



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Sistema RFID com Tecnologia ZigBee

Gonçalo Luís Santos Gomes

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores**

Júri

Presidente: Prof. José Antonio Beltran Gerald, Departamento de Engenharia
Electrotécnica e de Computadores (DEEC)

Orientador: Prof^a. Maria Helena da Costa Matos Samento, Departamento de
Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC)

Vogal: Prof. Francisco André Correa Alegria, Departamento de Engenharia
Electrotécnica e de Computadores (DEEC)

Novembro de 2008

Agradecimentos

No decorrer desta dissertação de mestrado, muitos foram os incentivos e apoios que me foram dirigidos. Tenho a agradecer aos meus amigos e à minha família todo o apoio e carinho nas alturas mais difíceis deste projecto. Não posso deixar de agradecer à minha orientadora, Prof. Helena Sarmento, pela paciência e dedicação que sempre demonstrou durante este longo processo. Tenho também a agradecer a orientação do Eng. Paulo Chaves, meu co-orientador, e do Eng. Luís Fernandes durante a fase inicial do trabalho.

Resumo

Este trabalho pretende maximizar as vantagens que existem na utilização da tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) juntamente com ZigBee, no âmbito do desenvolvimento de um sistema de localização em espaço fechado.

Os principais requisitos do sistema são a criação de uma WSN (*Wireless Sensor Network*) com tecnologia ZigBee, funcionando cada nó da rede como uma etiqueta RFID, e o desenvolvimento de um algoritmo de localização. O trabalho consiste, numa primeira etapa, na criação da rede ZigBee e no desenvolvimento de um protótipo para testar o sistema. De seguida são estudados sistemas de localização, com maior ênfase nos sistemas de localização em espaço fechado, de modo a ser desenvolvido um algoritmo de localização. O algoritmo de localização desenvolvido utiliza um modelo de propagação baseado no modelo de propagação do factor de atenuação de parede (WAF - *Wall Attenuation Factor*), juntamente com um algoritmo de triangulação.

Foram efectuados testes em espaço fechado para analisar ao pormenor o modelo de propagação desenvolvido. Os resultados alcançados, demonstraram que o sistema de localização é viável mostrando-se eficaz, flexível e facilmente adaptável a vários cenários de localização. É também provado que a utilização da rede ZigBee é ideal neste sistema de localização.

Palavras-Chave

Localização, Propagação, Triangulação, WAF, ZigBee, RFID .

Abstract

This work intended to maximize the advantages existing in the use of RFID technology with ZigBee, with the purpose of developing an indoor location system.

The main requirements of the system are the creation of a WSN (Wireless Sensor Network), in which each device operates like RFID tags, and the development of a location algorithm. In a first stage, the work is based on the creation of the ZigBee network and in the development of the location algorithm in order to test the system. In the following, the location systems are studied, with more emphasis the indoor location systems, in order to develop a location algorithm.

The developed location algorithm uses a propagation model based on the wall attenuation factor propagation model (WAF) together with a triangulation algorithm. A variety of tests was carried off in an indoor environment in order to analyse in detail the developed propagation model. The achieved results show that the developed location system is viable showing itself to be effective, flexible and easily adaptable to various location environments. It is also proved that the use of a ZigBee network is ideal in this location system.

Keywords

Location, Propagation, Triangulation, WAF, ZigBee, RFID.

Conteúdo

Agradecimentos	2
Resumo	3
Abstract	4
1 Introdução	10
1.1 Motivação	10
1.2 Objectivos	11
1.3 Estrutura da Dissertação	12
2 Enquadramento Tecnológico	13
2.1 RFID	13
2.1.1 Componentes e características de um sistema RFID	13
2.1.2 Espectro de Frequências	15
2.1.3 Electronic Product Code (EPC)	16
2.2 A Tecnologia ZigBee	17
2.2.1 A norma IEEE 802.15.4	17
2.2.2 ZigBee	21
3 Sistemas de Localização	23
3.1 Taxonomia	23
3.1.1 Triangulação	23
3.1.2 Proximidade	25
3.1.3 Análise de Cenário	26
3.2 Sistemas de Localização em Espaços Fechados	26
3.2.1 <i>Location Fingerprint</i>	26
3.2.2 Modelos de Propagação em Espaço Fechado	28
4 Sistema Desenvolvido	31
4.1 Requisitos e Implementação do Sistema	31
4.2 Protótipo do Sistema	31
4.3 Algoritmo de Localização	32

4.3.1	Modelo de Propagação	33
4.3.2	Algoritmo de Triangulação	33
4.4	Desenvolvimento de Hardware	36
4.4.1	Módulos ZigBee	36
4.5	Desenvolvimento de Software	38
4.5.1	Modos de Operação do Módulo XBee	38
4.5.2	Criação da rede ZigBee	38
4.5.3	Código desenvolvido em linguagem C	40
5	Resultados	41
5.1	Ambiente de Testes	41
5.2	Testes Efectuados	43
5.2.1	Cálculo do parâmetro de atenuação WAF	44
5.2.2	Caracterização dos sinais RF sem WAF	44
5.2.3	Caracterização dos sinais RF com WAF	46
5.2.4	Caracterização dos sinais RF com WAF médio	48
5.2.5	Resultados da Localização	50
5.2.6	Desvios e Erros	51
5.2.7	Análise dos Resultados	54
6	Conclusão	56
6.1	Trabalho Futuro	57
	Apêndice A	59
	Apêndice B	62
	Apêndice C	66
	Referências	67

Lista de Figuras

2.1	Estrutura de classes do <i>Auto-ID Center</i> para etiquetas RFID [12]	14
2.2	Espectro de Frequências RFID [14]	15
2.3	Estrutura do EPC [3]	16
2.4	Topologias de Rede	18
2.5	Camadas da norma IEEE 802.15.4 [16]	19
2.6	Comunicação para um Coordenador numa Rede Nonbeacon-Enabled	20
2.7	Comunicação para um Coordenador numa Rede Beacon-Enabled	20
2.8	Comunicação de um Coordenador numa Rede Nonbeacon-Enabled	21
2.9	Comunicação de um Coordenador numa Rede Beacon-Enabled	21
2.10	Arquitectura do ZigBee (IEEE 802.15.4/ZigBee Stack)	22
3.1	Triangulação	24
3.2	Angulação	25
3.3	Exemplo de uma grelha de espaçamento	27
3.4	Esquema da técnica <i>Location Fingerprint</i>	27
4.1	Funcionamento do Protótipo	32
4.2	Triangulação num Sistema de Coordenadas 2D	34
4.3	Triangulação num Sistema de Coordenadas 2D	34
4.4	Esquema do algoritmo DTN	35
4.5	Procedimento do algoritmo DTN	36
4.6	Diagrama de Radiação da Antena <i>Whip</i>	37
4.7	Módulo XBee e ligações à Placa ZigBee	38
4.8	Componentes da Placa ZigBee	38
4.9	Programação de um Nó Fixo	39
4.10	Programação do Nó Móvel	39
5.1	Espaço de localização	41
5.2	Conjunto de reduzidas áreas de localização	42
5.3	Direcções da recolha de valores de RSS	43
5.4	Valores recolhidos do Nó 3	45
5.5	Valores recolhidos de todos os Nós	45

5.6	Média dos valores recolhidos do Nó 3 sem WAF VS. Modelo Teórico do Nó 3 sem WAF .	46
5.7	Média dos valores de todos os Nós sem WAF VS. Modelo Teórico de todos os Nós sem WAF	46
5.8	Valores recolhidos do Nó3 com WAF	47
5.9	Valores recolhidos de todos os Nós com WAF	47
5.10	Média dos valores médios recolhidos do Nó 3 comm WAF VS. Modelo Teórico do Nó 3 comm WAF	48
5.11	Média dos valores médios recolhidos de todos os Nós com WAF VS. Modelo Teórico de todos os Nós com WAF	48
5.12	Valores recolhidos do Nó3 com WAF Médio	49
5.13	Valores recolhidos de todos os Nós com WAF Médio	49
5.14	Média dos valores médios recolhidos do Nó 3 com WAF Médio VS. Modelo Teórico do Nó 3 com WAF Médio	50
5.15	Média dos valores médios recolhidos de todos os Nós com WAF Médio VS. Modelo Teórico de todos os Nós com WAF Médio	50
5.16	Desvio Padrão verificado no Nó 3	52
5.17	Desvio entre valores recolhidos e modelo teórico no Nó 3	52
5.18	Desvio Padrão no conjunto de todos os Nós	53
5.19	Desvio entre valores recolhidos e modelo teórico no conjunto de todos os Nós	54
6.1	Mecanismo de comunicação <i>near field</i> [42]	60
6.2	Mecanismo de comunicação <i>far field</i> [42]	61
6.3	Layout da Placa	62
6.4	Componentes vistos de cima	63
6.5	Componentes vistos de baixo	64
6.6	Esquema Eléctrico da Placa Suporte	65

Lista de Tabelas

2.1	Diferentes bandas em que opera o RFID	16
4.1	Características dos Módulos	37
5.1	Coordenadas dos Nós Fixos	42
5.2	Parâmetros WAF	44
5.3	Parâmetros WAF Médio	44
5.4	Parâmetros calculados sem WAF	45
5.5	Parâmetros calculados com WAF	47
5.6	Parâmetros calculados com WAF Médio	49
5.7	Resultados da localização no ponto A	51
5.8	Resultados da localização no ponto A	51
5.9	Erros verificados no Nó 3 (todos os resultados estão em metros)	53
5.10	Erros verificados no conjunto de valores de todos os Nós (todos os resultados estão em metros)	54

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A história mostra que o progresso e o desenvolvimento tecnológico são inevitáveis, sendo mesmo uma necessidade do mundo globalizado dos dias de hoje. O ramo das telecomunicações é actualmente essencial no funcionamento da economia mundial e de qualquer sociedade moderna, sendo os sistemas e redes de comunicação sem fios um dos grandes desenvolvimentos nesta área. A utilização destes sistemas está em crescimento e tem ainda um grande potencial de inovação. Como exemplo disso, temos a tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) que tem revelado um enorme potencial nas mais variadas áreas.

Em 2007, os estudos apresentados nas conferências sobre RFID a cargo das Presidências Europeias da UE (União Europeia) da Alemanha e de Portugal, respectivamente em Junho e Novembro, demonstram os pontos fortes desta tecnologia e as oportunidades na Europa [1]. Também em 2007, o DOD (Departamento de Defesa dos EUA) e os grandes retalhistas como o Wal-Mart deram grande visibilidade ao RFID, fazendo avultados investimentos na sua implementação [2], [3], [4], [5], [6].

Dado o seu elevado potencial, está a ser utilizado em áreas como: a saúde, a segurança nacional, a automação industrial, as redes de sensores, a gestão e monitorização de animais, a gestão de stocks, os sistemas de localização, os sistemas anti-roubo, os sistemas de bilhética nos transportes públicos, o controlo de acessos, etc [7], [6]. O desenvolvimento do RFID, para além das vantagens que vem proporcionar nas mais diversas áreas, é também um ponto de partida para a evolução tecnológica na área da localização. Companhias como a Airbus têm feito manchetes nos jornais e revistas da matéria anunciando a utilização de RFID na localização dos componentes das suas aeronaves [8].

