



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Alexandre da Costa Martins

Sistema de Posicionamento
baseado em Redes de Sensores sem Fios

João Alexandre da Costa Martins
Sistema de Posicionamento
baseado em Redes de Sensores sem Fios



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Alexandre da Costa Martins

Sistema de Posicionamento
baseado em Redes de Sensores sem Fios

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em
Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Augusto Afonso

DECLARAÇÃO

Nome: João Alexandre da Costa Martins

Correio electrónico: joaoacostamartins@gmail.com

Tlm.: 916223722

Número do Bilhete de Identidade: 13356724

Título da dissertação:

Sistema de posicionamento baseado em redes de sensores sem fios

Ano de conclusão: 2013

Orientador:

Professor Doutor José Afonso

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em

Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Área de Especialização: Telecomunicações

Escola: Escola de Engenharia

Departamento: Eletrónica Industrial

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Ao longo deste trajeto acadêmico, e principalmente no último ano, tive o apoio de pessoas, que pelas mais variadas formas, possibilitaram a realização do trabalho aqui descrito. Desta forma, gostaria de relembrar a sua ajuda e prestar-lhes o meu agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Augusto Afonso, pela sua permanente disponibilidade, dedicação, apoio e acompanhamento ao longo desta dissertação, bem como pelas sugestões, correções e todos os comentários que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

Ao meu colega Hélder Silva pela constante ajuda e pelos diversos conselhos ao longo deste projeto. Tenho que lhe dar o meu obrigado, por nunca negar qualquer ajuda, em todas as fases do meu projeto.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmão, que sempre me transmitiram o seu carinho, apoio e compreensão e incentivaram nos momentos de maior desânimo.

À Sofia Freitas, pela sua contribuição neste fim de um ciclo importante na minha vida. Agradeço-lhe todo o apoio, amizade e ajuda incondicional, assim como, a paciência e compreensão quando mais precisei. Não tenho como descrever o quanto me ajudou, das mais variadas formas, nos mais variados momentos.

Aos meus amigos, pelo apoio, disponibilidade, compreensão e presença neste caminho de formação.

A todos os que, de algum modo, contribuíram para a concretização deste trabalho, o meu muito obrigado.

Resumo

Os sistemas de posicionamento surgiram para proporcionar um conjunto de serviços benéficos para o utilizador. Um exemplo disso é no caso da computação móvel, o utilizador poder facilmente encontrar um café num ambiente interno.

Nesta investigação foi desenvolvido um sistema de posicionamento baseado em redes de sensores sem fios cujas vantagens se prendem com o facto de o posicionamento ser feito através do RSSI (*Received Signal Strength Indication*), que é fornecido pelos nos módulos usados, mas também com o seu baixo custo de implementação devido à existência prévia das infraestruturas. Para além do método de localização escolhido, são apresentados outros e comparadas as suas vantagens e desvantagens.

Numa primeira fase, são comparados resultados entre o modelo *One Slope* e o modelo *Path Loss*, num ambiente externo. Com isto, é possível constatar qual o algoritmo que determina com maior exatidão a distância d entre um emissor e um recetor. Depois de analisar uma série de valores de RSSI obtidos nestas condições, o modelo escolhido foi o *One Slope*, que comparativamente com o *Path Loss*, utiliza uma distância de referência d_0 e um expoente médio no seu método de cálculo.

Posteriormente, num ambiente interno, procedeu-se ao cálculo das coordenadas (x , y) do emissor. Depois de obter os valores do RSSI para diferentes distâncias, seguiu-se a fase da análise dos resultados e, com isto, do desempenho do sistema. Em primeiro lugar, foi calculado o valor do expoente médio segundo o modelo *One Slope*. Este valor é ajustado dependendo das condições e do ambiente envolvente. De seguida, foi calculada a distância d através do RSSI recebido, pelo mesmo modelo matemático. Por último, para determinar as coordenadas x e y , foi utilizado o modelo WCL (*Weighted Centroid Localization*), que, utiliza um peso, neste caso, o inverso da distância d calculada.

Após determinar o conjunto de coordenadas (x, y) para as várias direções é possível concluir que, nos testes realizados, o sistema de posicionamento apresenta um erro absoluto médio, num ambiente interno, de 0,712 m.

Palavras-chave: Redes de Sensores sem Fios; Sistemas de Posicionamento; RSSI.

Abstract

Positioning systems have emerged to provide helpful services to the user. An example is the case of mobile computing, the user can easily find a coffee in an indoor environment.

This research work developed a positioning system based on wireless sensor networks, with the advantage of low implementation cost due to the prior existence of the infrastructures and the fact that the position is obtained through the RSSI (Received Signal Strength Indication), which is provided by the modules. Besides the chosen location algorithm, others are presented and their advantages and disadvantages are compared.

Initially, the One Slope model and Path Loss model results are compared in an external environment. With these results, it can be verified the algorithm that determines more accurately the distance d between a transmitter and a receiver. After reviewing a number of RSSI values obtained in these conditions, the One Slope model was chosen, which, compared to the Path Loss model, uses a reference distance d_0 and an average exponent in its method of calculation.

Subsequently, in an indoor environment, we proceeded to calculate the coordinates (x, y) of the transmitter. After getting the RSSI values for different distances, we proceeded to the stage of analyzing the results, and thus, the performance of the system. First, we calculated the average value of the exponent according to the One Slope model. This value is set depending on the conditions and the environment. Then, the distance d is calculated using the RSSI received and the same mathematical model. Finally, to determine the coordinates x and y , the WCL (Weighted Centroid Localization) model was used. This model uses a weight, which, in this case, was the inverse of d , the calculated distance.

After determining the set of coordinates (x, y) for various directions, it is possible to conclude that the positioning system features an average absolute error of 0,712 m in an indoor environment.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Positioning Systems; RSSI.

Índice de conteúdos

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de conteúdos	vii
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Lista de abreviaturas	xix
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2. Estado da arte	5
2.1 Tecnologias de localização.....	5
2.1.1 GPS – Sistema de Posicionamento Global.....	5
2.1.2 Wi-Fi.....	8
2.1.3 GSM	8
2.1.4 Outros sistemas de localização.....	9
2.2 Métodos de localização	9
2.2.1 Tempo de chegada	10
2.2.2 Diferença do tempo de chegada	11
2.2.3 Ângulo de chegada	12
2.2.4 Potência do sinal recebido	12

2.3	Algoritmos de localização	14
2.3.1	Fingerprinting	14
2.3.2	Trilateração.....	15
2.3.3	Multilateração	17
2.3.4	Método dos mínimos quadrados	18
2.3.5	Método do centróide.....	20
2.4	Sistema de monitorização de postura	22
2.5	Sistemas de localização baseados no RSSI.....	25
2.5.1	RADAR.....	25
2.5.2	WIPS.....	26
2.5.3	Ring Overlapping	27
2.5.4	LANDMARC	28
2.5.5	Design and Implementation of a RSSI-based Location System	29
2.5.6	Indoor Localization with Low Complexity in WSNs	31
3.	Desenvolvimento do sistema	35
3.1	IEEE 802.15.4.....	35
3.1.1	Camada física	36
3.1.2	Camada MAC	37
3.1.3	Funções gerais	38
3.1.4	Formato da mensagem.....	39
3.1.5	Tamanho das tramas utilizadas	43
3.2	Hardware	45
3.2.1	SmartRF05EB	45
3.2.2	CC2530EM	47

3.3	<i>Software</i>	48
3.4	Modelos Matemáticos	49
3.4.1	Modelo <i>One Slope</i>	49
3.4.2	Modelo de Propagação em Espaço Livre.....	50
3.5	Testes em ambiente externo	52
3.5.1	Código dos módulos	53
3.5.1.1	Recetor	53
3.5.1.2	Emissor	55
3.5.2	Código de leitura dos dados no PC.....	56
3.5.3	Código para processamento dos dados	60
3.6	Testes em ambiente interno.....	62
3.6.1	Código dos módulos	63
3.6.1.1	Recetor	64
3.6.1.2	Emissor	66
3.6.2	Código para processamento dos dados	67
4.	Resultados e discussão.....	71
4.1	Ambiente externo	71
4.1.1	Valores obtidos à altura de 0 m.....	71
4.1.1.1	Modelo <i>One Slope</i>	72
4.1.1.2	Modelo Path Loss	76
4.1.2	Valores obtidos à altura de 0,5 m.....	79
4.1.2.1	Modelo <i>One Slope</i>	80
4.1.2.2	Modelo Path Loss	84
4.2	Ambiente interno.....	87

4.2.1	Valores recebidos	87
4.2.1.1	Modelo <i>One Slope</i>	88
4.2.1.2	Modelo WCL	93
5.	Conclusões.....	95
	Referências.....	97

Lista de figuras

Figura 2.1 - Satélites GPS em órbita na Terra [6].	6
Figura 2.2 - Exemplo de trilateração [4].	7
Figura 2.3 - Localização por antenas GSM.	9
Figura 2.4 - Classificação dos métodos de localização.	10
Figura 2.5 – Princípio de funcionamento do método ToA.	11
Figura 2.6 - Princípio de funcionamento do método TDoA.	11
Figura 2.7 - Princípio de funcionamento do método AoA.	12
Figura 2.8 – Duas fases do <i>fingerprinting</i> .	15
Figura 2.9 – Princípio de funcionamento da trilateração.	16
Figura 2.10 – Princípio de funcionamento da multilateração, primeira iteração.	17
Figura 2.11 - Princípio de funcionamento da multilateração, segunda iteração.	18
Figura 2.12 - Método LLS.	19
Figura 2.13 - Método do centróide.	21
Figura 2.14 - Sistema monitorização da postura desenvolvido pela Universidade de Dongseo [21].	22
Figura 2.15 - Sistema de monitorização da postura, primeiro protótipo.	23
Figura 2.16 - Sistema de monitorização da postura, segundo protótipo.	24
Figura 2.17 - Mecanismo básico WiPS [26].	27
Figura 2.18 - Exemplos ilustrativos de ROCRSSI [27].	28
Figura 3.1 - Canais 802.15.4, frequência 2400 MHz.	36
Figura 3.2 - Formato de uma supertrama.	38

Figura 3.3 - Formato da supertrama IEEE 802.15.4.	39
Figura 3.4 - RSSI no campo do FCS.....	43
Figura 3.5 - Formato da trama utilizada no pela aplicação PER Test.....	44
Figura 3.6 - Formato da trama, ambiente externo.	44
Figura 3.7 - SmartRF05EB [37].	46
Figura 3.8 - Arquitetura da SmartRF05EB.....	47
Figura 3.9 - CC2530 Evaluation Module [37].	48
Figura 3.10 - Área de testes em ambiente externo.	52
Figura 3.11 - Fluxograma do recetor, ambiente externo.....	54
Figura 3.12 - Fluxograma do emissor, ambiente externo.....	56
Figura 3.13 - Primeiro menu do programa de leitura dos dados.	57
Figura 3.14 - Mensagem de erro na comunicação.	57
Figura 3.15 - Menu de apresentação dos dados.....	58
Figura 3.16 - Fluxograma do programa para leitura de dados.	59
Figura 3.17 - Fluxograma de tratamento de dados em ambiente externo.	61
Figura 3.18 - Área ambiente interno.....	62
Figura 3.19 - Fluxograma para escolha de emissor ou recetor, ambiente interno.	64
Figura 3.20 - Fluxograma do recetor, ambiente interno.	65
Figura 3.21 - Fluxograma do emissor, ambiente interno.	67
Figura 3.22 - Fluxograma de tratamento de dados MatLab, ambiente interno.....	69
Figura 4.1 - Valor real vs valor medido no modelo <i>One Slope</i> , para a altura 0 m.	73
Figura 4.2 - Valor real vs valor medido no modelo <i>One Slope</i> , para a altura 0 m, com o expoente calculado.....	75
Figura 4.3 - Erro absoluto no modelo <i>One Slope</i> , para a altura 0 m.	76

Figura 4.4 - Valor real vs valor medido no modelo *Path Loss*, para a altura 0 m. 78

Figura 4.5 - Erro absoluto no modelo *Path Loss*, para a altura 0 m. 78

Figura 4.6 - Valor real vs valor medido no modelo *One Slope*, para a altura 0,5 m. 81

Figura 4.7 - Valor real vs valor medido no modelo *One Slope*, para a altura 0,5 m, com o expoente calculado. 83

Figura 4.8 - Erro absoluto no modelo *One Slope*, para a altura 0,5 m. 84

Figura 4.9 - Valor real vs valor medido no modelo *Path Loss*, para a altura 0,5 m. 86

Figura 4.10 - Erro absoluto modelo *Path Loss*, para a altura 0,5 m. 86

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Resultados da interseção das esferas [4].....	7
Tabela 2.2 - RSSI em ambiente externo e interno [11].....	13
Tabela 2.3 - Parâmetros da rede na segunda arquitetura do sistema de monitorização da postura [23].....	25
Tabela 2.4 - Valor médio do RSSI com a distância [29].....	30
Tabela 3.1 - Formato da FCF.	40
Tabela 3.2 - Valores do <i>Superframe Type</i> [41].....	40
Tabela 3.3 - Valores para o <i>Destination Addressing Mode</i> [41].	41
Tabela 3.4 - <i>Address Information</i> [40].	42
Tabela 3.5 – Valores que γ pode assumir [43].....	50
Tabela 4.1 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente externo.	72
Tabela 4.2 – Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0 m, modelo <i>One Slope</i>	73
Tabela 4.3 - Diferentes valores de γ para a altura de 0 m.	74
Tabela 4.4 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0 m com o valor do γ recalculado.	75
Tabela 4.5 – Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0 m, modelo <i>Path Loss</i>	77
Tabela 4.6 - Tabela de valores recebidos para a altura 0,5 m.	80
Tabela 4.7 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0,5 m modelo <i>One Slope</i>	81
Tabela 4.8 - Diferentes valores de γ para a altura de 0,5 m.....	82

Tabela 4.9 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0,5 m com o valor do γ recalculado.....	83
Tabela 4.10 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0,5 m, modelo <i>Path Loss</i>	85
Tabela 4.11 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente interno, direção 1 para o 2.....	88
Tabela 4.12 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente interno, direção 1 para o 4.....	88
Tabela 4.13 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente interno, direção 1 para o 3.....	88
Tabela 4.14 - Diferentes valores de γ para o recetor 1, para as diferentes direções.	89
Tabela 4.15 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 2, 10 amostras.....	89
Tabela 4.16 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 2, 50 amostras.....	90
Tabela 4.17 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 2, 1000 amostras.....	90
Tabela 4.18 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 4, 10 amostras.....	90
Tabela 4.19 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 4, 50 amostras.....	91
Tabela 4.20 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 4, 1000 amostras.....	91
Tabela 4.21 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 3, 10 amostras.....	91
Tabela 4.22 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 3, 50 amostras.....	92

Tabela 4.23 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 3, 1000 amostras.....92

Tabela 4.24 - Coordenadas (x, y) e erro absoluto, direção 1 para o 2, para as várias amostras.....93

Tabela 4.25 - Coordenadas (x, y) e erro absoluto, direção 1 para o 4, para as várias amostras.....94

Tabela 4.26 - Coordenadas (x, y) e erro absoluto, direção 1 para o 3, para as várias amostras.....94

Lista de abreviaturas

AHLoS	Ad Hoc Localization System
AoA	Angle of Arrival
BI	Beacon Interval
BN	Blind Node
BO	Beacon Order
BSN	Body Sensor Network
CCA	Clear Channel Assessment
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DK	Development Kit
EB	Evaluation Board
ED	Energy Detection
EM	Evaluation Module
FCF	Frame Control Field
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMU	Inertial Measurement Unit
IR	Infrared
LAN	Local Area Network

LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LLS	Linear Least Squared
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control
MHR	MAC Header
NAVSTAR	Navigation System of Timing and Ranging
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer
PER	Packet Error Rate
PHR	PHY Header
POS	Personal Operating Space
PVC	Policloreto de Polivinila
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RN	Reference Node
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SD	Superframe Duration
SFD	Start-of-Frame Delimiter
SHR	Synchronization Header
SMA	SubMiniature version A
SO	Superframe Order

SoC	System-on-Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
UART	Universal Asynchronous Receive Transmit
USB	Universal Serial Bus
WCL	Weighted Centroid Localization
WiPS	Wireless LAN based indoor Positioning System
WLAN	Wireless Local Area Network

1. Introdução

Os sistemas de posicionamento permitem fornecer um conjunto acrescido de serviços ao utilizador. Normalmente, associa-se um sistema de posicionamento ao Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*) [1]. O GPS permite obter uma precisão satisfatória, se estivermos a falar num ambiente externo. Contudo, se estivermos no interior de um edifício, este sistema de localização torna-se inadequado, dado que:

- Os sinais de satélite não conseguem penetrar nos edifícios;
- Para aplicações que requerem maior exatidão, este tipo de sistema de posicionamento não consegue garantir os resultados esperados.

Para colmatar a incapacidade de resposta por parte do GPS nestes casos, surgiu uma série de novas propostas e ideias. Neste campo insere-se a proposta da presente dissertação, na qual se pretende desenvolver um sistema de localização baseado numa rede de sensores sem fios.

1.1 Enquadramento e motivação

Diversos serviços, aliados à comodidade e o bem-estar que são proporcionados ao utilizador, estão relacionados com os sistemas de posicionamento. Um exemplo, no caso da computação móvel, é o utilizador poder facilmente encontrar um café num ambiente interno, como no interior de um edifício.

Nesta dissertação foi desenvolvido um sistema de posicionamento baseado numa rede de sensores sem fios, que tem como vantagens o seu baixo custo de implementação, sujeito à existência prévia das infraestruturas, devido ao facto de o seu posicionamento ser feito através do RSSI (*Received Signal Strength Indication*), que está incorporado nos módulos da rede. Outra vantagem é a capacidade de fornecer ao utilizador novos serviços de localização num ambiente interno.

Do ponto de vista pessoal, a dissertação está inserida na Unidade de Especialização de Microtecnologias que integrou o plano curricular. Esta área despertou bastante interesse e, ao longo da mesma, foram abordados temas que servem de suporte para o desenvolvimento do projeto, nomeadamente as redes de sensores.

Além disso, os conhecimentos anteriormente obtidos na unidade curricular de Projeto II permitem encarar o tema com um maior conhecimento, dado que o trabalho aí desenvolvido está relacionado com o tema da dissertação.

1.2 Objetivos

Como já foi referido, esta dissertação centra-se no desenvolvimento de um sistema de posicionamento baseado numa rede de sensores sem fios e tem como principais objetivos:

- O estudo de protocolos de comunicação;
- O desenvolvimento e implementação do código que irá permitir a comunicação entre os diversos dispositivos;
- A análise dos resultados obtidos de uma sequência de testes realizados num ambiente interno e externo;
- O estudo e aplicação do algoritmo de localização, num ambiente interno.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. Desta forma serão descritas todas as etapas para a resolução do problema proposto.

No capítulo 2, estado da arte, são apresentados diversos tipos de sistemas de localização e listadas as suas principais características, de modo a que se entenda melhor a sua comparação com o sistema a utilizar. Também são referidos os diversos estudos e propostas de desenvolvimento relacionados com o tema proposto, de

modo a ser possível ter uma visão mais geral sobre o propósito do problema. Para além disso, é feita uma descrição da temática abordada.

A descrição do desenvolvimento do trabalho de dissertação tem lugar no terceiro capítulo, onde é referida toda a metodologia de resolução do problema até à implementação da solução final, bem como os materiais utilizados.

O quarto capítulo versa sobre os resultados e discussão, e aí são apresentados os resultados dos testes realizados, primeiramente num ambiente externo, posteriormente num ambiente interno.

O último capítulo, o quinto, contém as conclusões finais, bem como sugestões de investigação futuras.

2. Estado da arte

O GPS é provavelmente o sistema de posicionamento mundialmente mais conhecido. Contudo, a sua incapacidade de fornecer a localização num ambiente interno devido ao facto de os sinais de satélite não poderem penetrar nos edifícios, e à circunstância de este sistema de posicionamento não conseguir garantir os resultados esperados em aplicações que requerem maior exatidão, deu azo ao surgimento de uma série de novos sistemas de posicionamento e estudos para o mesmo propósito.

Neste capítulo serão apresentados alguns desses sistemas de posicionamento e referidos diversos estudos e propostas de desenvolvimento relacionadas com o tema em questão. Serão também descritos diversos conceitos teóricos fundamentais para a realização do trabalho.

2.1 Tecnologias de localização

A pesquisa e o conhecimento prévio de um determinado tema é fundamental para a sua melhor compreensão. Daí a necessidade de conhecer os diversos sistemas de localização já desenvolvidos.

2.1.1 GPS – Sistema de Posicionamento Global

O Sistema de Posicionamento Global, denominado anteriormente por NAVSTAR – *Navigation System for Timing and Ranging*, é atualmente conhecido por GPS – *Global Positioning System* [1]. O GPS é um sistema de navegação baseado em satélites, que foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos EUA, no início dos anos 70. Na primeira metade do século XX, diversas organizações estavam a desenvolver, separadamente, a tecnologia que mais tarde viria a criar este sistema

de localização GPS. Desses projetos destacam-se a Transit [2], a TIMATION [3] e o programa 612B [4].

Inicialmente, o GPS foi desenvolvido como um sistema militar, para responder às necessidades militares dos Estados Unidos. Contudo, em 1983, quando um Boeing 747 foi abatido após entrar no espaço aéreo interdito da URSS, o presidente dos EUA Ronald Reagan permitiu que o GPS se tornasse disponível para uso civil [5], pois já se encontrava suficientemente desenvolvido. Atualmente, o sistema GPS é constituído por 28 satélites que estão em órbita à volta da Terra, quatro dos quais são satélites de reserva, Figura 2.1. Este sistema ficou totalmente operacional em 1994.

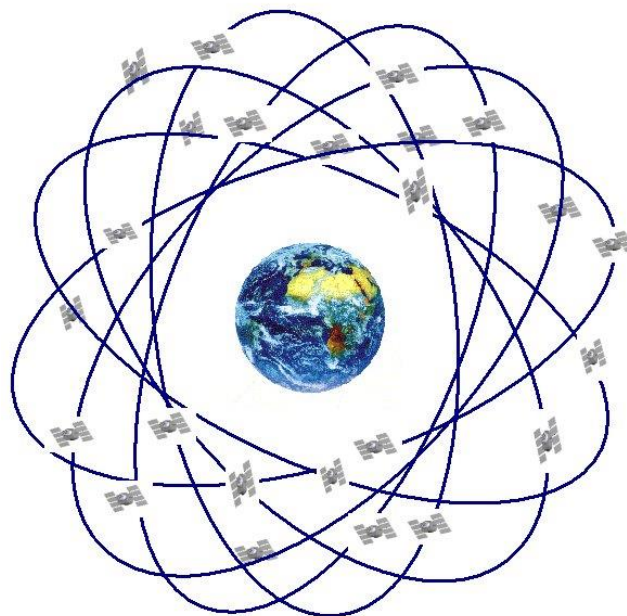


Figura 2.1 - Satélites GPS em órbita na Terra [6].

O recetor GPS calcula a sua posição através do tempo que demora a chegar a mensagem proveniente do satélite. Os satélites GPS estão continuamente a enviar mensagens que indicam o instante em que a mensagem foi transmitida e a posição do satélite no momento da transmissão.

Assim, o recetor utiliza as mensagens recebidas e determina a distância a cada um dos satélites utilizando a velocidade da luz, por meio da equação 2.1.

$$d = (t_r - t_e) * c \quad (2.1)$$

Em que d é a distância, c é a velocidade da luz (299.792.458 m/s), t_r é o instante de recepção do sinal GPS pelo recetor e t_e é o instante de emissão do sinal GPS pelo satélite. Estas distâncias e localizações são utilizadas para estimar a posição do recetor.

Geralmente, o GPS necessita que 4 ou mais satélites tenham um campo de visão não obstruído para obter um resultado preciso, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Resultados da interseção das esferas [4].

Interseção	Resultado
Interseção de 2 esferas	Círculo
Interseção de 3 esferas	Dois Pontos
Interseção de 4 esferas	Um ponto

Deste modo, com as distâncias obtidas e utilizando um algoritmo de trilateração, Figura 2.2, explicado na secção 2.3.2, é possível obter a posição do recetor.

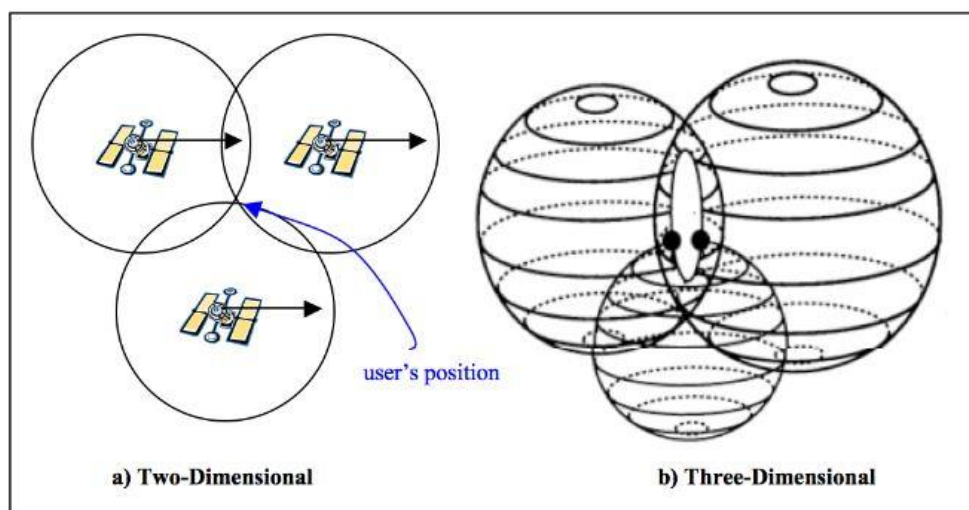


Figura 2.2 - Exemplo de trilateração [4].

2.1.2 Wi-Fi

Outro sistema de localização consiste na utilização de redes Wi-Fi, que é possível encontrar em diversos locais. Comparativamente ao GPS, o Wi-Fi tem a vantagem de conseguir fazer uma localização num ambiente interno ou mesmo em ambientes externos onde os sinais GPS têm um fraco sinal. A maior desvantagem deste tipo de tecnologia comparativamente ao GPS é que não existe uma rede mundial Wi-Fi abrangente a todos os locais.

Para realizar uma localização através de uma rede Wi-Fi é necessário ter apenas 3 pontos de acesso. A distância a que está o terminal dos pontos de acesso pode ser obtida através da potência do sinal recebido [7].

2.1.3 GSM

A localização com base em dispositivos móveis permite obter a posição atual de um telemóvel. Este tipo de localização pode-se conseguir por via de trilateração, secção 2.3.2, feita através dos sinais rádio enviados das várias antenas para as antenas base [8].

O GSM (*Global System for Mobile Communications*), originalmente chamado de *Groupe Spécial Mobile*, é uma norma *standard* desenvolvida pelo Instituto Europeu de Normas para as Telecomunicações para descrever os protocolos utilizados pelos telemóveis de segunda geração, também conhecidos por 2G.

