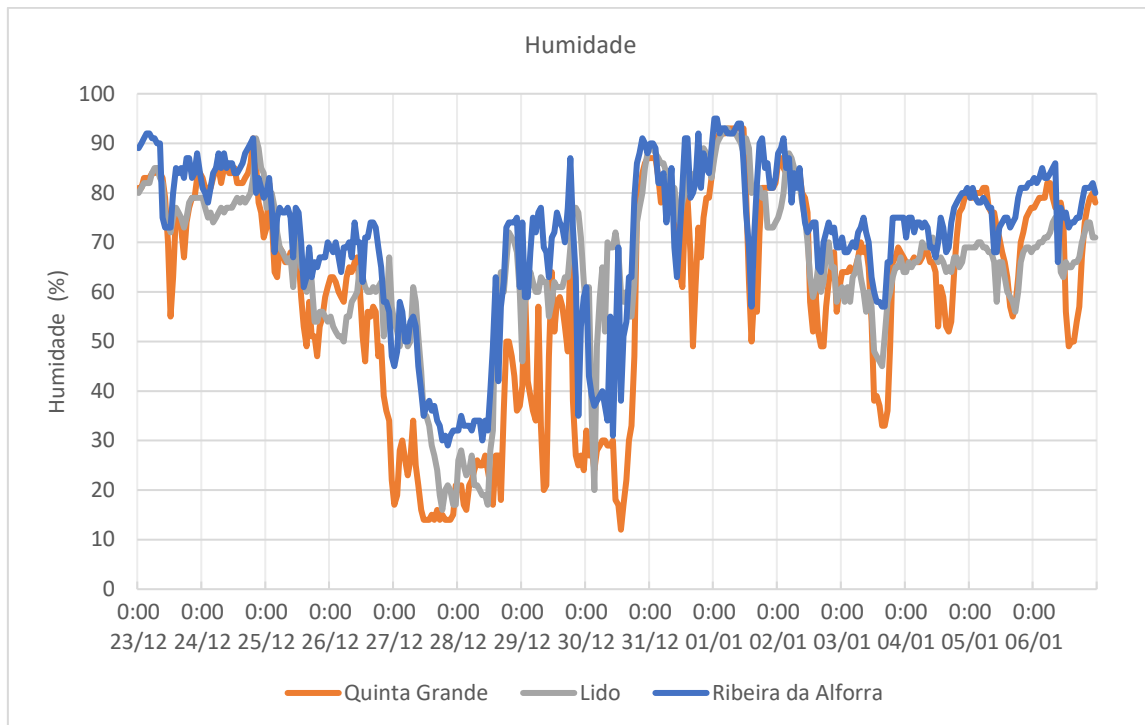


Figura 4.30 - Dados de humidade relativa do ar recolhidos pelas três estações meteorológicas

Na estação meteorológica da Quinta Grande não é efetuado o registo da velocidade do vento, de modo que apenas foi feita a comparação com a do Lido. O gráfico resultante encontra-se na Figura 4.31, como era de esperar devido à diferença de altitude entre elas, a estação da Ribeira da Alforra apresenta valores muito superiores devido à sua localização ser mais elevada. No anexo H encontra-se o gráfico dos valores obtidos para as rajadas em comparação com a velocidade média do vento.

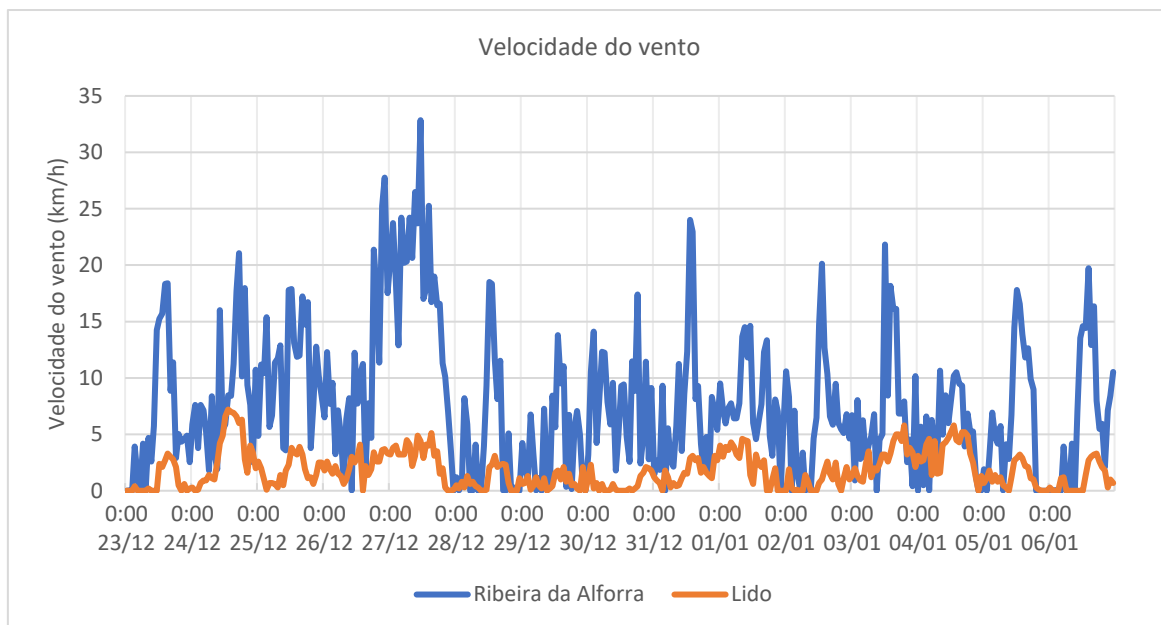


Figura 4.31 - Dados de velocidade do vento média recolhidos pelas estações meteorológicas da Ribeira da Alforra e do Lido.

Durante o período de estudo, existiu uma tendência de o vento provir das direções de Noroeste e de Norte na estação implementada, em que o gráfico referente à percentagem obtida para os diferentes pontos cardiais encontra-se na Figura 4.32.

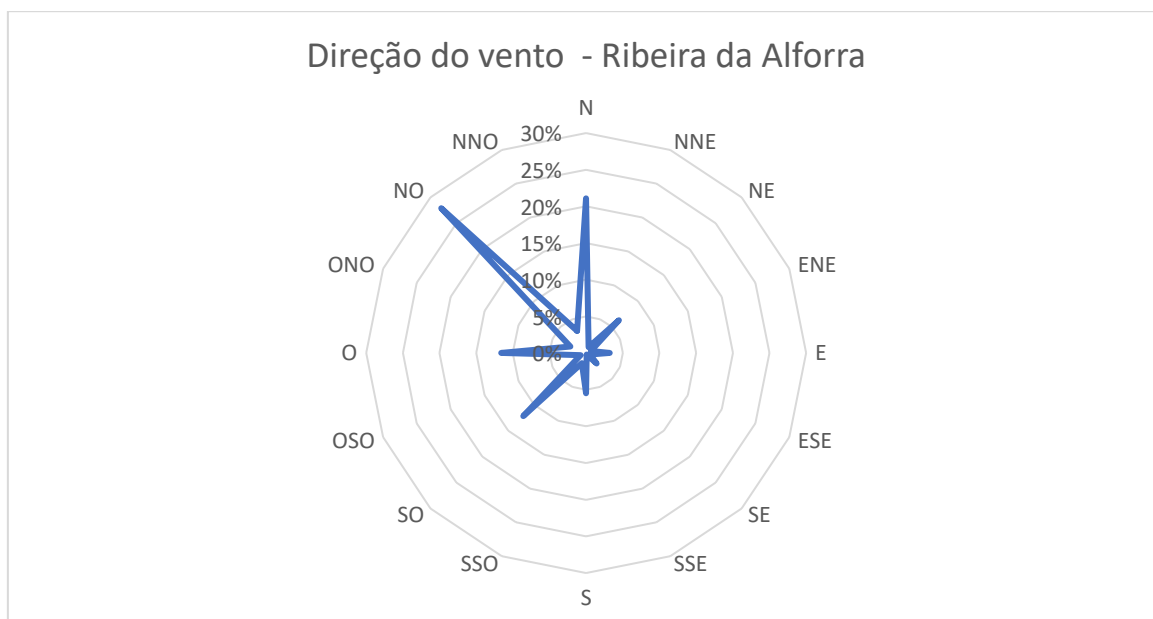


Figura 4.32 – Percentagem média das direções do vento na estação meteorológica da Ribeira da Alforra.

Na estação implementada foi colocado um sensor de pressão atmosférica, obtendo-se os dados do gráfico da Figura 4.33.