Há um crescente interesse em técnicas de localização, o que tem motivado muita investigação nesta área, existindo neste momento várias soluções para este problema. Em localização existem dois tipos de cenários: a localização em espaço aberto (*outdoor*) e em espaço fechado (*indoor*). Um sistema de localização em espaço aberto destina-se à localização de pessoas e objectos em ambientes exteriores, enquanto que um sistema de localização em espaço fechado tem como objectivo a localização no interior de edifícios. Cada um destes sistemas apresenta características e desafios diferentes, sendo que os sistemas de localização em espaço fechado são os que se mostram mais difíceis de implementar devido à sua

complexidade e a todos os factores que é necessário ter em conta.

A aplicação de tecnologias de comunicação sem fios aos sistemas de localização é hoje em dia bastante comum. Técnicas como o GPS (*Global Positioning System*) em espaços abertos e Wi-Fi ou Bluetooth em espaços abertos ou fechados não são novidade, sendo também possível encontrar no mercado soluções que fazem uso de RFID.

Actualmente, tem-se verificado um crescente interesse na integração de sistemas RFID e WSN (*Wireless Sensor Network*). Cada vez mais se encontram novas gerações de etiquetas RFID que incluem sensores, como também mais redes WSN requerem mecanismos de identificação automática [1]. Uma fusão das tecnologias RFID e WSN pode originar o desenvolvimento das mais variadas aplicações, nomeadamente em termos de localização, destinados a ambientes residenciais, empresariais e a infra-estruturas críticas a nível mundial [1].

Em crescente evidência na área das redes WSN, encontra-se o protocolo de comunicação ZigBee. O conjunto de especificações que define o protocolo ZigBee foi desenvolvido com base na norma IEEE 802.15.4. Este protocolo possibilita o desenvolvimento de redes WSN de baixo consumo energético, disponibilizando um reduzido débito binário e permitindo a implementação de uma rede de baixo custo.

A utilização da tecnologia RFID juntamente com o protocolo ZigBee abre portas ao estudo de sistemas de localização eficazes, de baixo consumo energético e financeiramente acessíveis. O desafio destes sistemas de localização passa pela caracterização dos espaços de localização ao nível dos sinais de rádio, de modo a torná-los fiáveis, flexíveis e adaptáveis a qualquer ambiente.

1.2 Objectivos

É precisamente a fusão do RFID com as WSN que serve de ponto de partida a este trabalho. O objectivo é fazer uso das capacidades do RFID no que toca à identificação automática de pessoas e objectos, tendo por base uma rede ZigBee, com o intuito de desenvolver um sistema de localização para espaços fechados.

Desta maneira é necessário proceder a uma análise individual das duas tecnologias, proporcionando uma descrição mais detalhada de cada uma. São apresentadas as características que se revelaram mais importantes para o trabalho em questão, demonstrando os pontos fortes de cada tecnologia. É também dado ênfase ao potencial que apresentam quando utilizadas em conjunto no âmbito da localização em espaços fechados.

Para desenvolver um sistema de localização é necessário estudar métodos e algoritmos de localização existentes, neste caso, dando maior relevo aos que se focam em espaços fechados. É importante maximizar as vantagens oferecidas pela utilização de RFID e ZigBee em conjunto. Sabendo que se pretende um sistema flexível e facilmente adaptável a vários cenários de localização, é necessário dar maior atenção a métodos de localização que se centrem em modelos de propagação de ondas electromagnéticas.

Tendo bem presente os objectivos a alcançar, pretende-se montar uma rede ZigBee num espaço fechado, desenvolver software que aplique o método de localização escolhido e realizar testes que averiguem a viabilidade do projecto.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos e tem dois anexos. No primeiro capítulo é feita a introdução ao trabalho, sendo apresentado o tema, a motivação e os objectivos do trabalho. No segundo capítulo é feito um enquadramento da tecnologia utilizada e uma exposição das suas principais características. O terceiro capítulo trata de sistemas de localização na sua generalidade. Neste capítulo é apresentada uma taxonomia em sistemas de localização, sendo também aprofundado o estudo de sistemas de localização em espaços fechados. O quarto capítulo tem como objectivo apresentar o sistema que foi desenvolvido, tal como o protótipo usado para o testar. No quinto capítulo são apresentados os testes efectuados e os respectivos resultados. No último capítulo são apresentadas as conclusões e o trabalho futuro.

Capítulo 2

Enquadramento Tecnológico

Para melhor compreensão do trabalho são aqui descritas as características técnicas das duas tecnologias utilizadas. Uma descrição das capacidades e características do RFID e do ZigBee permitirão compreender as suas vantagens e também as razões pelas quais podem ser utilizados, em conjunto, no desenvolvimento de um sistema de localização para espaços fechados.

2.1 RFID

Como já referido no capítulo introdutório, o RFID pode, hoje em dia, ser encontrado nas mais diversas aplicações: nos sistemas anti-roubo de mercadorias e automóveis, no pagamento de portagens em auto-estradas, no controlo de tráfego, na monitorização de livros em bibliotecas e livrarias e na localização de equipamento em hospitais de entre outros [9], [10].

Por incrível que pareça a origem da tecnologia RFID pode ser encontrada em trabalhos e desenvolvimentos tecnológicos que remontam ao início do século XX, desde então a sua evolução não tem parado. Nos anos 50, na 2ª Guerra Mundial, várias técnicas relacionadas com o RFID foram exploradas como por exemplo, sistemas de identificação IFF ("*Friend or Foe*") de longo alcance [11]. Na década de 90, os sistemas de pagamento de portagens em auto-estradas foram alvo de um grande desenvolvimento nos EUA e Europa, mais especificamente em Portugal com a introdução da Via Verde [11].

Actualmente existem várias opções para identificação automática de pessoas e objectos, como é o caso dos códigos de barras, identificação biométrica, identificação por voz e sistemas de reconhecimento óptico de caracteres (OCR - *Optical Character Recognition*). A vantagem do RFID é permitir a identificação automática de pessoas e objectos mas a distâncias consideráveis, através de ondas de rádio.

Novos desenvolvimentos são efectuados todos os dias no que toca ao RFID, sendo que o seu potencial de crescimento é ainda enorme.

2.1.1 Componentes e características de um sistema RFID

Na sua forma mais simples, um sistema RFID é composto por um leitor RF (*Radio Frequency*) e uma etiqueta RF (*transponder*), permitindo identificar pessoas ou objectos físicos. Quando um leitor detecta,

na sua vizinhança ou área de cobertura uma etiqueta, inicia um protocolo de comunicação com a mesma, através de sinais de rádio frequência e deste modo proceder à recolha de informação contida na etiqueta.

As etiquetas RFID podem ser divididas em três grupos diferentes: as passivas, as semi-passivas e as activas. A classificação da Auto-ID Center [12], ilustrada na Figura (2.1), considera cinco classes de etiquetas definidas também de acordo com a sua funcionalidade. As classes 1 e 2 são passivas, a classe 3 semi-passiva e as classes 4 e 5 activas.

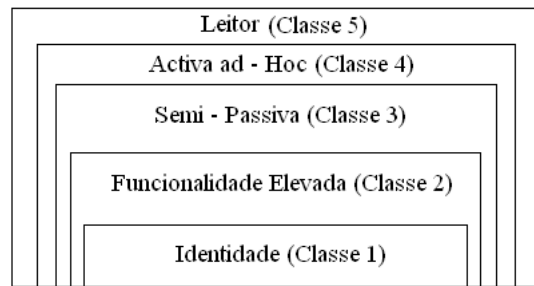


Figura 2.1: Estrutura de classes do *Auto-ID Center* para etiquetas RFID [12]

Como se representa na figura 2.1, cada classe herda as funcionalidade das classes que contém, por exemplo a classe 2 herda a funcionalidade da classe 1. A bibliografia mais antiga [13], refere a existência de etiquetas de classe 0, são equivalentes às de classe 1, mas nas de classe 1 o número de identificação pode ser programado depois da data de fabrico. As etiquetas das classes 1 e 2 são etiquetas passivas, as de classe 3 semi-passivas e as de classe 4 e 5 activas [12].

Uma etiqueta passiva é constituída por um pequeno circuito integrado e uma antena capaz de transmitir e receber sinais de rádio frequência, também existindo nas etiquetas semi-passivas e activas uma fonte de energia própria. O circuito integrado das etiquetas armazena informação, nomeadamente o número de identificação único, podendo também ter capacidade de processamento.

Etiquetas Passivas

As etiquetas passivas não possuem fonte de alimentação própria. A energia necessária ao seu funcionamento é obtida da radiação electromagnética emitida pelo leitor, por indução electromagnética [15] (ver anexo A). Deste modo, o funcionamento do sistema está limitado ao alcance do leitor RFID. Por não necessitarem continuamente de energia e por serem constituídas por um circuito simples, têm um maior ciclo de vida e o custo de produção é bastante reduzido. A forma de comunicação entre o leitor e a etiqueta está descrita no Anexo A.

Etiquetas Semi-Passivas

As etiquetas semi-passivas utilizam fontes de energia próprias para os circuitos que realizam funções lógicas, mas não na comunicação. A energia utilizada na comunicação, entre a etiqueta e o leitor, é

obtida por captura de ondas electromagnéticas, como se descreve no anexo A. Relativamente às passivas, o desempenho é melhor tornando-as mais fiáveis no que toca à comunicação. Apresentam também um maior alcance. A utilização de fontes de energia própria aumenta o custo de produção e torna-as mais susceptíveis a falhas devido à utilização de baterias.

Etiquetas Activas

As etiquetas activas têm um emissor/receptor de frequências de rádio (RF) activo alimentado, tal como o circuito lógico da etiqueta, por baterias. Em sistemas que utilizem este tipo de etiquetas o alcance de comunicação entre etiqueta e leitor pode chegar a alguns quilómetros. É também possível estabelecer comunicação com as etiquetas, estando estas em movimento. As etiquetas activas podem também estar equipadas com sensores, para poderem, por exemplo, monitorizar temperaturas ou serem utilizadas em sistemas de localização. As etiquetas activas têm uma capacidade de processamento bastante superior às passivas, sendo por esse motivo usadas em aplicações de maior complexidade.

Memória

Uma etiqueta pode ser do tipo WORM (Write Once Read Many), RW (read/write) ou misto. Nas etiquetas de tipo WORM, a informação referente ao número de identificação da etiqueta fica permanentemente guardada na sua memória, nas RW (read/write) este número pode ser alterado ou em vez disso substituído por outra informação e nas mistas, apesar do número de identificação não poder ser alterado, há memória RW para armazenamento de dados que podem ser escritos e alterados. As etiquetas passivas tipicamente têm uma memória não volátil que pode ir desde os 64 bits a 1 kbyte, enquanto que as etiquetas activas costumam ter memórias maiores que vão desde os 16 bytes aos 128 kilobytes [13].