O princípio de funcionamento da localização neste tipo de sistema é, e possível de ser observado na Figura 2.3:

1. O telemóvel envia o sinal para as diversas antenas próximas;
2. O *software* de posicionamento calcula por trilateração a posição dos sinais recebidos pelas antenas;
3. Os dados são convertidos numa localização geográfica.

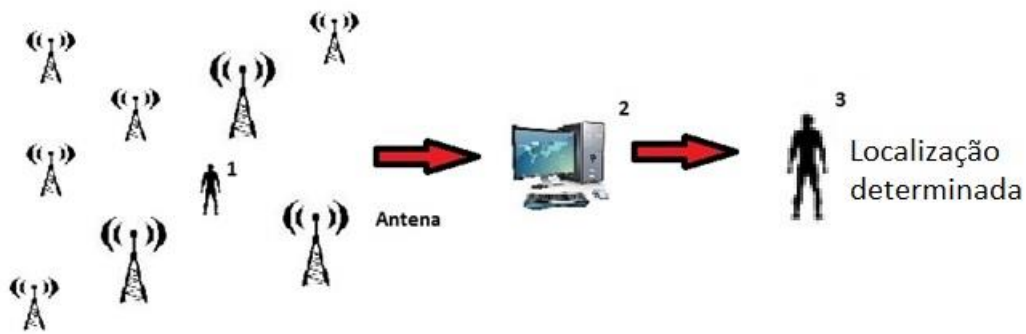


Figura 2.3 - Localização por antenas GSM.

2.1.4 Outros sistemas de localização

Existem ainda outros sistemas de localização, que utilizam diferentes tecnologias tais como RFID – *Radio-Frequency IDentification*, IR – *Infrared*, ultrassons, entre outros.

O método de identificação através de RFID é um método baseado em dispositivos denominados de etiquetas RFID [9]. Uma etiqueta ou *tag* RFID é um pequeno objeto que pode ser colocado numa pessoa, animal, equipamento, embalagem, entre outros. Contém chips de silício e antenas que permitem responder aos sinais rádio enviados por uma base emissora.

A localização por IR [10] consiste num sistema de orientação que utiliza a emissão de um terminal de radiação eletromagnética na parte do infravermelho para localização.

2.2 Métodos de localização

Nesta secção são descritos os diversos métodos de localização, as suas características e fatores comparativos. No que diz respeito aos métodos, os sistemas de localização podem ser classificados segundo mostra a Figura 2.4.

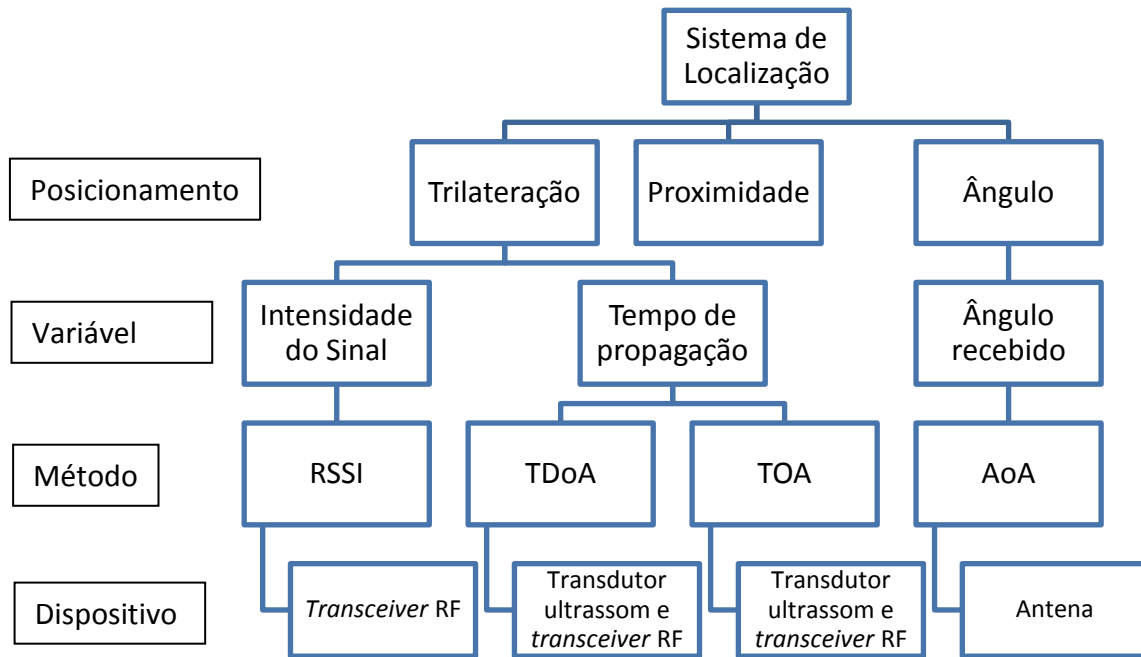


Figura 2.4 - Classificação dos métodos de localização.

2.2.1 Tempo de chegada

O tempo de chegada, ou ToA (*Time of Arrival*), é um método de localização que consiste em determinar a distância entre o emissor e o recetor através do tempo que as mensagens demoram a chegar ao seu destino [15][16].

Essa distância é calculada sabendo, à partida, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e, com isso, é possível determinar a distância que a mensagem percorreu, utilizando a velocidade da luz como referência. Na equação 2.2 é possível relacionar essas três variáveis.

$$d = v * t \quad (2.2)$$

Sendo assim, d é a distância, v a velocidade de propagação e t , o tempo que a mensagem demora a chegar ao seu destino. A Figura 2.5 ilustra o princípio de funcionamento deste método [15].

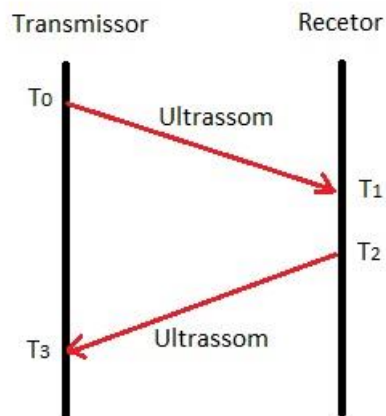


Figura 2.5 – Princípio de funcionamento do método ToA.

2.2.2 Diferença do tempo de chegada

O TDoA (*Time Difference of Arrival*) [15][16], apesar de semelhante ao método ToA, utiliza dois sinais que se deslocam no tempo a velocidades diferentes, como por exemplo, sinais RF (Radio Frequência) e ultrassom. A Figura 2.6 demonstra o funcionamento do TDoA, em que T_0 é o instante em que o transmissor emite o sinal de RF, seguido de T_2 , em que é emitido o sinal de ultrassom.

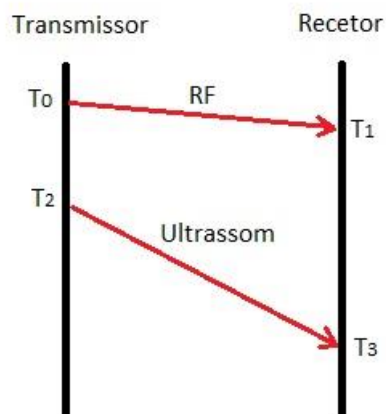


Figura 2.6 - Princípio de funcionamento do método TDoA.

O recetor pode de seguida determinar a distância ao emissor, através da equação 2.3 [15].

$$d = ((T_3 - T_1) - (T_2 - T_0)) * \left(\frac{V_{RF} * V_{US}}{V_{RF} - V_{US}}\right) \quad (2.3)$$

Onde V_{RF} e V_{US} são as velocidades dos sinais de RF e ultrassom, respetivamente.

2.2.3 Ângulo de chegada

No caso do AoA (*Angle of Arrival*) [15] [16], os emissores possuem um conjunto de antenas direcionais que cobrem um ângulo de 360 graus. Um terminal, ao receber os sinais dos emissores, verifica qual deles é que tem maior potência e, então, determina qual o ângulo a que está o emissor. Com o recurso a dois emissores já é possível calcular a localização do recetor, desde que esteja situado no mesmo plano, como é possível observar na Figura 2.7.

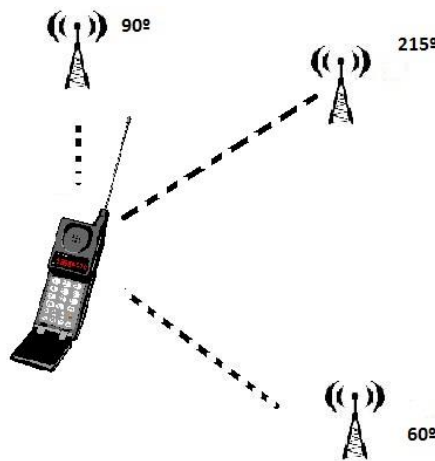


Figura 2.7 - Princípio de funcionamento do método AoA.

2.2.4 Potência do sinal recebido

O RSSI (*Received Signal Strength Indication*) de um sinal recebido pode ser usado para estimar a distância, pois as ondas eletromagnéticas têm uma relação do inverso do quadrado entre a potência do sinal recebido e a distância (equação 2.4 [12]).

$$P_r \propto \frac{1}{d^2} \quad (2.4)$$

Onde P_r representa a potência recebida e d a distância do emissor ao recetor. Esta equação demonstra a relação entre a potência e a distância, que pode ainda ser relacionada com a comparação entre a potência recebida e a potência de transmissão, chamada de *Path Loss*.

Na utilização do método do RSSI, é necessário ter em consideração as diferenças entre a localização num ambiente interno e num ambiente externo. Adotando o RSSI, o desempenho e os métodos de execução são totalmente diferentes para cada um dos meios. A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre o ambiente interno e o ambiente externo.

Tabela 2.2 - RSSI em ambiente externo e interno [11].

	Externo	Interno
Modelo <i>Path Loss</i>	Linear	Afetado por <i>multipath</i> e <i>shadowing</i>
Exatidão	Mais fácil de atingir, menos importante (espaço aberto)	Mais difícil de atingir, mais importante (espaços pequenos)
Espaço	Grande e não limitado	Pequeno e maioritariamente retangular
Mapa	Global	Local

O modelo *Path Loss* utilizado para fazer a comparação entre os dois ambientes é descrito no secção 3.4.2. Este modelo é capaz de converter o valor de RSSI numa distância.

Num ambiente interno, a variação da intensidade do sinal com a distância não é linear, devido a fatores como a propagação multipercurso (*multipath*) [13] e o efeito de obstrução (*shadowing*) [14]. Por isso, é necessário estudar o local, por forma a contornar esse problema e, assim, aumentar a exatidão. Comparativamente com um ambiente externo, num ambiente interno a área coberta é menor, o que faz com que o erro aumente pois se a área é menor, a percentagem do erro é mais notória e, por sua vez, a exatidão decresce.

Para determinar as coordenadas da localização do dispositivo, as distâncias entre os vários dispositivos são relacionadas por multilateração. Quanto maior for o número de nós de referência maior é a exatidão, mas maior é também a complexidade no processamento. Para obter a localização do dispositivo são necessários, pelo menos, três nós de referência - trilateração, descrita na secção 2.3.2.

2.3 Algoritmos de localização

Na secção anterior foi abordada a forma de calcular a distância entre dois dispositivos. Caso um nó conheça a sua distância para os diversos dispositivos na rede local, é possível determinar a sua localização. Esta secção apresenta diferentes algoritmos que podem ser utilizados para esse propósito.

2.3.1 Fingerprinting

A técnica do *fingerprinting* consiste em fazer um mapeamento prévio de um determinado local e armazenar os dados recolhidos numa base de dados para, posteriormente utilizá-los para determinar a localização de um dado dispositivo. A ideia fundamental da técnica do *fingerprinting* é comparar os sinais recebidos (ou enviados) pelo dispositivo com aqueles existentes na base de dados e, desta forma, determinar a localização do dispositivo. Este tipo de solução tem duas fases, ilustradas na Figura 2.8:

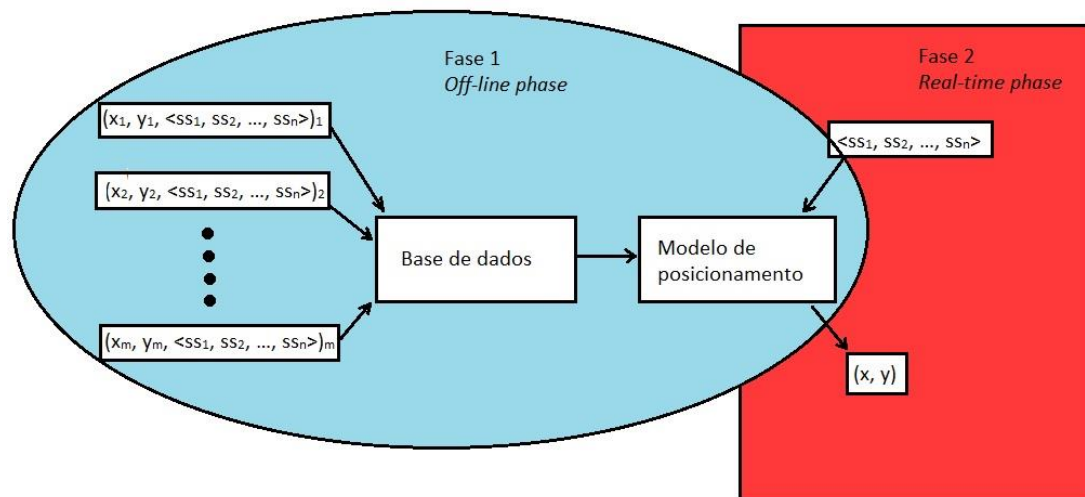


Figura 2.8 – Duas fases do *fingerprinting*.

- *Off-line phase* – a finalidade desta fase é a recolha dos sinais de todas as estações base em cada ponto do local mapeado. Em primeiro lugar, é definido o número de amostras para a base de dados e, de seguida, são recolhidos os valores de RSSI em cada ponto. Cada entrada na base de dados tem o formato $(x, y, \langle ss_1, ss_2, \dots, ss_n \rangle)$, em que x, y são as coordenadas do ponto e $ss_i, i=1, \dots, n$, é a intensidade do sinal recebido naquele ponto.
- *Real-time phase* – depois de termos a base de dados, é possível estimar a localização de um determinado dispositivo, através da comparação entre o valor de RSSI recebido pelo dispositivo, e os valores contidos na base de dados.

2.3.2 Trilateração

A trilateração é uma técnica que permite obter o posicionamento através de um conjunto de nós cuja posição é conhecida [15]. Os nós podem transmitir sinais, de modo a que outros dispositivos possam determinar as suas distâncias a estes terminais, pela intensidade do sinal recebido. Caso um dispositivo consiga estar num campo em que haja pelo menos três nós, a sua localização pode ser obtida.

A Figura 2.9 a) mostra o funcionamento da trilateração, em que A, B e C são os nós com localização conhecida. A partir de um sinal transmitido, é possível determinar que o dispositivo está localizado no círculo centrado em A. Por sua vez, a partir dos sinais emitidos por B e C, podemos estimar que o objeto se encontra localizado nos círculos centrados em B e C.

O ponto de interseção dos três círculos dar-nos-á, por estimativa, a localização do dispositivo. A Figura 2.9 a) representa o caso ideal de localização por trilateração. Contudo, na prática, devido a erros na estimativa das distâncias, é mais comum encontrar-se uma situação como a que é representada na Figura 2.9 b) em que os três círculos não se encontram num único ponto comum. Nesse caso, o valor máximo do método de probabilidade pode ser usado para calcular a localização do dispositivo.

Sabendo que os três nós - A, B e C - estão localizados em (x_A, y_A) , (x_B, y_B) e (x_C, y_C) , respetivamente, para qualquer ponto de coordenadas (x, y) no plano, a posição pode ser calculada pela equação 2.5.

$$\delta_{x,y} = \left| \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} - r_A \right| + \left| \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2} - r_B \right| + \left| \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2} - r_C \right| \quad (2.5)$$

Onde r_A , r_B e r_C são as distâncias estimadas para A, B e C respetivamente. A localização do objeto pode ser vista como o ponto (x, y) .

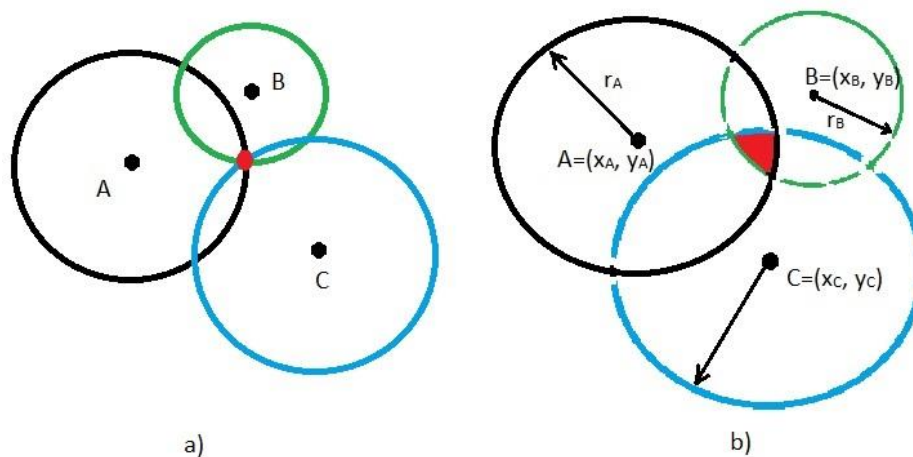


Figura 2.9 – Princípio de funcionamento da trilateração.

2.3.3 Multilateração

No método de trilateração são necessários pelo menos três nós com localização conhecida para determinar a localização do objeto. Numa rede de vários sensores, em que os nós são implantados de forma aleatória, podem não existir pelo menos três nós com localização conhecida. Sendo assim, vários métodos de multilateração são propostos para contornar esta limitação.

O AHLoS (*Ad Hoc Localization System*) é um sistema distribuído para a descoberta da localização do objeto. Numa rede, alguns locais dos nós são conhecidos e existem ainda alguns objetos com localização desconhecida. O método AHLoS permite que os nós determinem a localização através de alguns algoritmos iterativos [17].

O método básico é a multilateração atômica, em que é possível estimar a localização do objeto se existirem pelo menos três nós dentro do alcance de deteção. Os nós 1, 2, 3, 4 estão em locais desconhecidos numa primeira iteração, como demonstra a Figura 2.10.

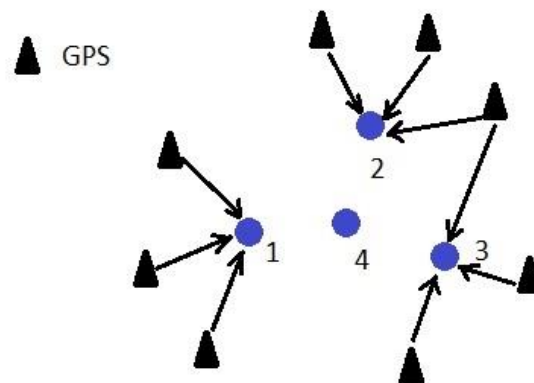


Figura 2.10 – Princípio de funcionamento da multilateração, primeira iteração.

Na primeira iteração são determinadas as localizações dos nós 1, 2 e 3. Para facilitar a localização dos restantes nós, os nós 1, 2 e 3 neste método ficam com localização conhecida, via GPS. Numa segunda iteração, o nó 4 pode ser localizado através dos nós 1, 2 e 3 como é possível constatar na Figura 2.11.

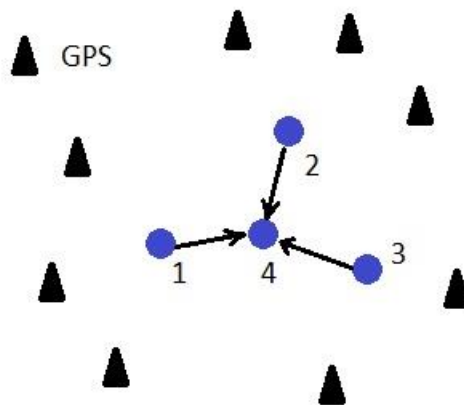


Figura 2.11 - Princípio de funcionamento da multilateração, segunda iteração.

A equação 2.6, substituindo a matriz A e B pelas equações 2.7 e 2.8 respectivamente, permite obter a matriz X que corresponde à localização do ponto que se pretende determinar. A equação de localização 2.6 é desenvolvida pelas equações 2.7 e 2.8 [18].

$$AX = B \quad (2.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 2 * (x_1 - x_n) & 2 * (y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2 * (x_{n-1} - x_n) & 2 * (y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$B = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 - d_1^2 + d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 - d_{n-1}^2 + d_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

As variáveis x_n e y_n correspondem à localização do nó n , d_n representa a distância do nó desconhecido ao nó n , e x_0 e y_0 correspondem à localização do nó desconhecido.

2.3.4 Método dos mínimos quadrados

O método LLS (*Linear Least Squared*) é uma abordagem matemática para a técnica de trilateração, usando um conjunto de medições de distâncias e ângulos

entre um nó desconhecido e um número fixo de *beacons* [19]. Para uma localização bidimensional, é necessário saber a distância de três *beacons*. Com mais de três nós, o resultado do sistema linear é sobredeterminado. A Figura 2.12 apresenta uma configuração com quatro *beacons*.

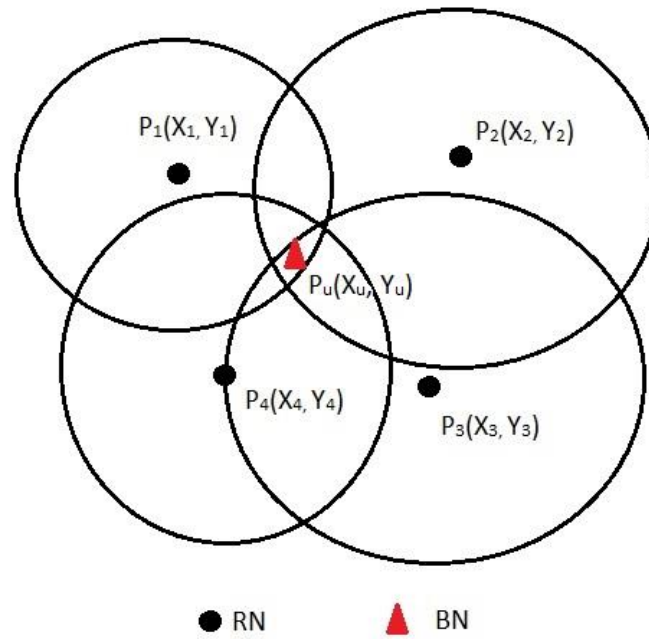


Figura 2.12 - Método LLS.

Os círculos apresentam a estimativa das distâncias, mas não se cruzam num único ponto. Assim, não existe uma solução exata para o sistema. A abordagem LLS minimiza a soma dos quadrados dos erros às estimativas dos erros das distâncias (equação 2.9) [20].

$$\tilde{d}_j = (j = 2, \dots, N_{RN}) \quad (2.9)$$

Onde RN (*Reference Node*) é o nó de referência, para resolver o seguinte sistema de equações 2.10.

$$(x_u - x_j)^2 + (y_u - y_j)^2 = \tilde{d}_j^2 \quad (2.10)$$

A solução para a equação 2.11 procede da substituição da localização do primeiro RN e posteriores, equação 2.10.

Os novos sistemas de equações têm a forma de uma matriz (equações 2.11 a 2.14).

$$AX = B \quad (2.11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 2y_1 - 2y_2 \\ 2x_1 - 2x_3 & 2y_1 - 2y_3 \\ \dots & \dots \\ 2x_1 - 2x_n & 2y_1 - 2y_n \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} \widetilde{d}_2^2 - \widetilde{d}_1^2 + x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 \\ \widetilde{d}_3^2 - \widetilde{d}_1^2 + x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 \\ \dots \\ \widetilde{d}_n^2 - \widetilde{d}_1^2 + x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

A estimativa da posição do BN (*Blind Node*) pode ser calculada, com o método LLS, resolvendo a equação 2.15.

$$\begin{bmatrix} \widehat{x}_u \\ \widehat{y}_u \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} (A^T B) \quad (2.15)$$

2.3.5 Método do centróide

O método do centróide é uma técnica baseada na proximidade para determinar a posição de um BN com a ajuda de certos nós de referência com o mínimo de *software*. A sua implementação usa o alcance para um nó de referência para uma estimativa da localização aproximada [19].

Neste método, existe um número fixo de pontos de referência que enviam periodicamente *beacons* que contêm a informação da posição (X_i, Y_i) . Depois de receber um *beacon*, é possível determinar a posição de um BN, usando a equação 2.16.

$$(X_{est}, Y_{est}) = \left(\frac{X_1 + \dots + X_N}{N}, \frac{Y_1 + \dots + Y_N}{N} \right) \quad (2.16)$$

Em que X_{est}, Y_{est} são as posições estimadas do RN. Na Figura 2.13 é apresentado um possível cenário com quatro nós de referência. Assumindo que todo o alcance da

comunicação é uniformemente circular, o BN está localizado dentro da área sombreada quando tem um alcance para os quatro nós de referência.

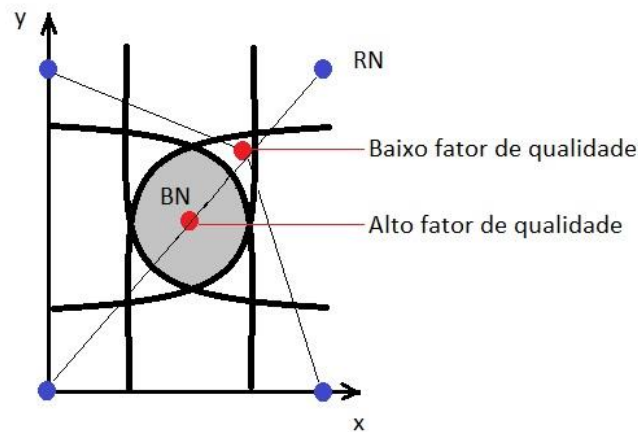


Figura 2.13 - Método do centróide.

O método centróide é um algoritmo que tem uma precisão baixa e que depende diretamente do número de nós de referência e a distância à que estes se encontram de um BN.

De forma a aumentar a precisão da localização e ao mesmo tempo, diminuir a influência dos RN, o valor do RSSI é utilizado. Este método denomina-se de WCL (*Weighted Centroid Localization*). O método foi utilizado na resolução da proposta de dissertação para obter a localização do emissor, num ambiente interno.

O objetivo deste método é fornecer uma maior influência aos RNs que se encontram mais perto do BN. Como o RSSI aumenta com a distância, secção 2.2.4, este é usado como fator de ponderação. Assim, é utilizado um modelo de cálculo para determinar a distância d , em função do RSSI recebido.

A ideia fundamental do método WCL é utilizar um fator de ponderação ou peso. Este peso é dado pela equação 2.17.

$$w_i = \frac{1}{d_i} \quad (2.17)$$

Em que w_i é o peso, e d_i a distância calculada através do RSSI recebido. A distância, no caso da dissertação, é calculada através do modelo *One Slope*.