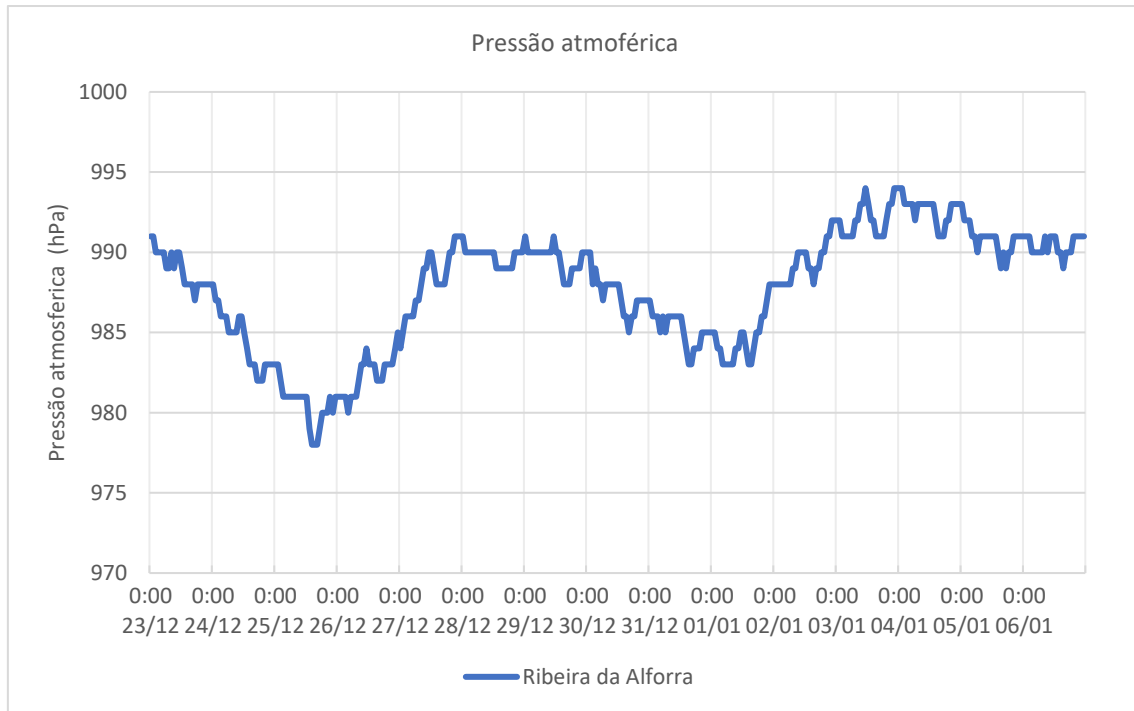


Figura 4.33 – Dados da pressão atmosférica recolhidos da estação meteorológica implementada.

Os níveis de luminosidade captada ao longo do período de estudo na estação implementada estão representados na Figura 4.34, em que é possível observar os dias em que os níveis de luminosidade foram menores devido à nebulosidade.

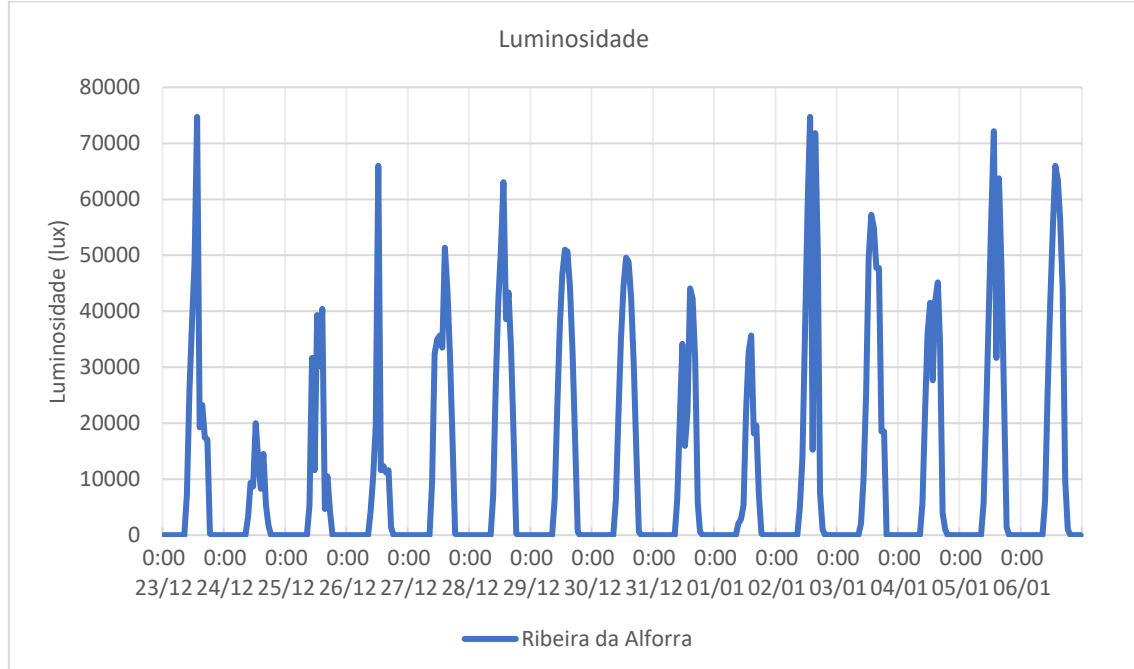


Figura 4.34 - Dados da Luminosidade recolhidos da estação meteorológica implementada.

A ligação estabelecida entre estação meteorológica e a *gateway* foi obtido um valor médio de ESP de -96,2 dBm e um desvio padrão de 1,33 dB. O comportamento do SNR encontra-se ilustrado na Figura 4.35, o valor médio obtido foi 9,15 dB, com um desvio padrão de 0,58 dB.

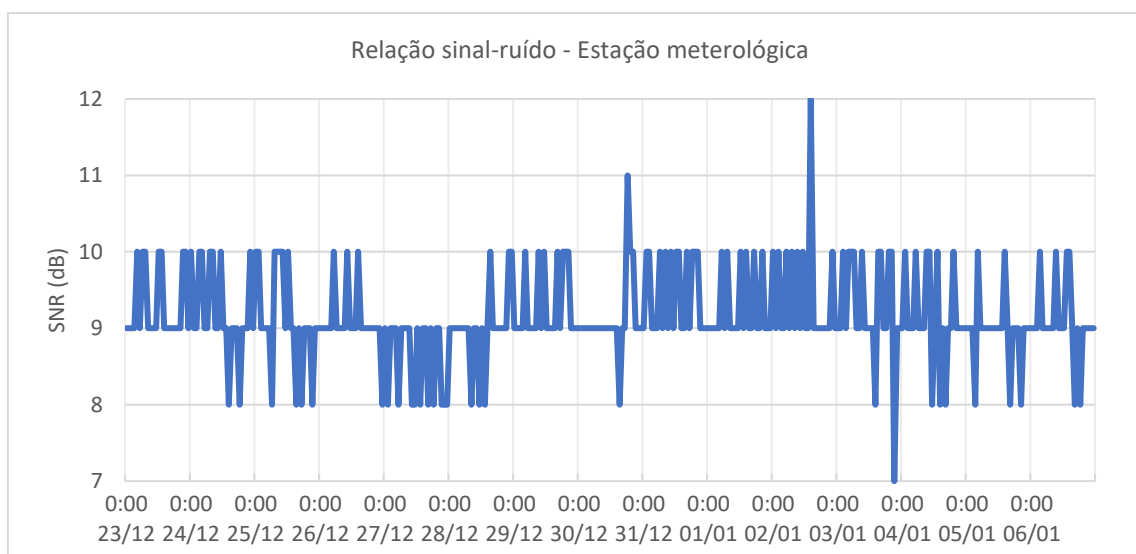


Figura 4.35 – Dados obtidos da relação sinal-ruído durante o período de estudo.

Devido a estes valores estarem numa gama distante da sensibilidade promoveu uma taxa de entrega de pacotes de 100%. De forma a determinar a atenuação induzida pelo meio de propagação, sabendo que o ERP (*effective radiated power*) da estação meteorológica é de 13,7 dBm e o conjunto da antena recetora e do respetivo cabo correspondem a uma atenuação de 1,36 dB, originando uma perda de percurso média de 108,54 dB, foi obtido um valor 15,75 dB superior á atenuação em espaço livre ilustrado na Figura 4.36, um possível fator poderá ser os edifícios nas proximidades dos sistemas que contribuem para obstrução do primeiro elipsoide de Fresnel. A variação da potência recebida foi mais pequena devido ao facto de nos estudos de propagação a antena recetora era propositalmente oscilada, enquanto neste sistema as antenas estavam paradas.

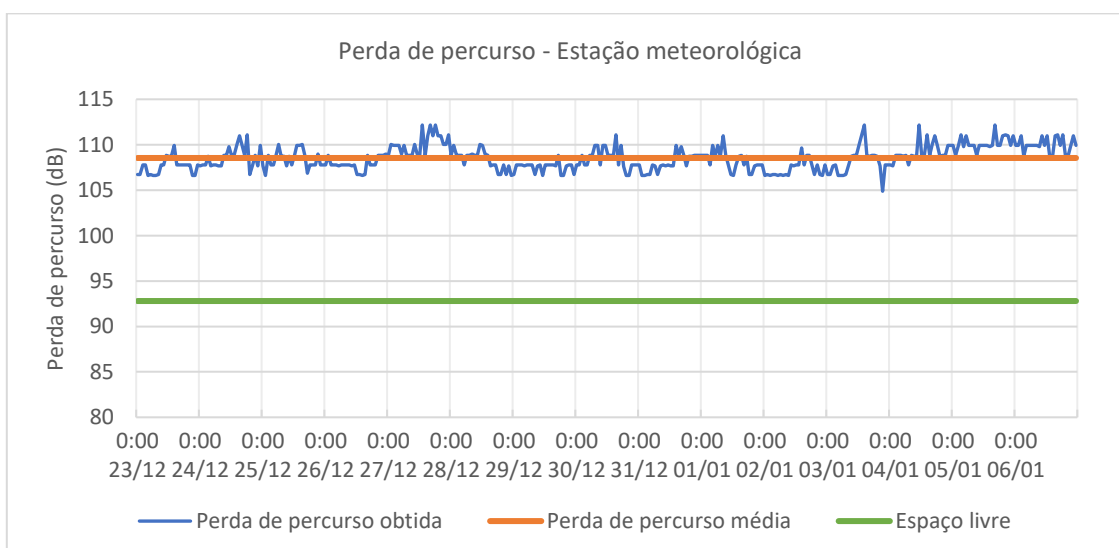


Figura 4.36 – Perdas de percurso durante o período de estudo da estação meteorológica

## Capítulo 5 - Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas com a realização deste projeto, assim como algumas sugestões de trabalhos futuros que podem ser realizados a partir deste trabalho.