2.1.2 Espectro de Frequências

Como já foi mencionado a tecnologia RFID tem por base a comunicação sem fios, através de ondas electromagnéticas. Nesta tecnologia são utilizadas frequências desde os 3kHz aos 3GHz, que por sua vez são agrupadas em 4 grupos com diferentes características, como se pode ver na figura (2.2):

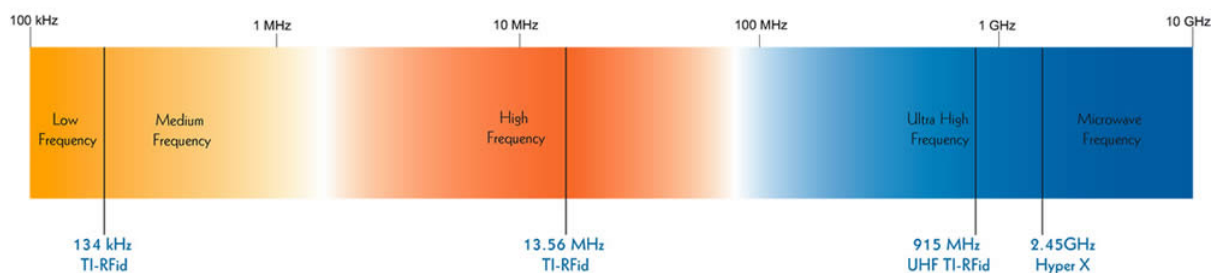


Figura 2.2: Espectro de Frequências RFID [14]

Na tabela 2.1 é possível observar as características técnicas das diferentes bandas e também as principais aplicações de cada uma.

Bandas de frequência	LF Low Frequency	HF High Frequency	UHF Ultra High Frequency	Microondas
Frequências	30 - 30 kHz	3 -30 MHz	300 MHz - 3 GHz	2 - 30 GHz
Frequências típicas RFID	125 - 134 kHz	13,56 MHz	433 MHz 865 - 956 MHz 2,45 GHz	2,45 GHz
Alcance Aproximado	< 0,5 m	Até 1,5 m	433 MHz-Até 100 m 865-956 MHz-0,5 a 5 m	Até 10 m (<i>indoor</i>)
Débito Binário	< 1 Kbps	aprox. 25 Kbps	433-956 MHz-30 Kbps 2,45 GHz-100 Kbps	Até 100 Kbps
Características	Curto alcance, baixo débito binário, penetra na água e metal	Maiores alcances, débito binário razoável semelhante a GSM	Longo alcance, elevado débito binário, leitura de até 100 itens simultaneos	Longo alcance elevado débito, não penetra água e metal
Uso típico	Identificação animal, imobilizador	Etiquetas inteligentes, acessos e segurança	Monitorização e localização em animais e logística	Portagens em auto-estradas

Tabela 2.1: Diferentes bandas em que opera o RFID

2.1.3 Electronic Product Code (EPC)

Um dos desenvolvimentos que contribuíram para o sucesso da tecnologia RFID foi a criação do EPC (*Electronic Product Code*). O EPC é o número de identificação único da etiqueta RFID que é guardado na sua memória. É semelhante ao UPC (*Universal Product Code*), mas para além de identificar o produtor e o tipo de produto, permite identificar o próprio produto. Por exemplo, se num supermercado uma embalagem de um sumo tiver uma etiqueta RFID e um código de barras, o código de barras só consegue identificar a marca e o tipo de sumo (laranja, maçã, etc.), enquanto que a etiqueta RFID identifica também aquela embalagem de sumo. O sistema de codificação criado pelo Auto-ID Centre consiste numa palavra de código de 96 bits com a estrutura indicada na figura 2.3.

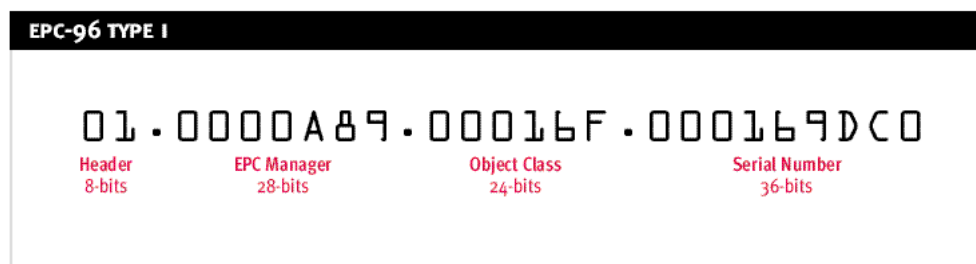


Figura 2.3: Estrutura do EPC [3]

O cabeçalho (*Header*) do código tem 8 bits e indica o comprimento do EPC. O EPC pode ter desde 64 a 256 bits. No exemplo da figura, ' 01 ' indica que é um EPC do tipo 1. O EPC de tipo 1 tem 96 bits. O segundo campo (*EPC Manager*) contém um número que identifica o fabricante do objecto no qual está fixada a etiqueta RFID. Num código de 96 bits, utilizam-se para este campo 28 bits que permitem gerar identificadores únicos para 268 milhões de fabricantes (2^{28}). No campo da classe do objecto (*Object Class*) é identificado o tipo do produto etiquetado. Num código com 96 bits, cada fabricante pode ter 16 milhões de classes de produtos. O número de série (*Serial Number*), com 36 bits, permite gerar 68 biliões de (2^{36}) números de identificação únicos.

2.2 A Tecnologia ZigBee

Cada vez mais em sistemas de comunicação sem fios existe a necessidade de se recorrer a redes. Em tecnologias como o ZigBee utilizam-se redes sem fios como as WPANs (*Wireless Personal Area Networks*). As WPANs são destinadas ao espaço à volta de uma pessoa ou objecto, com um alcance de cerca de 10 metros em todas as direcções. Os principais objectivos destas redes sem fios centram-se no baixo custo, baixo consumo de energia, curto alcance e tamanho reduzido.

O grupo de trabalho IEEE 802.15 é responsável pela definição das normas a utilizar em WPANs. Este grupo definiu três classes de WPANs que se diferenciam de acordo com débito binário, consumo de bateria e qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*). As redes de elevado débito binário, IEEE 802.15.3, destinam-se a aplicações multimédia que necessitem de QoS elevada. As redes com um débito binário médio, IEEE 802.15.1/Bluetooth, são muito utilizadas para comunicações entre dispositivos móveis a curta distância tais como: telemóveis e PDAs (*Personal Digital Assistance*). As redes de baixo débito binário, IEEE 802.15.4/LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*), permitem o desenvolvimento de um conjunto de aplicações industriais, residenciais e médicas de entre outras, que tenham um consumo de energia bastante reduzido.

O protocolo ZigBee surge como complemento à norma IEEE 802.15.4, uniformizando e garantindo fiabilidade e segurança bem como um baixo consumo energético. Foi desenvolvido em 2002 e define as camadas de rede e aplicação e o serviço de segurança entre elas. A definição das camadas física e de acesso é da responsabilidade da norma IEEE 802.15.4. [16]. Dispositivos que utilizem a tecnologia ZigBee deverão ter um alcance máximo de 150 metros, dependendo este valor do ambiente e do consumo de energia necessário a cada aplicação. Operam em frequências não licenciadas da banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) (2.4 GHz global, 915 MHz Americas e 868 MHz Europa). Os débitos binários para as diferentes frequências são: 250 Kbps a 2.4 GHz, 40 Kbps a 915 MHz e 20 Kbps a 868 MHz.

2.2.1 A norma IEEE 802.15.4

Esta norma define dois tipos de dispositivos: FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduced Function Device*). Um dispositivo FFD funciona em qualquer topologia de rede, desempenhando a função de coordenador da rede e consequentemente tem acesso a todos os outros dispositivos. Um dispositivo RFD é limitado a uma configuração com topologia em estrela, não podendo funcionar como coordenador da

rede. Um RFD pode comunicar apenas com dispositivos FFD e está associado a apenas um FFD de cada vez. Destina-se a ser utilizado em aplicações que requerem um baixo consumo energético.

Topologias de Rede

A norma IEEE 802.15.4 define três tipos de topologias de rede: a topologia em estrela, topologia ponto-a-ponto e a topologia em árvore [16], [17]. A figura 2.4 ilustra os três tipos de topologia.

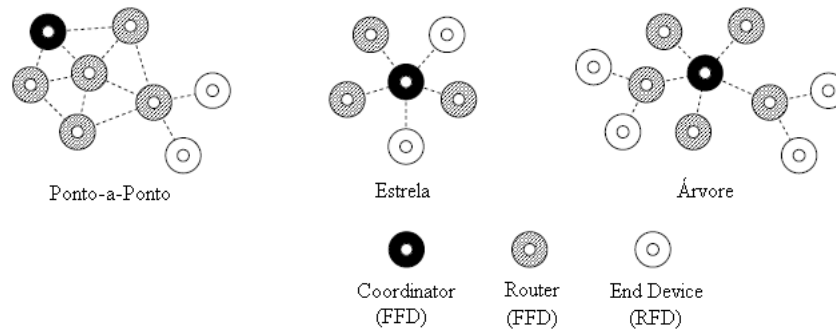


Figura 2.4: Topologias de Rede

As topologias em estrela requerem pelo menos um dispositivo FFD a funcionar como coordenador da rede (PAN), podendo os restantes ser RFDs. A comunicação é estabelecida entre dispositivos e um coordenador da rede. O coordenador da PAN é tipicamente alimentado pela rede eléctrica enquanto que os restantes dispositivos (FFD ou RFD) são alimentados por baterias.

Numa topologia ponto-a-ponto também existe um coordenador da PAN, sendo que nesta topologia todos os dispositivos podem comunicar entre si, desde que estejam na área de alcance um do outro. Esta configuração pode ser encontrada em redes de sensores para aplicações em controlo e monitorização industrial.

Uma rede que utilize uma topologia em árvore não é mais do que um caso particular da topologia ponto-a-ponto, onde a maioria dos dispositivos são FFDs. Qualquer um dos FFDs pode funcionar como coordenador e fornecer serviços de monitorização aos outros dispositivos.

Qualquer que seja a topologia, todos os dispositivos têm um endereço único de 64 bits. A comunicação é feita através deste endereço, ou a partir de um endereço de 16 bits, que é gerado pelo coordenador da PAN, quando um dispositivo a ele se associa. Cada PAN selecciona um único identificador, que permite a comunicação entre dispositivos numa rede usando endereços de 16 bits e entre dispositivos de redes independentes [16].

Camadas

A norma IEEE 802.15.4 define duas camadas (de mais baixo nível): a camada física (PHY) e a camada de controlo de acesso ao meio MAC (*Media Access Control*). A figura 2.5 ilustra a estrutura de camadas.

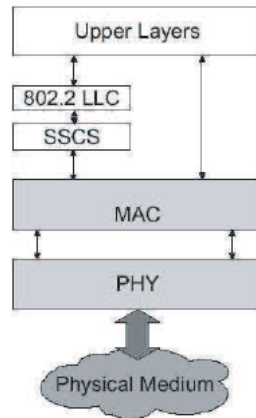


Figura 2.5: Camadas da norma IEEE 802.15.4 [16]

A camada física (PHY) tem o objectivo de acomodar as necessidades de interfaces de baixo custo, permitindo níveis elevados de integração. A utilização da técnica de transmissão de sequência directa de espalhamento espectral (DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*) permite que os dispositivos sejam bastante simples, possibilitando implementações de custo reduzido.