Desta forma, as coordenadas (x, y) são determinadas pela equação 2.18, em função do valor w_i calculado em 2.17.

$$Pi(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i * Bi(x, y))}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.18)$$

Onde $Pi(x, y)$ são os valores das coordenadas calculadas, w_i é o peso, e $Bi(x, y)$ o a posição do sensor e i o número do sensor.

2.4 Sistema de monitorização de postura

Um sistema de monitorização de postura consiste, tal como o nome indica, num sistema concebido para monitorizar o movimento do corpo. Foram já desenvolvidos vários sistemas que usam acelerómetros como base para a deteção de diferentes posturas e movimentos. Neste sentido, investigadores da Universidade de Dongseo, na Coreia do Sul, criaram um módulo sem fios com um acelerómetro de três eixos para medir a postura e o movimento [21]. O sensor foi colocado no lado direito da anca do utilizador e foram medidas as variações da aceleração sofrida, enquanto este repetira posturas fixas e em movimento. De forma a reconhecer os movimentos, os investigadores desenvolveram um algoritmo que permitia avaliar a saída do sensor Figura 2.14.

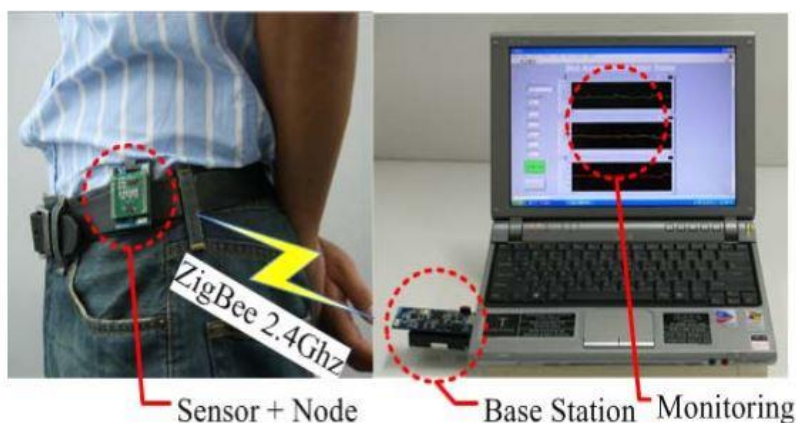


Figura 2.14 - Sistema monitorização da postura desenvolvido pela Universidade de Dongseo [21].

Após efetuarem diversas experiências, foram registados resultados com uma precisão de reconhecimento de 98% ao andar, de 96% a correr, de 100% ao cair, de 100% sentado e de 100% deitado. Contudo, e apesar da grande precisão do sistema, este apenas permite reconhecer a postura e o movimento básico, tendo como limitação a ausência da indicação da direção do movimento e a falta de conhecimento dos restantes membros do corpo.

Neste sentido, foi desenvolvido no Departamento de Eletrónica Industrial na Universidade do Minho um projeto que permite a medição da orientação e movimento do corpo humano em tempo real, mas também a frequência cardíaca e a frequência respiratória [22]. Esta é constituída por cinco módulos sensoriais, através de acelerómetros e de magnetómetros, dos quais dois são colocados nos membros superiores, outros dois são colocados nos membros inferiores e um na coluna vertebral. Do ponto de vista da frequência cardíaca, esta é medida com um sensor infravermelho colocado na orelha e a frequência respiratória é medida através de uma indutância colocada em torno do tronco, Figura 2.15. Para além disso, é utilizado um computador para servir de estação base onde os dados são recebidos, armazenados e vistos em tempo real.

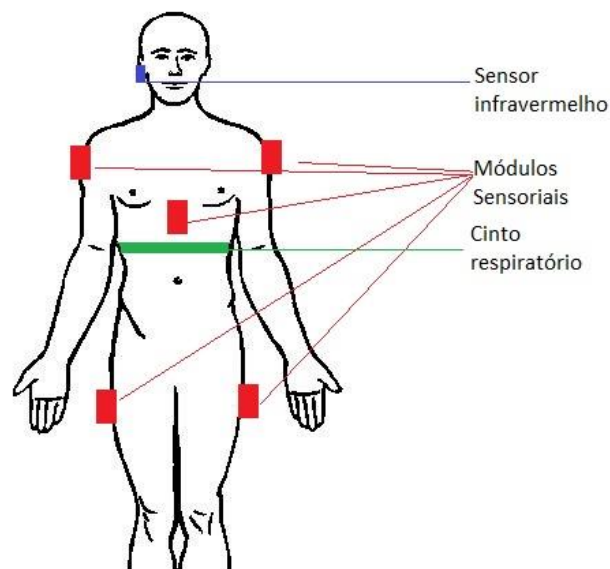


Figura 2.15 - Sistema de monitorização da postura, primeiro protótipo.

A arquitetura do sistema, no primeiro protótipo, consistia no facto dos sensores estarem conectados por fios através de uma BSN (*Body Sensor Network*) a uma estação sem fios que, posteriormente comunicava com uma estação base. Uma BSN é caracterizada pela presença de sensores presos ao corpo do utilizador, para desta forma adquirirem sinais físicos e uma central de monitorização, para receber os dados dos sensores. Estas redes podem permitir um controlo de vários tipos de sinais, como a temperatura, a pressão arterial, a frequência respiratória, entre outros.

O segundo protótipo baseia-se numa arquitetura completamente sem fios com a estação base, Figura 2.16 [23]. Esta permite uma maior flexibilidade quando comparada com a primeira, uma vez que o número de módulos sensoriais aumenta e a sua distribuição pelo corpo pode ser facilmente alterada.

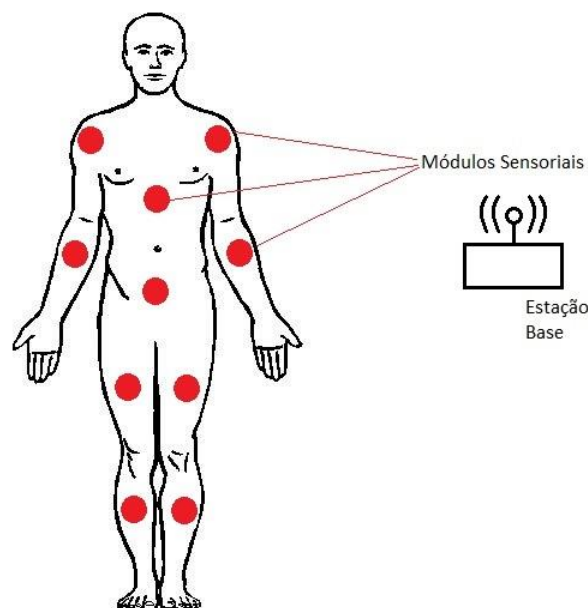


Figura 2.16 - Sistema de monitorização da postura, segundo protótipo.

Os módulos sensoriais são constituídos por um microcontrolador, um conversor analógico-digital, um *transceiver*, uma antena, uma bateria e os respetivos sensores. Este foi baseado no CC2430, um SoC (*system-on-chip*) da Texas Instruments que integra um microcontrolador, um conversor analógico-digital e um *transceiver*.

Após a realização das simulações, a Tabela 2.3 apresenta os parâmetros relacionados com a rede e os valores.

Tabela 2.3 - Parâmetros da rede na segunda arquitetura do sistema de monitorização da postura [23].

Parâmetro	Valor
<i>PHY overhead</i>	6 bytes
<i>MAC overhead</i>	9 bytes
Tamanho do <i>payload</i>	28 bytes
Duração da supertrama	100 ms

Em comparação com a dissertação, o tamanho total da trama utilizada nos testes em ambiente externo e interno é igual. A principal diferença prende-se com o facto de o segundo protótipo se basear no CC2430 ao invés da proposta da dissertação que será desenvolvida com recurso ao CC2530, secção 3.2.2.

2.5 Sistemas de localização baseados no RSSI

Na presente de dissertação, como foi já descrito anteriormente, pretende-se implementar um sistema de localização para uma rede de sensores sem fios. Para isso, e depois de estudar todos os métodos de estimar a distância do recetor ao emissor, optou-se por conceber o sistema utilizando o RSSI, pelas seguintes razões:

- Baixo custo de implementação devido à existência das infraestruturas;
- Baixo consumo;
- Não necessidade de qualquer *hardware* extra.

Nesta secção são descritos outros sistemas de localização que utilizam esta técnica para estimar a posição do recetor.

2.5.1 RADAR

O RADAR é um sistema de localização que utiliza sinais RF para permitir a localização dos utilizadores num ambiente interno. Este sistema utiliza o valor da

intensidade do sinal recebido em diversas estações base e um algoritmo de trilateração para obter as coordenadas do nó e desta forma registar os diferentes valores do RSSI, para criar um mapa do edifício [24].

Este mapa consiste numa base de dados do edifício, com os dados (x, y, z, ss_i) ($i=1\dots n$), onde (x, y, z) são as coordenadas da localização, ss_i a intensidade do sinal recebido para aquele ponto, e i o número de estações base. Posteriormente, o utilizador poderá caminhar ao longo do mapa e este saberá a localização por comparação dos dados recebidos com os da base de dados [25].

O sistema de localização RADAR, por comparação com a dissertação, utiliza o método baseado em *fingerprinting* para estimar a posição do utilizador. Neste caso, é necessário saber antecipadamente qual o valor do RSSI para cada posição e, deste modo, é criado um mapa do local. No sistema de posicionamento da dissertação é utilizado o método de localização WCL que não necessita de uma recolha de dados e criação do mapa inicial.

2.5.2 WiPS

WiPS (*Wireless LAN based indoor Positioning System*) é um sistema de localização num ambiente interno [26]. Este sistema utiliza o valor do RSSI de cada pacote enviado entre os seus terminais para determinar a distância a que se encontram. Este sistema é direcionado para a norma IEEE 802.11.b.

A Figura 2.17 demonstra a grande diferença do sistema WiPS para os outros sistemas WLAN (*Wireless Local Area Network*) convencionais. Um sistema WLAN conecta dois ou mais dispositivos que utilizam comunicação *wireless*. Este sistema permite aos utilizadores uma maior mobilidade para se deslocarem pois, se continuarem abrangidos pela área coberta continuam ligados à rede.

No caso de um sistema WLAN, que use o RSSI, este usa apenas RSSI obtido entre o ponto de acesso e o terminal, e, de seguida, calcula a localização de cada terminal. No caso do WiPS, valor do RSSI que é obtido provém não apenas dos pontos de

acesso em comunicação com os terminais, mas também entre os próprios terminais da rede.

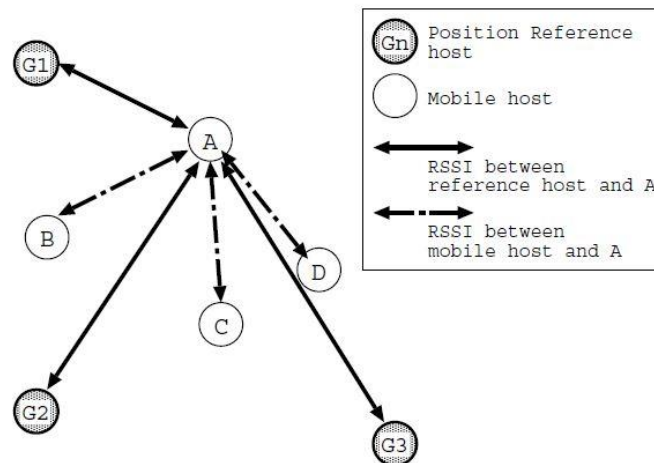


Figura 2.17 - Mecanismo básico WiPS [26].

Para o cálculo da distância, o sistema WiPS utiliza o modelo de propagação de espaço livre, secção 3.4.2, que assume as condições ideais de propagação, ou seja, a existência de uma linha de vista entre o terminal e o recetor.

A grande diferença do sistema WiPS para a dissertação provém da norma utilizada. O sistema WiPS foi desenvolvido para a norma IEEE 802.11.b, enquanto na dissertação a norma utilizada é a IEEE 802.15.4, secção 3.1.

2.5.3 Ring Overlapping

O ROCRSSI (*Ring Overlapping based on Comparison of Received Signal Strength Indicator*) é um outro sistema de localização que, como o próprio nome indica, utiliza o valor do RSSI para estimar a posição [27]. Este sistema necessita de conhecer as coordenadas de localização dos nós, e, por sua vez, esses nós utilizam uma série de anéis com os diferentes valores de RSSI, para assim determinar a posição do terminal.

A Figura 2.18 (a) demonstra um exemplo deste sistema. No caso, para o terminal S, em que a distância é superior a A – B, mas inferior a A – C, pode concluir-se que S

está contido na circunferência centrada em A, com distância superior a A-B, mas inferior a A-C. Por sua vez, se for usado agora um anel centrado em B e um outro centrado em C, através da intersecção destes anéis é possível calcular a posição estimada. Isto é demonstrado na Figura 2.18 (b).

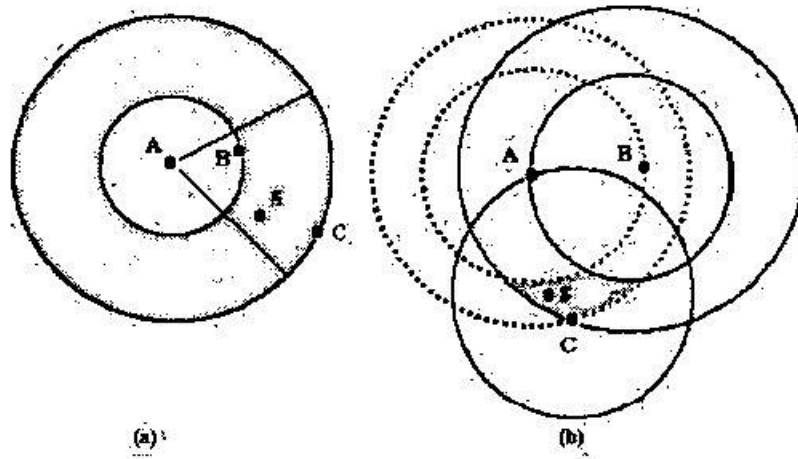


Figura 2.18 - Exemplos ilustrativos de ROCRSSI [27].

2.5.4 LANDMARC

O sistema LANDMARC (*Location Identification based on Dynamic Active RFID Calibration*) é um sistema de calibração RFID que junta a ideia de ter marcas de referência num local fixo, para assim ajudar a calibração [28].

Esta tecnologia permite à partida três vantagens: a desnecessidade de um grande número de leitores RFID; o ambiente pode ser facilmente ajustado; e as informações de localização são mais confiáveis e precisas.

O sistema LANDMARC necessita de obter o RSSI de cada um dos leitores. Contudo, o atual sistema de RFID não fornece a intensidade do sinal das etiquetas diretamente ao leitor. Os leitores apenas apresentam um nível de potência, que varia entre 1-8.

Supondo agora que existem n leitores RF, com m marcas de referência e u tags a serem monitorizadas. A intensidade do sinal é definida por 2.19, onde S_i é a intensidade do sinal da tag, e i varia entre (1 e n).

$$S = (S_1, S_2 \dots S_n) \quad (2.19)$$

Para a *tag* de referência, temos o vetor do RSSI, como apresenta 2.20.

$$\theta = (\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n) \quad (2.20)$$

Onde θ_i é a intensidade do sinal. Para cada *tag* individual p , onde $p \in (1 \text{ e } u)$, foi introduzida a distância Euclidiana na intensidade do sinal, obtendo 2.21.

$$E_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - S_i)^2} \quad (2.21)$$

Onde $j \in (1, \dots, m)$, que é a relação da distância Euclidiana entre a *tag* e uma *tag* de referência, sendo E a relação entre a localização das *tags* com as *tags* de referência, ou seja, a *tag* de referência mais próxima da *tag* tem um menor valor de E . Quando existem m *tags* de referência, uma *tag* para ser monitorizada tem o vetor E como 2.22.

$$E = (E_1, E_2 \dots E_n) \quad (2.22)$$

A maneira mais simples de encontrar uma *tag* de referência mais próxima da *tag* consiste em utilizar as coordenadas da *tag* de referência com o menor E . O algoritmo da equação 2.23 traduz esse método.

$$(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i (x_i, y_i) \quad (2.23)$$

Em que W_i é o fator de ponderação para o $i = (1 \text{ e } n)$ da *tag* de referência.

2.5.5 Design and Implementation of a RSSI-based Location System

Nos algoritmos de localização baseados no RSSI, o recetor obtém a localização através da relação entre a distância e a perda da intensidade do sinal [29]. Para a realização dos testes, de modo a obter a relação entre a perda do sinal e a distância neste caso, utilizaram-se os chips MSP430 e CC2420, e os valores foram obtidos em testes realizados num ambiente externo, pois as obstruções estão diretamente ligadas com a precisão.

No chip CC2420, o RSSI pode ser obtido através da equação 2.24.

$$P = RSSI_{VAL} + RSSI_{OFFSET} \quad (2.24)$$

Em que $RSSI_{OFFSET}$ é -45 dBm, e $RSSI_{VAL}$ o valor obtido em cada leitura.

Após uma série de testes, foi verificado que não existe qualquer relação entre a distância e o RSSI, num ambiente interno. Contudo, no caso de um ambiente externo, fatores como a distância, a direção da antena, a altura dos nós relativamente ao nível do solo e os obstáculos estão diretamente relacionados.

Como condição inicial, estabeleceu-se a altura de 2 m em relação ao nível do solo para a altura dos nós e a posição das antenas sempre igual. Durante os testes foram recolhidas 500 amostras para cada posição e, ao eliminar os dados menos confiáveis, obteve-se a Tabela 2.4, que relaciona a distância em metros com o valor médio do RSSI em dBm.

Tabela 2.4 - Valor médio do RSSI com a distância [29].

Distância [m]	Valor médio do RSSI [dBm]
20	-10,897
30	-16,771
50	-19,378
80	-23,921
100	-24,509

Posteriormente foi possível calcular a distância pela equação 2.25.

$$d = 0,4425 * RSSI^2 + 10,2174 * RSSI + 78,6547 \quad (2.25)$$

Para obter a localização do nó desconhecido D (x, y), recorreu-se ao método de trilateração, pois já anteriormente eram conhecidas as coordenadas dos nós A(x_A , y_A), B(x_B , y_B) e C(x_C , y_C), com recurso às equações 2.26 e 2.27.

$$denominador = 2 * ((x_A - x_C) * (y_B - y_C) - (x_B - x_C) * (y_A - y_C)) \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \frac{1}{denominador} \begin{bmatrix} y_B - y_C & y_C - y_A \\ x_B - x_C & x_A - x_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A^2 - x_C^2 + y_A^2 - y_C^2 + d_C^2 - d_A^2 \\ x_B^2 - x_C^2 + y_B^2 - y_C^2 + d_C^2 - d_B^2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

O sistema de localização do artigo foi desenvolvido num ambiente externo, ao contrário do da proposta de dissertação que será desenvolvido num ambiente interno. Para além disso, a nível de *hardware*, o artigo menciona que é utilizado o CC2420, ao invés do CC2530 da dissertação.

Por último, para estimar a distância em função do RSSI recebido, o modelo matemático utilizado na dissertação é o modelo *One Slope*, secção 3.4.1, ao passo que o modelo mencionado no artigo é o da equação 2.25.

2.5.6 Indoor Localization with Low Complexity in WSNs

O artigo [30] calcula a localização aproximada num ambiente interno, utilizando uma abordagem baseada no algoritmo WCL, com base na intensidade do sinal recebido.

Existe já um pequeno número de métodos que efetuam a localização através de nós de *beacon* com a sua posição conhecida. Todos os outros nós da rede, sem a sua posição conhecida, são denominados de incógnitas. Através das distâncias e/ou ângulos entre os *beacons* e as incógnitas, o processo de localização inicia.

A localização exata de um nó desconhecido baseia-se na resolução de um sistema linear de equações com as coordenadas dos nós e as distâncias aos nós desconhecidos. Com pelo menos três *beacons*, necessários para duas dimensões, as posições dos nós desconhecidos são estimadas por trilateração [31].

Devido ao seu consumo, nos cálculos complexos e na memória, os métodos exatos não são adequados para serem aplicados em sistemas de energia limitados.

Quanto à localização aproximada, devido às restrições de energia em redes de sensores, criou-se um grupo de algoritmos que consomem menos energia, mas determinam a posição com um erro de localização superior.

Salvo algumas exceções, os métodos de localização necessitam de uma observação para determinar a distância. Estas observações são recolhidas por diferentes técnicas de medição, como o AoA, ToA, RSSI, entre outras. Os sinais podem ser de rádio, infravermelho ou ultrassom. No caso de a leitura ser feita para o

RSSI, esta é suportada por quase todos os *transceivers*, o que faz com que seja esta a solução mais benéfica, equação 2.28 [30].

$$RSSI(d) = P_T - P_L(d_0) - 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (2.28)$$

Onde P_T é a potência do transmissor, $P_L(d_0)$ o *Path Loss* para a distância d_0 , d_0 a distância de referência, n o expoente *Path Loss* e X_σ uma variável aleatória gaussiana.

Infelizmente, as medidas do RSSI são muito propensas a erros, devido às reflexões das ondas rádio em obstáculos, à existência de outros campos elétricos no ambiente, pela limitação do *hardware* do recetor na leitura do sinal e à necessidade de vista entre os nós.

Do ponto de vista do modelo de localização, foi escolhido o WCL que está dividido em duas fases. Numa primeira fase, os *beacons* transmitem a sua posição $B_j(x, y)$ para todos os nós desconhecidos estes recebem os pacotes que permitem medir o valor RSSI .

Depois de todas as posições estarem reunidas, o nó desconhecido estima a sua posição $P(X_{iapp}, Y_{iapp})$ pelo modelo WCL, descrito na equação 2.29 [30].

$$P(X_{iapp}, Y_{iapp}) = \left(\frac{\sum_{j=1}^n (w_{ij}(d)x_{Bj})}{\sum_{j=1}^n (w_{ij}(d))}, \frac{\sum_{j=1}^n (w_{ij}(d)y_{Bj})}{\sum_{j=1}^n (w_{ij}(d))} \right) \quad (2.29)$$

Onde $w_{ij}(d)$ é o peso entre o nó i e o *beacon* j e n o número de *beacons*.

Os módulos utilizados foram o CC1010 da Chipcon. Estes apresentam um baixo consumo de energia e uma baixa sensibilidade, geralmente -107 dBm.

Como resultado, foi possível relacionar o modelo WCL com o RSSI, em ambientes interiores, com um erro de localização entre 14% a 69% para todos os pontos de teste. Com a otimização do erro médio, este diminuiu para 8%.

No artigo, é utilizado o módulo CC1010 da Chipcon, que opera numa frequência de 818/915 MHz. Na dissertação é usado o CC2530 da Texas Instruments que trabalha numa gama de frequência dos 2,4 GHz.

Outra diferença a salientar no artigo é que neste é usado o valor do RSSI diretamente como o inverso do peso para o modelo WCL, equação 2.30, enquanto

nesta dissertação é primeiramente calculado o valor da distância pelo modelo *One Slope* e, em seguida, este valor é utilizado no cálculo do peso para o modelo WCL, secção 2.3.5.

$$w = \frac{1}{RSSI} \quad (2.30)$$

3. Desenvolvimento do sistema

Neste capítulo é descrito todo o desenvolvimento do sistema, englobando os conceitos teóricos associados, os materiais e métodos utilizados e os cenários de teste definidos na implementação do sistema.

3.1 IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4 define um *standard* para redes de área pessoal sem fios de baixo débito (LR-WPAN - *Low Rate Wireless Personal Area Network*). Apresenta como principais características a sua baixa taxa de transmissão de dados, baixo consumo de energia e baixo custo de implementação [32][33].

Em comparação com redes com fios, as redes sem fios apresentam como vantagens a sua fácil montagem, custo, tamanho e inteligência atribuída. Esta tecnologia não só permite aos utilizadores configurar uma rede facilmente, como também configurá-la onde é inconveniente ou impossível passar os cabos.

A norma IEEE 802.15.4 define as especificações da camada física (PHY) e da camada de controlo de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) para comunicação sem fios entre dispositivos relativamente simples e que tipicamente operam em POS (*Personal Operating Space*), com um alcance que se pode estender a várias dezenas de metros.

Apresenta diferentes taxas de transmissão de dados em função da banda de frequências utilizada:

- 250 kb/s na banda de 2,4 GHz;
- 40 kb/s na banda dos 915 MHz;
- 20 kb/s na banda dos 868 MHz;

Para além disso, possui 27 canais, sendo que 16 deles estão na banda dos 2,4 GHz, 10 canais nos 915 MHz e um canal na banda dos 868 MHz (Figura 3.1).

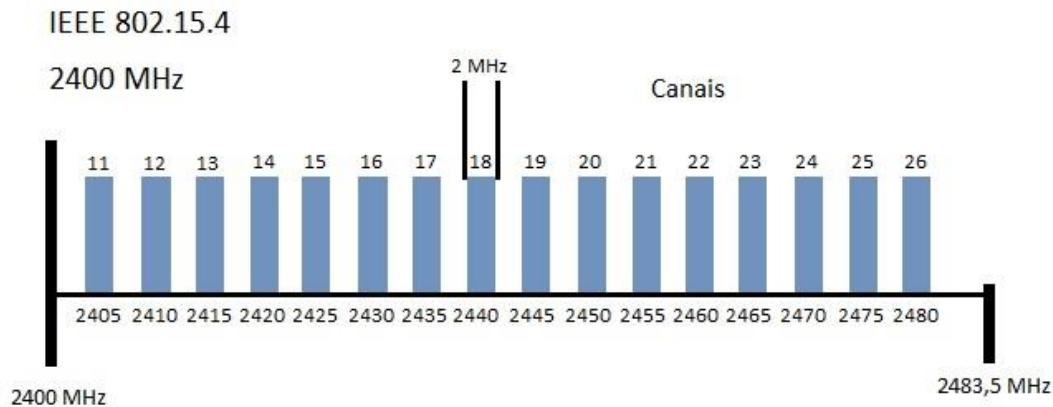


Figura 3.1 - Canais 802.15.4, frequência 2400 MHz.

São agora apresentadas as suas duas camadas, física e MAC, e algumas das suas principais funções.

3.1.1 Camada física

A camada física proporciona uma interface entre a camada MAC e o canal de rádio físico. A camada física é responsável pelas seguintes funções [35]:

- Ativação e desativação do *transceiver* de rádio: coloca o rádio num de três estados, a transmitir, a receber, ou desligado (*sleep*), de acordo com o pedido da subcamada MAC;
- ED (*Energy Detection*): é a estimativa da potência do sinal recebido dentro de uma largura de banda de um canal IEEE 802.15.4. O resultado da ED pode ser utilizado por uma camada da rede, num algoritmo de seleção de canal, ou para avaliar se o meio está livre.
- LQI (*Link Quality Indication*): mede a qualidade com que cada pacote é recebido. A camada física utiliza o recetor da ED, ou uma relação entre o sinal/ruído, ou a combinação entre os dois para medir a força e/ou a qualidade de um pacote recebido.