### 5.1 Conclusões

Com a contribuição desta dissertação demonstrou-se as capacidades do sistema LoRa como tecnologia a ser usada para a recolha e transmissão de parâmetros meteorológicos, através de ensaios de propagação concretos em diferentes ambientes. Na análise do estado da arte foram estudados os modelos de propagação que têm sido aplicados ao sistema LoRa.

Para avaliar o comportamento da atenuação do sinal no sistema LoRa foram efetuados quatro ensaios. O primeiro teve como objetivo a aproximação da atenuação para um obstáculo do tipo ponta de faca. Em termos práticos para o ensaio foi usada uma colina, como obstáculo equivalente para averiguar a aproximação ao modelo teórico. Em termos de potência esperada e recebida foram obtidos valores de média de erro de estimação inferiores a 4 dB, juntamente com uma relação de que os valores de ESP e SNR quando próximos do limiar de sensibilidade, estão associados à taxa de perda de pacotes.

No ensaio da propagação em linha vista, caso as condições do elipsoide de Fresnel se encontre desobstruído, a atenuação do sinal segue a tendência do comportamento em espaço livre, com a obtenção de um expoente de atenuação bastante próximo do esperado. Foi, também, aferido que, com a diminuição da potência de transmissão se obtém uma atenuação quase proporcional com a potência de sinal recebida, obtendo um erro médio de 1,63 dB.

Referente aos ensaios na vegetação, nas duas passagens, que diferem no SF usado e na gama de potência de sinal transmitido, foi obtido o mesmo comportamento de perda de percurso no meio para as duas passagens. Em termos estatísticos dos resultados obtidos em comparação com os modelos em ambientes de vegetação aplicáveis ao LoRa, os modelos Chen and Kuo e o ITU-R, apresentaram as melhores aproximações. Foi aferido que o comportamento do PDR está relacionado com a aproximação dos valores limiares de ESP e SNR. De realçar a obtenção de um comportamento bidirecional neste ambiente.

Nos ensaios na serra foram obtidas novas informações sobre o comportamento da atenuação do sinal, de se destacar o comportamento não bidirecional verificado, visto a perda de pacotes ser superior no canal descendente, cujo parâmetro que melhor indicou este desnível foi o SNR. De referir que nos modelos celulares aplicados ao sistema LoRa, em termos estáticos se destaca o modelo SUI, que obteve a melhor aproximação aos resultados obtidos para os dois percursos. De salientar que foi possível efetuar comunicação em ambos canais para distâncias superiores a 6 km, sem a condição de linha de vista.

O sistema LoRa, apesar das suas limitações legais de *duty cycle* e ERP impostas pela entidade reguladora, para aplicações de baixa transmissão de dados, como é o caso da utilização para sistemas de monitorização ambiental, torna-se uma alternativa viável aos sistemas convencionais, justificado pela elevada distância de comunicação. Os estudos realizados em várias localizações e em diferentes cenários de propagação demonstrou a viabilidade da utilização desta tecnologia de longo alcance e baixo consumo energético.

O teste do sistema de monitorização mostrou a recolha de dados meteorológicos a 1,2 km de distância sem perda de pacotes, com uma flutuação da potência recebida de  $\pm 3$  dB, estando 26,8 dB acima da sensibilidade no modo SF mais baixo.

### 5.2 Trabalhos futuros

No âmbito do estudo da propagação, tem-se como proposta de trabalho futuro a ponderação da utilização de antenas diretivas em vez de omnidirecionais de modo a averiguar se melhora o desempenho do sistema LoRa.

Também é de verificar se o efeito da variação da temperatura no funcionamento dos rádios LoRa, tem alguma influência direta com a variação de parâmetros de qualidade da ligação obtidos, ou seja, por exemplo temperaturas mais elevadas dos rádios podem corresponder a menor potência de sinal transmitida e captada.

No âmbito da estação meteorológica implementada, propõe-se a adição de novos sensores, de modo a obter uma maior panóplia de parâmetros meteorológicos, como por exemplo um sensor de deteção de precipitação em conjunto com o melhor aproveitamento do *duty cycle* de modo a obter maior quantidade de dados. Também se propõe o melhoramento da *gateway* ao qual seria adicionada uma base de dados, que poderia ser acedida através da internet.



## Referências

- [1] Semtech Corporation, “LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview,” 2019.
- [2] ANACOM, “ISENÇÃO DE LICENÇA DE ESTAÇÃO,” ANACOM, 6 dezembro 2021. [Online]. Available: [https://www.anacom.pt/streaming/IsencaoLicencaDeEstacao\\_Rev06122021.pdf?contentId=1188499&field=ATTACHED\\_FILE](https://www.anacom.pt/streaming/IsencaoLicencaDeEstacao_Rev06122021.pdf?contentId=1188499&field=ATTACHED_FILE). [Acedido em outubro 2022].
- [3] J. N. F. Pereira, “Recolha de Dados numa Rede de Sensores em Ambiente Urbano,” *PROJETO DE MESTRADO*, fevereiro 2020.
- [4] Semtech, “RSSI and SNR for LoRa® modulation on STM32WL Series,” 2021.
- [5] HOPERF ELECTRONIC, “RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module,” *Datasheet*, pp. 1-121.
- [6] 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.
- [7] A. L. Reis, “Análise Comparativa dos Modelos Empíricos de Propagação Aplicados a Sistemas Móveis Celulares,” *Dissertação*, dezembro 2018.
- [8] G. E. Athanasiadou, “Incorporating the Fresnel Zone Theory in Ray Tracing for Propagation Modelling of Fixed Wireless Access Channels,” *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-5, 3 dezembro 2007.
- [9] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Nova Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [10] P. S. V. Hum, *Radio and Microwave Wireless Systems*, 2006.
- [11] S. Chakraborty e S. Sen, “Qualitative analysis on Log-Normal Indoor Propagation Model for WLAN,” *Journal of Computer Science and Technology*, pp. 120-121, 1 janeiro 2014.
- [12] N. A. M. Razali, M. H. Habaebi, N. F. B. Zulkurnain, M. R. Islam e A.-H. Zyoud, “The Distribution of Path Loss Exponent in 3D Indoor Environment,” *International Journal of Applied Engineering Research*, pp. 7154-7161, 1 outubro 2017.
- [13] M. Viswanathan, *Wireless Communication Systems in Matlab*, India: Varsha Srinivasan, 2020.
- [14] S. Ozuomba, E. H. J. e E. N. Udoiwod, “Application of Weissberger Model for Characterizing the Propagation Loss in a Gliricidia sepium Arboretum,” *Universal Journal of Communications and Network*, vol. 6, nº 2, pp. 18-23, 2018.
- [15] Y. S. Meng, “Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1461-1468, 1 maio 2009.
- [16] H.-Y. Chen e Y.-Y. Kuo, “Calculation of radio loss in forest environments by an empirical formula,” *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 474-480, 26 outubro 2001.

## Referências

- [17] A. Barrios-Ulloa, P. P. Ariza-Colpas, H. Sánchez-Moreno, A. P. Quintero-Linero e E. D. I. Hoz-Franco, "Modeling Radio Wave Propagation for Wireless Sensor Networks in Vegetated Environments: A Systematic Literature Review," *Sensors (Basel)*, pp. 1-28, 15 julho 2022.
- [18] E. Harinda, S. Hosseinzadeh, H. Larijani e R. M. Gibson, "Comparative Performance Analysis of Empirical Propagation Models for LoRaWAN 868MHz in an Urban Scenario," *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 154-159, 15 abril 2019.
- [19] U. E. Uyoata, "LoRa Network Planning Using Empirical Path Loss Models," *IEEE NIGERCON*, Nigeria, 2022.
- [20] V. Abhayawardhana, I. Wassell, D. Crosby, M. Sellars e M. Brown, "Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems," *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, pp. 73-77, 2005.
- [21] M. Stusek, "Accuracy Assessment and Cross-Validation of LPWAN Propagation Models in Urban Scenarios," *IEEE Access*, pp. 154625 - 154636, 12 agosto 2020.
- [22] 3GPP, "Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects," *3GPP TR 36.814*, pp. 1-104, março 2010.
- [23] M. R. Ansah, R. A. Sowah, J. Melià-Seguí, F. A. Katsriku, X. Vilajosana e W. O. Banahene, "Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment," *IET Wireless Sensor Systems*, pp. 198-207, 1 outubro 2020.
- [24] E. Harinda, S. Hosseinzadeh, H. Larijani e R. M. Gibson, "Comparative Performance Analysis of Empirical Propagation Models for LoRaWAN 868MHz in an Urban Scenario," *IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 154-159, 22 julho 2019.
- [25] R. E. Chall, S. Lahoud e M. E. Helou, "LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon," *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, vol. VI, nº 2, pp. 2366-2378, 2019.
- [26] O. Dieng, C. Pham e O. Thiare, "Comparing and Adapting Propagation Models for LoRa Networks," *16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 1-7, 13 novembro 2020.
- [27] S. W. Smith, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California: California Technical Publishing, 1999.
- [28] Antenna Technologies Limited Company, "PRODUCTS CATALOG," [Online]. Available: <https://atlcllc.com/wp-content/uploads/2020/04/2020-Catalog.pdf>. [Acedido em janeiro 2023].
- [29] seeed studio, "2.8dBi Long Range Antenna - SMA male - 868MHz - 195mm," [Online]. Available: <https://www.seeedstudio.com/External-Antenna-868MHz-L195mm-black-folding-antenna-With-Male-SMA-J-p-5045.html>. [Acedido em janeiro 2023].