Esta camada disponibiliza dois serviços: o serviço de dados PHY e o serviço de interface de controlo PHY para a entidade de controlo da camada física (PLME - *Physical Layer Management Entity*). O serviço de dados PHY permite a transmissão e recepção de unidades de informação de protocolo PHY (PPDU - *PHY Protocol Data Units*) ao longo do canal rádio físico. As funções da camada PHY passam pela activação e desactivação do transmissor/receptor de sinais de rádio, detecção de energia (ED - *Energy Detection*), indicação da qualidade da ligação (LQI - *Link Quality Indication*), selecção de canal, realização de (CCA - *clear channel assesment*) e receber e transmitir pacotes ao longo do meio físico. A norma IEEE 802.15.4 oferece duas opções para PHY baseadas na, banda de frequência e técnica de transmissão de sequência directa de espalhamento espectral (DSSS).

A camada MAC permite múltiplas topologias de baixa complexidade, onde a gestão de energia, por exemplo, não requer modos de operação complexos. As funções da camada MAC passam pela gestão de *beacons*, acesso de canais, gestão de GTS, validação de trama, reconhecimento de entrega de trama, associação e dissociação de dispositivos. A norma IEEE 802.15.4 define quatro diferentes tipos de trama MAC: o *beacon*, informação, reconhecimento e a trama de comando MAC. Esta camada disponibiliza dois serviços: o serviço de informação MAC e o serviço de gestão MAC. O serviço de informação MAC possibilita a transmissão e recepção de unidades de informação do protocolo MAC (MPDU - *MAC Protocol Data Units*) através do serviço de informação da PHY. O serviço de gestão MAC, se o dispositivo for coordenador da PAN, faz a gestão dos *beacons* da rede.

Esta camada desempenha um papel importante ao nível da segurança da norma IEEE 802.15.4. Utiliza o padrão AES (*Advanced Encryption Standard*) como algoritmo de criptografia, descrevendo uma variedade de rotinas de segurança. Estas rotinas têm como objectivo proteger a confidencialidade, a integridade e a autenticidade das tramas da camada. A camada MAC faz o processamento de segurança, mas são as camadas superiores que controlam o processo, ajustando as chaves de criptografia e deter-

minando os níveis de segurança que deverão ser usados. Quando a camada MAC transmite (ou recebe) uma trama, verifica o destino (ou a fonte) da trama, recupera a chave associada a esse destino (ou fonte), e usa essa chave para processar a trama de acordo com a rotina de segurança designada para a chave usada. Cada chave é associada a uma única rotina de segurança e o cabeçalho da trama MAC possui um bit que especifica se a segurança para a trama foi efectuada ou não.

A camada MAC é também responsável pela transferência de informação entre os dispositivo e o coordenador da PAN, para tal é utilizado o Modelo de Transferência de Informação (*Data Transfer Model*). Existem três tipos de transacções de transferência de informação: do coordenador para o dispositivo, do dispositivo para o coordenador e entre dois dispositivos. O mecanismo para cada uma destas transferências depende se a rede suporta ou não a transmissão de *beacons*.

Quando um dispositivo deseja transferir informação numa rede *nonbeacon-enabled*, simplesmente transmite a sua trama de informação, usando o algoritmo *unslotted* CSMA-CA, para o coordenador (figura 2.6) [16], [18].

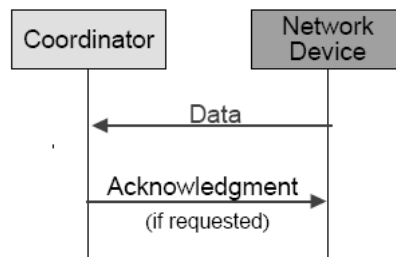


Figura 2.6: Comunicação para um Coordenador numa Rede Nonbeacon-Enabled

Quando um dispositivo deseja transferir informação para um coordenador numa rede *beacon-enabled*, procura primeiro pelo *beacon* da rede. Quando o *beacon* é encontrado sincroniza-se com a estrutura da super trama. A uma dada altura, transmite a sua trama de informação para o coordenador, utilizando o algoritmo *slotted* CSMA-CA (figura 2.7) [16], [18].

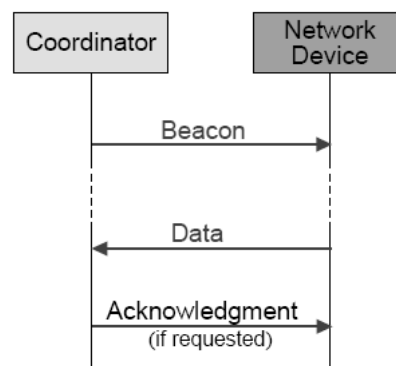


Figura 2.7: Comunicação para um Coordenador numa Rede Beacon-Enabled

As aplicações de transferência são totalmente controladas pelos dispositivos da PAN em detrimento

dos coordenadores. Deste modo é possível diminuir o consumo de energia, que é um dos objectivos da tecnologia ZigBee. As figuras 2.8 e 2.9 ilustram os procedimentos atrás descritos quando a transferência de informação se processa do coordenador da PAN para os dispositivos.

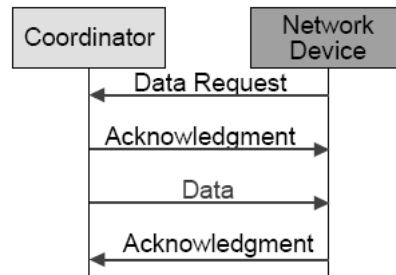


Figura 2.8: Comunicação de um Coordenador numa Rede Nonbeacon-Enabled

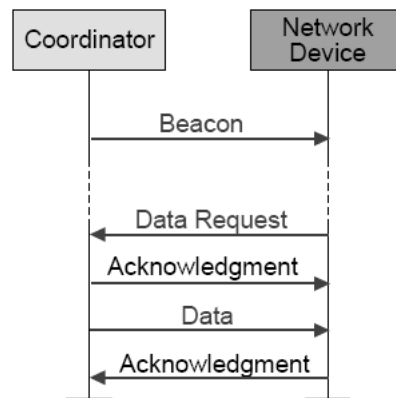


Figura 2.9: Comunicação de um Coordenador numa Rede Beacon-Enabled

2.2.2 ZigBee

A tecnologia ZigBee, tornou-se disponível publicamente em Junho de 2005. Esta tecnologia tem como suporte as camadas PHY e MAC da norma IEEE 802.15.4, definindo as camadas de rede e de aplicação.

A arquitectura do ZigBee é constituída por blocos ou camadas. Cada camada tem entidades que executam serviços específicos para servir a camada de nível superior. Esta arquitectura, ilustrada na figura 2.10, é baseada no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) de sete camadas, mas define apenas as camadas mais relevantes para obter a funcionalidade desejada.

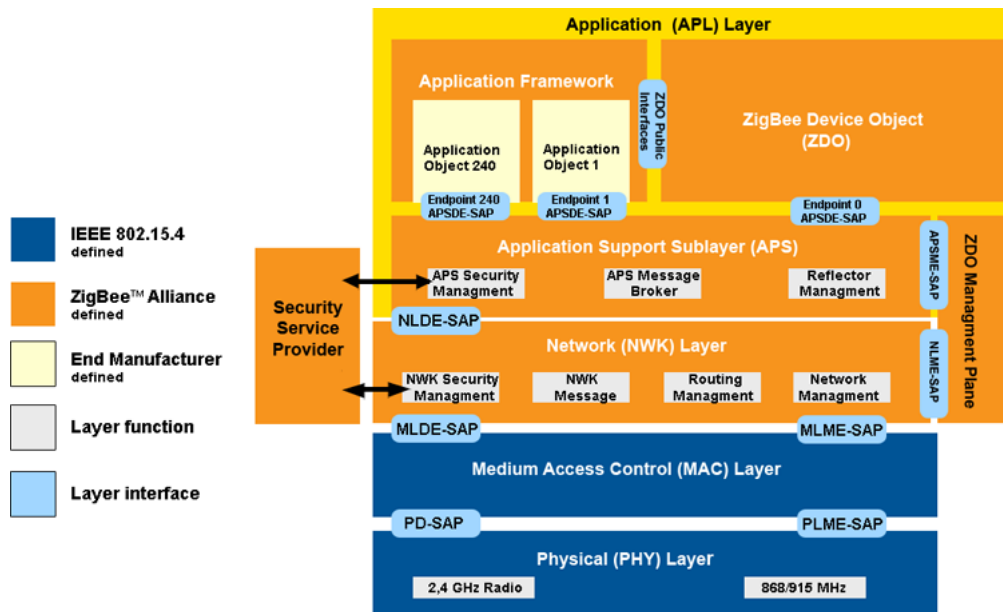


Figura 2.10: Arquitetura do ZigBee (IEEE 802.15.4/ZigBee Stack)

A camada de rede (NWK) possui mecanismos com funcionalidades de gestão e segurança, *routing* e associação e dissociação de dispositivos numa rede. Adicionalmente, a camada de rede é responsável pela determinação e manutenção de rotas entre os dispositivos da rede. O coordenador da camada de rede é responsável pela inicialização de novas redes sempre que necessário e pela atribuição de endereços para os novos dispositivos associados.

A camada de aplicação é composta pela APS (*Application Support Sub-Layer*), pelo enquadramento de aplicações (AF - *Application Framework*), pelo ZDO (*ZigBee Device Object*) e pelos objectos de aplicação. A sub-camada APS mantém as tabelas para *binding*.

Os ZDOs representam uma classe baixa de funcionalidades que fornecem uma interface entre os objectos de aplicação e o APS. O ZDO é responsável pela inicialização da subcamada de aplicação (APS), da camada de rede (NWK) e especificação dos serviços de segurança (SSS). O ZDO possui interfaces publicas para os objetos da camada de aplicação no enquadramento, para controle do dispositivo e funcionalidades de rede. Também interage com as camadas baixas do Zigbee Stack, no *Endpoint 0*, através do APSDE-SAP para dados e através do APSME-SAP para controle de mensagens. A interface pública fornece a gestão de endereços do dispositivo, *binding* e funções de segurança na aplicação dentro da camada de enquadramento do protocolo ZigBee [16].

Dispositivos ZigBee

O ZigBee distingue o conceito de dispositivos físicos (FFD, RFD), utilizando a noção de dispositivos lógicos. O *ZigBee Coordinator* é o primeiro tipo de dispositivo lógico, assumindo um papel muito semelhante ao coordenador na norma IEEE 802.15.4 e é responsável por: inicializar, manter e gerir a rede. Na hierarquia ZigBee, abaixo deste vem o *ZigBee Router*, responsável pelo *message routing* entre os nós. Finalmente, vem o *ZigBee End Device* que é o ponto final da estrutura da rede [17].

Capítulo 3

Sistemas de Localização

O sucesso da utilização do sistema GPS na localização e monitorização de objectos em espaços exteriores, encorajou a aplicação do mesmo tipo de técnicas em espaços fechados. No entanto, estas técnicas não constituem uma opção válida na localização em espaços fechados, pelo facto de os sinais GPS serem muito difíceis de receber em tais ambientes [19]. Dadas estas dificuldades tem-se notado um crescente interesse em técnicas de localização, motivando muita investigação nesta área o que tem gerado várias soluções para este problema.