- CCA (*Clear Channel Assessment*) para CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*): a camada física executa o CCA utilizando a ED, o *Carrier Sense*, ou a combinação destes. No modo de ED, o meio é considerado ocupado se toda a energia acima de um valor pré estipulado é detetada. No modo *Carrier Sense*, o meio é considerado ocupado se um sinal com a modulação definida na norma IEEE 802.15.4 for detetado;
- Seleção da frequência do canal: a ligação em 802.15.4 pode operar em 27 canais diferentes. Logo, a camada física deve ser capaz de ajustar o *transceiver* de modo a selecionar o canal mais adequado.
- Transmissão e receção de dados: esta é a tarefa principal da camada física.

3.1.2 Camada MAC

A camada MAC fornece uma interface entre a SCS (Service Specific Convergence Sublayer) e a camada física. Esta tem como tarefas [35]:

- Gerar *beacons* de rede, caso o dispositivo seja coordenador: um coordenador envia *beacons* para sincronizar os dispositivos conectados e para outras finalidades;
- Sincronização com os *beacons*: um dispositivo conectado ao coordenador, no modo *beacon-enabled*, deve ser capaz de acompanhar os *beacons*, de modo a estar sincronizado;
- Associação e desassociação numa PAN: para autoconfiguração, a 802.15.4 é capaz de associar e desassociar na sua camada MAC. Isto permite não só que um dispositivo seja capaz de se configurar automaticamente, mas também a autoconfiguração numa rede *peer-to-peer*;
- CSMA/CA: como a grande maioria dos protocolos projetados para uma rede sem fios, a 802.15.4 utiliza o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA.

3.1.3 Funções gerais

A norma 802.15.4 fornece especificações detalhadas sobre o tipo de dispositivo, a estrutura da supertrama, o modelo de transferência de dados, a robustez, o consumo e a segurança.

Numa rede 802.15.4 existem dois tipos de dispositivos, os FFD (*Full Function Device*) e os RFD (*Reduced Function Device*). Um FFD pode comunicar com os RFDs e também com os outros FFDs, e, também pode operar como sendo um coordenador PAN, um coordenador ou um dispositivo. Um RFD apenas pode comunicar com um FFD e destina-se para aplicações simples.

A norma 802.15.4 permite a opção de ser usada uma estrutura de supertrama, sendo que o formato da mesma é definido pelo coordenador. A Figura 3.2 apresenta o formato de uma supertrama, que contém uma parte ativa e uma parte inativa e é delimitada pelos *beacons*.

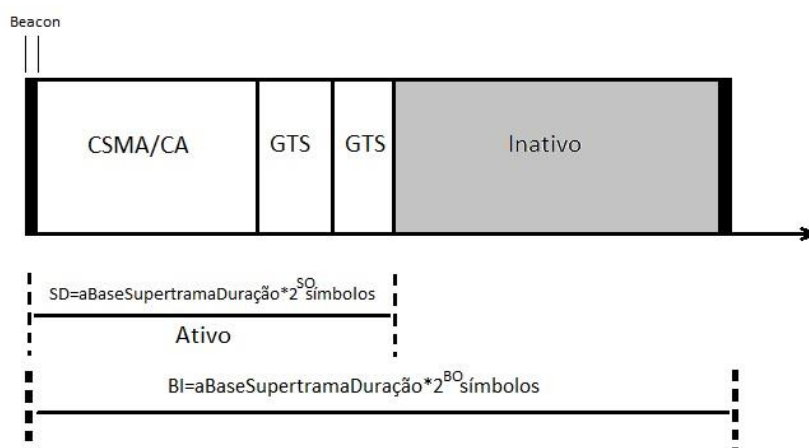


Figura 3.2 - Formato de uma supertrama.

O comprimento da supertrama, BI (*Beacon Interval*), e o comprimento da parte ativa, SD (*Superframe Duration*), são dados por 3.1 e 3.2, respetivamente.

$$BI = aBaseSupertramaDuração * 2^{BO} \quad (3.1)$$

$$SD = aBaseSupertramaDuração * 2^{SO} \quad (3.2)$$

Onde $aBaseSupertramaDuração=960$ símbolos, *BO* é o *Beacon Order* e *SO* é o *Superframe Order*. Os valores de *BO* e *SO* são determinados pelo coordenador.

3.1.4 Formato da mensagem

Será apresentado, agora, o formato da mensagem IEEE 802.15.4. A Figura 3.3, baseada em [40], apresenta uma visão esquemática da mensagem.

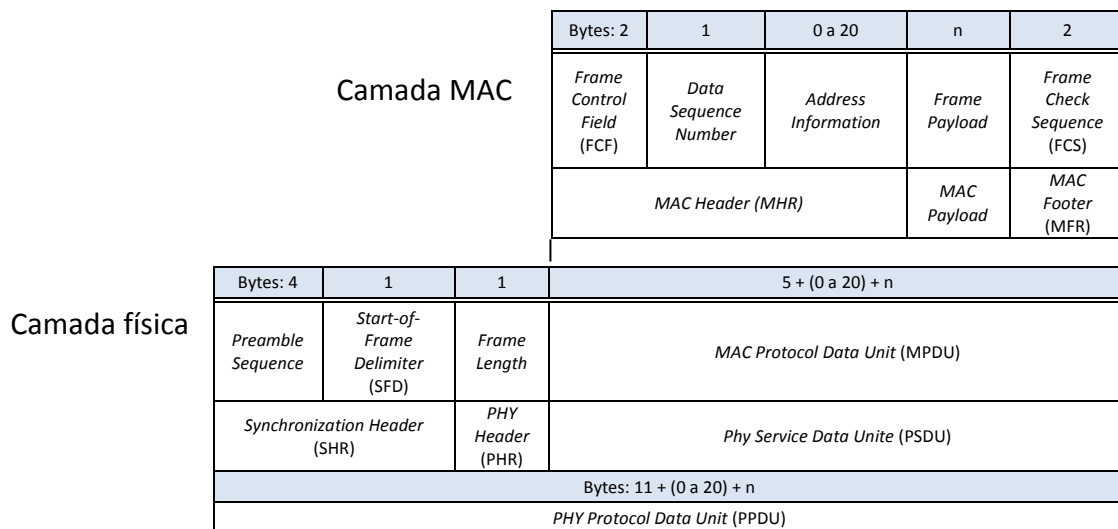


Figura 3.3 - Formato da supertrama IEEE 802.15.4.

O SHR (*Synchronization Header*) consiste no *Preamble Sequence* seguido por um SFD (*Start-of-Superframe Delimiter*). No formato IEEE 802.15.4, o *Preamble Sequence* é definido por 4 bits de 0x00. O SFD é um *byte* com o valor 0xA7. O PHR (*PHY Header*) destina-se a fornecer o tamanho da supertrama – *Superframe Length*.

A camada MAC permite obter o FCF, o *Data Sequence Number* e o *Address Information*, bem como o valor do RSSI. O *Data Sequence Number* e o RSSI são dados são fundamentais, tal como já anteriormente referido, para criar e estudar o sistema de localização.

O FCF (*Frame Control Field*) pode ser visto na Tabela 3.1. Esta contém informações como o *Superframe type*, *Addressing Fields*, e outras *flags* de controlo.

Tabela 3.1 - Formato da FCF.

Bits: 0 – 2	3	4	5	6	7 – 9	10 – 11	12 – 13	14 – 15
<i>Frame type</i>	<i>Security enable</i>	<i>Frame pending</i>	<i>Acknowledge request</i>	<i>Intra PAN</i>	<i>Reserved</i>	<i>Destination addressing mode</i>	<i>Reserved</i>	<i>Source addressing mode</i>

Superframe Type

O *Superframe Type* tem o comprimento de 3 bits, e deve ser ajustado para valores listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores do *Superframe Type* [41].

Superframe Type Value b_2, b_1, b_0	Descrição
000	<i>Beacon</i>
001	<i>Data</i>
010	<i>Acknowledgment</i>
011	<i>MAC command</i>
100-111	<i>Reserved</i>

Security Enable

Este é um subcampo de 1 bit de comprimento e deve ser ajustado para 1, caso a supertrama seja protegida pela subcamada MAC e para 0 no caso contrário.

Superframe Pending

A *Superframe Pending* é um subcampo de 1 bit de comprimento e é colocada em 1 caso o dispositivo envie mais dados na supertrama para o destinatário. Caso contrário, o valor é colocado a 0.

Acknowledge Request

O *Acknowledge Request* é um subcampo de 1 bit e especifica se o reconhecimento é pedido pelo recetor, no momento da receção da supertrama. Se este campo for definido com 1, o emissor deve enviar a confirmação. Caso contrário, ou seja, se for definido como 0, o emissor não envia qualquer confirmação.

Intra PNA

O *Intra PNA*, ou *PAN ID Compression* é um subcampo de 1 bit e especifica se a supertrama MAC deve enviar informação relativa aos campos de identificação PAN, quando os endereços de origem e de destino estiverem presentes.

Este toma o valor de 1, caso estejam presentes os dois endereços, a supertrama deve conter o campo *Destination PAN Identifier* e o campo *Source PAN Identifier*, que deve assumir o mesmo valor no destinatário. Toma o valor de 0, caso nenhum dos identificadores PAN não seja conhecido.

Destination Addressing Mode

É um subcampo de 2 bits e deve ser ajustado para um dos valores da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores para o *Destination Addressing Mode* [41].

Addressing Mode Value b_1, b_0	Descrição
00	<i>PAN Identifier and address fields are not present</i>
01	<i>Reserved</i>
10	<i>Address field contains a 16-bit short address</i>
11	<i>Address field contains a 64-bit extended address</i>

Source Addressing Mode

Tem um tamanho de 2 bit e deve ser ajustado para os valores definidos na Tabela 3.3.

Data Sequence Number

O *Data Sequence Number* tem 1 *byte* de comprimento e especifica o identificador de sequência da supertrama.

Address Information

O *Address Information* pode ser decomposto como é apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - *Address Information* [40].

0/2	0/2/8	0/2	0/2/8
<i>Destination PAN Identifier</i>	<i>Destination Address</i>	<i>Source PAN Identifier</i>	<i>Source Address</i>
<i>Addressing Fields</i>			

Destination PAN Identifier

O *Destination PAN Identifier* tem um tamanho de 2 *bytes*. Este especifica o identificador de PAN único do destinatário pretendido na supertrama. Um valor de 0xFFFF neste campo deve representar o identificador PAN da transmissão que deve, posteriormente, ser aceite como um identificador PAN válido para todos os recetores.

Este campo deve ser incluído na supertrama MAC apenas se o *Destination Addressing Mode* for diferente de 0.

Destination Address

O *Destination Address*, quando presente, tem um comprimento de 2 ou 8 *bytes*, de acordo com o valor especificado no *Destination Addressing Mode*, e especifica o endereço de destino da supertrama.

Este campo apenas deve ser incluído na supertrama MAC se o *Destination Addressing Mode* for diferente de 0.

Source PAN Identifier

Quando presente, a *Source PAN Identifier* assume um tamanho de 2 *bytes* e apresenta o identificador único PAN da origem da supertrama. Este campo apenas deve ser incluído na supertrama MAC se o *Source Addressing Mode* for diferente de 0 e o *PAN ID Compression* for 0.

Source Address

A *Source Address*, quando presente, tem um tamanho de 2 ou 8 *bytes*, de acordo com o *Source Addressing Mode*. Esta deve especificar a origem da supertrama.

Este campo apenas deve ser incluído na supertrama MAC se *Source Addressing Mode* for diferente de 0.

Superframe Payload

A *Superframe Payload* é um campo de comprimento variável e contém a informação específica da supertrama.

FCS

O FCS (*Frame Check Sequence*) é um campo de 2 *bytes* e é calculado pelo polinómio da equação 3.3. A informação relativa a este campo pode ser vista com maior detalhe em [40], pág. 241.

$$G_{16} = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (3.3)$$

Na passagem da trama recebida para a camada superior, no recetor, o valor do RSSI substitui o FCS, como é possível ver na Figura 3.4, baseado em [39].

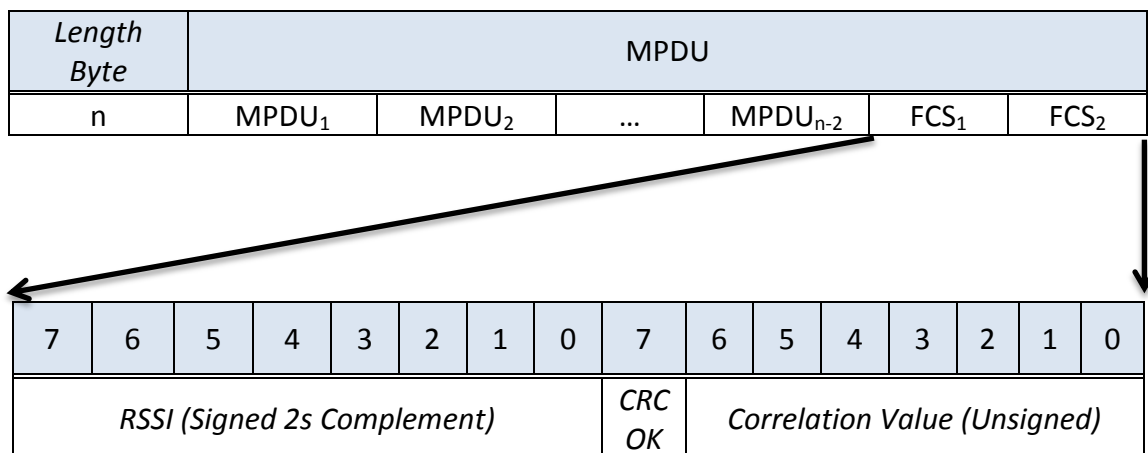


Figura 3.4 - RSSI no campo do FCS.

3.1.5 Tamanho das tramas utilizadas

A trama 802.15.4 foi utilizada nos testes realizados em ambiente interno, pois o código que serviu de base, PER (*Packet Error Rate*) Test, explicado na secção 3.6.1, utiliza este formato. Deste modo, o formato de trama utilizado é apresentado na Figura 3.5.

Bytes:1	2	1	2	2	2	5	n	2
Lenght Byte	Frame Control	Sequence Number	Destination PAN ID	Destination Address	Source Address	Aux. Sec. Header	Payload	FCS

Figura 3.5 - Formato da trama utilizada no pela aplicação PER Test.

O primeiro *byte* é o comprimento e este não é contabilizado para o comprimento da trama. O *Sequence Number* é um campo de 8 bits, que começa a partir de 0 para o primeiro pacote transmitido após a inicialização.

O cabeçalho de segurança auxiliar é apenas incluído na trama quando as características de segurança são usadas ou seja, quando a opção SECURITY_CCM é definida no projeto. O *payload* da trama tem tamanho variável, que pode tomar um valor máximo de 103 *bytes*.

Neste sentido, a trama possui 2 *bytes* da *Frame Control* mais 1 para o *Sequence Number*, 2 para o *Destination PAN ID*, 2 para o *Destination Address*, 2 para o *Source Address* e 5 para o *Auxiliar Security Heade*, totalizando 14 *bytes* de cabeçalho MAC. Estes 14 *bytes* são somados aos 2 *bytes* do FCS, formam 16 *bytes* de MAC *overhead*. Assim, na área do *payload* a trama tem 21 *bytes* para assim ter o mesmo tamanho da trama dos testes realizados em ambiente externo, explicado abaixo.

Do ponto de vista dos testes realizados em ambiente externo, o código utilizado como base já tinha sido anteriormente desenvolvido em [42], e explicado na secção 3.5.1. A trama utilizada respeita na mesma o formato 802.15.4. O tamanho da mesma pode ser visto na Figura 3.6.

Bytes:1	2	1	2	2	2	n	2
Lenght Byte	Frame Control	Sequence Number	Destination PAN ID	Destination Address	Source Address	Payload	FCS

Figura 3.6 - Formato da trama, ambiente externo.

Sendo assim, 2 *bytes* são destinados à *Frame Control*, 1 *byte* ao *Sequence Number*. Para além disso, 4 *bytes* são usados para a comunicação rádio, sendo que 2 deles se destinam ao *Source Address* e os outros 2 ao *Destination Address*. Ainda existem 2 *bytes* do *Destination PAN ID*. Sendo assim, $2 + 1 + 4 + 2 = 9$ *bytes* no

cabeçalho MAC, 11 *bytes* do MAC *overhead*. Na parte do *payload*, esta tem 26 *bytes*, para que o seu conteúdo tenha o mesmo tamanho do sistema de monitorização da postura. Ou seja, o sistema de monitorização da postura, secção 2.4 a trama tinha 9 *bytes* de MAC *overhead* e 28 *bytes* de tamanho do *payload*, no total 37 *bytes*. No caso da trama usada, esta terá 26 *bytes* no tamanho de *payload*, a somar aos 9 *bytes* do cabeçalho MAC e 2 *bytes* do FCS.

O principal fator para que as mensagens do sistema de monitorização da postura desenvolvido no Departamento de Eletrónica Industrial e o do sistema de localização desenvolvido nesta dissertação tenham o mesmo formato, prende-se com o facto de ambos poderem trabalhar em conjunto e, deste modo, o sistema de monitorização consiga determinar as coordenadas do utilizador.

3.2 Hardware

A plataforma de *hardware* utilizada ao longo desta dissertação é baseada nos kits de desenvolvimento CC2530DK [37], da Texas Instruments. Cada kit de desenvolvimento é constituído pelos seguintes componentes:

- 2x SmartRF05EB;
- 2x CC2530EM;
- 2x Antenas;
- 1x CC2531 USB Dongle;
- Cabos;
- Baterias.

3.2.1 SmartRF05EB

A SmartRF05EB (*Evaluation Board*) é uma placa auxiliar que disponibiliza os seguintes componentes para o utilizador:

- 3x16 caracteres no LCD;
- UART;

- LEDs;
- Serial Flash;
- Potenciómetro;
- *Joystick*;
- Botões;
- Interface USB 2.0.

A SmartRF05EB permite ainda a ligação ao PC através da interface USB (*Universal Serial Bus*) para controlar o módulo CC2530EM (*Evaluation Module*) [37], descrito na secção 3.2.2. A Figura 3.7 ilustra esta *Evaluation Board*.



Figura 3.7 - SmartRF05EB [37].

A SmartRF05EB atua como *motherboard* em diversos kits de desenvolvimento para dispositivos de baixo consumo da Texas Instruments. A placa possui diversas interfaces com o utilizador e conexões para interfaces externas que permitem um rápido teste de *software* e *hardware*.

A Figura 3.8 apresenta os principais componentes da SmartRF05EB.

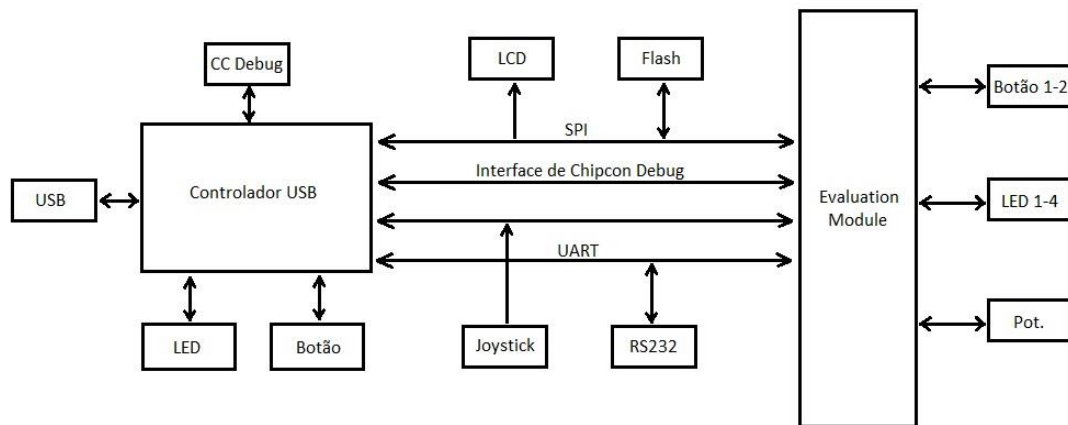


Figura 3.8 - Arquitetura da SmartRF05EB.

Um dos principais componentes da placa é o controlador USB. Este permite a comunicação com o PC via USB e permite a interação com as várias ferramentas, como o SmartRF Studio, para ações na placa. O controlador USB comunica com o CC2530EM utilizando SPI, UART e/ou interface de depuração (para SoC). Há ainda a salientar que nem todos os periféricos da placa são acessíveis a partir do controlador USB.

3.2.2 CC2530EM

O CC2530EM (*Evaluation Module*) é um módulo RF, equipado com um cristal de 32 MHz e um outro cristal de 32,768 kHz. Além disso, contem um conector SMA para a ligação à antena [37]. O componente principal desta placa é o microcontrolador CC2530F256. A Figura 3.9 apresenta os principais componentes deste módulo.

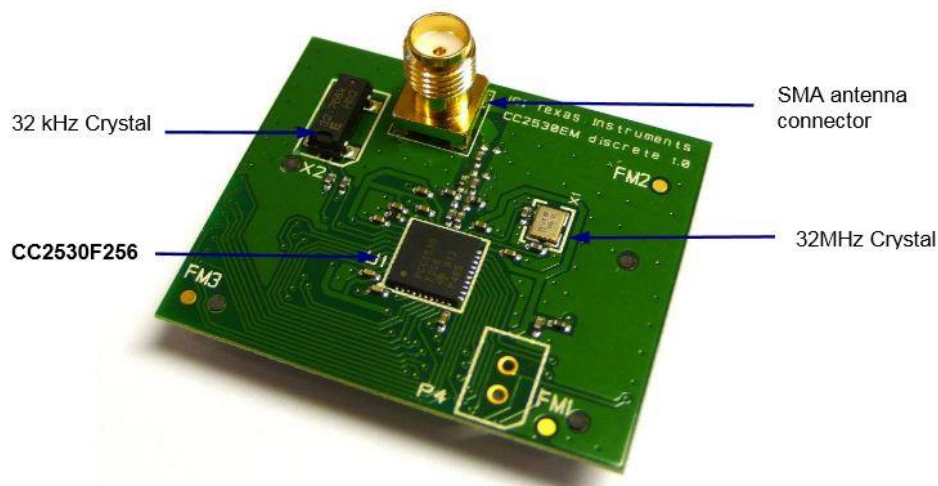


Figura 3.9 - CC2530 Evaluation Module [37].

O CC2530 é o “cérebro” para a comunicação rádio e, por sua vez, para a resolução da proposta apresentada nesta dissertação. O CC2530 é uma solução SoC para comunicações IEEE 802.15.4/ZigBee [39]. O CC2530F256 é uma das opções do segmento do CC2530, em que se incluem também o CC2530F32, o CC2530F64 e o CC2530F128. A principal diferença entre os diversos modelos é a memória da versão *flash*, de 32, 64, 128 ou 256 kB. O CC2530 combina um excelente desempenho para um transmissor RF, aliado à grande sensibilidade e robustez à interferência. Para além disso, numa comunicação RF pode ser programável até à potência de saída de 4,5 dBm e não necessita de muitos componentes externos. No caso de a rede ser assíncrona, este necessita apenas de um único cristal. Com isto, o CC2530 permite realizar a comunicação RF entre os vários módulos para, dessa forma, obter as mensagens de modo a serem analisadas.

3.3 Software

Depois de reconhecer todos os campos presentes no formato da mensagem, foi necessário implementar o código para permitir a comunicação RF. Este foi desenvolvido no IAR Embedded Workbench IDE. Para além disso, foi implementado, em Microsoft Visual C#, um programa para permitir a leitura dos dados via porta-

série e o seu armazenamento. Por último, o processamento dos dados para obtenção dos resultados foi feito em MatLab.

3.4 Modelos Matemáticos

Nesta secção serão referidos dois modelos matemáticos para calcular a distância em ambientes internos. Estes modelos apresentam uma equação para descrever a perda devido à propagação do sinal. Os modelos, na sua maioria, consideram a perda em espaço livre, adicionando as perdas devido a pisos e paredes para descrever o ambiente interno. Os dois modelos utilizados para análise dos valores obtidos foram o modelo *One Slope* e o modelo *Free Space Path Loss*.

3.4.1 Modelo *One Slope*

Para calcular a distância d , foi usado o modelo *One Slope* descrito na equação 3.4 [43]. Este modelo foi utilizado ao longo da resolução da dissertação para calcular a distância d entre diferentes emissores e recetores.

$$P_L(d) \text{ [dB]} = P_L(d_0) \text{ [dB]} + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.4)$$

Em que $PL(d)$ [dB] é o *Path Loss* à distância d , $PL(d_0)$ [dB] é o *Path Loss* à distância de referência d_0 , d a distância e d_0 a distância de referência. Sabendo que,

$$P_L \text{ [dB]} = P_{trans} \text{ [dBm]} - P_{rec} \text{ [dBm]} \quad (3.5)$$

Em que P_{trans} [dBm] é a potência de transmissão e P_{rec} [dBm] a potência recebida. Colocando em ordem a d , obteve-se a equação 3.6:

$$d = d_0 * 10^{\left(\frac{-P_{rec}(d) \text{ [dBm]} + P_{rec}(d_0) \text{ [dBm]}}{10 * \gamma}\right)} \quad (3.6)$$

A variável γ pode assumir os valores da Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores que γ pode assumir [43].

Local	γ
Espaço livre	1,6 a 2
Edifícios (sem visão direta)	2 a 4
Edifícios (sem visão direta separados por um a três pisos)	4 a 6

3.4.2 Modelo de Propagação em Espaço Livre

Em espaço livre, a energia radiada por uma antena omnidirecional propaga-se pela superfície de uma esfera. O modelo de propagação em espaço livre é utilizado quando existe linha de vista entre o emissor e o receptor, como o caso de sistemas de comunicação por satélite.

Tal como a grande maioria dos modelos de propagação, no modelo em espaço livre a potência recebida está inversamente relacionada com a distância, e pode ser descrita pela equação de Friis, equação 3.7.

$$P_{rec}(d) = \frac{P_{trans}G_tG_r\lambda^2}{(4\pi)^2d^2L} \quad (3.7)$$

Em que $P_{rec}(d)$ é a potência recebida à distância d , P_{trans} a potência a que o sinal é transmitido, G_t o ganho da antena transmissora, G_r o ganho da antena receptora, λ o comprimento da onda expresso em metros, d a distância entre receptor e emissor e L as perdas do sistema na propagação.

O ganho da antena é dado pela equação 3.8.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.8)$$

Em que A_e é a abertura efetiva que se relaciona com o tamanho físico da antena e com a frequência, 3.9.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (3.9)$$

Onde f é a frequência em Hz, ω_c é a frequência da onda dada em radianos por segundo e c a velocidade da luz.

Os valores de P_{rec} e P_{trans} devem ser expressos nas mesmas unidades, e $L=1$ caso não existam perdas no sistema. Assim:

$$P_L[\text{dB}] = 10 \log\left(\frac{P_{trans}}{P_{rec}}\right) = -10 \log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right) \quad (3.10)$$

Caso os ganhos das antenas sejam desprezados, assumindo-se o ganho unitário, temos a equação 3.11.

$$P_L[\text{dB}] = 10 \log\left(\frac{P_{trans}}{P_{rec}}\right) = -10 \log\left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right) \quad (3.11)$$

A equação de Friis demonstra que a potência do sinal recebido é atenuada com o quadrado da distância entre o transmissor e o recetor.