- [30] pycom, “Sigfox/LoRa Antenna Kit,” [Online]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/2574252.pdf>.
- [31] Dragino, “Lora Shield,” Dragino, [Online]. Available: [https://wiki1.dragino.com/index.php?title=Lora\\_Shield](https://wiki1.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield). [Acedido em janeiro 2023].
- [32] adafruit, “Adafruit RFM95W LoRa Radio Transceiver Breakout - 868 or 915 MHz - RadioFruit,” [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/3072>. [Acedido em janeiro 2023].
- [33] adafruit, “Adafruit Ultimate GPS Breakout - 66 channel w/10 Hz updates - PA1616S,” [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/746>. [Acedido em janeiro 2023].
- [34] Arduino, “Datasheet Arduino UNO R3,” [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>. [Acedido em janeiro 2023].
- [35] Raspberry, “Raspberry Pi 3 Datasheet,” [Online]. Available: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>. [Acedido em janeiro 2023].
- [36] SENSIRION, “Datasheet SHT1x,” [Online]. Available: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x\\_datasheet.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/SHT1x_datasheet.pdf). [Acedido em janeiro 2023].
- [37] ARGENT DATA SYSTEMS, “ADS-WS1 Weather Station,” [Online]. Available: [https://www.argentdata.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=135](https://www.argentdata.com/catalog/product_info.php?products_id=135). [Acedido em janeiro 2023].
- [38] ARGENT DATA SYSTEMS, “Weather Sensor Assembly p/n 80422,” [Online]. Available: [https://www.argentdata.com/files/80422\\_datasheet.pdf](https://www.argentdata.com/files/80422_datasheet.pdf).
- [39] M. T. T. Jr e M. E. Loretero, “Application of a low-cost water level circuit for an accurate pulse detection of a tipping-bucket rain gauge as an alternative method for reed switch sensors,” *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 191-294, abril 2019.
- [40] seeed studio, “Grove - High Precision Barometric Pressure Sensor (DPS310),” [Online]. Available: [https://cdn.ozdisan.com/ETicaret\\_Dosya/650333\\_502618.pdf](https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/650333_502618.pdf). [Acedido em 2023 janeiro ].
- [41] Skye Instruments Ltd, “Pyranometer SKS 1110,” [Online]. Available: [https://www.skyeinstruments.info/index\\_htm\\_files/pyranometer-dts-v1a.pdf](https://www.skyeinstruments.info/index_htm_files/pyranometer-dts-v1a.pdf). [Acedido em janeiro 2023].
- [42] B. Razavi, “The Transimpedance Amplifier,” *IEEE SOLID-STATE CIRCUITS MAGAZINE*, pp. 10-13, 6 fevereiro 2019.
- [43] adafruit, “USB / DC / Solar Lithium Ion/Polymer charger - v2,” adafruit, [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/390>. [Acedido em janeiro 2023].

## Referências

- [44] sparkfun, “Arduino Pro Mini 328 - 3.3V/8MHz,” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/11114>. [Acedido em janeiro 2023].
- [45] airspayce, “RadioHead,” [Online]. Available: <http://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/>. [Acedido em janeiro 2023].
- [46] adafruit, “Medium 6V 2W Solar panel - 2.0 Watt,” [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/200>. [Acedido em janeiro 2023].
- [47] T. Ameloot, P. V. Torre e H. Rogier, “A Compact Low-Power LoRa IoT Sensor Node with Extended Dynamic Range for Channel Measurements,” *sensors*, pp. 1-16, 6 julho 2018.
- [48] IPMA, “IPMA>Enciclopédia IPMA>Redes de observação,” Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/redes.observacao/meteo/index.jsp>. [Acedido em fevereiro 2023].

## Anexo A – Códigos dos sistemas de medição

### Código do sistema transmissor

```
// Transmissor LoRa
// Tese - Francisco Jose Correia Sardinha

#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <SoftwareSerial.h>

// Pinos GPS
#define RXPin 8
#define TXPin 7

// Shield Dragino
#define RFM95_CS 10
#define RFM95_RST 9
#define RFM95_INT 2

boolean GPS_ATIVO = false;

// Potencia de transmisao
#define POWER 2
// Frequencia Lora
#define RF95_FREQ 868.0
// Opções para a largura de Banda:
7800,10400,15600,20800,31250,41700,62500,125000,250000,500000
#define LARG_BAND 125000
// Spreading Factor (7 ~ 12)
#define SFact 12
// Coding Rate:5(4/5),6(4/6),7(4/7),8(4/8)
#define COD_RATE 5

#define TEMPO_ENTRE_PAC 2000

// Configuração portas LoRa
RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

// Configuração portas GPS
TinyGPSPlus gps;
SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin);

int numeropacote = 1;
int numeropacote2 = 0;
static const uint32_t GPSBaud = 9600;
double ATUAL_LAT, ATUAL_LON = 0;
//double ATUAL_LAT = 32.695223, ATUAL_LON = -16.978174;
int ATUAL_ALT = 0;
int Lat1, Lat2, Lat3, Lat4=0;
int Lon1, Lon2, Lon3, Lon4=0;
int valorok = 0;

void setup()
{
```

## Anexos

```
pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

while (!Serial);
Serial.begin(115200);
delay(100);

Serial.println("#Transmissor LoRa - Francisco Sardinha");

// Reset forçado do Radio LoRa
digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
delay(10);
digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
delay(10);

while (!rf95.init()) {
    Serial.println("#Falha na inicializacao do radio LoRa");
    while (1);
}
Serial.println("#Radio LoRa incializado com sucesso");

if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("#Falha na configuracao da frequencia LoRa");
    while (1);
}
Serial.print("#Frequencia de operacao: ");
Serial.println(RF95_FREQ);
Serial.print("#Potencia de transmisao: "); Serial.println(POWER);
Serial.print("#Spreading Factor: "); Serial.println(SFact);
Serial.print("#Coding Rate: "); Serial.println(COD_RATE);

rf95.setModemConfig(RH_RF95::Bw125Cr45Sf128);
rf95.setTxPower(POWER, false);
rf95.setSpreadingFactor(SFact);
rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND);
rf95.setCodingRate4(COD_RATE);

delay(1000);
if (GPS_ATIVO){
    ss.begin(GPSBaud);
    GPSfuncao();
}
}

void loop()
{
    Serial.println("#Inicio do envio");
    // Criação da trama
    byte trama [14] = {0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};
    int numeropacoteaux2 = (int) (numeropacote2); // Cast de
float para inteiro
    byte numeropacoteByte2 = (byte)numeropacoteaux2; // Cast de
inteiro para byte
    trama[0] = numeropacoteByte2; // Preenche
a 1ª posição da trama
    int numeropacoteaux = (int) (numeropacote); // Cast de
float para inteiro
    byte numeropacoteByte = (byte)numeropacoteaux; // Cast de
inteiro para byte
```

```

    trama[1] = numeropacoteByte; // Preenche
a 2ª posição da trama
    Lat1 = ATUAL_LAT;
    Lat2 = (ATUAL_LAT-Lat1)*100;
    Lat3 = ((ATUAL_LAT-Lat1)*100-Lat2)*100;
    Lat4 = (((ATUAL_LAT-Lat1)*100-Lat2)*100-Lat3)*100;
    trama[2] = (byte) Lat1; // Preenche
a 3ª posição da trama
    trama[3] = (byte) Lat2; // Preenche
a 4ª posição da trama
    trama[4] = (byte) Lat3; // Preenche
a 5ª posição da trama
    trama[5] = (byte) Lat4; // Preenche
a 6ª posição da trama
    Lon1 = -1*ATUAL_LON;
    Lon2 = (-1*ATUAL_LON-Lon1)*100;
    Lon3 = ((-1*ATUAL_LON-Lon1)*100-Lon2)*100;
    Lon4 = (((-1*ATUAL_LON-Lon1)*100-Lon2)*100-Lon3)*100;
    trama[6] = (byte) Lon1; // Preenche
a 7ª posição da trama
    trama[7] = (byte) Lon2; // Preenche
a 8ª posição da trama
    trama[8] = (byte) Lon3; //
Preenche a 9ª posição da trama
    trama[9] = (byte) Lon4; // Preenche
a 10ª posição da trama
    trama[10] = highByte(ATUAL_ALT); // Preenche
a 11ª posição da trama
    trama[11] = lowByte(ATUAL_ALT); // Preenche
a 12ª posição da trama
    int sensorValue = analogRead(A0);
    trama[12] = highByte(sensorValue); //
Preenche a 13ª posição da trama
    trama[13] = lowByte(sensorValue); //
Preenche a 14ª posição da trama

    Serial.println("#Enviando..."); delay(10);
    rf95.send(trama, sizeof(trama)); // Envia e trama em bytes

    Serial.println("#Espera de pacote completo..."); delay(10);
    rf95.waitPacketSent();
    Serial.print("#O numero do Pacote enviado é:
"); Serial.println(numeropacote2*256+numeropacote);
    if ((numeropacote < 255)){
        numeropacote++;
    }
    else{
        numeropacote=0;
        numeropacote2++;
    }
    if(numeropacote2 == 256){
        numeropacote=1;
        numeropacote2=0;
    }
    delay(TEMPO_ENTRE_PAC);
}

void GPSfuncao()
{
    Serial.println("#Inicio de Calibracao GPS");

```

## Anexos

```
while (valorok <= 50){
while ( ss.available() > 0){
    if (gps.encode(ss.read()))
    {
        if (gps.location.isValid() && gps.altitude.isValid())
        {
            Serial.print("#LAT: ");
            ATUAL_LAT = gps.location.lat();
            Serial.print(ATUAL_LAT, 6);
            Serial.print(F(" , LON: "));
            ATUAL_LON = gps.location.lng();
            Serial.print(ATUAL_LON, 6);
            Serial.print(" ALT:");
            ATUAL_ALT= gps.altitude.meters();
            Serial.print(ATUAL_ALT);
            Serial.print(" PacoteGPS: ");
            Serial.println(valorok);
            valorok++;
        }
        else
        {
            Serial.print(F("#ERRO GPS"));
            Serial.println();
        }
    }
}
}
valorok = 0;
}
```