3.1 Taxonomia

As diferentes técnicas e métodos de localização existentes motivaram a introdução de uma taxonomia neste trabalho. A taxonomia adoptada é a apresentada por Hightower e Boriello [20] que é referida em muitas publicações nesta área. A introdução da taxonomia permite ainda fazer um levantamento do estado da arte dos sistemas de localização. A taxonomia apresentada por Hightower e Boriello distingue os sistemas de localização em três grupos distintos consoante as técnicas utilizadas por cada grupo: triangulação, proximidade e análise de cenário.

3.1.1 Triangulação

A triangulação é uma técnica de localização que se baseia em propriedades geométricas e fórmulas matemáticas para a definição de pontos no espaço. Existem duas técnicas distintas de triangulação: lateração (*lateration*) e angulação (*angulation*).

Lateração(*Lateration*)

Através da técnica de lateração, a posição de um ponto é obtida utilizando as distâncias entre esse mesmo ponto e outros pontos de referência, cuja posição é previamente conhecida. Para calcular a posição de um ponto num sistema de coordenadas bidimensional é necessário conhecer as distâncias entre pelo menos 3 pontos não colineares, como ilustra a figura 3.1. Num sistema de coordenadas tridimensional são necessários pelo menos 4 distâncias entre pontos não co-planares.

O conhecimento prévio das características do ambiente, em que se pretende implementar o sistema de localização, pode reduzir a quantidade de distâncias necessárias, especialmente em espaços fechados. Existem três métodos para obter as distâncias entre os pontos: medição directa, tempo de chegada (*time of arrival*) e atenuação.

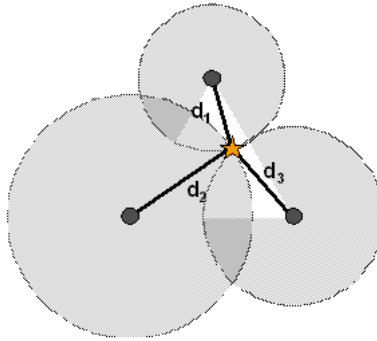


Figura 3.1: Triangulação

No método de medição directa, tal como o nome indica, utilizam-se medidas físicas de distâncias. Podem utilizar-se sondas, um braço robótico que se estica até tocar no objecto ou até mesmo uma fita métrica. O método de medição directa parece simples, no entanto, não é fácil implementá-lo em sistemas automatizados e não pode ser usado para grandes distâncias.

O método do tempo de chegada deriva do método de medição directa. Consiste no cálculo da distância entre dois pontos através da medição do tempo que um sinal demora a chegar de um ponto ao outro, sabendo a velocidade de propagação. Se esta medição levar em conta a velocidade relativa dos dois pontos, é possível fazer medições para objectos que se encontrem em movimento (*tracking*). Nesta abordagem são usados sinais de ultra-som ou de rádio-frequência [21]. A utilização deste método em espaço fechado introduz problemas adicionais devido ao efeito multipercurso. Existem sinais reflectidos que chegam ao receptor por via indirecta, dificultando a detecção do raio directo. Este problema pode ser contornado através de modelos estatísticos, desde que se conheçam as propriedades de reflexão e refração no ambiente.

O método do tempo de chegada possui também limitações relacionadas com a sincronização dos relógios [22]. Muitas vezes o tempo de chegada é muito inferior ao tempo de processamento, sendo necessário que o emissor e o receptor estejam sincronizados com uma margem de erro significativamente inferior aos valores a serem medidos.

O método de atenuação baseia-se no fenómeno físico da diminuição da intensidade de um sinal com o aumento da distância de origem do sinal. É possível estimar a distância entre dois pontos, aplicando uma função que relacione a intensidade do sinal com a distância para os valores da intensidade do sinal na origem e no destino. Por exemplo, os sinais de rádio sofrem uma atenuação proporcional a $\frac{1}{r^2}$ a uma

distância r da origem. Apesar da atenuação de sinais estar num primeiro plano relacionada com a distância, outros factores influenciam a intensidade medida num ponto: reflexões, refacções e interferências construtivas ou destrutivas podem contribuir significativamente para o valor final da intensidade do sinal.

Angulação (*Angulation*)

O princípio matemático usado na angulação é muito semelhante ao da lateração. Em vez de distâncias, são usados ângulos entre pontos de referência e os segmentos de recta gerados pela união de cada ponto de referência ao ponto a ser localizado. Para um sistema de coordenadas bidimensional são necessários dois ângulos e a distância entre os pontos onde os ângulos foram medidos, como se ilustra na figura 3.2. Num sistema de coordenadas tridimensional são necessários: a distância entre os pontos de medição, um valor de azimuth e dois ângulos. O valor do ângulo de recepção de um sinal pode ser calculado, usando um agregado de antenas (*phased antenna arrays*). Este cálculo é geralmente feito, comparando a diferença do tempo na recepção (TDOA - *time difference of arrival*), entre sinais recebidos por várias antenas cuja disposição é conhecida [23].

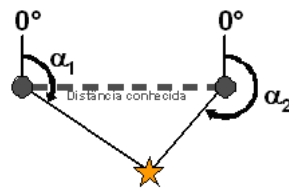


Figura 3.2: Angulação

3.1.2 Proximidade

Na técnica de proximidade obtém-se a localização (provável) do objecto ou pessoa, determinando o quão perto este se encontra de posições pré-definidas ou conhecidas. Existem três técnicas de proximidade: detecção por contacto físico, detecção com pontos de acesso sem fios e observação de sistemas de identificação automáticos.

A detecção por contacto físico é o método mais básico que utiliza por exemplo: sensores de pressão, sensores de toque e sensores capacitivos de presença, sendo que estes últimos são usados em aplicações que visam o contacto directo com a pele de uma pessoa [24].

A detecção com pontos de acesso sem fios é conseguida quando o objecto ou pessoa se encontra na zona de alcance de diferentes pontos de acesso. Um bom exemplo de utilização deste método é descrito em [21].

A observação de sistemas automáticos de identificação baseia-se em informações como: históricos de acesso em computadores, transacções bancárias ou compras com cartões de crédito e etiquetas RFID. A partir dessa informação é possível inferir uma possível localização [25].

3.1.3 Análise de Cenário

O método de análise de cenário baseia-se na observação do ambiente no qual se pretende conhecer a posição relativa de um objecto. Existem dois tipos de análise de cenário: análise estática e análise diferencial.

Em análise estática, a determinação da localização de um objecto ou pessoa é feita com o auxílio de uma base de dados que contém a informação que caracteriza o ambiente (cenário). É com base nesta informação que é possível determinar a localização do objecto ou pessoa.

Na análise diferencial pode determinar-se o deslocamento do objecto ou pessoa (*tracking*). Observando a informação recolhida sobre o mesmo, em diferentes instantes e diferentes localizações através dos quais se desloca, é possível inferir a sua posição.

Os sistemas de localização que utilizam análise de cenário têm a vantagem de não necessitarem de efectuar cálculos. Baseiam-se apenas nos dados permanentemente recolhidos que caracterizam o cenário. Têm como desvantagem estarem ligados a um único ambiente que é caracterizado pela recolha de dados numa fase anterior à localização. Qualquer alteração no ambiente obriga a uma actualização da informação que o caracteriza. Os dados que caracterizam o ambiente podem ser imagens captadas por câmaras ou características electromagnéticas de um sinal rádio [26]. Os sistemas [19] e [27] são exemplos que utilizam análise de cenário, quer análise estática como diferencial.

3.2 Sistemas de Localização em Espaços Fechados

Este trabalho centra-se no desenvolvimento de um sistema de localização em espaços fechados. Por esta razão, vão ser descritos alguns sistemas existentes que se consideram mais relevantes para o trabalho realizado, demonstrando o estado da arte em sistemas de localização em espaços fechados.

3.2.1 *Location Fingerprint*

Existem vários sistemas que utilizam análise de cenário, referidos como *Location Fingerprint*. Estes sistemas caracterizam vários pontos de referência do ambiente (cenário) através dos valores de intensidade de sinal rádio (RSSI - *Received Signal Strength Indication*) nesses pontos, de vários emissores (pontos de acesso) colocados em posições pré-definidas. Para tal são definidas amostras e etiquetas. As amostras são vectores com as amostras das intensidades do sinal e as etiquetas as localizações. Dado que o valor de RSSI flutua ao longo do tempo, este pode ser caracterizado por uma variável aleatória e tratado por processos estatísticos [26], [28]. As amostras e respectivas etiquetas são guardadas numa base de dados.

Nestes sistemas é necessário definir uma grelha que especifica os pontos de referência onde será realizada a recolha dos valores de RSSI. O grau de cobertura do ambiente é definido pelo espaçamento da grelha, que corresponde à mais curta distância entre os pontos para os quais são medidos os valores de RSSI. A figura 3.3 ilustra uma grelha de espaçamento onde as circunferências assinalam os pontos de referência a partir dos quais serão recolhidos os valores de RSSI.

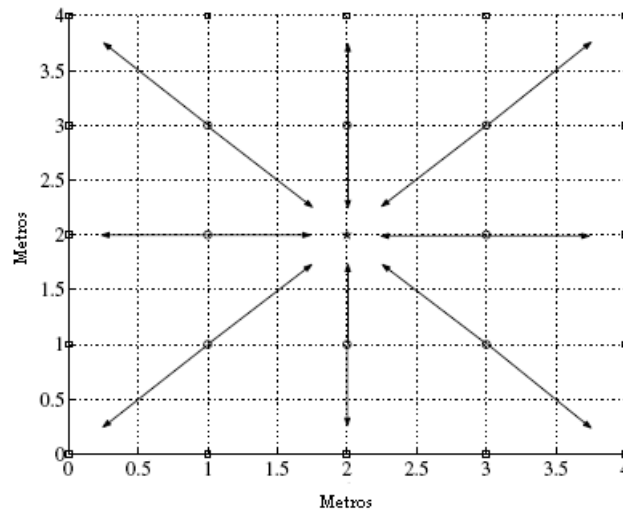


Figura 3.3: Exemplo de uma grelha de espaçamento

Numa fase inicial (*off-line*) recolhem-se os valores de RSSI, referentes aos vários emissores (pontos de acesso), nos vários pontos pré-definidos pela grelha. Esta amostra e a respectiva etiqueta armazenadas na base de dados definem o denominado mapa de rádio [26], [29]. A fase seguinte (*on-line*) é a fase de localização e consiste em recolher valores de RSSI dos vários pontos de acesso relativos às posições onde se encontra, o objecto alvo da localização e enviá-los para uma estação de base. A estação de base utiliza de seguida um algoritmo de localização para estimar uma possível localização do objecto ou pessoa. A figura 3.4 ilustra o procedimento geral.