Colocando em ordem a d , obteve-se a equação 3.13:

$$P_L[\text{dB}] = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (3.12)$$

$$d = 10^{\left(\frac{10 \log\left(\frac{P_{trans}}{P_{rec}}\right) - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right)}{20}\right)} \quad (3.13)$$

Em que P_{trans} é a potência a que o sinal é transmitido e P_{rec} a potência recebida. Como o valor de c é a velocidade da luz (299.792.458 m/s) na equação 3.13 é constante, é possível determinar uma constante geral, segundo a equação 3.14, caso as unidades da distância d seja em metros e a frequência f em Hertz.

$$-20 \log\left(\frac{4\pi}{299792458}\right) = -147,56 \quad (3.14)$$

Com o valor da constante calculado, obteve-se a equação 3.15.

$$d = 10^{\left(\frac{(P_{trans}[\text{dBm}] - P_{rec}[\text{dBm}] - 20 \log(f) + 147,55)}{20}\right)} \quad (3.15)$$

3.5 Testes em ambiente externo

Num ambiente externo foram realizados uma série de testes numa área com as características apresentadas na Figura 3.10. A área de testes corresponde à área de um campo de futebol de 5, cuja superfície é em cimento. O sistema de comunicação realizado neste teste consiste apenas num emissor e num recetor.

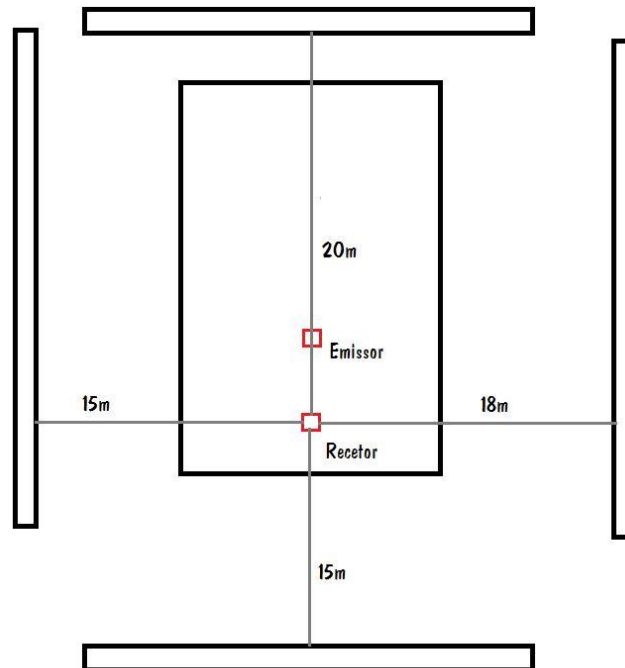


Figura 3.10 - Área de testes em ambiente externo.

Os testes foram realizados de 1 em 1 metro e a cada distância foram lidas várias amostras. Foram realizados testes a duas alturas diferentes: um primeiro teste à altura de 0 m, nível do chão, e um segundo à altura de 0,5 m. Para obter a altura de 0,5 m foi utilizado um banco totalmente feito em madeira.

Do ponto de vista da orientação dos módulos, estes foram sempre colocados com a mesma disposição, ou seja, com as antenas dos módulos sensoriais na vertical.

Relativamente ao número de amostras, período entre cada amostra e tamanho dos pacotes enviados (visto em 3.1.5), os dados são os seguintes:

- Nº amostras para cada distância: 1000;

- Período entre amostras: 100 ms;
- Tamanho dos pacotes: 26 bytes.

O canal utilizado nestes testes foi o 25, logo, segundo a secção 3.1, Figura 3.1, a frequência do canal foi de 2475 MHz.

3.5.1 Código dos módulos

O código utilizado já tinha anteriormente sido desenvolvido em [42], pelo que, foi apenas necessário implementar um novo algoritmo que serviu de base à realização dos testes. Esta opção foi tomada pois o código apresentava já as funções para a utilização da UART, comunicação rádio, entre outras. As alterações efetuadas são agora apresentadas nesta secção, com os algoritmos correspondentes, quer para o emissor, quer para o recetor.

3.5.1.1 Recetor

Foi implementado um código para o emissor e outro para o recetor. O recetor tem que receber as mensagens via RF e ser capaz de, na mensagem recebida, extrair os dados que irão ser alvo de análise, como é o caso do número de sequência da mensagem e o RSSI. Ao valor do RSSI recebido tem que ser ainda subtraído o valor do *offset*, equação 3.16.

$$RSSI_{Final}[\text{dBm}] = RSSI [\text{dBm}] - Offset [\text{dBm}] \quad (3.16)$$

Em que o *offset*, neste caso, é de -73 dBm, segundo a referência [40], na pág. 245.

O fluxograma para o recetor é apresentado na Figura 3.11.

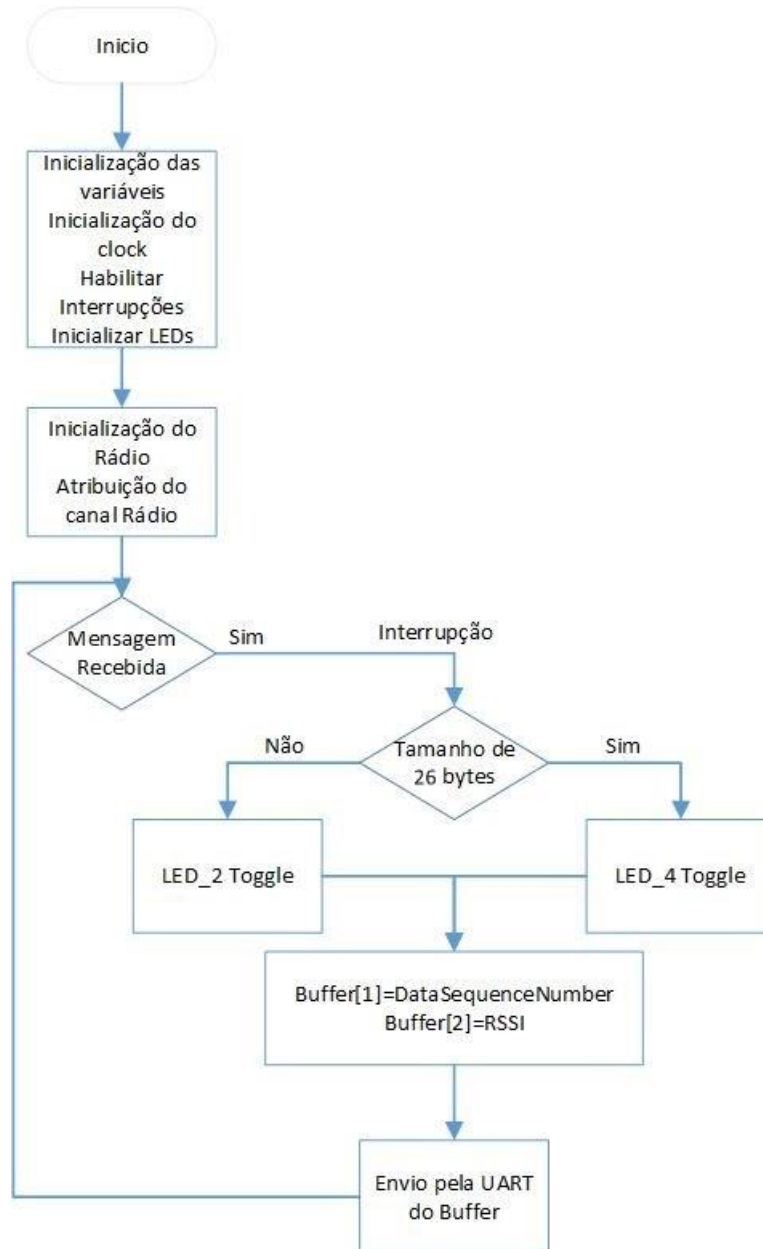


Figura 3.11 - Fluxograma do recetor, ambiente externo.

No início, são inicializados os parâmetros das bibliotecas para a manipulação do rádio, da UART e dos outros periféricos a serem usados. É ainda inicializado o *clock*, são habilitadas as interrupções e os LEDs são inicializados. De seguida, é aberto o rádio e definido o canal a ser usado para o envio das mensagens.

Caso haja uma mensagem recebida, o programa entra numa interrupção e verifica primeiramente se o tamanho da mensagem é de 26 *bytes*. Se sim, o LED 4 faz o *toggle*, caso contrário, é o LED 2 que faz o *toggle*. Depois disso, os dados recebidos,

DataSequenceNumber e o RSSI são atribuídos ao *buffer* declarado. Para além destas duas variáveis, o *buffer* terá também um carácter para inicial, usado cada vez que uma mensagem nova é recebida e um carácter terminador, '\n'.

Por fim, os dados do *buffer* são enviados pela UART.

3.5.1.2 Emissor

O emissor deve ser capaz de criar a mensagem a enviar e enviar a mesma com um período predefinido.

O fluxograma para o emissor é apresentado na Figura 3.12. Tal como no caso anterior, primeiramente foram inicializados os parâmetros das bibliotecas para a manipulação do rádio, dos LEDs e de outros periféricos. Neste caso, já não foi necessário incluir a biblioteca da UART, pois não haverá qualquer tipo de comunicação via porta-série. O *clock* é inicializado, são habilitadas as interrupções e inicializados os LEDs. De seguida, é inicializado e atribuído o canal rádio. É ainda inicializado a 0 o valor do *DataSequenceNumber* e enviada a primeira mensagem rádio, que contém o canal usado, o *buffer* da mensagem, o tamanho da mensagem e o modo de acesso. Assim que é enviada, o LED 1 realiza o *toggle*, e existe um período de espera de 100 ms.

A rotina de interrupção foi criada para permitir o envio de mensagens com um período de 100 ms entre elas. Cada vez que uma mensagem é enviada com o mesmo conteúdo da primeira mensagem, o LED 1 faz o *toggle*.

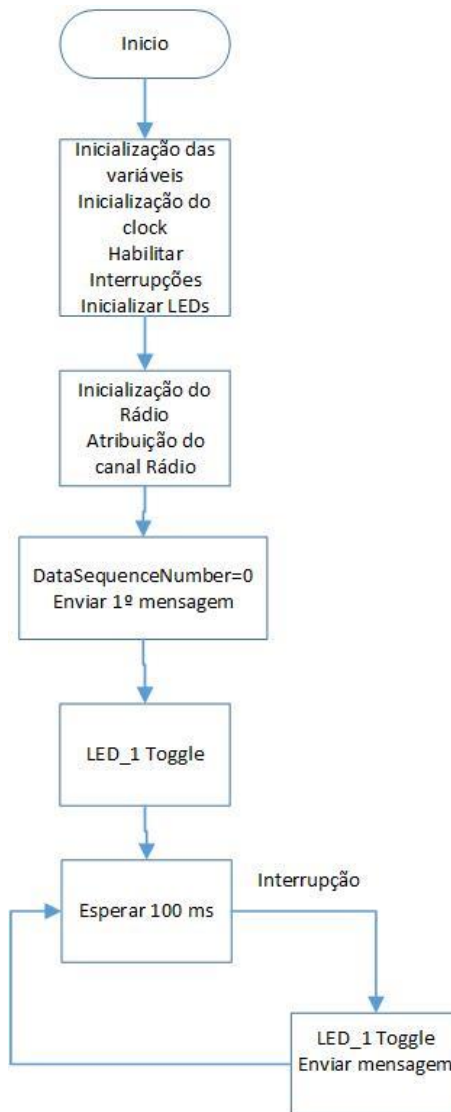


Figura 3.12 - Fluxograma do emissor, ambiente externo.

3.5.2 Código de leitura dos dados no PC

Em Visual C# foi criada uma interface gráfica que serve de terminal para permitir a leitura dos dados recebidos pelo recetor. Esta comunica com o PC via porta-série.

A Figura 3.13 apresenta o menu de entrada do programa. É possível selecionar a porta-série de comunicação entre PC e recetor, a velocidade de transmissão de dados e o número de amostras que irão ser lidas. Depois destes três campos estarem preenchidos, é necessário estabelecer a comunicação confirmando no botão de "Connect".

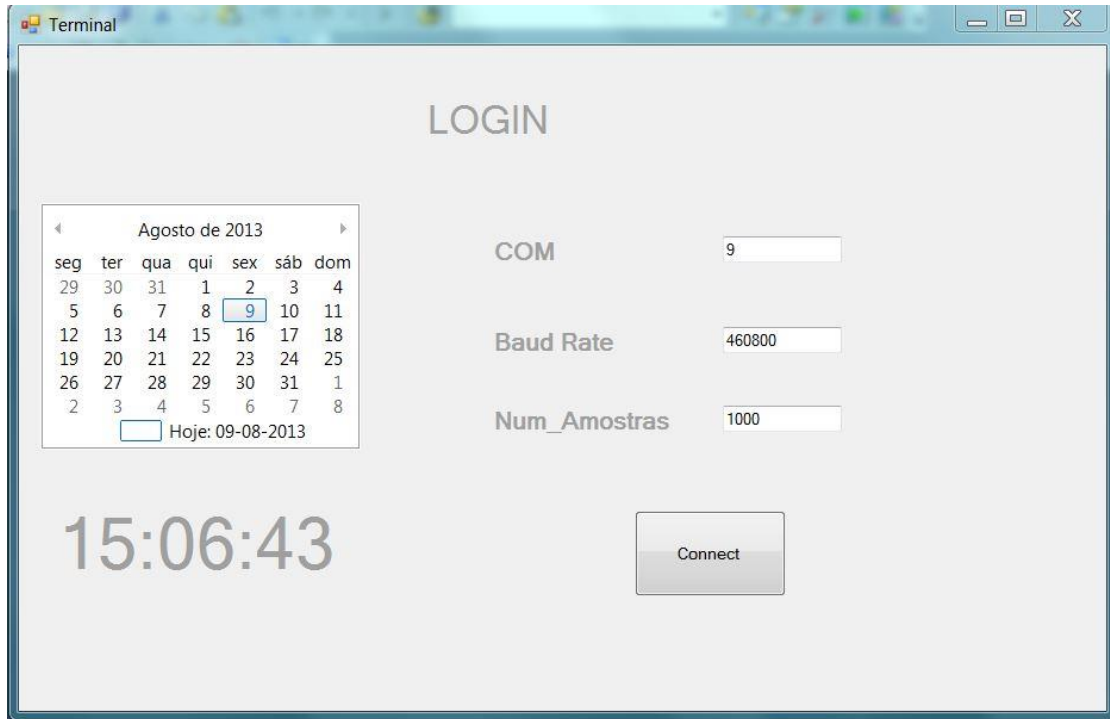


Figura 3.13 - Primeiro menu do programa de leitura dos dados.

Caso o valor atribuído à porta COM seja diferente ao estabelecido pelo computador, este imprime uma mensagem de erro, como demonstra a Figura 3.14.

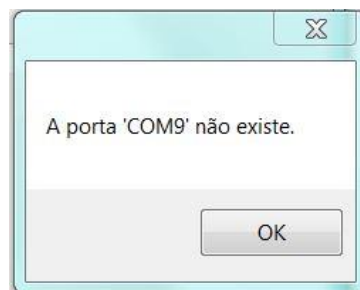


Figura 3.14 - Mensagem de erro na comunicação.

Caso contrário, ou seja, quando todos os dados forem inseridos corretamente, é estabelecida a comunicação e aberta uma nova janela, onde todos os dados são apresentados, Figura 3.15.

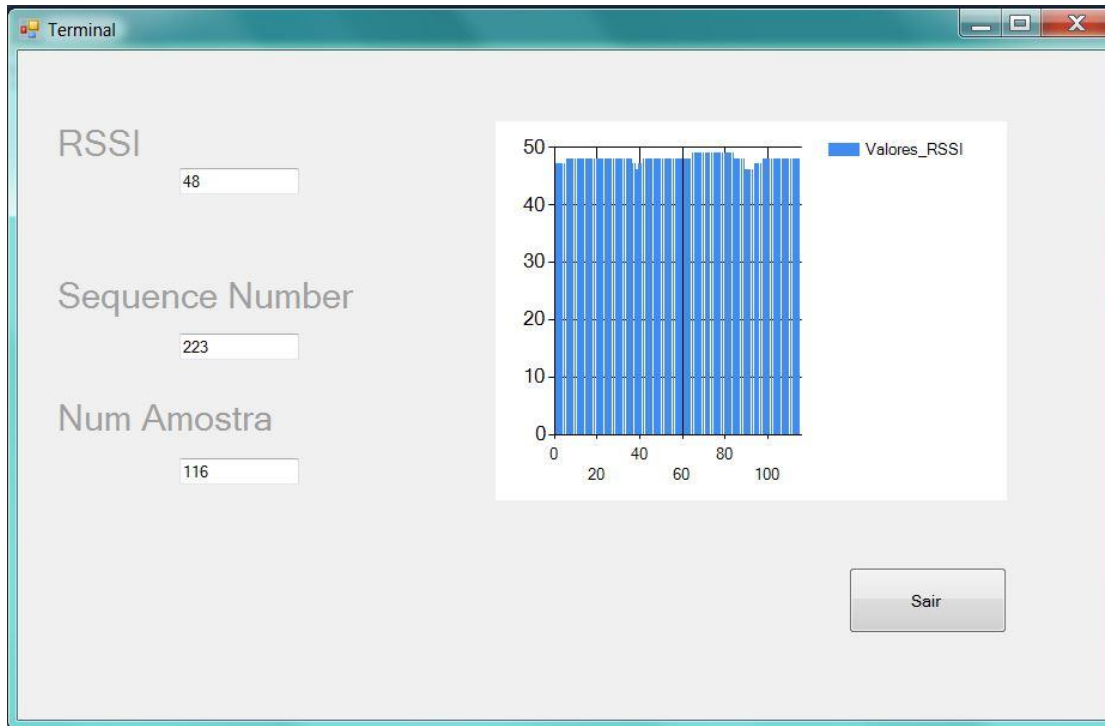


Figura 3.15 - Menu de apresentação dos dados.

Nesta janela, será impresso o valor do RSSI da mensagem ainda sem o *Offset* subtraído, o número de sequência da mensagem e o número da amostra recebida – para verificar se chegam as amostras anteriormente estabelecidas. O número de amostra recebida permite verificar se são recebidas pelo recetor o número pré-estabelecido de amostras a serem enviadas.

É ainda apresentado um gráfico em tempo real, com os valores do RSSI com o *Offset* ainda, pois somente na fase do processamento de dados é que ele é retirado.

Os dados recebidos são guardados num ficheiro '.txt' com três colunas, sendo que a primeira é o número da amostra recebida, a segunda o número de sequência da mensagem e a terceira o valor do RSSI recebido.

A Figura 3.16 apresenta o fluxograma de funcionamento do programa para leitura e apresentação dos dados via porta-série e posterior gravação no ficheiro.

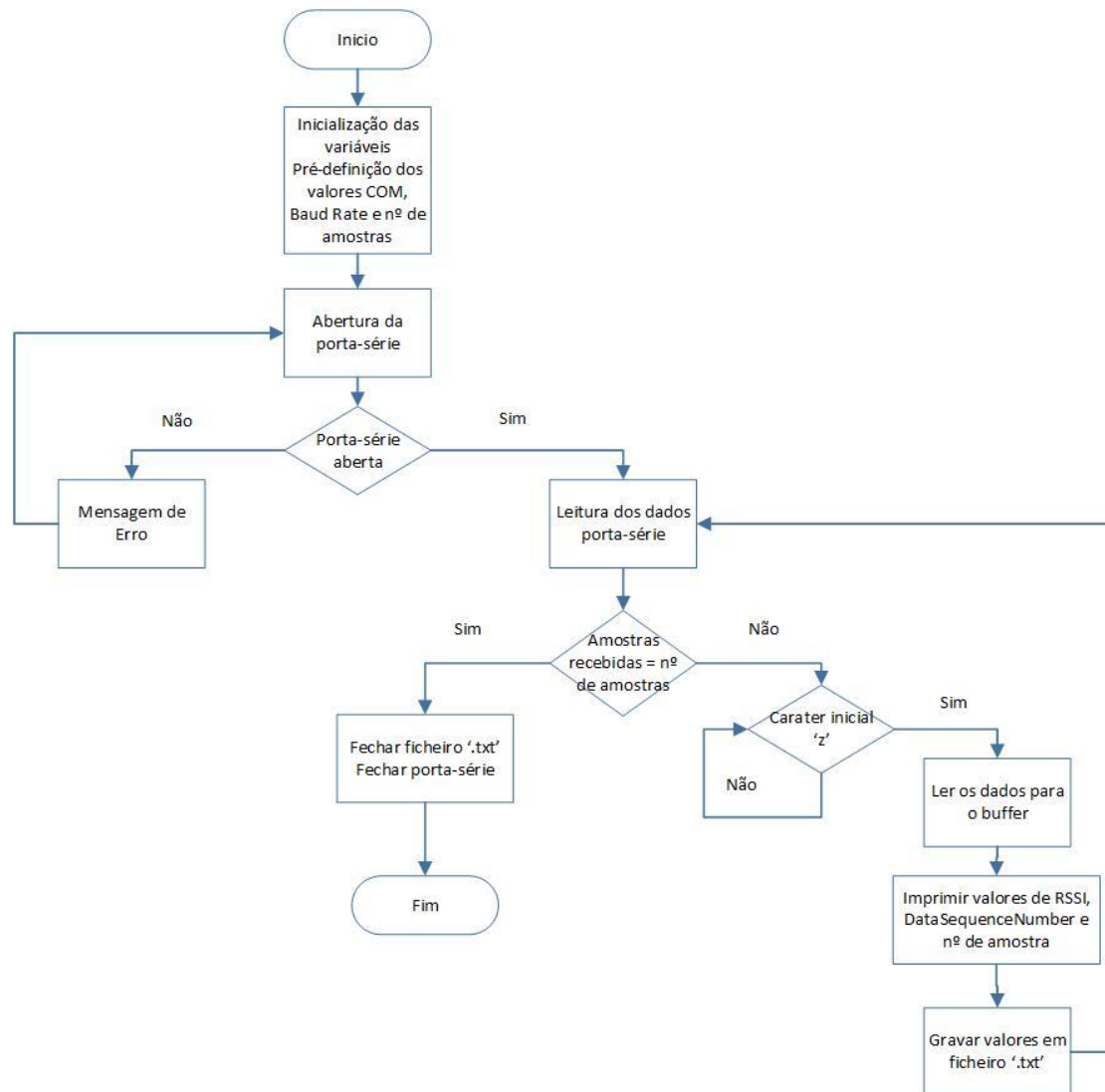


Figura 3.16 - Fluxograma do programa para leitura de dados.

São inicializadas as variáveis e definidos os valores da COM e do *BaudRate*, o número de amostras para a porta-série, de forma a realizar a comunicação, tal como é apresentado na Figura 3.13.

Quando o botão “Connect” é pressionado, há uma tentativa de abrir a porta-série para iniciar a comunicação. Caso esta seja impossível de realizar, surge uma mensagem de aviso de erro, Figura 3.14. Se tudo correr bem, verifica-se se esta realmente ficou aberta para, assim começar a leitura de valores.

Caso o número de mensagens recebidas seja inferior ao número pré-estabelecido, é visto se o primeiro carater da mensagem recebida é o ‘z’. Este é o

carater de aviso de início de uma nova mensagem. Se sim, os dados são lidos para um *buffer*, ou seja, fica guardado o *DataSequenceNumber* e o RSSI recebidos.

Posteriormente são apresentados, tal como ilustra a Figura 3.15, os valores recebidos e o número da amostra atual. Para além disso, é adicionado um novo ponto ao gráfico em tempo real, com o valor do RSSI. Por último, depois dos dados serem apresentados, o *buffer* é guardado num ficheiro com extensão '.txt'.

Caso o número de amostras seja igual ao número de amostras recebidas, o ficheiro e a porta-série são fechados.

3.5.3 Código para processamento dos dados

Em MatLab os valores recolhidos são analisados. É aberto o ficheiro criado pelo terminal, são processados os dados com bases nos modelos matemáticos definidos e, no final, são gerados gráficos para permitir a análise e observação dos dados. Nesta secção é apresentado o fluxograma de funcionamento.

A Figura 3.17 apresenta a forma como os dados são tratados. Inicialmente é lido o ficheiro para cada distância e os valores das amostras do RSSI são colocados numa variável. De seguida, para cada valor de RSSI recebido é aplicado o modelo matemático de forma a obter o valor da distância.

Após determinar todas as distâncias, é calculada a distância média, o erro e o desvio padrão.

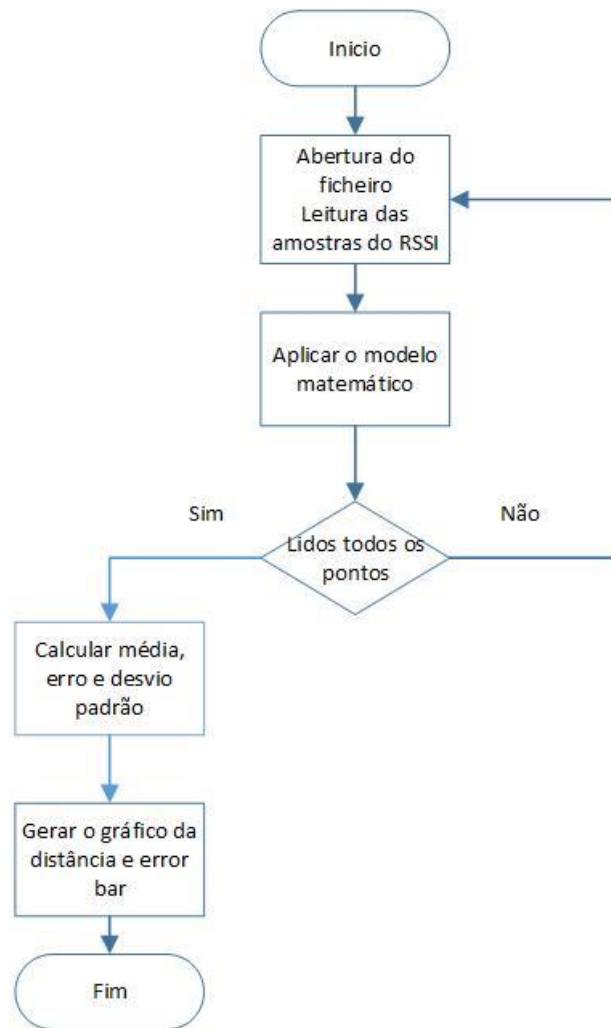


Figura 3.17 - Fluxograma de tratamento de dados em ambiente externo.

No final, é gerado o gráfico da distância e um gráfico com as barras de erro, dos vários valores obtidos. No caso do gráfico da distância, é apresentada a distância média, a distância média mais o desvio padrão e distância média menos o desvio padrão. No gráfico das barras de erro, este é gerado com o valor do erro e o desvio padrão. O processo apresentado na Figura 3.17 é repetido para as várias distâncias e, no final, os dois gráficos apresentam os valores calculados para todas as distâncias medidas.