## Código do sistema recetor

```
// Resetor LoRa
// Tese - Francisco Jose Correia Sardinha

#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <SoftwareSerial.h>

// Pinos GPS
#define RXPin 8
#define TXPin 7

#define RFM95_CS 10
#define RFM95_RST 9
#define RFM95_INT 2

boolean GPS_ATIVO = false;

// Potencia de transmissao
#define POWER 2
// Frequencia Lora
#define RF95_FREQ 868.0
// Opções para a largura de Banda:
7800,10400,15600,20800,31250,41700,62500,125000,250000,500000
#define LARG_BAND 125000
// Spreading Factor (7 ~ 12)
```



```

#define SFact 12
// Coding Rate:5(4/5),6(4/6),7(4/7),8(4/8)
#define COD_RATE 5

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

// Configuração portas GPS
TinyGPSPlus gps;
SoftwareSerial ss(RXPin, TXPin);

static const uint32_t GPSBaud = 9600;
//double ATUAL_LAT = 32.695223, ATUAL_LON = -16.978174;
//int ATUAL_ALT = 1053;
double ATUAL_LAT, ATUAL_LON = 0;
int ATUAL_ALT = 0;
byte trama [14]; // Trama para a recepção dos dados
int P_perdidos = 0;
int Ultimo_P = 0;
int P_Atual = 0;
int P_Recebidos = 0;
int P_Perdidos = 0;
int Dif_Pacotes = 0;
float MedRSSI = 0;
float RSSI_CALB = 0;
float ESP = 0;
float ESP_CALB = 0;
float MedESP = 0;
int valorok = 0;
bool arranque = true;
unsigned long DISTANCIA = 0;
int DIF_ALT = 0;
int ALT_TRAN = 0;
float a,b = 0;

void setup()
{
    while(Serial.available())
        Serial.read();
    //while (!Serial);
    Serial.begin(115200);

    pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
    digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
    delay(10);
    digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
    delay(10);

    while (!rf95.init()) {
        Serial.println("#Falha na inicializacao do radio LoRa");
        while (1);
    }

    if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {

```

## Anexos

```
Serial.println("#Falha na configuracao da frequencia LoRa");
while (1);
}

rf95.setModemConfig(RH_RF95::Bw125Cr48Sf4096);
rf95.setTxPower(POWER, false);
rf95.setSpreadingFactor(SFact);
rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND);
rf95.setCodingRate4(COD_RATE);

calibracao();
if (GPS_ATIVO){
ss.begin(GPSBaud);
}
}

void loop()
{
  if(arranque == true){
    Serial.println("#Recetor LoRa - Francisco Sardinha");
    Serial.println("#Radio LoRa incializado com sucesso");
    Serial.print("#Frequencia de operacao: ");
    Serial.println(RF95_FREQ);
    Serial.print("#Potencia de transmisao: "); Serial.println(POWER);
    Serial.print("#Spreading Factor: "); Serial.println(SFact);
    Serial.print("#Coding Rate: "); Serial.println(COD_RATE);
    delay(1000);
    if (GPS_ATIVO){
      GPSfuncao();
    }
    arranque = false;

    Serial.println("#RSSI_SNR_NPacR_CPacPerd_CPacRec_RPerd_MedRSSI_ESP_ME
DEsp__LatTrans____LongTrans____LatRec____LongRec____Dist__DifAltura_RSSI
Rad_Vbat");

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

    if (rf95.recv(buf, &len))
    {
      for (int i = 0; i < len ; i++)
      {
        trama[i]=buf[i]; // Preenche a trama com os dados recebidos
      }
      int SignalRSSI = rf95.lastRssi();
      int snr=rf95.lastSNR();
      if ( snr < 0 )
      {
        SignalRSSI=SignalRSSI-snr;
      }
      double LAT_TRAN =
trama[2]+0.01*trama[3]+0.0001*trama[4]+0.000001*trama[5];
      double LON_TRAN = -1*trama[6]-0.01*trama[7]-0.0001*trama[8]-
0.000001*trama[9];
      if (GPS_ATIVO){
```

```

        DISTANCIA = (unsigned
long)TinyGPSPlus::distanceBetween(LAT_TRAN,LON_TRAN,ATUAL_LAT,
ATUAL_LON);
        ALT_TRAN = word(trama[10],trama[11]);
        DIF_ALT = ATUAL_ALT - ALT_TRAN;
    }
    int ADC_VALOR = word(trama[12],trama[13]);
    float V_BATERIA = 5.53 * ADC_VALOR * (5.0 / 1023.0);
    P_Atual=trama[0]*256+trama[1];
    if (Ultimo_P == 0){
        Ultimo_P=P_Atual-1;
    }
    if ((P_Atual-Ultimo_P) == 1){
        Dif_Pacotes = 0;
        P_Recebidos++;
        Ultimo_P=P_Atual;
    }
    else{
        P_Recebidos++;
        Dif_Pacotes = (P_Atual-Ultimo_P) - 1;
        P_Perdidos=P_Perdidos + (P_Atual-Ultimo_P) - 1;
        Ultimo_P=P_Atual;
    }
    ESP = SignalRSSI + snr - (10*log10(1+(pow(10,0.1*snr))));
    ESP_CALB = (ESP-b)/a;
    RSSI_CALB = ESP_CALB - snr + (10*log10(1+(pow(10,0.1*snr))));

    if(P_Recebidos == 1){
        MedRSSI=RSSI_CALB;
        MedESP=ESP_CALB;
    }
    else
    {
        MedRSSI=(MedRSSI*(P_Recebidos-1)+RSSI_CALB)/P_Recebidos;
        MedESP=(MedESP*(P_Recebidos-1)+ESP_CALB)/P_Recebidos;
    }
    Serial.flush();
    Serial.print(RSSI_CALB);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(snr);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(P_Atual);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(P_Perdidos);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(P_Recebidos);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(Dif_Pacotes);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(MedRSSI);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(ESP_CALB);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(MedESP);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(LAT_TRAN,6);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(LON_TRAN,6);
    Serial.print(" ; ");
    Serial.print(ATUAL_LAT,6);
    Serial.print(" ; ");

```

```

        Serial.print(ATUAL_LON,6);
        Serial.print(" ; ");
        Serial.print(DISTANCIA);
        Serial.print(" ; ");
        Serial.print(DIF_ALT);
        Serial.print(" ; ");
        Serial.print(SignalRSSI);
        Serial.print(" ; ");
        Serial.println(V_BATERIA);
        Serial.flush();
    }
    else
    {
        Serial.println("#Falha na Rececao");
    }
}

}

void GPSfuncao()
{
    Serial.println("#Inicio de Calibracao GPS");
    while (valorok <= 20){
        while ( ss.available() > 0){
            if (gps.encode(ss.read()))
            {
                if (gps.location.isValid() && gps.altitude.isValid())
                {
                    Serial.flush();
                    Serial.print("#LAT: ");
                    ATUAL_LAT = gps.location.lat();
                    Serial.print(ATUAL_LAT, 6);
                    Serial.print(F(" , LON: "));
                    ATUAL_LON = gps.location.lng();
                    Serial.print(ATUAL_LON, 6);
                    Serial.print(" ALT:");
                    ATUAL_ALT= gps.altitude.meters();
                    Serial.print(ATUAL_ALT);
                    Serial.print(" PacoteGPS: ");
                    Serial.println(valorok);
                    Serial.flush();
                    delay(100);
                    valorok++;
                }
                else
                {
                    Serial.flush();
                    Serial.print(F("#ERRO GPS"));
                    Serial.println();
                    Serial.flush();
                }
            }
        }
        valorok = 0;
    }
}

void calibracao(){
    switch(SFact){
        case 7:
            a = 0.96;
            b = -13.8;

```

```
break;
case 8:
a = 0.95;
b = -15.2;
break;
case 9:
a = 0.94;
b = -16.6;
break;
case 10:
a = 0.93;
b = -18.5;
break;
case 11:
a = 0.91;
b = -20.2;
break;
case 12:
a = 0.90;
b = -22.0;
break;
default:
a = 0;
b = 0;
break;
}
}
```



## Anexo B – Interface gráfica de recolha de dados

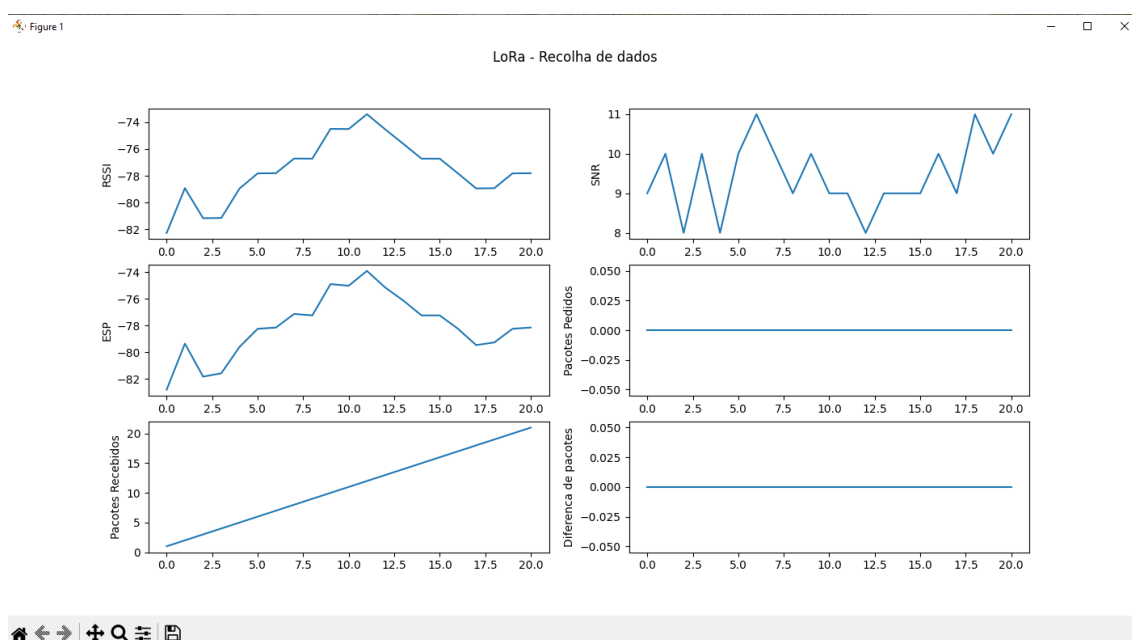


Figura B.1 – Interface gráfica gerada pelo programa de recolha de dados.