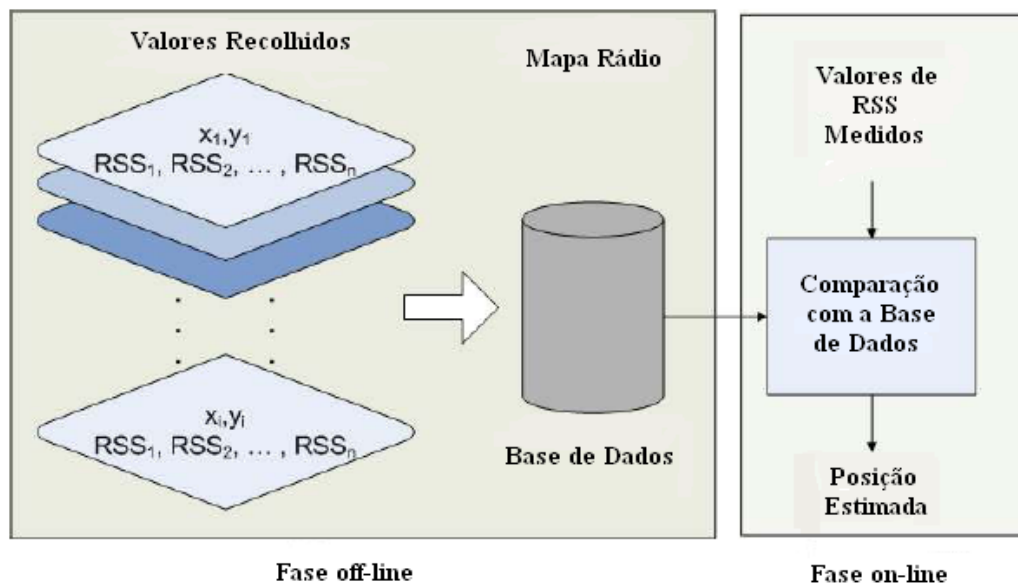


Figura 3.4: Esquema da técnica *Location Fingerprint*

Algoritmos de Localização

Os algoritmos de localização utilizados neste tipo de sistemas (*Location Fingerprint*) procuram a solução mais próxima (onde haja maior similaridade), entre as amostras recolhidas na fase de localização e a informação contida no mapa de rádio. Podem ser classificados como determinísticos ou probabilísticos. Os determinísticos utilizam a técnica do vizinho mais próximo (*nearest neighbour*) ou redes neuronais [30]. Os determinísticos são baseados na teoria de aprendizagem estatística (*statistical learning theory*) e na inferência Bayesiana (*Bayesian inference*) [31], [32].

3.2.2 Modelos de Propagação em Espaço Fechado

A propagação de ondas electromagnéticas em espaço fechado, nomeadamente no interior de edifícios, é caracterizada por reflexões, difracções e dispersão das ondas nas suas estruturas internas. O sinal transmitido chega ao receptor por vários caminhos, originando flutuações no sinal recebido. Este efeito, designado por efeito de multipercurso, que é fortemente influenciado pelos materiais usados na construção do edifício e pelos objectos existentes no seu interior, torna bastante difícil a caracterização das ondas electromagnéticas e consequentemente a determinação da potência do sinal recebido. Para resolver este problema, utilizam-se modelos de propagação teóricos baseados numa equação que relacione a potência do sinal recebido com a distância entre emissor e receptor. A equação caracteriza o ambiente de propagação do sinal, através da introdução de parâmetros que tentam prever o comportamento do sinal durante a sua propagação, tendo em conta o efeito de multipercurso e a atenuação do mesmo com a distância. De seguida é feita uma exposição de alguns dos principais modelos de propagação.

O Modelo de Desvanecimento de Rayleigh

O modelo de desvanecimento de Rayleigh (*Rayleigh fading model*) descreve a flutuação rápida da amplitude do sinal, na ausência de uma componente forte do sinal na recepção (desvanecimento rápido), utilizando a distribuição de Rayleigh. Este modelo considera que todas as componentes dos sinais recebidos no receptor têm igual potência, quer sejam componentes relativas ao raio directo (LoS -Line-of-Sight) ou aos raios reflectidos. Este pressuposto raramente se verifica, visto que, na maioria das situações, a componente relativa ao raio directo é sempre dominante relativamente às componentes dos raios reflectidos [33].

O Modelo de Distribuição de Rician

A distribuição de Rician utiliza-se em situações onde existe uma forte componente do sinal, como é o caso da componente relativa ao raio directo (LoS), juntamente com várias componentes de baixa potência, relativas aos raios reflectidos. Este modelo tem problemas na aplicação prática, sendo extremamente difícil determinar os parâmetros do modelo. Uma das principais dificuldades prende-se com o facto de ser necessário isolar fisicamente a componente forte do sinal relativa ao raio directo das restantes [34].

O Modelo de Factor de Atenuação de Parede (WAF - *Wall Attenuation Factor*)

O modelo de factor de atenuação de parede (WAF) é bastante atractivo, devido à capacidade que possui para descrever o fenómeno de desvanecimento lento e a atenuação que os ambientes fechados introduzem na propagação do sinal. Utiliza um factor de atenuação que permite prever o comportamento do sinal quando este se propaga num ambiente onde as paredes constituem o principal obstáculo (espaço fechado) e deriva de um outro modelo (FAF - *Floor Attenuation Factor*) [35] em que o factor de atenuação permite estimar a potência em andares diferentes do andar em que se efectua a emissão. No modelo WAF a potência é estimada com base na equação (3.1).

$$P(d)_{[dBm]} = P(d_0)_{[dBm]} - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - \begin{cases} nW * WAF & , nW < C \\ C * WAF & , nW \geq C \end{cases} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), n indica a taxa a que a atenuação do sinal aumenta com o aumento da distância de propagação, $P(d_0)$ é a potência do sinal recebido a uma distância de referencia d_0 e d a distância que separa o emissor do receptor. O parâmetro C contabiliza o número de paredes a partir do qual o factor de atenuação de parede (WAF) deixa de ter influência, nW é o número de obstruções (paredes) entre emissor e receptor e o valor de WAF refere-se à atenuação que uma parede introduz no sinal. De uma maneira geral os valores de n e WAF são parâmetros característicos de cada espaço fechado. O valor de WAF é dependente das características de cada parede, sendo função da espessura, do material que a constitui e das suas características electromagnéticas.

O Modelo Motley-Keenan Ajustado

O modelo Motley-Keenan ajustado [36] foi desenvolvido, tendo como ponto de partida o modelo Motley-Keenan proposto em [37]. Este último modelo é semelhante ao modelo de factor de atenuação de parede (WAF). A diferença reside na não existência de uma limitação máxima do número de paredes a partir do qual o factor de atenuação WAF deixa de ter influência e por considerar diferentes tipos de paredes.

Na equação (3.2), relativa ao modelo Motley-Keenan, PL_d é o valor da atenuação que o sinal sofre quando é transmitido através de um emissor que se encontra a uma distância de um metro do receptor. O parâmetro n descreve a taxa a que a atenuação do sinal aumenta com o aumento da distância. N é o número de paredes existentes entre o emissor e o receptor. O factor k_i refere-se ao número de paredes de tipo i , tendo cada tipo de parede i um factor de atenuação de Lw_i .

$$PL(d)_{[dB]} = PL_{d[dB]} + 10n \log(d) + \sum_{i=1}^N k_i Lw_i \quad (3.2)$$

O modelo Motley-Keenan ajustado avalia o efeito da espessura das paredes no factor de atenuação introduzindo um termo que contabiliza a espessura destas. Na equação (3.3), L_{0i} refere-se à atenuação de uma parede de referência com uma espessura e_0 , sendo k_i o número de paredes do tipo i com uma espessura e_i . O termo ajustado substitui, na equação (3.2), o termo $\sum_{i=1}^N k_i L w_i$ de modo a contabilizar a espessura das paredes e originado a equação (3.4).

$$TermoAjustado = \sum_{i=1}^N k_i L_{0i} 2^{\log_3(\frac{e_i}{e_{0i}})} \quad (3.3)$$

$$PL(d)_{[dB]} = PL_{d[dB]} + 10n \log(d) + \sum_{i=1}^N k_i L_{0i} 2^{\log_3(\frac{e_i}{e_{0i}})} \quad (3.4)$$

Capítulo 4

Sistema Desenvolvido

O sistema desenvolvido criou uma WSN com tecnologia ZigBee para implementar um sistema de localização em espaços fechados, como escritórios ou ambientes residenciais. Este sistema tem também a particularidade de ser desenvolvido de modo a possuir um sistema de identificação automática, recorrendo a RFID.

Na rede WSN um dos dispositivos é móvel, sendo o alvo da localização. Os restantes estão colocados em posições pré-definidas. Os vários dispositivos funcionam também como etiquetas RFID, possuindo cada um deles um número de identificação único EPC.

O objectivo final será colocar o dispositivo móvel numa pessoa ou objecto de modo a que através da WSN e da tecnologia RFID seja possível determinar a sua provável localização e proceder à identificação do mesmo.

4.1 Requisitos e Implementação do Sistema

Para desenvolver um protótipo deste sistema foi necessário recorrer a dispositivos de comunicação ZigBee, que possuíssem funcionalidades de etiquetas RFID para a identificação automática dos nós fixos e do nó móvel. O sistema necessitou de dispositivos de suporte (Placas ZigBee) para o funcionamento dos módulos de comunicação. Para efectuar a localização do nó móvel foi necessário a utilização de um algoritmo adequado à localização em espaços fechados.

A implementação do sistema de localização implicou a compra dos módulos de comunicação ZigBee e foram feitas PCBs (*Printed Circuit Boards*) com base num projecto já existente, de modo a servirem de dispositivo de suporte aos módulos. Na implementação do sistema foi também necessário desenvolver software para a criação e inicialização da WSN, para a comunicação com os dispositivos ZigBee e também na utilização do algoritmo de localização.

4.2 Protótipo do Sistema

O protótipo do sistema desenvolvido é composto por cinco dispositivos, sendo que os quatro que se encontram em posições fixas são RFDs, programados como *ZigBee End Devices*. Cada um destes

dispositivos é montado numa placa ZigBee de suporte de modo a assegurar a sua alimentação. O quinto é um dispositivo móvel (nó móvel), composto por um módulo ZigBee montado também numa placa ZigBee de suporte e ligado a um PC portátil através de uma interface RS - 232. O dispositivo móvel é FFD e programado como *ZigBee Coordinator*. Os quatro dispositivos RFD funcionam como nós fixos numa WSN sendo também designados de EB (Estação de Base), o dispositivo móvel que funciona como nó móvel pode também ser designado de EM (Estação Móvel).

Cada um dos quatro dispositivos fixos RFD funciona independentemente dos outros, sendo cada um alimentado por uma bateria. Estes dispositivos encontram-se em modo de *sleep*, passando a estar activos sempre que detectem o dispositivo móvel FFD. Quando o dispositivo móvel entra em funcionamento emite um sinal de rádio de modo a que os dispositivos fixos RFD o possam detectar.

Os quatro dispositivos fixos são colocados em posições que assegurem uma boa cobertura da área de localização e de modo a que haja sempre comunicação, por parte de pelo menos três dispositivos fixos com o dispositivo móvel. A necessidade do dispositivo móvel estabelecer comunicação sempre com pelo menos três dispositivos fixos é explicada na secção seguinte.