3.6 Testes em ambiente interno

Os testes em ambiente interno foram realizados num armazém. A área dos testes tem as dimensões da Figura 3.18.

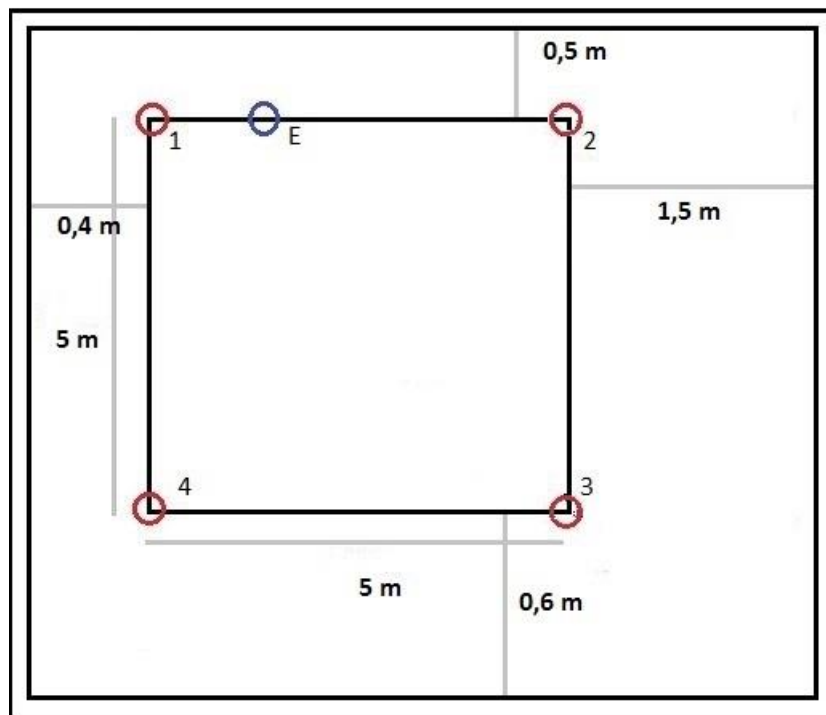


Figura 3.18 - Área ambiente interno.

Como é demonstrado na Figura 3.18, a área foi dividida para obter uma forma quadrada e os módulos foram colocados em cima de uma base em PVC, a uma altura de 1 m em relação ao solo. A superfície dos testes era em cimento. Quanto à altura do armazém, esta era de 2,4 m.

Posteriormente foi colocado em cada canto do quadrado um recetor. O emissor deslocou-se de 1 em 1 metro, tendo como ponto de partida o recetor 1, ao longo de uma linha vertical, uma horizontal e outra diagonal. A cada teste, os valores eram apresentados nas linhas do LCD da SmartRF05EB e anotados manualmente.

Do ponto de vista da orientação dos módulos, do número de amostras, do período entre cada amostra, estes foram iguais aos descritos na secção anterior,

referente ao ambiente externo. A única diferença é no tamanho dos pacotes, pois para este caso tinham 21 *bytes*, secção 3.1.5.

O canal utilizado nestes testes foi o 18, logo, segundo a secção 3.1, Figura 3.1, a frequência do canal foi de 2440 MHz.

3.6.1 Código dos módulos

Para os testes num ambiente interno, o código implementado para programar os módulos foi diferente dos testes realizados no ambiente externo. A principal razão prende-se ao facto de, para este novo teste, ter sido utilizado o LCD para escrever os resultados do RSSI recebido nas suas diferentes linhas, e para isso foi necessário utilizar as funções de escrita no LCD.

Neste sentido, utilizou-se como código base o software de exemplo PER Test [44], desenvolvido pela Texas Instruments, alterando o seu funcionamento para o pretendido. A *stack*, na qual, o PER Test foi desenvolvido inclui bibliotecas para o uso do LCD, do rádio e de outros periféricos, sendo este o fator principal para a sua utilização. Do ponto de vista do funcionamento do programa, é na própria SmartRF05EB que é escolhido o modo de funcionamento, recetor ou emissor, através do *joystick* e botões. O fluxograma da Figura 3.19 apresenta esse modo de seleção.

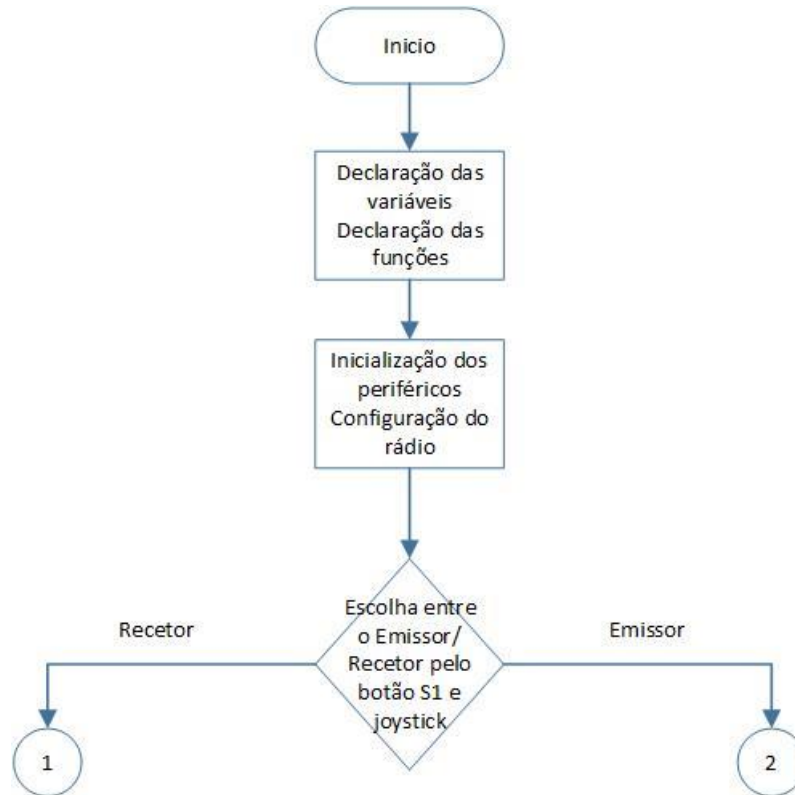


Figura 3.19 - Fluxograma para escolha de emissor ou recetor, ambiente interno.

Tal como em todos os casos, é feita uma primeira inicialização das variáveis e funções a utilizar. Posteriormente, os periféricos, tais como o LCD, são também inicializados e o rádio configurado. Depois desta primeira fase, é escolhido se a SmartRF05EB irá funcionar como emissor ou recetor através do *joystick* e do botão S1.

3.6.1.1 Recetor

No funcionamento como recetor, é definido o endereçamento do rádio e, de seguida, o dispositivo fica à espera das mensagens via RF. Depois de receber a mensagem, se o valor do *DataSequenceNumber* for 0 as variáveis são reiniciadas, caso contrário, é verificado o valor do número de sequência para caso cumpra alguma das condições, o valor do RSSI seja somado à respetiva variável: 10, 50 ou 1000. Os valores são lidos e, no LCD, é apresentada a média do RSSI das 10 primeiras amostras na linha 1 (um valor para fornecer uma resposta rápida do sistema), a

média do RSSI das 50 primeiras amostras na linha 2 (valor mínimo necessário, após os testes realizados num ambiente externo, para apresentar uma boa precisão) e a média do RSSI do total das amostras na linha 3. De salientar que quanto menor for o número de amostras, mais rápida é a resposta do sistema, mas também menos precisa se torna.

Neste caso, o valor do *offset* já é retirado pelo próprio programa. No final, é escrita no LCD, na respetiva linha, a média de cada uma das variáveis. O fluxograma para o recetor é apresentado na Figura 3.20.

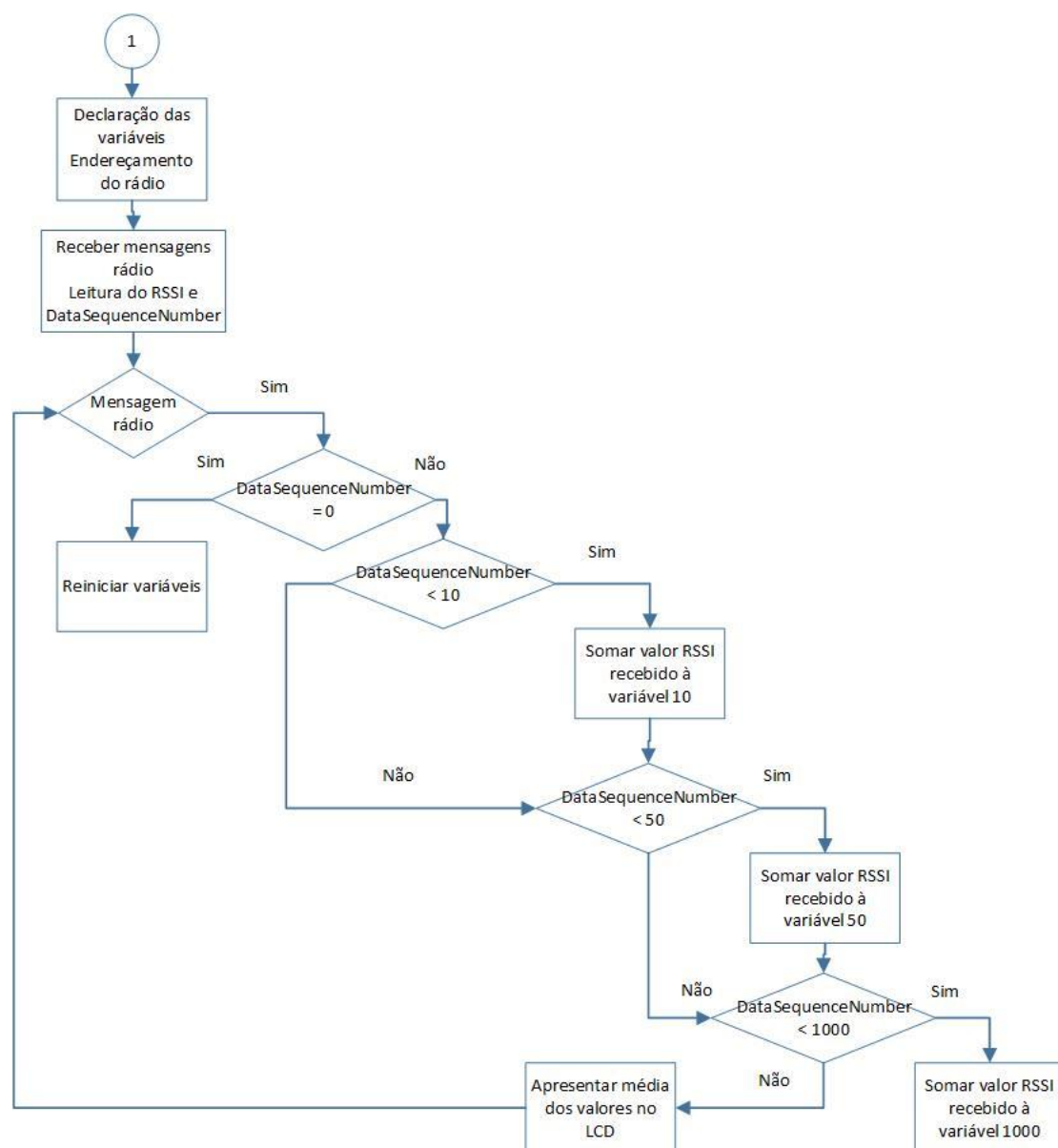


Figura 3.20 - Fluxograma do recetor, ambiente interno.

3.6.1.2 Emissor

No caso do emissor, este permite definir o canal a ser usado, o número de amostras a enviar, a potência a que o sinal é enviado e o período entre cada amostra. Depois de escolher todos estes parâmetros, o dispositivo fica à espera que o botão S1 seja pressionado de modo a começar a enviar mensagens. Este apenas começa a enviar mensagens 10 segundos depois, tempo utilizado para assegurar que não haja pessoas em redor do módulo durante o teste e, assim, exista o menor número de interferências possível.

No final desse tempo, o emissor começa a transmitir as mensagens e escreve no LCD o *DataSequenceNumber* da mensagem enviada. Caso o número de amostras seja inferior às mensagens enviadas este continua a enviar com um período anteriormente estipulado de 100 ms.

Depois de enviar todas as mensagens, o emissor fica em espera até que o botão do S1 seja de novo pressionado e entre de novo em funcionamento. Todo este processo pode ser visto na Figura 3.21, que apresenta o fluxograma de funcionamento.

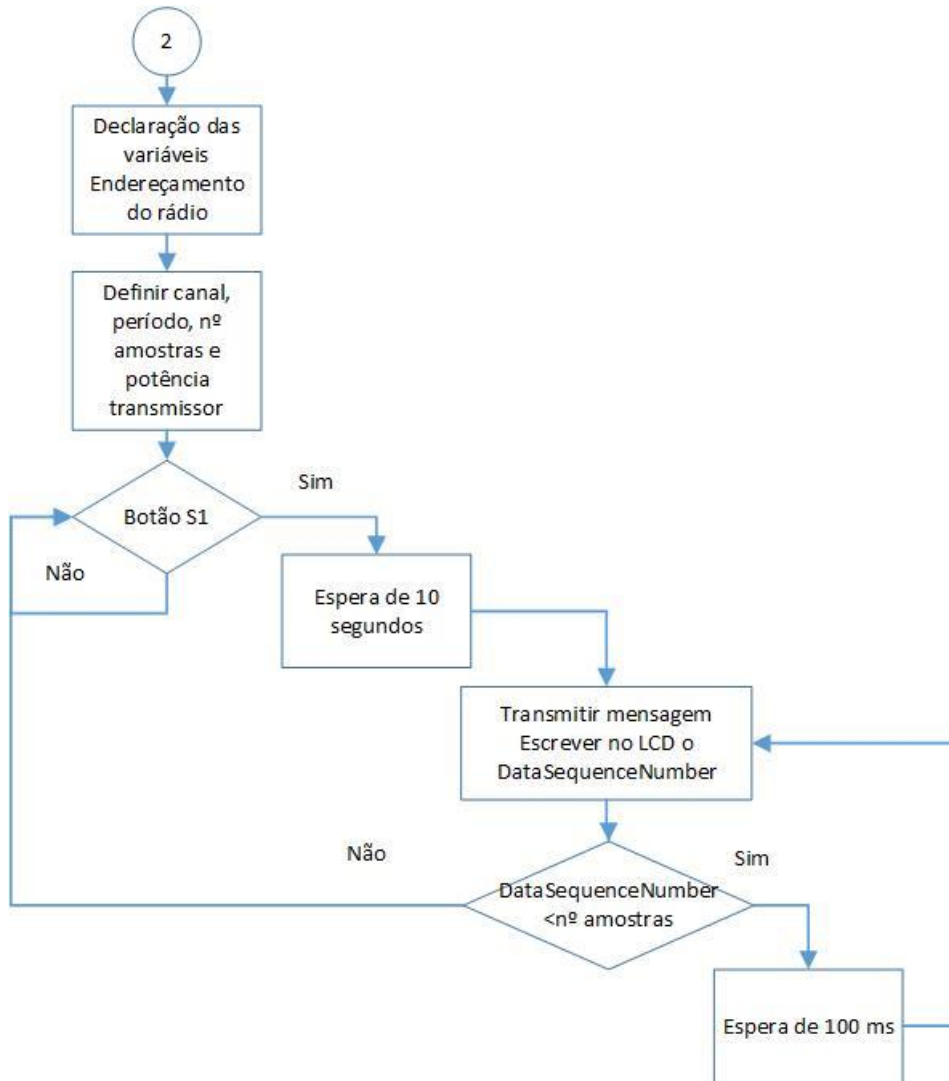


Figura 3.21 - Fluxograma do emissor, ambiente interno.

3.6.2 Código para processamento dos dados

No *software* MatLab, os valores obtidos foram analisados. Os dados foram lidos de uma tabela e, procedeu-se a uma sequência de cálculos para implementar o modelo de localização WCL.

A Figura 3.22 apresenta a forma como o modelo de localização é aplicado no MatLab. Primeiramente, os valores de RSSI recolhidos dos quatro módulos são inseridos manualmente num ficheiro de texto e posteriormente lidos pelo MatLab.

Depois, considerando o recetor 1 como referência, é calculada a média do expoente no modelo *One Slope* para as várias distâncias, nas várias direções,

segundo a equação 3.17 partindo da equação 3.6. É calculada a média do expoente para que assim exista o menor erro possível quando a distância é determinada. Como foi visto anteriormente, dependendo do local e das condições, o valor também muda. Sendo assim, a média é uma tentativa de encontrar o valor do expoente ideal.

$$\gamma = \frac{P_{rec}(d_0) [dBm] - P_{rec}(d) [dBm]}{10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right)} \quad (3.17)$$

Uma vez determinado o valor do expoente médio, procede-se ao cálculo, para cada ponto, da distância estimada a que o recetor se encontra do emissor. Este cálculo é feito para os quatro módulos recetores através da aplicação do modelo *One Slope*, equação 3.6. Como foram recolhidos valores de 1 em 1 metro, foi possível obter o valor de RSSI à distância de referência d_0 , neste caso 1 m, e assim ter uma $P_{rec}(d_0)$ [dBm] para cada recetor. Este procedimento é baseado no artigo [45], onde também é calculado o valor do expoente médio, o valor da distância por um modelo matemático e por último, utilizada a distância como peso para o modelo de localização.

A distância calculada é usada como peso no modelo de localização WCL, analisado na secção 2.3.5, segundo a equação 3.18.

$$w_i = \frac{1}{d_i}, \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (3.18)$$

Onde w_i é o peso para o modelo WCL e d_i a distância calculada pelo modelo *One Slope*.

Por fim, é aplicado o modelo de localização WCL, equação 2.18, secção 2.3.5.



Figura 3.22 - Fluxograma de tratamento de dados MatLab, ambiente interno.

Em MatLab, os valores do RSSI são lidos a partir de um ficheiro de texto. Após essa leitura, o valor do expoente médio é calculado pela equação descrita em 3.17. Através do RSSI recebido à distância d_0 e dos diferentes valores de RSSI recebidos no recetor 1 é calculada a média dos valores. Desta forma, é assumido que o valor dos restantes expoentes para cada um dos recetores será próximo do valor médio para o recetor 1.

A distância a que o recetor se encontra do emissor é obtida segundo a equação 3.6, pelo modelo *One Slope*. São determinadas as quatro distâncias a que os recetores se encontram do emissor que, depois, irão ser usadas como peso para o

modelo de cálculo das coordenadas. As coordenadas (x, y) a que o emissor se encontra são calculadas pelo modelo WCL, pela equação 2.18.

Por último, é calculado o erro absoluto das coordenadas obtidas pela equação 3.19.

$$\text{Erro Absoluto} = \sqrt{(x_m - x_r)^2 + (y_m - y_r)^2} \quad (3.19)$$

Onde x_m e y_m são os valores das coordenadas calculadas, x_r o valor real da coordenada real em x e y_r o valor real da coordenada real em y .

4. Resultados e discussão

Neste capítulo é avaliada a eficiência de todo o sistema de posicionamento desenvolvido. Para tal, são descritos os resultados obtidos nos testes em ambiente externo e em ambiente interno. Para cada um dos casos, será apresentada a tabela dos valores recolhidos e os gráficos obtidos com os modelos matemáticos, de forma a poder aferir o funcionamento do sistema.

4.1 Ambiente externo

A recolha de dados relativa ao ambiente externo foi descrita na secção 3.5. Foram registados dados para duas alturas diferentes: a altura de 0 m, quando os módulos foram colocados no solo, e a altura de 0,5 m, quando os módulos foram colocados em cima de um banco de madeira.

4.1.1 Valores obtidos à altura de 0 m

Para a altura de 0 m foram retirados valores de 13 distâncias diferentes, sendo que $d_0 = 1$ m. Como tal, a Tabela 4.1 apresenta as várias distâncias, $Prec(d)$ [dBm] (média do valor do RSSI lido), e $Prec(d_0)$ [dBm] (média do valor do RSSI à distância de referência de 1 m).

Tabela 4.1 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente externo.

Distância [m]	$Prec(d)$ [dBm]	$Prec(d0)$ [dBm]
2	-49,004	-38,002
3	-55,905	
4	-60,000	
5	-62,597	
6	-68,455	
7	-74,173	
8	-79,481	
9	-74,212	
10	-73,344	
11	-74,944	
12	-78,504	
13	-75,492	

4.1.1.1 Modelo One Slope

Iniciou-se o estudo dos valores obtidos pelo modelo matemático *One Slope*, pois, devido ao estudo prévio, este foi considerado aquele que iria apresentar resultados mais próximos do esperado.

A equação matemática deste modelo, descrito na secção 3.4.1, é apresentada na equação 4.1.

$$d = d0 * 10^{\left(\frac{-Prec(d) [dBm] + Prec(d0) [dBm]}{10 * \gamma}\right)}, \text{ com } \gamma = 2 \quad (4.1)$$

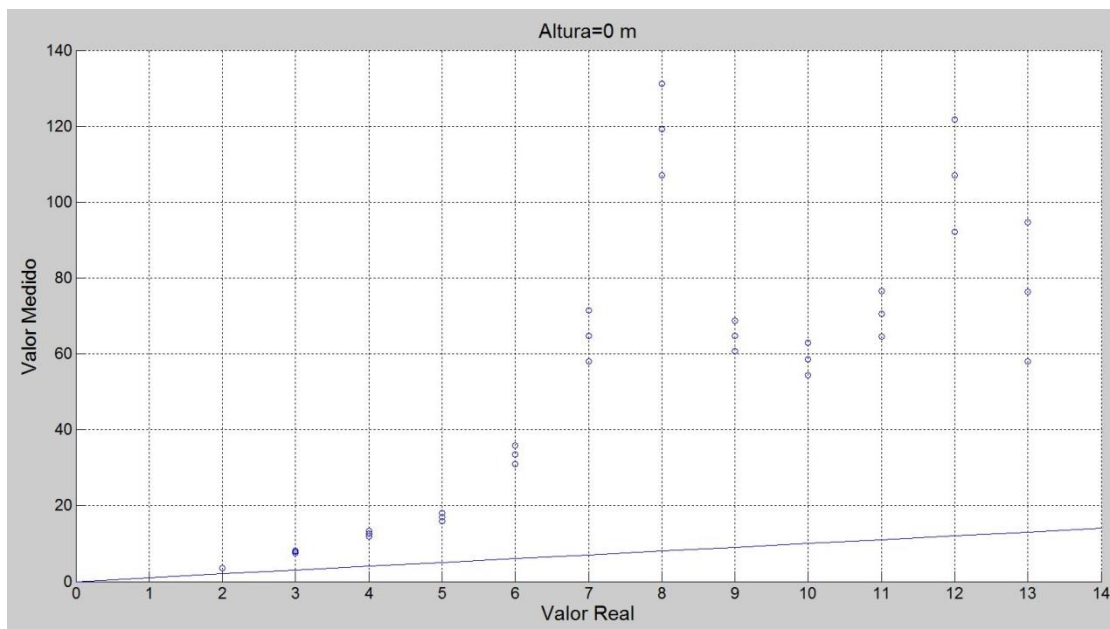
Em que $d0$ é a distância de referência de 1 m, $Prec(d)$ o valor do RSSI a cada distância, $Prec(d0)$ o valor do RSSI à distância de referência e γ o valor do expoente do modelo, que inicialmente foi de 2.

A Tabela 4.2 apresenta os valores da distância média, do desvio padrão e do erro absoluto calculados através do modelo *One Slope*.

Tabela 4.2 – Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0 m, modelo *One Slope*.

Distância real [m]	Distância média [m]	Desvio padrão [m]	Erro absoluto [m]
2	3,549	0,038	1,549
3	7,861	0,294	4,861
4	12,612	0,790	8,612
5	17,005	1,037	12,005
6	33,412	2,501	27,412
7	64,697	6,687	57,697
8	119,178	12,050	111,178
9	64,755	3,977	55,755
10	58,646	4,220	48,646
11	70,566	5,931	59,566
12	106,959	14,841	94,959
13	76,415	18,370	63,415

Para analisar o comportamento da distância média, distância média mais desvio padrão e distância média menos desvio padrão, estes foram colocados num gráfico, Figura 4.1. É ainda inserida a reta $y=x$, de modo a verificar se os valores medidos estão desviados dos valores reais.

Figura 4.1 - Valor real vs valor medido no modelo *One Slope*, para a altura 0 m.

Como é possível verificar, e após observar o gráfico obtido, os valores medidos encontram-se muito distantes dos valores reais e, por sua vez, dos valores

pretendidos. Com isto, para conseguir uma melhor aproximação do valor medido ao valor real para as diferentes distâncias, ajustou-se o valor do expoente γ . A Tabela 4.3 apresenta os diferentes valores do γ .

Tabela 4.3 - Diferentes valores de γ para a altura de 0 m.

Distância [m]	γ
2	3,655
3	3,752
4	3,654
5	3,519
6	3,914
7	4,280
8	4,593
9	3,795
10	3,534
11	3,547
12	3,753
13	3,366

Com isto, o valor do expoente médio foi de $\gamma = 3,778$. Desta forma, foram de novo calculados os valores das diferentes distâncias médias, desvio padrão e erro absoluto, obtendo-se a Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0 m com o valor do γ recalculado.

Distância real [m]	Distância média [m]	Desvio padrão [m]	Erro absoluto [m]
2	1,955	0,011	-0,045
3	2,977	0,060	-0,023
4	3,821	0,128	-0,179
5	4,476	0,146	-0,524
6	6,397	0,256	0,397
7	9,069	0,497	2,069
8	12,530	0,673	4,530
9	9,081	0,290	0,081
10	8,615	0,330	-1,385
11	9,499	0,419	-1,501
12	11,820	0,863	-0,180
13	9,864	1,091	-3,136

Com o novo expoente e valores da distância calculados, foi desenhado um novo gráfico, de forma a observar o comportamento dos valores medidos. A Figura 4.2 apresenta esses resultados:

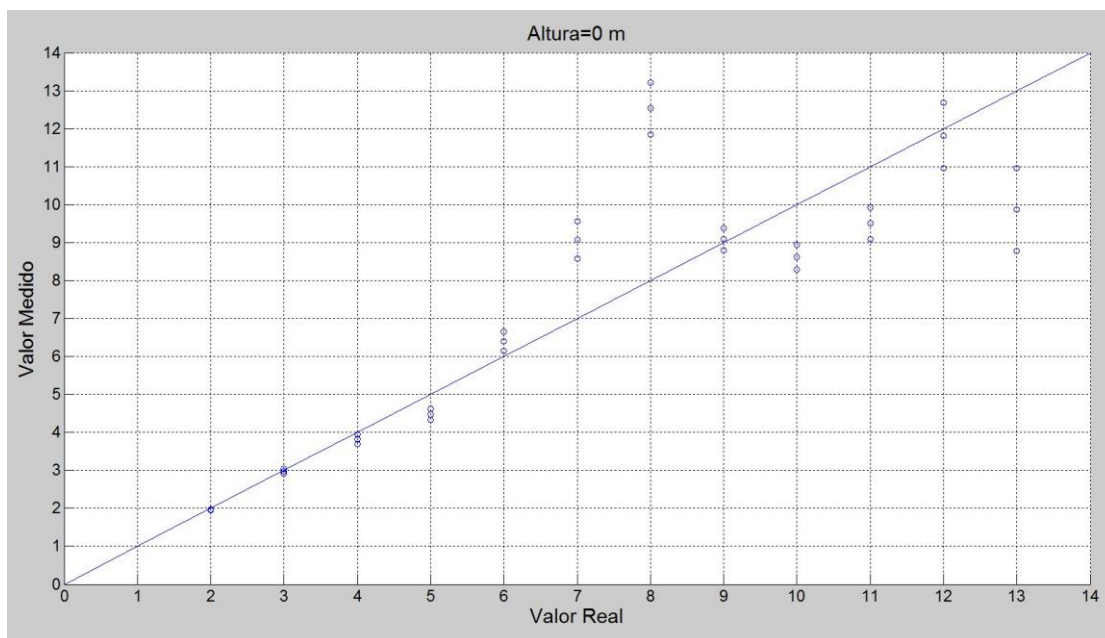


Figura 4.2 - Valor real vs valor medido no modelo *One Slope*, para a altura 0 m, com o expoente calculado.