## Anexo C – Código do programa de recolha dos parâmetros de qualidade da ligação e representação gráfica

```

"""
Tese de Mestrado - Francisco Sardinha
Recolha de dados
"""

import time
import serial
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import os

#Parametros a defenir pelo utilizador
nome_zona=input("Nome da zona: ")
SF_aux=input("SF : ")
SF=int(SF_aux)
tempo_entre_envio_aux=input("Tempo entre envio em segundos : ")
tempo_entre_envio= int(tempo_entre_envio_aux)
Numero_Pacotes_aux=input("Numero de pacotes do ensaio : ")
Numero_Pacotes = int(Numero_Pacotes_aux)
PortaCOM=input("Numero da porta COM: ")
PortaCOM = 'COM' + PortaCOM

if(SF == 7):
    ToA = 0.046336;
if(SF == 8):
    ToA = 0.082432;
if(SF == 9):
    ToA = 0.164864;
if(SF == 10):
    ToA = 0.288768;
if(SF == 11):
    ToA = 0.659456;
if(SF == 12):
    ToA = 1.3033;

#Calculo do tempo de execucao do programa
tempo_seg = tempo_entre_envio +(ToA +
tempo_entre_envio)*Numero_Pacotes;

#Abertura da porta COM
serialport = serial.Serial(PortaCOM, baudrate=115200, timeout=2)

os.makedirs(nome_zona, exist_ok=True)
filename = 'Data_' + 'SF_' + str(SF) + time.strftime("_%Y%m%d_%H%M%S") +
'.txt';

textfile = open(os.path.join(nome_zona, filename), 'w')
plt.close('all');
f1 = plt.figure();
plt.suptitle('LoRa - Recolha de dados')

list_values = []

```

```

Fase_GPS= True;
Primeira_Trama= True;
data = np.array([]);
data2 = np.array([]);
data3 = np.array([]);
data4 = np.array([]);
data5 = np.array([]);
data6 = np.array([]);
serialport.flushInput()
serialport.flushOutput()
while (Fase_GPS == True):
    arduinodata=serialport.readline().decode().rstrip('\n')
    decode_values = str (arduinodata[0:len(arduinodata)])
    if(len(arduinodata)!=0):
        if (arduinodata[0]=='#'):
            print(arduinodata)
        else:
            Fase_GPS = False
            Primeira_Trama= True
start = time.time();
while ((time.time()-start) <= tempo_seg):
    if (Primeira_Trama == True):
        list_values = decode_values.split(';')
        Primeira_Trama = False;
    else:
        arduinodata=serialport.readline().decode().rstrip('\n')
        decode_values = str (arduinodata[0:len(arduinodata)])
        list_values = decode_values.split(';')
    if (list_values != ['']):
        a0 = float (list_values[0])
        a1 = int (list_values[1])
        a2 = float (list_values[7])
        a3 = int (list_values[3])
        a4 = int (list_values[4])
        a5 = int (list_values[5])
        data = np.append(data,a0)
        data2 = np.append(data2,a1)
        data3 = np.append(data3,a2)
        data4 = np.append(data4,a3)
        data5 = np.append(data5,a4)
        data6 = np.append(data6,a5)
        plt.clf()
        plt.suptitle('LoRa - Recolha de dados')
        plt.subplot(3, 2, 1)
        plt.plot(data)
        plt.ylabel('RSSI')
        plt.subplot(3, 2, 2)
        plt.plot(data2)
        plt.ylabel('SNR')
        plt.subplot(3, 2, 3)
        plt.plot(data3)
        plt.ylabel('ESP')
        plt.subplot(3, 2, 4)
        plt.plot(data4)
        plt.ylabel('Pacotes Pedidos')
        plt.subplot(3, 2, 5)
        plt.plot(data5)
        plt.ylabel('Pacotes Recebidos')
        plt.subplot(3, 2, 6)
        plt.plot(data6)
        plt.ylabel('Diferença de pacotes')

```

```
plt.pause(0.01)
print(arduinodata)
textfile.write(arduinodata)
serialport.flushInput()
serialport.flushOutput()
serialport.close()
textfile.close()
```



## Anexo D - Placa de circuito impresso da estação meteorológica

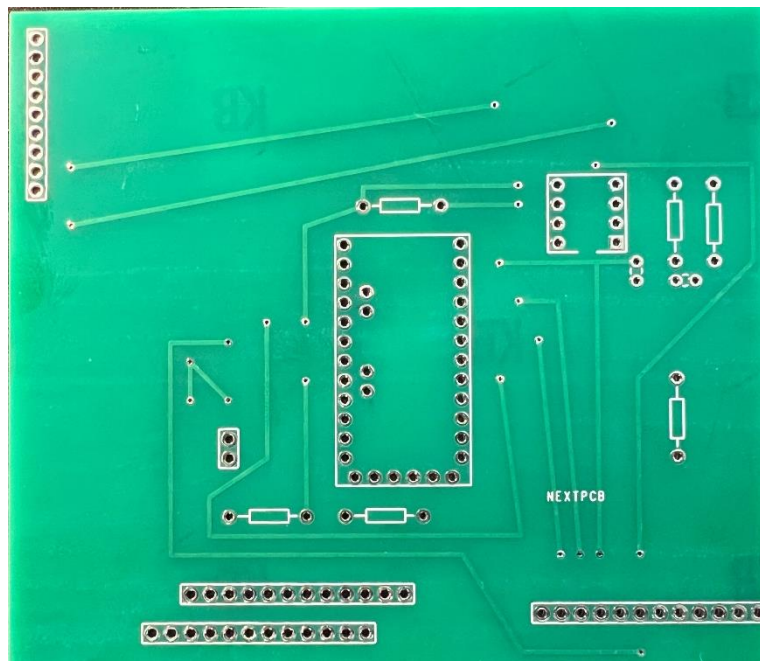


Figura D.1 – Parte superior da placa de circuito impresso da estação meteorológica.

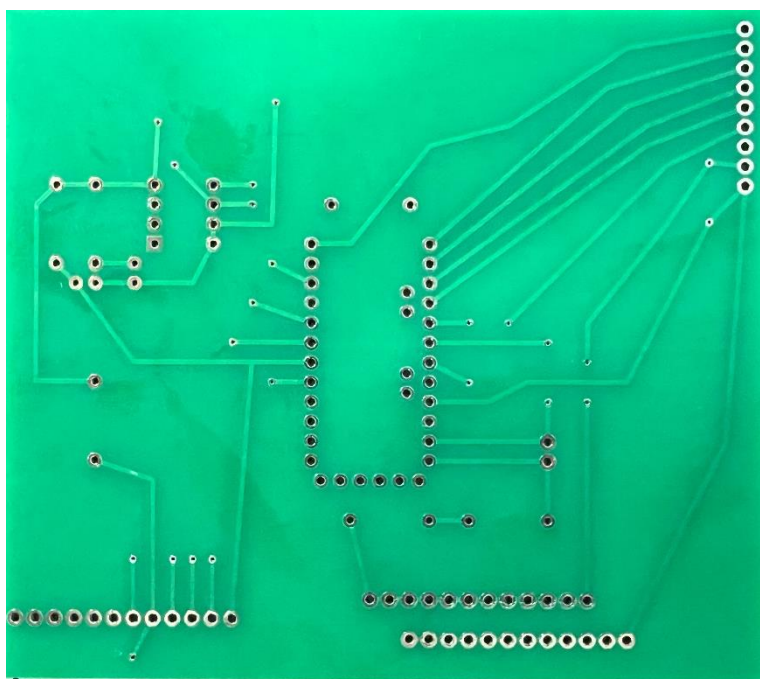


Figura D.2 – Parte inferior da placa de circuito impresso da estação meteorológica.