O dispositivo móvel fornece ao PC portátil os dados relativos aos valores de RSS detectados através da comunicação com os dispositivos fixos (este protocolo de comunicação é explicado com mais pormenor na secção 4.4.1), de modo a que este os possa processar através do algoritmo de localização e devolver uma possível localização para o dispositivo móvel. A figura 4.1 ilustra a distribuição dos dispositivos e o princípio de funcionamento.

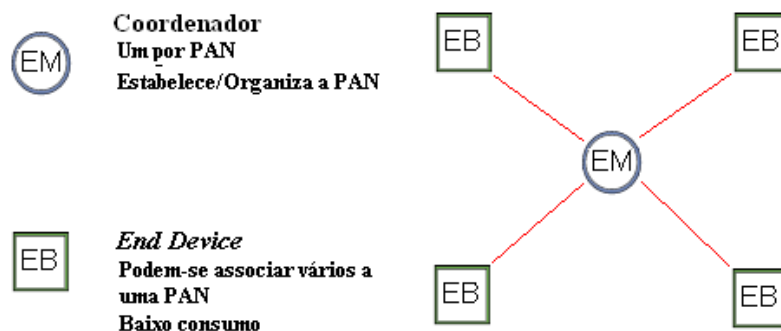


Figura 4.1: Funcionamento do Protótipo

4.3 Algoritmo de Localização

Um dos objectivos do trabalho é desenvolver um sistema de localização fiável, apresentando resultados aceitáveis e que permitam inferir a localização de uma pessoa ou objecto. Para tal é necessário desenvolver um algoritmo de localização.

O algoritmo de localização desenvolvido pode ser dividido em dois passos. No primeiro passo é utilizado um modelo de propagação, para através dos valores da intensidade do sinal (RSS) recebidos

pelo dispositivo móvel, proveniente dos dispositivos fixos, calcular as distâncias a que estes se encontram do dispositivo móvel. No segundo passo, com base nas distâncias calculadas e através da utilização de um algoritmo de triangulação é possível obter uma provável localização do dispositivo móvel.

De modo a iniciar o primeiro passo do algoritmo é necessário determinar os parâmetros da equação do modelo de propagação. A determinação desses parâmetros é efectuada através de uma recolha prévia de valores de intensidade de sinal (RSS), para se obter uma caracterização do ambiente de localização ao nível dos sinais RF. Esta etapa prévia é semelhante à fase *off-line* utilizada nos métodos de análise de cenário. Esta fase inicial é apresentada com maior detalhe no capítulo seguinte.

4.3.1 Modelo de Propagação

O modelo de propagação utilizado é baseado no modelo do factor de atenuação de parede (WAF). O modelo utilizado faz uso da equação 3.1 mas com o parâmetro WAF igual a zero (equação 4.1). Neste modelo a atenuação introduzida por uma parede é contabilizada na etapa prévia (*off-line*) à localização.

Durante a recolha de valores de intensidade de sinal (RSS), para se obter uma caracterização do ambiente de localização através dos parâmetros n e $P(d_0)$ da equação 4.1, são identificados os valores que são afectados pela atenuação de parede. A esses valores de intensidade de sinal (RSS) são subtraídos os valores de WAF (previamente determinados para as respectivas distâncias e direcções), de modo a reduzir ao mínimo a influência das paredes na caracterização dos sinais RF no ambiente de localização.

A opção pela utilização da equação 4.1 em detrimento da equação 3.1, deve-se ao facto de nem sempre existirem paredes entre o nó móvel e um nó fixo. Tome-se um raio de uma determinada distância em torno de um nó fixo, podem nem sempre existir obstruções entre o nó móvel e esse nó fixo. Essas obstruções podem existir numa determinada direcção e deixarem de existir noutra direcção. A figura 4.2 ilustra essa situação. Desta maneira, somente nas direcções e nas distâncias em que existam paredes a obstruir é contabilizada a atenuação WAF. Através deste método é possível obter valores de atenuação WAF diferentes para a mesma distância consoante as direcções.

$$P(d)_{[dBm]} = P(d_0)_{[dBm]} - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.1)$$

4.3.2 Algoritmo de Triangulação

No sistema de localização a informação que indica a localização do dispositivo móvel tem de ser relativa a posições conhecidas, isto é, o dispositivo móvel tem de se encontrar num ambiente específico que permita que a informação relativa à sua posição seja facilmente indentificável. Para tal foi necessário definir um sistema de coordenadas no ambiente de localização (figura 4.3). O sistema de coordenadas utilizado é um sistema 2D, assumindo-se que todos os dispositivos se encontram a uma altura semelhante. Após a definição do sistema de coordenadas são escolhidas as localizações dos dispositivos fixos de modo a cobrirem toda a área de localização, ficando atribuídas coordenadas (x,y) a cada dispositivo. Tendo as

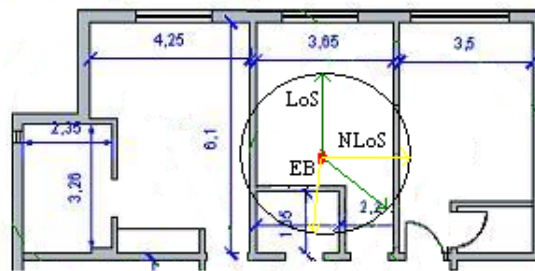


Figura 4.2: Triangulação num Sistema de Coordenadas 2D

posições dos dispositivos fixos e as distâncias de pelo menos três dispositivos fixos em relação ao móvel é possível calcular um par de coordenadas (x,y) para o dispositivo móvel, determinando assim a localização do mesmo. Para tal recorre-se a um algoritmo de triangulação a executar pelo computador após o cálculo das distâncias.

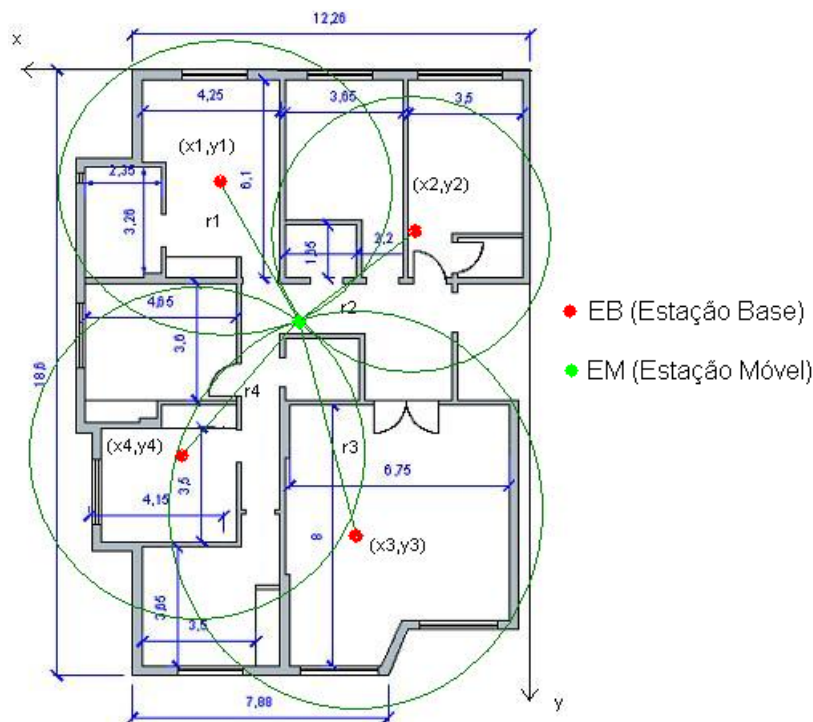


Figura 4.3: Triangulação num Sistema de Coordenadas 2D

O algoritmo de triangulação utilizado é o algoritmo triangular dinâmico (DTN - *Dynamic Triangular Algorithm*) [38]. Este algoritmo foi escolhido para este sistema de localização, pois apresenta um erro relativamente baixo (máximo de 2 metros), num cenário de localização com uma área reduzida, muito semelhante à área em que os testes do sistema aqui proposto foram efectuados. Outra característica que favorece o DTN é a sua baixa complexidade permitindo que a sua utilização não requira muito tempo de processamento.

Este algoritmo necessita de pelos menos três nós fixos para assegurar a localização do nó móvel. O DTN despreza o nó fixo que apresente o mais baixo valor de RSS, utilizando os valores dos três nós que apresentem melhor RSS. Destes três é escolhido o nó que apresentar o maior valor de RSS para *Master Node*, sendo os outros dois nós designados de *Slave Node*, tal como ilustra a figura 4.4.

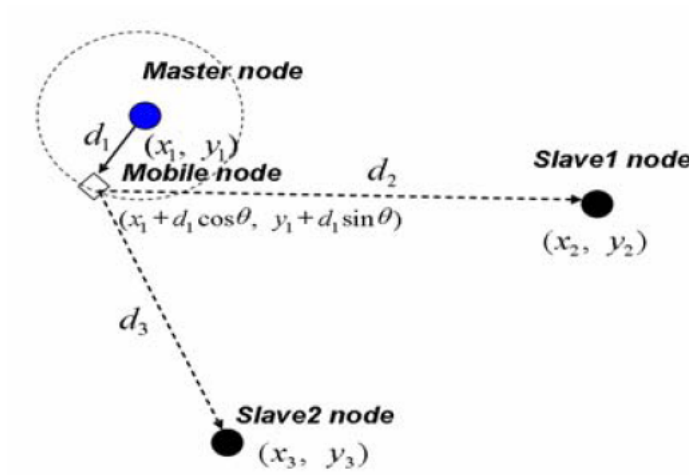


Figura 4.4: Esquema do algoritmo DTN

Desta maneira o DTN assume que a localização do nó móvel se encontra em torno de um círculo de raio d_1 entre o *Master Node* e o nó móvel (Figura 4.4). O DTN escolhe um ângulo θ no círculo de raio d_1 usando uma função de custo que escolhe o θ que apresentar o menor custo (θ_M). Com o valor de θ_M é possível estimar um par de coordenadas (x, y) relativas à possível posição do nó móvel. A figura 4.5 ilustra o procedimento do DTN.

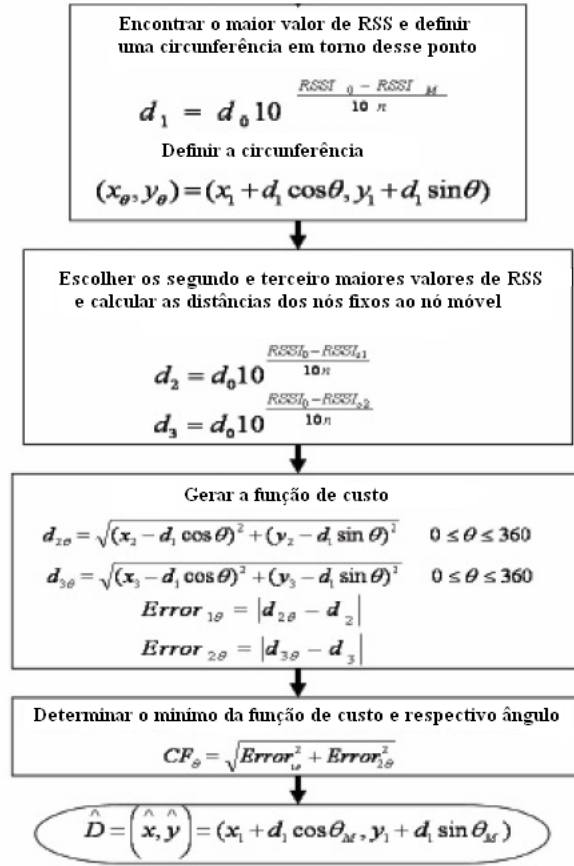


Figura 4.5: Procedimento do algoritmo DTN

4.4 Desenvolvimento de Hardware

4.4.1 Módulos ZigBee

Foram utilizados os módulos XBee OEM RF desenvolvidos pela MaxStream. São compostos por um microcontrolador e um emissor - receptor de RF (MC 13193) da Freescale, cujas principais características são apresentadas na tabela 4.1.