Neste caso, os valores medidos encontram-se mais próximos dos valores reais e, desta forma, o seu resultado é mais aceitável. Para obter uma melhor perspetiva, foi desenhado um gráfico do erro absoluto e desvio padrão, positivo e negativo, Figura 4.3.

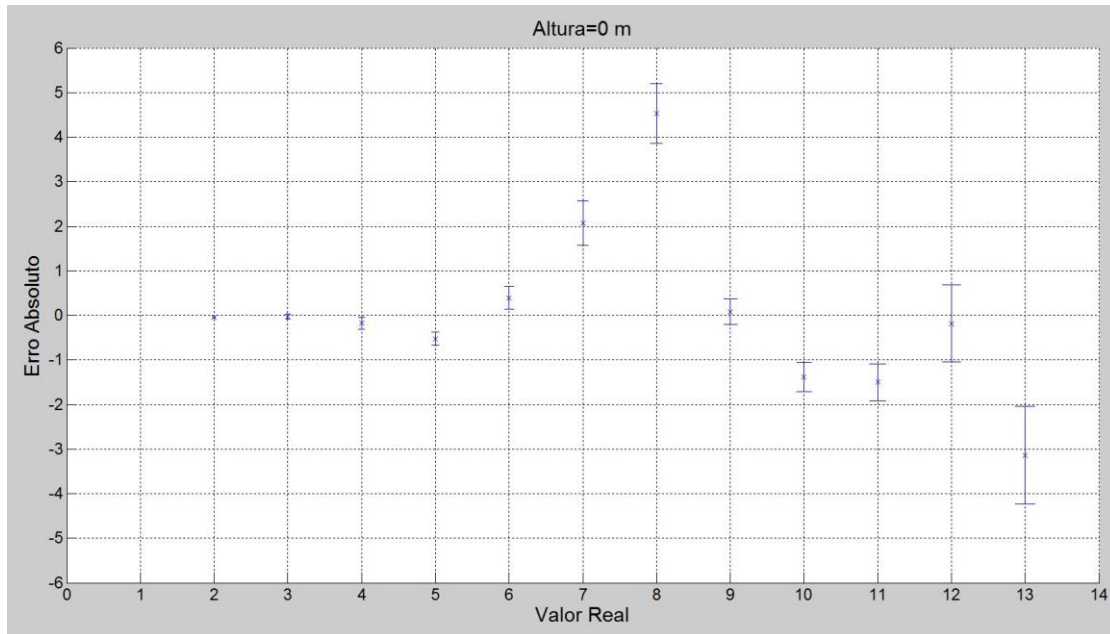


Figura 4.3 - Erro absoluto no modelo *One Slope*, para a altura 0 m.

Neste sentido, é possível observar que o erro absoluto tem o seu máximo para a distância de 8 m. Numa fase inicial, até aos 6 m, este valor encontra-se próximo de 0.

Quando o valor do expoente era 2, o erro absoluto médio (média dos módulos dos erros absolutos) era de 45,471 m. Após o expoente ser ajustado para o valor médio, o erro absoluto médio passou a ser de 1,171 m.

4.1.1.2 Modelo Path Loss

Com os resultados do modelo *One Slope* obtidos, foram analisados os dados segundo o modelo *Path Loss*, secção 3.4.2, através da equação 4.2.

$$d = 10^{\left(\frac{(P_{trans}[dBm] - P_{rec}[dBm]) - 20 \log(f) + 147,55}{20}\right)} \quad (4.2)$$

Em que P_{trans} [dBm] é a potência a que o sinal é transmitido, ou seja, $P_{trans} = 4,5$ dBm, e P_{rec} [dBm] a potência recebida. A frequência para o canal 25 é de 2475 MHz, visto em 3.1 e os valores obtidos do RSSI são os mesmos da Tabela 4.1. Após aplicar o modelo *Path Loss*, obteve-se a distância média, o desvio padrão e o erro absoluto apresentados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0 m, modelo *Path Loss*.

Distância real [m]	Distância média [m]	Desvio padrão [m]	Erro absoluto [m]
1	1,285	0,007	0,285
2	4,562	0,048	2,562
3	10,104	0,378	7,104
4	16,211	1,015	12,211
5	21,858	1,333	16,858
6	42,946	3,215	36,946
7	83,159	8,595	76,159
8	153,187	15,488	145,187
9	83,234	5,112	74,234
10	75,381	5,424	65,381
11	90,702	7,624	79,702
12	137,477	19,076	125,477
13	98,220	23,612	85,220

Com todos os valores calculados, foi então desenhado o gráfico para o modelo *Path Loss*, Figura 4.4.

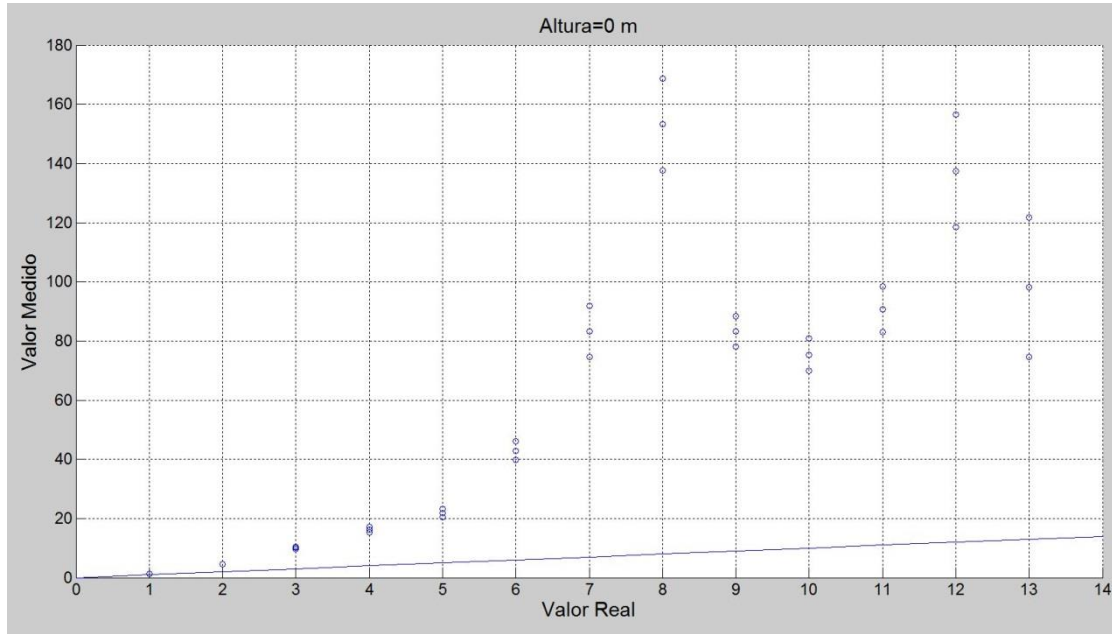


Figura 4.4 - Valor real vs valor medido no modelo *Path Loss*, para a altura 0 m.

Uma perspectiva do erro absoluto deste modelo de cálculo pode ser vista através do gráfico da Figura 4.5.

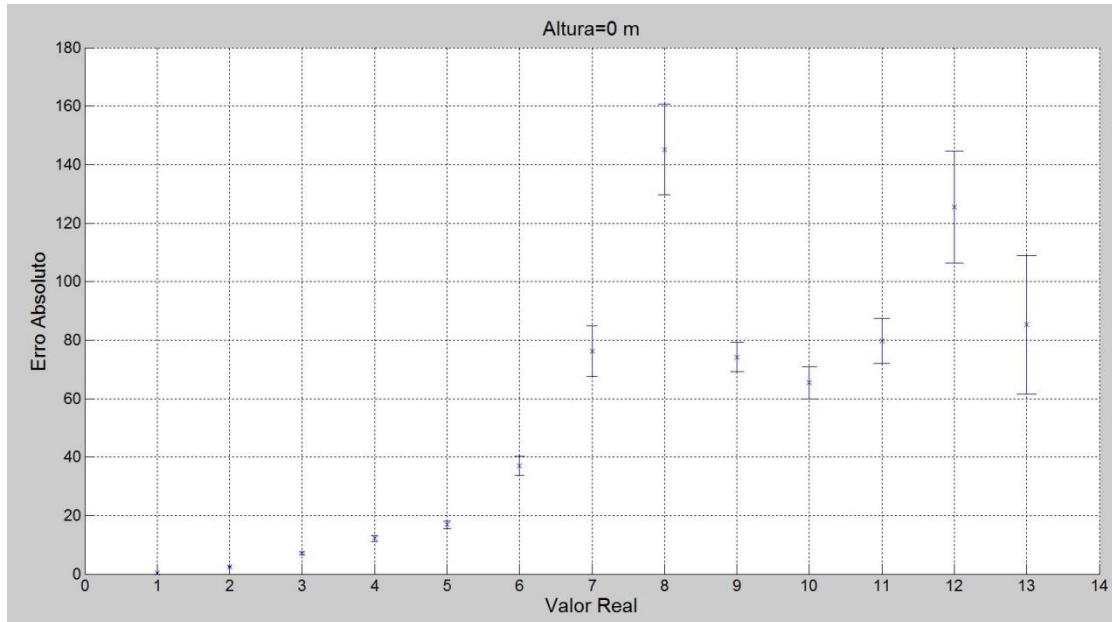


Figura 4.5 - Erro absoluto no modelo *Path Loss*, para a altura 0 m.

Relativamente ao erro absoluto, o modelo *One Slope* tem um erro menor que o modelo *Path Loss*, depois de o valor do expoente ter sido ajustado para a média dos

valores. No primeiro caso, Figura 4.3, o erro absoluto é de 0,234 m, até aos 6 m, e depois dessa distância, o erro aumenta para um valor máximo a rondar os 4,5 m, à distância de 8 m. Todos os outros valores de erro apresentam um valor inferior a 4 m. No que concerne ao modelo *Path Loss*, Figura 4.5, o erro absoluto é muito superior, sendo que a sua média é de 55,799 m. O principal fator deve-se à impossibilidade de ajustar o valor do expoente, e ao facto de não existir qualquer variável de referência, como sucede com o d_0 para o modelo *One Slope*. Como tal, para este modelo, o erro máximo foi de aproximadamente 160 m à distância de 8 m. E, mesmo assim, todos os outros valores superiores à distância de 4 m apresentam valores de erro absoluto bastante elevados. Com isto, é possível concluir que, para o tratamento de dados do valor do RSSI, o modelo que melhor se ajusta é o modelo *One Slope*.

4.1.2 Valores obtidos à altura de 0,5 m

Do mesmo modo, será agora analisado, nesta secção, os valores de RSSI obtidos à altura de 0,5 m. Para esta altura foram retirados valores para 15 distâncias diferentes.

A Tabela 4.6 apresenta as diferentes distâncias, $Prec(d)$ [dBm] a média do valor do RSSI lido e, ainda, $Prec(d_0)$ [dBm] a média do valor do RSSI à distância de referência de 1 m.

Tabela 4.6 - Tabela de valores recebidos para a altura 0,5 m.

Distância [m]	$Prec(d)$ [dBm]	$Prec(d0)$ [dBm]
2	-39,000	-34,000
3	-42,000	
4	-45,000	
5	-48,617	
6	-49,867	
7	-49,001	
8	-50,396	
9	-49,031	
10	-51,038	
11	-49,000	
12	-50,996	
13	-53,018	
14	-51,986	
15	-52,982	

4.1.2.1 Modelo *One Slope*

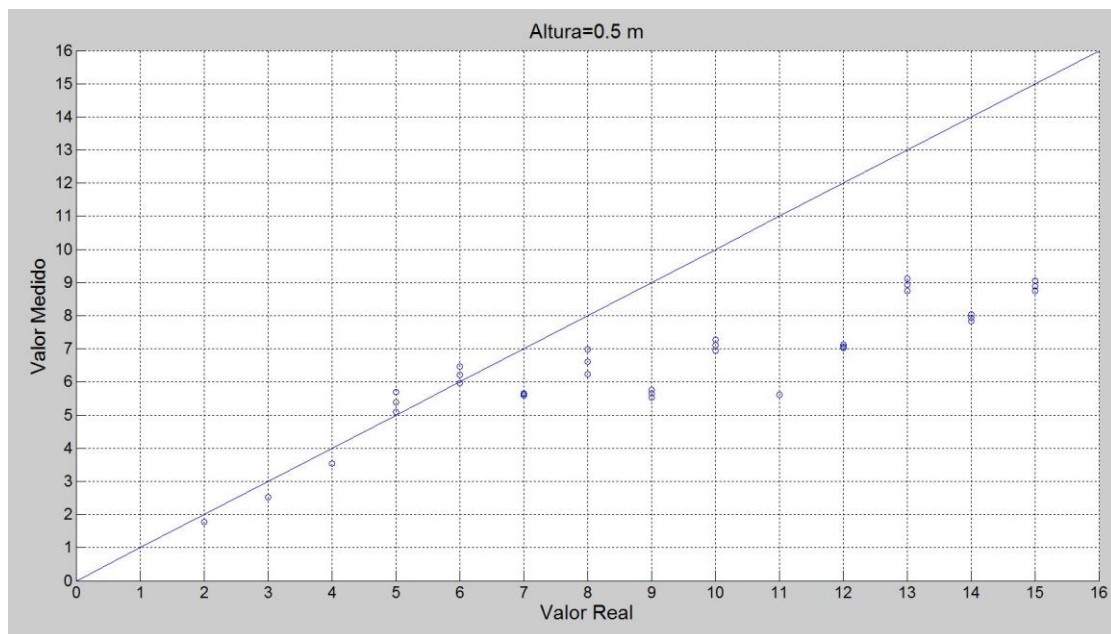
Do mesmo modo que na secção 4.1.1, é analisado agora, os valores obtidos para o modelo matemático *One Slope*, através da equação 4.1.

A Tabela 4.7 apresenta os valores da distância média, do desvio padrão e do erro absoluto calculados através deste modelo.

Tabela 4.7 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0,5 m modelo One Slope.

Distância real [m]	Distância média [m]	Desvio padrão [m]	Erro absoluto [m]
2	1,778	0	-0,222
3	2,512	0	-0,488
4	3,548	0	-0,452
5	5,389	0,297	0,389
6	6,219	0,244	0,219
7	5,624	0,022	-1,376
8	6,614	0,377	-1,386
9	5,645	0,123	-3,355
10	7,111	0,165	-2,889
11	5,623	0	-5,377
12	7,076	0,049	-4,924
13	8,933	0,184	-4,067
14	7,931	0,102	-6,069
15	8,896	0,159	-6,104

Sendo assim, para observar o comportamento dos valores medidos face aos valores reais, foram colocadas num gráfico as medições da distância média, da distância média mais o desvio padrão, da distância média menos o desvio padrão e a reta $y=x$, apresentada na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Valor real vs valor medido no modelo *One Slope*, para a altura 0,5 m.

Para obter uma melhor aproximação do valor medido ao valor real, o valor do expoente γ foi ajustado para a altura de 0,5 m.

Com recurso ao MatLab, foi obtida a Tabela 4.8 que apresenta os vários valores do expoente para as diversas alturas e, no final, fez-se a média destes valores.

Tabela 4.8 - Diferentes valores de γ para a altura de 0,5 m.

Distância [m]	γ
2	1,661
3	1,677
4	1,827
5	2,091
6	2,039
7	1,775
8	1,816
9	1,575
10	1,704
11	1,440
12	1,575
13	1,707
14	1,569
15	1,614

Após calcular estes valores, a média do expoente para as diferentes distâncias é de $\gamma=1,719$.

Por sua vez, com o novo valor do expoente determinado foi calculado o novo valor da distância média, do desvio padrão e do erro absoluto, Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0,5 m com o valor do γ recalculado.

Distância real [m]	Distância média [m]	Desvio padrão [m]	Erro absoluto [m]
2	1,954	0	-0,046
3	2,920	0	-0,080
4	4,363	0	0,363
5	7,097	0,455	2,097
6	8,382	0,354	2,382
7	7,456	0,034	0,456
8	9,007	0,598	1,007
9	7,488	0,191	-1,512
10	9,798	0,267	-0,202
11	7,455	0	-3,545
12	9,740	0,077	-2,260
13	12,772	0,307	-0,228
14	11,122	0,164	-2,878
15	12,710	0,262	-2,290

Depois de determinar todos os valores e com o novo expoente $\gamma = 1,719$ calculado, foi desenhado um novo gráfico, Figura 4.7.

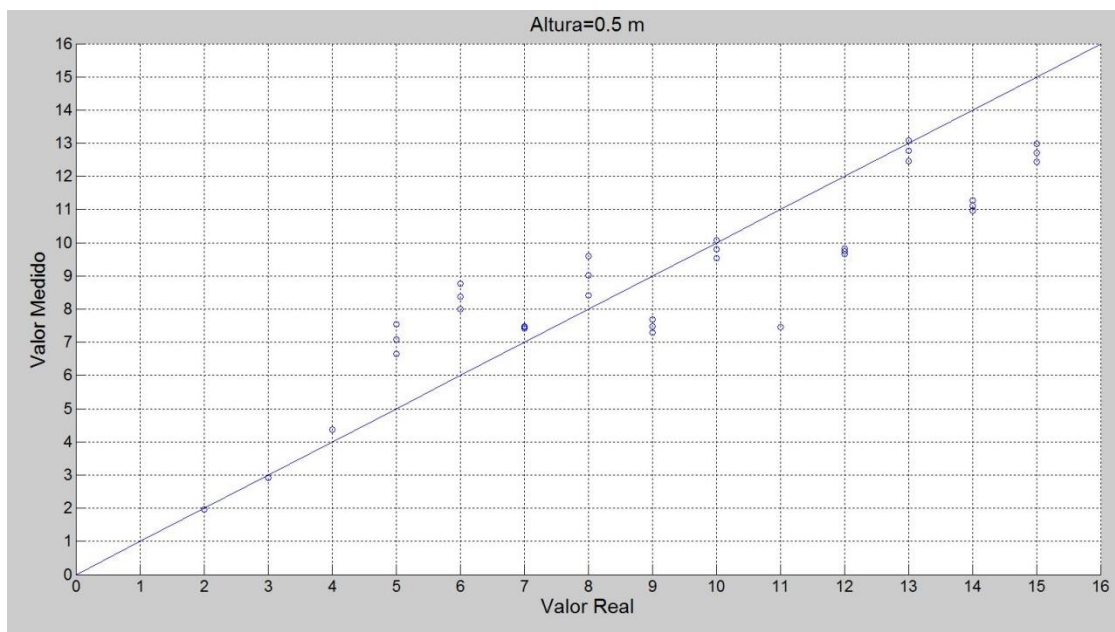


Figura 4.7 - Valor real vs valor medido no modelo *One Slope*, para a altura 0,5 m, com o expoente calculado.

Tal como na altura de 0 m, depois do valor do expoente ser ajustado os valores medidos na altura de 0,5 m encontram-se mais próximos dos valores reais, como se pode verificar na Figura 4.8.

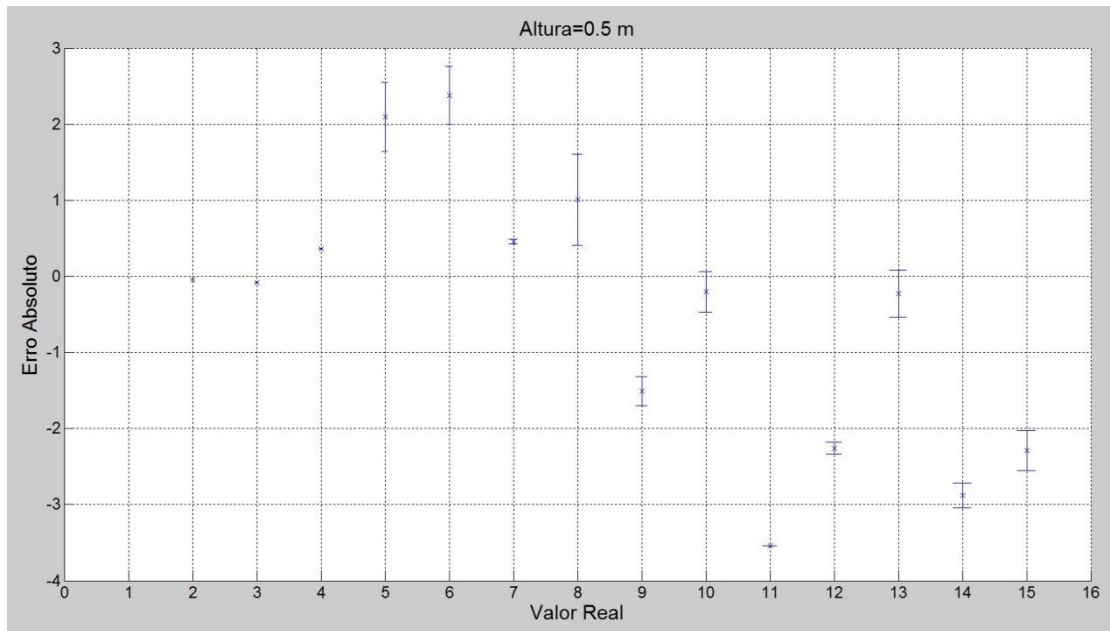


Figura 4.8 - Erro absoluto no modelo *One Slope*, para a altura 0,5 m.

O gráfico da Figura 4.8 apresenta os valores com o novo expoente médio calculado.

Deste modo, é possível observar que o erro absoluto se encontra mais próximo de 0, atingindo o seu máximo aos 11 m com o valor de -3,545 m. O valor do erro absoluto médio, quando o valor do expoente era 2, era de 2,666 m e, após o expoente ter sido ajustado para o valor médio de 1,719, o erro absoluto médio passou a ser de 1,382 m. Neste sentido, é possível concluir que o valor do erro absoluto médio diminuiu conforme aumenta a altura dos módulos.

4.1.2.2 Modelo Path Loss

Depois de analisar os resultados para o modelo *One Slope*, serão agora analisados segundo o modelo *Path Loss* da equação 4.2.

Durante os testes realizados a esta altura, a potência a que o sinal é transmitido P_T [dBm] é de 4,5 dBm e a distância de referência é de 1 m. Neste caso, o canal escolhido é o mesmo que o anterior, ou seja, o 25, com a frequência de 2475 MHz.

Os valores de RSSI analisados foram os da Tabela 4.6 e, depois de aplicar o modelo *Path Loss*, secção 3.4.2, obtiveram-se as distâncias da Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Distância média, desvio padrão e erro absoluto para a altura 0,5 m, modelo *Path Loss*.

Distância real [m]	Distância média [m]	Desvio padrão [m]	Erro absoluto [m]
1	0,811	0	-0,189
2	1,442	0	-0,558
3	2,037	0	-0,963
4	2,877	0	-1,123
5	4,370	0,241	-0,630
6	5,042	0,198	-0,958
7	4,560	0,018	-2,440
8	5,363	0,305	-2,637
9	4,577	0,099	-4,423
10	5,767	0,134	-4,233
11	4,560	0	-6,440
12	5,738	0,039	-6,262
13	7,243	0,149	-5,757
14	6,431	0,082	-7,569
15	7,213	0,129	-7,787

Após o cálculo de todos os valores segundo o modelo *Path Loss*, foi desenhado o gráfico da Figura 4.9, que apresenta a distância média, a distância média mais desvio padrão e a distância média menos desvio padrão.

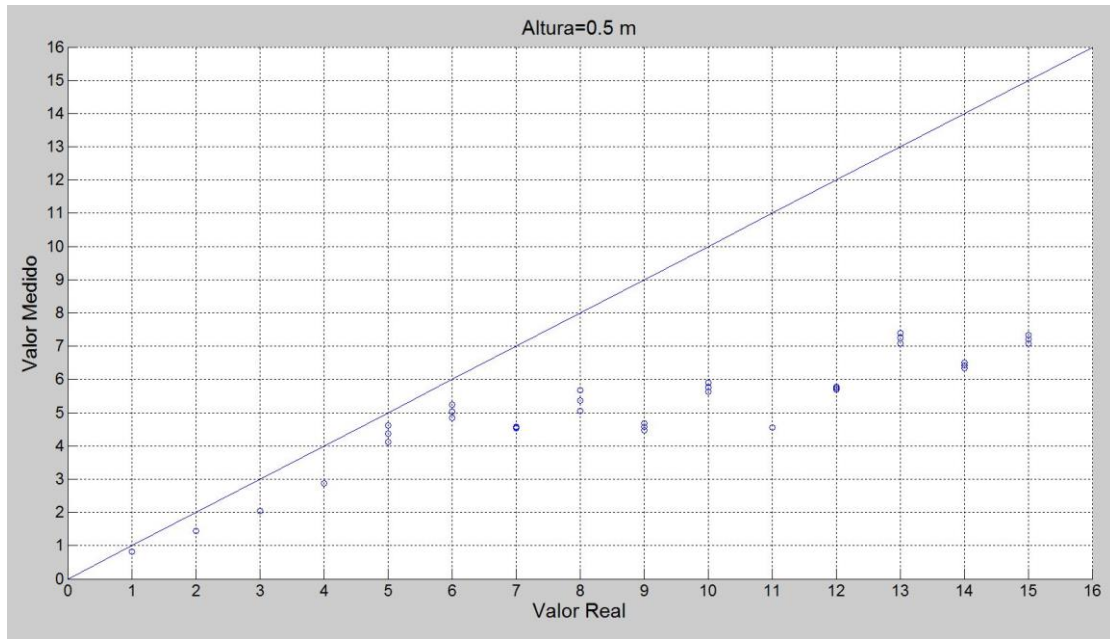


Figura 4.9 - Valor real vs valor medido no modelo *Path Loss*, para a altura 0,5 m.

Observando agora o erro absoluto e o desvio padrão, foi obtido o gráfico da Figura 4.10.