## Anexo E – Código da estação meteorológica

```

/*
  Tese Mestrado - Francisco Sardinha
*/

#include "PinChangeInterrupt.h"
#include <avr/sleep.h> // Biblioteca sleep do
arduino
#include <Dps310.h> // Biblioteca do sensor de
pressao atmosferica
#include <SHT1x.h> // Biblioteca do sensor de
temperatura e humidade
#include <SPI.h> // Comunicação SPI
#include <RH_RF95.h> // Biblioteca LoRa
#include <RHReliableDatagram.h> // Biblioteca com
enderecamento

#define anemometer 7 // Pino Digital 7 da Interrupção
ligado ao Anemómetro
#define pluviometer 3 // Pino da Interrupção 1 D3 ligado
ao pluviómetro
#define dataPin 4 // Pino DATA SHT
#define clockPin 5 // Pino CLK SHT
#define luminosidade 0 // ADC 0 luminosidade
#define catavento 1 // ADC 1 catavento
#define bateria 2 // ADC 2 tensao da bateria
volatile int unsigned cont = 0; // Variavel aux para a
velocidade média do vento
volatile int unsigned contRajada = 0; // Variavel aux para contar as
rajadas de vento
volatile int unsigned contagem = 0; // Variavel aux do contador
principal

int NumPacote = 0; // Variavel para incrementar os
numero de pacotes enviado

int VarDebounce = 5000; // Tempo para o debounce das
interrupções

//Variaveis auxiliares
float VelMax = 0;
float pressure;
int16_t ret;
int sensorValue;
int direcao;
float temp_c;
float humidity;
float lux;
int PressaoA;
int Temperatura;
int humidade;
float TensaoBat;
float Bat;

int ValorIntSensor;
byte ValorSensorByte;

/*--- CONTADOR 2 (Timer2) ---*/

```

## Anexos

```
unsigned int tcnt2; // Variável global para armazenar
o valor de contagem
int counter = 0; // Variavel auxiliar para contar
ciclos de contagem
int counterRajada = 0; // Variavel auxiliar para contar
ciclos de contagem das rajadas

int seconds = 31; // Tempo de 1 segundo
int start = seconds*120 ; // Envio de dados a cada 120 seg
int TempoRajada = seconds*10; // Tempo para a medição das rajadas
(10 seg)

byte trama [16] = {0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};

Dps310 Dps310PressureSensor = Dps310();
SHT1x sht1x(dataPin, clockPin);

#define RFM95_RST 9
// Potencia de transmisao
#define POWER 14
// Frequencia Lora
#define RF95_FREQ 868.2
// Opeções para a largura de Banda:
7800,10400,15600,20800,31250,41700,62500,125000,250000,500000
#define LARG_BAND 125000
// Spreading Factor (7 ~ 12)
#define SFact 7
// Coding Rate:5(4/5),6(4/6),7(4/7),8(4/8)
#define COD_RATE 5

RH_RF95 rf95;

#define CLIENT_ADDRESS 111 // Endereco da estacao meterologica
#define SERVER_ADDRESS 222 // Endereco da gateway

RHReliableDatagram manager(rf95, CLIENT_ADDRESS);
/* ===== Setup ===== */
void setup()
{
    Serial.begin(9600);

    pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
    digitalWrite(RFM95_RST, HIGH); // Reset do Radio LoRa
    digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
    delay(10);
    digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
    delay(10);

    while (!rf95.init() || !manager.init())
    {
        while (1);
    }
    if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ))
    {
        Serial.println("#Falha na configuracao da frequencia LoRa");
        while (1);
    }
    rf95.setModemConfig(RH_RF95::Bw125Cr45Sf128);
```



```

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

delay(1000);

pinMode(anemometer, INPUT);
pinMode(pluviometer, INPUT);

digitalWrite(anemometer, HIGH);
digitalWrite(pluviometer, HIGH);
attachPinChangeInterrupt(digitalPinToPinChangeInterrupt(anemometer),
WindMeter, FALLING);
attachInterrupt(1, countRainmeter, FALLING);
delayMicroseconds(50); // Debounce

Dps310PressureSensor.begin(Wire);

/*--- Configuração do CONTADOR 2 ---*/
TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2); // First disable
the timer overflow interrupt while we're configuring
TCCR2A &= ~((1<<WGM21) | (1<<WGM20)); // Configure
timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.)
TCCR2B &= ~(1<<WGM22);
ASSR &= ~(1<<AS2); // Select clock
source: internal I/O clock
TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A); // Disable
Compare Match A interrupt enable (only want overflow), ou seja, a
interrupção de contagem acontece quando o contador chega ao fim
TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits to
configure the prescaler to CPU clock divided by 1024, ou seja, 8MHz /
1024 = 7812,5 Hz
tcnt2 = 0; // Valor para
restart de contagem. 0 => 256 passos até overflow 256 * 1/ 7812,5 =
0.032768 segundos
TCNT2 = tcnt2; // Carrega valor
no contador
TIMSK2 |= (1<<TOIE2); // Ativa
interrupção de overflow

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_IDLE); // Configura de
adormecimento
set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
sleep_enable(); // Permite
adormecimento

Serial.println("Estacao Meteriologica - Francisco Sardinha ");

}
/* ===== */

/* == Configuração das interrupções ===== */
ISR(TIMER2_OVF_vect) // Install the Interrupt Service
Routine (ISR) for Timer2 overflow
{
    TCNT2 = tcnt2; // Recarrega o contador
    counter++; // Conta parciais de 0.032768
segundos

```

## Anexos

```
    counterRajada++;
}
/* ===== */

/* ==== Programa principal ===== */
void loop()
{
    if(counterRajada == TempoRajada){           // Tratamento
das rajadas
        int temp = contRajada;
        contRajada = 0;
        counterRajada = 0;
        if(temp > VelMax){                       // Verificacao do
valor em memoria e superior ao novo valor de rajada
            VelMax = temp;
        }
    }

    if(counter == start){           // Se chegou ao período de
adormecimento executa o programa
        TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2); // Desativa interrupcao de contador
        leituraeenvio();
        rf95.setModeIdle();      // Hibernação do LoRa
        rf95.sleep();            // Hibernação do LoRa
        counter = 0;             // Contador parcial reiniciado
        TCNT2 = tcnt2;          // Contador 2 reiniciado a 0
        TIMSK2 |= (1<<TOIE2);   // Ativa interrupcao de contador
    }
    sleep_enable();              // Permite adormecimento
    sleep_mode();                // Adormece, quando acorda de
overflow do contador 2 executa sua interrupção
    sleep_disable();             // Proíbe adormecimento
}
/* ===== */

/* ==== Funções ===== */

// Função de interrupção para medicao das rotações do anemometro
void WindMeter()
{
    if (!digitalRead ( anemometer ))
    {
        cont++;
        contRajada++;
        delayMicroseconds (VarDebounce);           // Debounce
    }
}

// Interrupção para contagem do pluviômetro
void countRainmeter()
{
    if (!digitalRead ( pluviometer ))
    {
        contagem++;
        delayMicroseconds (VarDebounce);           // Debounce
    }
}
```

```

void direcaovento()
{
    sensorValue = analogRead(catavento);
    float voltage = sensorValue * (3.3 / 1023.0);
    if (voltage < 0.56) {
        direcao = 5;
    }
    if (voltage >= 0.56 & voltage < 0.66) {
        direcao = 3;
    }
    if (voltage >= 0.66 & voltage < 0.79) {
        direcao = 4;
    }
    if (voltage >= 0.79 & voltage < 1.05) {
        direcao = 7;
    }
    if (voltage >= 1.05 & voltage < 1.35) {
        direcao = 6;
    }
    if (voltage >= 1.35 & voltage < 1.58) {
        direcao = 9;
    }
    if (voltage >= 1.58 & voltage < 1.87) {
        direcao = 8;
    }
    if (voltage >= 1.87 & voltage < 2.17) {
        direcao = 1;
    }
    if (voltage >= 2.17 & voltage < 2.42) {
        direcao = 2;
    }
    if (voltage >= 2.42 & voltage < 2.63) {
        direcao = 11;
    }
    if (voltage >= 2.63 & voltage < 2.74) {
        direcao = 10;
    }
    if (voltage >= 2.74 & voltage < 2.88) {
        direcao = 15;
    }
    if (voltage >= 2.88 & voltage < 2.99) {
        direcao = 0;
    }
    if (voltage >= 2.99 & voltage < 3.07) {
        direcao = 13;
    }
    if (voltage >= 3.07 & voltage < 3.16) {
        direcao = 14;
    }
    if (voltage > 3.16) {
        direcao = 12;
    }
}

void leituraeenvio()
{
    sensorValue = analogRead(luminosidade);
    lux = sensorValue * (3.3 / 1023.0);
    ValorIntSensor = (int) (lux*100);
    ValorSensorByte = highByte(ValorIntSensor);
    trama[0] = ValorSensorByte;
}

```

```

ValorSensorByte = lowByte(ValorIntSensor);
trama[1] = ValorSensorByte;

ret = Dps310PressureSensor.measurePressureOnce(pressure);
PressaoA= pressure/100;
ValorSensorByte = highByte(PressaoA);
trama[2] = ValorSensorByte;
ValorSensorByte = lowByte(PressaoA);
trama[3] = ValorSensorByte;

direcaovento();
ValorSensorByte = (byte) direcao;
trama[4] = ValorSensorByte;

temp_c = sht1x.readTemperatureC();
Temperatura = (int) (temp_c*100);
ValorSensorByte = highByte(Temperatura);
trama[5] = ValorSensorByte;
ValorSensorByte = lowByte(Temperatura);
trama[6] = ValorSensorByte;
humidity = sht1x.readHumidity();
humidade = (int) humidity;
ValorSensorByte = (byte) humidade;
trama[7] = ValorSensorByte;

ValorIntSensor = (int) cont;
cont= 0;
ValorSensorByte = highByte(ValorIntSensor);
trama[8] = ValorSensorByte;
ValorSensorByte = lowByte(ValorIntSensor);
trama[9] = ValorSensorByte;
ValorIntSensor = (int) VelMax;
VelMax = 0;
ValorSensorByte = highByte(ValorIntSensor);
trama[10] = ValorSensorByte;
ValorSensorByte = lowByte(ValorIntSensor);
trama[11] = ValorSensorByte;
ValorIntSensor = (int) contagem;
contagem = 0;
ValorSensorByte = highByte(ValorIntSensor);
trama[12] = ValorSensorByte;
ValorSensorByte = lowByte(ValorIntSensor);
trama[13] = ValorSensorByte;

sensorValue = analogRead(bateria);
TensaoBat = sensorValue * (3.3 / 1023.0);
ValorIntSensor = (int) (TensaoBat*10);
ValorSensorByte = (byte) ValorIntSensor;
trama[14] = ValorSensorByte;

NumPacote++;
if(NumPacote == 256)
{
    NumPacote = 1;
}
ValorIntSensor = (int) NumPacote;
ValorSensorByte = (byte) ValorIntSensor;
trama[15] = ValorSensorByte;

Serial.println("enviando...");
manager.sendtoWait(trama, sizeof(trama), SERVER_ADDRESS);

```

```
    delay(100);  
}
```



## Anexo F – Código da *gateway*

```

/*
  Tese Mestrado - Francisco Sardinha
*/

#include <SPI.h>                // Comunicação SPI
#include <RH_RF95.h>            // Biblioteca LoRa
#include <RHReliableDatagram.h> // Biblioteca com endereçamento

#define RFM95_RST 9

// Potencia de transmisao
#define POWER 14
// Frequencia Lora
#define RF95_FREQ 868.2
// Opções para a largura de Banda:
7800,10400,15600,20800,31250,41700,62500,125000,250000,500000
#define LARG_BAND 125000
// Spreading Factor (7 ~ 12)
#define SFact 7
// Coding Rate:5(4/5),6(4/6),7(4/7),8(4/8)
#define COD_RATE 5

RH_RF95 rf95;

#define CLIENT_ADDRESS 111      // Endereco da estacao meterologica
#define SERVER_ADDRESS 222      // Endereco da gateway

RHReliableDatagram manager(rf95, SERVER_ADDRESS);

//Variaveis auxiliares
float a,b = 0;
float RSSI_CALB = 0;
float ESP = 0;
float ESP_CALB = 0;

// Tempos defenidos na Estacao meterologica
float tempo_rajada = 10;
float tempo_entre_envio = 120;

byte trama [16];                // Trama para a recepção dos dados

void setup()
{
  while(Serial.available())
    Serial.read();
  Serial.begin(9600);

  pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH); // Reset do Radio LoRa
  delay(100);
  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

```

## Anexos

```
delay(10);

while (!rf95.init() || !manager.init()) {
    Serial.println("#Falha na inicializacao do radio LoRa");
    while (1);
}

if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("#Falha na configuracao da frequencia LoRa");
    while (1);
}

rf95.setModemConfig(RH_RF95::Bw125Cr48Sf4096);
rf95.setTxPower(POWER, false);
rf95.setSpreadingFactor(SFact);
rf95.setSignalBandwidth(LARG_BAND);
rf95.setCodingRate4(COD_RATE);

delay(1000);
calibracao();

Serial.println("Data_Hora_Luminosidade_Pressao_DirecaoVento_Temperatur
a_Humidade_Vento_Rajada_Chuva_Bateria_ESP_RSSI_SNR_NumPacote");
}

void loop()
{
    if (manager.available())
    {
        uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
        uint8_t len = sizeof(buf);
        uint8_t from;
        manager.recvfromAck(buf, &len, &from); // Recebe a mensagem
        if (from == CLIENT_ADDRESS)
        {
            for (int i = 0; i < len ; i++)
            {
                trama[i]=buf[i]; // Preenche a trama com os dados recebidos
            }
            float luminosidade = word(trama[0],trama[1]);
            luminosidade = 36502*(luminosidade/100)-102.62;
            if (luminosidade == -102.62)
            {
                luminosidade = 0;
            }
            float Pressao = word(trama[2],trama[3]);
            float direcaovento = (int)trama[4];
            direcaovento = direcaovento*22.5;
            float Temperatura = word(trama[5],trama[6]);
            Temperatura = Temperatura/100;
            float humidade = (int)trama[7];
            float vento = word(trama[8],trama[9]);
            vento = vento*((2.4)/(tempo_entre_envio));
            float Rajada = word(trama[10],trama[11]);
            Rajada = Rajada*((2.4)/(tempo_rajada));
            float chuva = word(trama[12],trama[13]);
            chuva= chuva*0.2794;
            float bateria = (int)trama[14];
        }
    }
}
```



```

bateria = ((bateria/10)*2);
int NumPacote = (int)trama[15];

int SignalRSSI = rf95.lastRssi();
int snr=rf95.lastSNR();
if ( snr < 0 )
{
SignalRSSI=SignalRSSI-snr;
}
ESP = SignalRSSI + snr - (10*log10(1+(pow(10,0.1*snr))));
ESP_CALB = (ESP-b)/a;
RSSI_CALB = ESP_CALB - snr + (10*log10(1+(pow(10,0.1*snr))));

Serial.print(luminosidade);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(Pressao);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(direcaovento);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(Temperatura);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(humidade);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(vento);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(Rajada);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(chuva);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(bateria);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(ESP_CALB);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(RSSI_CALB);
Serial.print(" ; ");
Serial.print(snr);
Serial.print(" ; ");
Serial.println(NumPacote);
Serial.flush();
}
else
{
Serial.println("#Falha na Rececao");
}
}
}

void calibracao(){
switch(SFact){
case 7:
a = 0.96;
b = -13.8;
break;
case 8:
a = 0.95;
b = -15.2;
break;
case 9:
a = 0.94;
b = -16.6;
break;
}
}

```

## Anexos

```
case 10:  
a = 0.93;  
b = -18.5;  
break;  
case 11:  
a = 0.91;  
b = -20.2;  
break;  
case 12:  
a = 0.90;  
b = -22.0;  
break;  
default:  
a = 0;  
b = 0;  
break;  
}  
}
```

## Anexo G – Programa da *gateway* para recolha de dados

```

"""
Tese de Mestrado - Francisco Sardinha
Gateway
"""

import time
import serial
import os

nome_zona=input("Nome da zona: ")
PortaCOM=input("Numero da porta COM: ")
PortaCOM = 'COM' + PortaCOM

serialport = serial.Serial(PortaCOM, baudrate=9600, timeout=2)

os.makedirs(nome_zona, exist_ok=True)
filename = 'Data_'+ time.strftime("_%Y%m%d_%H%M%S") + '.txt';

textfile = open(os.path.join(nome_zona, filename), 'w')

serialport.flushInput()
serialport.flushOutput()

primeira_linha = True
Dia_ant = time.strftime("%d")

while(1):
    try:
        if(Dia_ant == time.strftime("%d")):

            arduinodata=serialport.readline().decode().rstrip('\n')
            if(len(arduinodata)!=0):
                if(primeira_linha == True):

                    print("Data_Hora_Luminosidade_Pressao_DirecaoVento_Temperatura_Humidad
e_Vento_Rajada_Chuva_Bateria_ESP_RSSI_SNR_NPacote")
                    primeira_linha = False
                else:
                    print(time.strftime("%Y/%m/%d ; %H:%M:%S ; "))
                    + arduinodata)
                    textfile.write(time.strftime("%Y/%m/%d ;
%H:%M:%S ; ") + arduinodata)
            else:
                textfile.close()
                filename = 'Data_'+ time.strftime("_%Y%m%d_%H%M%S")
+ '.txt';
                textfile = open(os.path.join(nome_zona,
filename), 'w')
                serialport.flushInput()
                serialport.flushOutput()
                Dia_ant = time.strftime("%d")
        except KeyboardInterrupt:
            serialport.close()
            textfile.close()

```



## Anexo H – Gráfico da velocidade do vento média e de rajada da estação meteorológica implementada

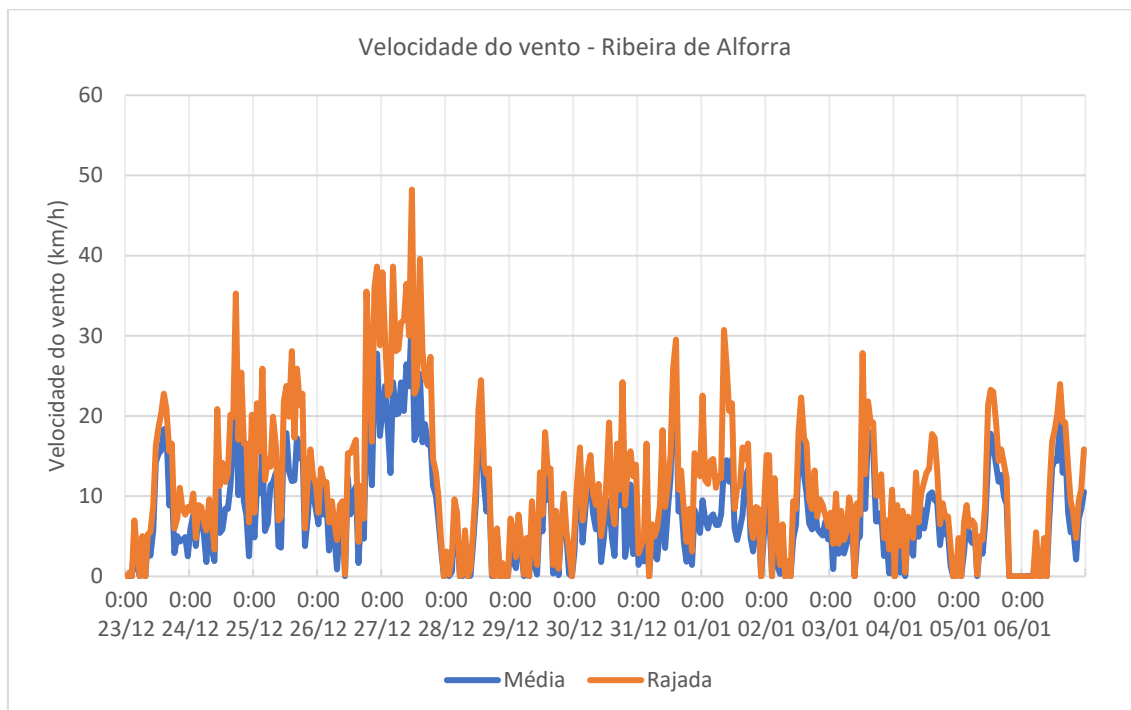


Figura H.1 – Gráfico da velocidade do vento médio e de rajada da estação meteorológica implementada.