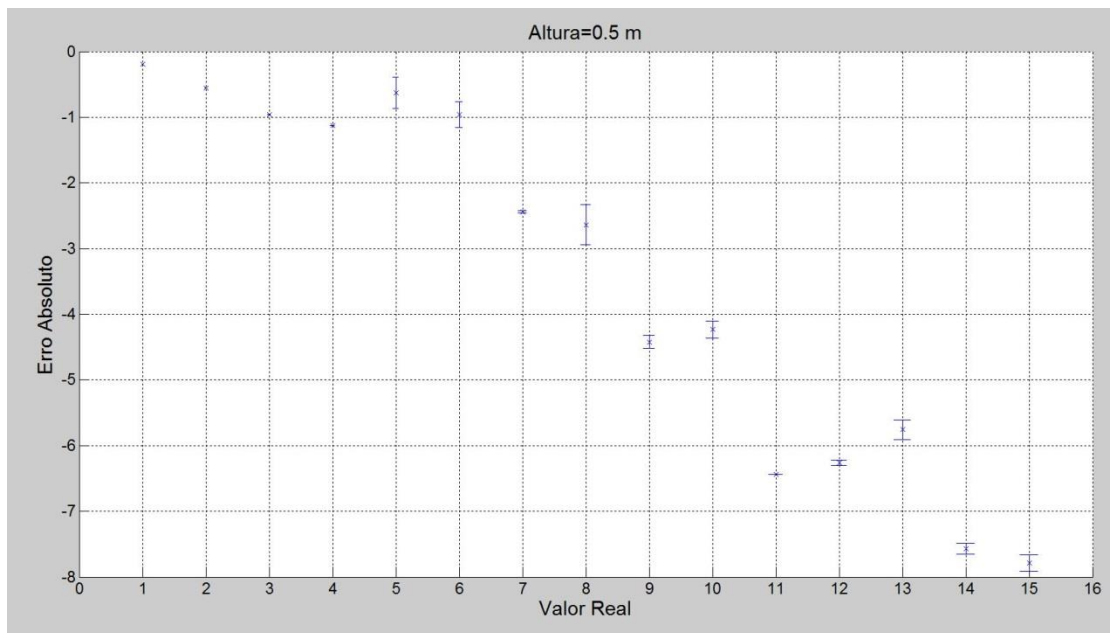


Figura 4.10 - Erro absoluto modelo *Path Loss*, para a altura 0,5 m.

Tal como para a altura de 0 m, também na altura de 0,5 m o erro absoluto é menor no modelo *One Slope* comparativamente ao modelo *Path Loss*, depois de o valor do expoente ter sido recalculado.

Segundo o erro absoluto do modelo *One Slope*, Figura 4.8, este apresenta um erro máximo de aproximadamente -3,5 m a uma distância de 11 m. Todos os outros valores de erro absoluto são inferiores. Como tal, é possível concluir que, com o aumento da altura, o erro absoluto é menor.

No modelo *Path Loss*, Figura 4.10, o erro é de novo muito superior não só por não existir uma distância de referência, mas também por não haver a possibilidade de ajustar os parâmetros para uma condição mais aproximada do ideal. Deste modo, o erro máximo é de aproximadamente -8 m. Quanto ao erro absoluto médio, este tem um valor de 3,465 m. Apesar disso, comparativamente aos testes à altura de 0 m, os erros registados são bem inferiores. Logo, é possível constatar que a altura tem uma influência direta nos resultados obtidos.

Tal como no teste anterior, é possível concluir que o modelo que melhor se ajusta para o tratamento de dados do valor do RSSI é o modelo *One Slope*.

4.2 Ambiente interno

Os dados foram recolhidos segundo a descrição efetuada na secção 3.6. A cada distância foram recolhidos três valores de RSSI médio por módulo recetor, que foram escritos no LCD e, posteriormente, através da aplicação do método WCL, foi possível determinar as coordenadas (x, y) do nó desconhecido.

4.2.1 Valores recebidos

Os valores obtidos neste teste correspondem à média de 10, 50 e 1000 amostras. O processo de recolha de dados é descrito na secção 3.6, ou seja, de 1 em 1 m foram anotados manualmente os valores de RSSI dos quatro recetores.

A Tabela 4.11, Tabela 4.12 e Tabela 4.13 apresentam as várias distâncias, o $Prec(d)$ [dBm] (média do valor do RSSI lido), para as diferentes médias de valores recebidos do RSSI nos diferentes módulos, na direção do módulo 1 para o 2, 1 para o 4 e 1 para o 3, respetivamente.

Tabela 4.11 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente interno, direção 1 para o 2.

D [m]	$Prec(d)$ [dBm] Recetor 1			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 2			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 3			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 4		
	10	50	1000	10	50	1000	10	50	1000	10	50	1000
1	-56	-45	-44	-62	-56	-54	-72	-63	-62	-62	-50	-48
2	-54	-48	-47	-62	-54	-52	-74	-63	-60	-60	-54	-52
3	-58	-50	-50	-60	-51	-49	-68	-58	-56	-66	-61	-59
4	-58	-52	-51	-59	-48	-47	-64	-51	-48	-68	-61	-62

Tabela 4.12 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente interno, direção 1 para o 4.

D [m]	$Prec(d)$ [dBm] Recetor 1			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 2			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 3			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 4		
	10	50	1000	10	50	1000	10	50	1000	10	50	1000
1	-54	-46	-44	-65	-59	-58	-67	-57	-55	-59	-50	-50
2	-58	-49	-48	-72	-62	-61	-63	-53	-52	-58	-48	-48
3	-65	-52	-51	-75	-64	-65	-62	-50	-50	-55	-45	-45
4	-66	-53	-52	-74	-69	-68	-60	-51	-48	-51	-43	-43

Tabela 4.13 - Tabela de valores de RSSI recebidos, ambiente interno, direção 1 para o 3.

D [m]	$Prec(d)$ [dBm] Recetor 1			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 2			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 3			$Prec(d)$ [dBm] Recetor 4		
	10	50	1000	10	50	1000	10	50	1000	10	50	1000
1	-56	-45	-44	-63	-56	-55	-69	-58	-57	-63	-54	-52
2	-60	-49	-48	-65	-54	-53	-62	-54	-54	-59	-51	-50
3	-66	-51	-50	-59	-52	-51	-55	-47	-46	-57	-50	-48
4	-62	-55	-52	-65	-62	-61	-55	-45	-43	-70	-64	-62
5	-71	-55	-54	-72	-67	-65	-51	-41	-40	-69	-69	-66
6	-71	-59	-55	-76	-70	-68	-46	-39	-38	-81	-73	-72

4.2.1.1 Modelo *One Slope*

Tal como explicado na secção 3.6.2, iniciou-se o estudo com a obtenção do valor médio do expoente do modelo matemático *One Slope*, em relação ao recetor 1. A

Tabela 4.14 apresenta os vários valores do expoente, nas diferentes direções, e a respetiva média.

Tabela 4.14 - Diferentes valores de γ para o recetor 1, para as diferentes direções.

Distância [m]	γ Direção de 1 para o 2	γ Direção de 1 para o 4	γ Direção de 1 para o 3
2	0,664	1,661	1,661
3	1,467	1,677	1,677
4	1,329	1,495	1,495
5			1,574
6			1,542
Média	1,153	1,611	1,590

Sendo assim, a média final do expoente, para o recetor 1 nas diferentes direções é de 1,451.

Com o valor do expoente calculado, a Tabela 4.15, Tabela 4.16 e Tabela 4.17 apresentam as várias distâncias medidas para os vários recetores, obtidas a partir dos 3 valores das amostras, na direção do recetor 1 para o 2.

Os valores da distância medidos, nas diversas direções, foram calculados pelo modelo *One Slope*, equação 4.1, e visto na secção 3.4.1.

Tabela 4.15 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 2, 10 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	7,866	4	12,661	6,403	258,007	5,100	23,882
2	5,727	3	12,661	5,831	354,355	5,385	17,389
3	10,803	2	9,218	5,385	136,778	5,831	45,050
4	10,803	1	7,866	5,100	72,511	6,403	61,872

Tabela 4.16 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 2, 50 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	1,373	4	4,887	6,403	61,872	5,100	3,558
2	2,211	3	3,558	5,831	61,872	5,385	17,378
3	3,036	2	2,311	5,385	27,988	5,831	20,378
4	10,803	1	1,373	5,100	9,218	6,403	20,378

Tabela 4.17 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 2, 1000 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	1,172	4	3,558	6,403	52,795	5,100	2,591
2	1,886	3	2,591	5,831	38,440	5,385	4,887
3	3,036	2	1,610	5,385	20,378	5,831	14,838
4	3,558	1	1,172	5,100	5,727	6,403	23,882

Da mesma forma, a Tabela 4.18, Tabela 4.19 e Tabela 4.20 apresentam as distâncias medidas segundo o modelo *One Slope*, mas agora na direção do recetor 1 para o recetor 4.

Tabela 4.18 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 4, 10 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	5,727	5,100	20,378	6,403	116,711	4	14,838
2	10,803	5,385	61,872	5,831	61,872	3	12,661
3	32,801	5,831	99,588	5,385	52,795	2	7,866
4	38,440	6,403	84,998	5,100	38,440	1	4,170

Tabela 4.19 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 4, 50 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	1,610	5,100	7,866	6,403	23,882	4	3,558
2	2,591	5,385	12,661	5,831	12,661	3	2,591
3	4,170	5,831	17,389	5,385	7,866	2	1,610
4	4,887	6,403	38,440	5,100	9,218	1	1,172

Tabela 4.20 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 4, 1000 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	1,172	5,100	6,712	6,403	17,389	4	3,558
2	2,211	5,385	10,803	5,831	10,803	3	2,591
3	3,558	5,831	20,378	5,385	7,866	2	1,610
4	4,170	6,403	32,801	5,100	5,727	1	1,172

Por último, a Tabela 4.21, Tabela 4.22 e Tabela 4.23 apresentam os valores na direção do recetor 1 para o recetor 3, ou seja, quando o emissor teve um deslocamento na diagonal.

Tabela 4.21 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 3, 10 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	7,866	4,351	14,838	6	160,295	4,310	27,988
2	14,838	3,855	20,378	5	52,795	3,827	14,838
3	38,440	3,576	7,866	4	17,389	3,566	10,803
4	20,387	3,566	20,378	3	17,389	3,576	84,978
5	84,978	3,827	61,872	2	9,218	3,855	72,511
6	84,978	4,310	116,711	1	4,170	4,351	486,683

Tabela 4.22 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 3, 50 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	1,373	4,351	4,887	6	27,988	4,310	6,712
2	2,590	3,855	3,558	5	14,838	3,827	4,170
3	3,558	3,576	2,591	4	4,887	3,566	3,558
4	6,712	3,566	12,989	3	3,558	3,576	32,801
5	6,712	3,827	27,988	2	1,886	3,855	72,511
6	12,661	4,310	45,050	1	1,373	4,351	136,778

Tabela 4.23 - Cálculo das diferentes distâncias para os 4 recetores, direção 1 para o 3, 1000 amostras.

Distância real [m] Recetor 1	Distância medida [m] Recetor 1	Distância real [m] Recetor 2	Distância medida [m] Recetor 2	Distância real [m] Recetor 3	Distância medida [m] Recetor 3	Distância real [m] Recetor 4	Distância medida [m] Recetor 4
1	1,172	4,351	4,170	6	23,882	4,310	4,887
2	2,211	3,855	3,036	5	14,838	3,827	3,558
3	3,036	3,576	2,211	4	4,170	3,566	2,591
4	4,170	3,566	10,803	3	2,591	3,576	23,882
5	5,727	3,827	20,378	2	1,610	3,855	45,050
6	6,712	4,310	32,801	1	1,172	4,351	116,711

Os valores elevados de algumas distâncias apresentadas devem-se principalmente ao cálculo do expoente médio γ , pois, somente foi determinado um valor médio em relação ao recetor 1, para as diversas distâncias. Desta forma, foi assumido que os restantes recetores teriam um valor de expoente médio próximo do valor calculado. Estes valores da distância calculados serviram como fator de ponderação, visto na secção 2.3.5, equação 4.3.

$$w_i = \frac{1}{d_i} \quad (4.3)$$

Em que w_i é o peso, e d_i a distância calculada. Após determinar as distâncias do emissor aos vários recetores, nas diversas direções medidas, foram calculadas as coordenadas (x, y) do emissor. O modelo utilizado é o WCL, descrito na secção 2.3.5, e as coordenadas são calculadas pela equação 4.4.

$$P_i(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i * B_i(x, y))}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4.4)$$

Onde $P_i(x, y)$ são os valores das coordenadas calculadas, w_i é o peso, e $B_i(x, y)$ o a posição do recetor e i o número do recetor.

Os resultados serão apresentados pela mesma ordem, ou seja, primeiramente na direção do recetor 1 para o recetor 2, depois na direção do recetor 1 para o recetor 4 e, finalmente, na direção do recetor 1 para o recetor 3. Os resultados práticos serão apresentados sob a forma de tabela com as coordenadas calculadas e o erro absoluto (equação 4.5) para cada conjunto de coordenadas.

$$\text{Erro Absoluto} = \sqrt{(x_m - x_r)^2 + (y_m - y_r)^2} \quad (4.5)$$

Em que x_m e y_m são os valores das coordenadas calculadas, x_r o valor real da coordenada real em x e y_r o valor real da coordenada real em y.

4.2.1.2 Modelo WCL

Os valores calculados para as coordenadas (x, y) e o erro absoluto, para a direção de 1 para o 2 serão apresentados na Tabela 4.24, na direção 1 para o 4 na Tabela 4.25 e por fim, na Tabela 4.26 serão apresentados os resultados na direção 1 para o 3.

Tabela 4.24 - Coordenadas (x, y) e erro absoluto, direção 1 para o 2, para as várias amostras.

(x, y) [m]	10 amostras			50 amostras			1000 amostras		
	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto
(1, 0)	1,645	0,908	1,114	0,898	1,208	1,213	0,974	1,315	1,316
(2, 0)	1,303	0,961	1,187	1,841	0,456	0,982	1,796	1,006	1,026
(3, 0)	2,511	0,640	0,805	2,816	0,489	0,523	3,314	0,546	0,564
(4, 0)	2,822	0,600	1,322	4,276	0,805	0,755	3,805	0,801	0,825

Tabela 4.25 - Coordenadas (x, y) e erro absoluto, direção 1 para o 4, para as várias amostras.

(x, y) [m]	10 amostras			50 amostras			1000 amostras		
	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto
(0, 1)	0,962	1,268	0,998	0,789	1,507	0,938	0,770	1,263	0,814
(0, 2)	0,793	2,334	0,860	0,849	2,500	0,986	0,904	2,338	0,966
(0, 3)	0,777	3,914	1,200	0,883	3,578	1,055	0,817	3,470	0,942
(0, 4)	0,622	4,378	0,728	0,564	4,033	0,565	0,790	3,959	0,791

Tabela 4.26 - Coordenadas (x, y) e erro absoluto, direção 1 para o 3, para as várias amostras.

(x, y) [m]	10 amostras			50 amostras			1000 amostras		
	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto	X [m]	Y [m]	Erro Absoluto
(0,707, 0,707)	1,557	0,940	0,881	1,076	0,891	0,412	1,051	0,983	0,441
(1,414, 1,414)	1,676	2,129	0,761	1,788	1,577	0,408	1,755	1,542	0,364
(2,121, 2,121)	3,045	2,475	0,989	2,562	2,107	0,441	2,459	2,223	0,353
(2,828, 2,828)	3,183	2,069	0,838	3,337	2,887	0,512	3,147	2,814	0,320
(3,536, 3,536)	4,149	4,070	0,813	3,883	3,732	0,399	3,865	3,710	0,373
(4,243, 4,243)	4,736	4,612	0,616	4,484	4,395	0,285	4,244	4,138	0,105

Após determinar todos os valores das coordenadas (x, y), assim como do erro absoluto, podemos afirmar que a exatidão do sistema é boa, pois o erro absoluto médio é baixo, 0,712 m, considerando as três direções diferentes, para as 1000 amostras. Do ponto de vista das 10 amostras, o erro absoluto médio é de 0,957 m e por último, para 50 amostras, o erro absoluto médio é de 0,721 m. Quer isto dizer que, os valores medidos pelo modelo WCL estão próximos dos valores reais.

Desta forma, é possível afirmar que o método de cálculo, em que primeiramente é determinado o valor do expoente médio, e de seguida, o valor da distância d pelo modelo *One Slope* usado como fator de peso para o modelo WCL satisfaz as condições, e com isso, é possível ser utilizado com os valores de RSSI recebidos, e, assim, obter uma localização x, y.

5. Conclusões

O principal objetivo do trabalho apresentado nesta dissertação foi o desenvolvimento de um sistema de posicionamento baseado numa rede de sensores sem fios.

Deste modo, pretendeu-se determinar as coordenadas (x, y) de um sensor numa rede através da intensidade do sinal recebido. Para tal, foram estudadas e desenvolvidas soluções para determinar a distância entre um emissor e um recetor, e posteriormente, determinar a posição de um emissor numa rede com quatro recetores.

Reunidos todos os elementos necessários para a criação do sistema, foi necessário implementar um algoritmo, para permitir a comunicação entre os módulos. Os resultados obtidos permitem determinar a localização das coordenadas do sensor desconhecido.

Em seguida, apresentam-se as conclusões relativas aos vários tópicos usados e aplicados.

O RSSI apresenta diversos fatores preponderantes como forma de localização, pois existe um baixo custo de implementação devido à existência prévia das infraestruturas e ao seu baixo consumo.

Para determinar a distância entre um emissor e um recetor, foram abordados vários modelos, de entre os quais se escolheu o modelo *One Slope*, que se revelou mais preciso. Este, quando comparado com o modelo *Path Loss*, utiliza um valor de RSSI de referência à distância d_0 . Por comparação entre os dois modelos, através dos testes realizados num ambiente externo, foi possível concluir que o modelo *One Slope* possibilita uma melhor localização, apresentando um erro muito inferior. Contudo, estes resultados apenas surgem quando o valor do expoente γ é ajustado.

O sistema de localização permite determinar a localização pelas coordenadas (x, y) do módulo sensorial. O sistema de localização implementado na resolução da dissertação foi baseado no método WCL, que utiliza um peso, definido como o inverso da distância, calculada pelo modelo *One Slope*. O método WCL permitiu obter uma boa precisão, analisado através do erro absoluto médio entre as medidas reais e as calculadas. Na direção do recetor 1 para o recetor 2, o erro absoluto médio é de 0,933 m, para o caso do recetor 1 para o recetor 4, este é de 0,878 m e, por último, do recetor 1 para o recetor 3, o valor é de 0,326 m. Os valores obtidos foram registados pelas 1000 amostras recolhidas.

A resolução apresentada ao longo desta dissertação cumpriu os objetivos propostos com um bom desempenho para as condições testadas. Neste sentido, considera-se que o sistema desenvolvido pode ter uma aplicabilidade em sistemas de posicionamento num ambiente interno.

Apesar disso, o trabalho desenvolvido não se esgota nele mesmo. Existem vários aspetos que podem ser melhorados. O principal é o aumento da precisão do sistema, para assim obter uma melhor resposta. Um outro aspeto essencial é recorrer a outra forma de cálculo do peso para a localização pelo modelo WCL. A solução encontrada requer uma calibração prévia, sendo necessário determinar o valor do expoente médio do modelo *One Slope*.

De salientar ainda que o trabalho desenvolvido poderá ser usado juntamente com um sistema baseado em IMU (*Inertial Measurement Unit*), aumentando desta forma a precisão do conjunto.

Um sistema baseado em IMU é um sistema eletrónico que permite a medição da orientação e das forças gravitacionais, utilizando para isso acelerómetros e giroscópios e, por vezes, magnetómetros [46].

Referências

- [1] Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, "The Global Positioning System: A Shared National Asset", National Academies Press, 1995.
- [2] Helen E. Worth, Mame Warren, "Transit to Tomorrow. Fifty Years of Space Research", *The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory*, 2009.
- [3] R. L. Beard and J. Murray, "GPS Clock Technology and the Navy PTTI programs at the U.S. Naval Research Laboratory", p. 39, 40, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., 1986.
- [4] J. Ta, "Global Positioning System", A Thesis Presented to The Faculty of the Mathematics Program, California, University Channel Islands, Abril, 2011.
- [5] American Gov., "United States Updates Global Positioning System Technology", Fevereiro, 2006.
- [6] "How Does Gps Technology Work", Importance of Technology, 03 Nov. 2012, Disponível em: <http://4youtechnology.com/how-does-gps-technology-work/>, Consultado em: 14 Março, 2013.
- [7] C. H. Lim, Y. Wan, Ng. Boon-Poh and C.-M.S. See, "A Real-Time Indoor WiFi Localization System Utilizing Smart Antennas", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, pp. 618-622, Maio, 2007.
- [8] BBC News, "Tracking a suspect by any mobile phone: Tracking SIM and handset", Agosto, 2005.
- [9] M. W. Cardullo, "Genesis of the Versatile RFID Tag", *RFID Journal*, Abril, 2003.
- [10] S. P. Mahulikar and H. R. Sonawane, G. A. Rao, "Infrared signature studies of aerospace vehicles", *Progress in Aerospace Science*, pp. 218-245, 2007.

-
- [11] C. C. Pu, C. H. Pu and H. J. Lee, "Indoor Location Tracking using Received Signal Strength Indicator", Sunway University College, Taylor's University College, Dongseo University, Malaysia, Malaysia and South Korea, 2011.
- [12] C. C. Pu, "Development of a New Collaborative Ranging Algorithm for RSSI Indoor Location Tracking in WSN", PhD Thesis, Dongseo University, South Korea, 2009.
- [13] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Characterization and Mitigation", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, number 7, pp. 90-109, 1997.
- [14] I. K. Eltahir, "The Impact of Different Radio Propagation Models for Mobile Ad hoc NETWORKS (MANET) in Urban Area Environment", AusWireless, pp. 30-38, Sydney, Australia, Agosto, 2007.
- [15] Yu-Chee Tseng, Chi-Fu Huang and Sheng-Po Kuo, "Positioning and Location Tracking in Wireless Sensor Networks", *Pervasive Communications Handbook*, 2005.
- [16] S. Gezici, "A Survey on Wireless Position Estimation", *Wireless Pers Commun*, pp. 263-282, 2007.
- [17] J. Blumenthal, E Reichenbach and D. Timmermann, "Precise Positioning with a Low Complexity Algorithm in Ad hoc Wireless Sensor Networks", *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, pp. 80-85, vol. 28, 2005.
- [18] L. Wang, Y. Liu, X. Xu, and X. Wang, "WSN Multilateration Algorithm Based on Landweber Iteration", *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2009.
- [19] A. Fink and H. Beikirch, "Analysis of RSS-based Location Estimation Techniques in Fading Environments", *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 21 a 23 Setembro, Guimarães, Portugal, 2011.
- [20] W. Navidi, W. S. Murphy and W. Hereman, "Statistical methods in surveying by trilateration", *Comput. Stat. Data Anal.*, pp. 209-227, Abril, 1998.

-
- [21] D. Jeong, S. Kim and W. Chung, "Classification of posture and movement using a 3-axis accelerometer", *International Conference on Convergence Information Technology*, IEEE Computer Society, Washington, Nov., 2007.
- [22] H. R. Silva, L. A. Rocha, J. A. Afonso, P. C. Morim, P. M. Oliveira and J. H. Correia, "Wireless Hydrotherapy Smart-Suit Network for Posture Monitoring", *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics - ISIE 2007*, Vigo, Spain, Junho, 2007.
- [23] J. A. Afonso, P. Macedo, H. D. Silva, J. H. Correia, L. A. Rocha, "Design and Implementation of Multi-User Wireless Body Sensor Networks", *International Journal on Advances in Networks and Services*, Vol. 3, No. 1, pp. 62-74, Setembro, 2010.
- [24] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system", *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE (Volume:2)*, Tel Aviv, Israel, pp. 775-784, Março, 2000.
- [25] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System", *Microsoft Research*, University of California, San Diego, Fevereiro, 2000.
- [26] T. Kitasuka, K. Hisazumi, T. Nakanishi, and a. Fukuda, "WiPS: Location and Motion Sensing Technique of IEEE 802.11 Devices", *Third International Conference on Information Technology and Applications (ICITA'05)*, Sydney, Australia, pp. 346-349, 4 a 7 Julho, 2005.
- [27] C. Liou, K. Wu and T. He, "Sensor Localization with Ring Overlapping Based on Comparison of Received Signal Strength Indicator", *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, Florida, USA, 25-27 Oct. 2004, pp. 516-518, 2004.
- [28] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau and A. B. Patil, "LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID", *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp. 407-415, Março, 2003.

-
- [29] Y. Zhang, Z. Fang, R. Li and W. Hu, "The Design and Implementation of a RSSI-Based Localization System", *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2009.
- [30] F. Reichenbach and D. Timmermann, "Indoor Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks", *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 1018-1023, Agosto, 2006.
- [31] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, "Range-free localization schemes for large scale sensor networks", *In Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '03*, pp. 81-95, San Diego, USA, 2003.
- [32] IEEE P802.15.4/D18, "Draft Standard: Low Rate Wireless Personal Area Networks", Fevereiro, 2003.
- [33] IEEE 802.11, "Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications", IEEE, Agosto, 1999.
- [34] Jennic, "Co-existence of IEEE 802.15.4 at 2.4 GHz Application Note", JN-AN-1079, Fevereiro, 2008.
- [35] J. Zheng and M. J. Lee, "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4", *Sensor Network Operations*, IEEE Press, New York, pp. 218-237, 2006.
- [36] National Communications System Technology & Standards Division, "Telecommunications: Glossary of Telecommunication Terms", General Services Administration Information Technology Service, Agosto, 1996.
- [37] Texas Instruments, "CC2530 Development Kit User's Guide", User's Guide, Abril, 2010.
- [38] Texas Instruments, "SmartRF05 Evaluation Board", User's Guide, 2010.
- [39] Texas Instruments, "A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Application", Abril, 2009.
- [40] Texas Instruments, "CC2530x System on Chip Solution for 2.4GHz IEEE 802.15.4

-
- and ZigBee Applications”, User’s Guide, Janeiro, 2012.
- [41] IEEE Computer Society, “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Network (WPANs)”, IEEE Std 802.15.4, 2006.
- [42] Helder D. Silva, “Protocolos de acesso ao meio em redes de sensores sem fios aplicadas à captura de movimentos corporais”, Dissertação de Mestrado, Mestrado Integrado em Engenharia de Comunicações, Universidade do Minho, Novembro, 2010.
- [43] N. G. Fernández, “Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiossidad por refinamiento progresivo”, Tese de doutoramento, Universidade de Oviedo, 2006.
- [44] Texas Instruments, “CC2530 Software Examples”, User’s Guide, 2009. Disponível em: <http://www.ti.com/litv/zip/swrc135b>, Consultado em: 01 Junho, 2013.
- [45] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, “Gps-less low cost outdoor localization for very small devices”, *IEEE Personal Communications Magazine*, pp. 28-34, 2000.
- [46] M. M. Morrison, “Inertial Measurement Unit”, *European Patent Application EP0245467*, Novembro, 1987.