Desempenho	Espaço Fechado	alcance até 30 m
	Ambiente Externo	alcance até 100 m
	Potência de Transmissão	1 mW (0 dBm)
	Ritmo de Transmissão	250 Kbps
	Sensibilidade	-92 dBm (1% PER)
Requisitos Energéticos	Tensão	2,8 - 3,4 V
	Corrente de Transmissão	45 mA (@ 3,3 V)
	Corrente de Recepção	50 mA (@ 3,3 V)
Geral	Frequência	ISM 2,4 GHz
	Antena	Antena Interna "Whip"
	Dimensões	2,438 cm x 2,761 cm

Tabela 4.1: Características dos Módulos

Os módulos XBee utilizados estão equipados com uma antena integrada do tipo *Whip*, cujo diagrama de radiação [39] está ilustrado na figura 4.6. É possível observar que a antena radia quase omnidireccionalmente, não havendo necessidade de ter em conta o posicionamento do módulo durante a sua utilização.

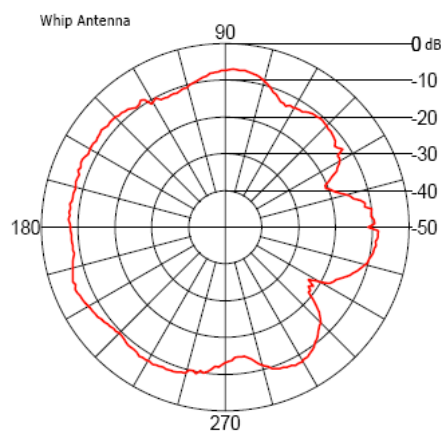


Figura 4.6: Diagrama de Radiação da Antena *Whip*

O dispositivo de suporte utilizado no sistema é uma placa ZigBee que foi desenvolvida pelo INOV. A alimentação da placa pode ser feita de duas maneiras, através de baterias ou pilhas e através de uma ligação USB. Estas duas possibilidades de alimentação existem graças à utilização de reguladores de tensão que transformam a tensão de entrada nos 3,3 V necessários ao funcionamento do módulo XBee. As cinco placas foram construídas de raiz, desde a placa PCB até à montagem final dos seus componentes. Em anexo são apresentados o esquema eléctrico e *layout* da placa.

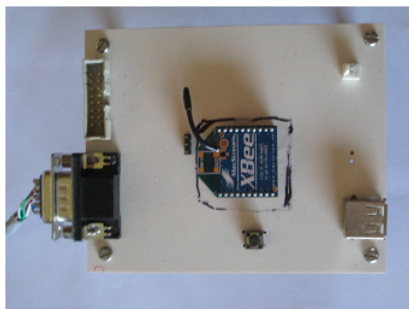


Figura 4.7: Módulo XBee e ligações à Placa ZigBee

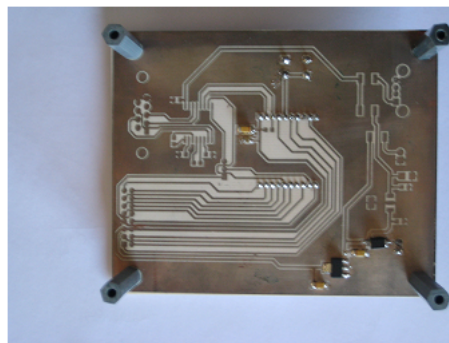


Figura 4.8: Componentes da Placa ZigBee

4.5 Desenvolvimento de Software

4.5.1 Modos de Operação do Módulo XBee

Os módulos XBee podem funcionar em modo transparente ou de comando. Por omissão, operam em modo transparente. Toda a informação da UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) recebida no pino DI é colocada em espera para ser transmitida pela antena. Quando a informação da antena é recebida é transmitida através do pino DO [40]. Em modo de comando, os caracteres recebidos são interpretados como comandos. Existem dois tipos de modo de comando, o modo de comando API e o modo de comando AT. O modo de comando API possibilita a configuração do módulo ao nível da camada de aplicação que tem de criar os respectivos pacotes com dados, endereços, identificadores, e de modo a estabelecer comunicação com outros dispositivos. O modo de comando AT possibilita modificar e ler os parâmetros do módulo através do envio de caracteres específicos [37].

4.5.2 Criação da rede ZigBee

Uma das principais etapas no desenvolvimento deste sistema de localização, passou pela criação de uma WSN. Na rede existem vários nós fixos que cobrem a área de localização. No protótipo, por simplificação a rede é constituída por quatro nós fixos e um nó móvel.

A criação desta rede foi feita com o auxílio da aplicação X-CTU, disponível on-line através do site da MaxStream. Através deste software é possível programar cada um dos módulos, definindo-os como *Coordinator* (nó móvel) ou *End Device* (nós fixos).

Nesta aplicação existem seis grupos de funcionalidades importantes na criação da rede. O grupo 'Gestão da Rede e Segurança' permite a leitura e alteração dos diferentes tipos de endereços, canais, identificadores, tempos de procura, modos de funcionamento e pedidos de associação. Proceda também à procura de dispositivos na rede. Em 'Interface RF' é feita a leitura e alteração do nível de potência de emissão e do nível de potência a partir do qual não se efectua o envio de pacotes. O grupo 'Modos *Sleep*' permite a leitura e alteração dos diferentes modos de baixo consumo, intervalos de tempo de espera e de *sleep*. Em 'Interface Série' é permitida a leitura e alteração do ritmo de transmissão, intervalo de tempo de espera por caracteres antes da transmissão, modos de funcionamento API e configuração interna da resistência *pull-up* para as linhas I/O. No grupo de 'Diagnósticos' é feita a leitura das versões de firmware

e hardware, de falhas no envio de pacotes e nível de sinal do último pacote recebido. Procede ao *scan* de energia nos canais seleccionados e *reset* do contador de falhas de envio. Finalmente, nas 'Opções do Modo de Comando AT' é permitida a entrada e saída do modo de comandos AT, leitura e alteração dos respectivos intervalos de tempo de guarda e *timeout*.

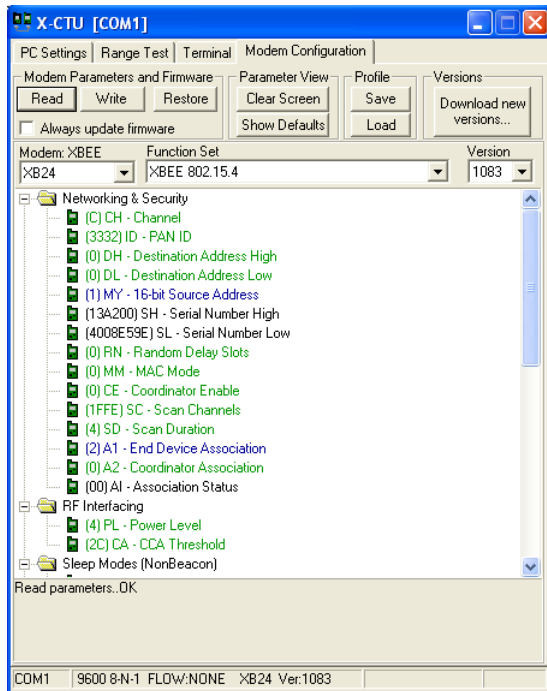


Figura 4.9: Programação de um Nó Fixo

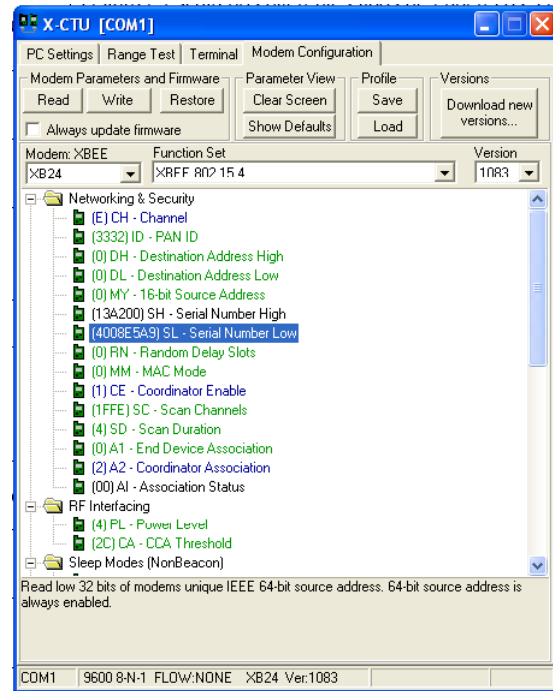


Figura 4.10: Programação do Nó Móvel

As figuras 4.9 e 4.10 ilustram as funcionalidades da aplicação X-CTU. As seguintes foram necessárias para alterar e configurar a rede ZigBee do sistema desenvolvido.

Para os Nós Fixos:

- (0) CE - *Coordinator Enable*, vem a "0" pois estes módulos não serão coordenadores de rede.
- (2) A1 - *End Device Association*, estando o módulo programado como *End Device*, permite que este se associe a uma rede.
- (0) A2 - *Coordinator Association*, vem a "0" pois estes módulos não serão coordenadores de rede.

Para o Nó Móvel:

- (E) CH - *Channel*, a cada módulo é atribuído um canal diferente de funcionamento.
- (0) MY - 16-bit *Source Address*, número de identificação de cada módulo, neste caso a estação móvel tem como identificador "0".
- (4008E549) SL - *Serial Number Low*, será diferente em cada módulo e é definido automaticamente.

- (1) CE *Coordinator Enable*, permite definir o módulo como coordenador da rede ZigBee.
- (0) A1 - *End Device Association*, sendo este módulo o coordenador da rede, este parâmetro vem a "0".
- (2) A2 - *Coordinator Association*, possibilita que outros dispositivos se liguem à rede.
- (4) PL - *Power Level*, permite alterar o nível da potência de emissão do módulo é de 0 dBm para todos os módulos.

4.5.3 Código desenvolvido em linguagem C

De modo a colocar em funcionamento e testar o protótipo do sistema foi necessário desenvolver um programa para executar num PC portátil. Este programa foi escrito em linguagem C com o objectivo de comunicar com o nó móvel (coordenador da rede ZigBee) e executar o algoritmo de localização desenvolvido. No protótipo do sistema o programa é executado em MS-DOS. No Anexo C são apresentados os protótipos e é feita uma descrição das principais funções do programa.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados. Para tal, o sistema de localização foi instalado num ambiente residencial, de modo a testar a eficácia do mesmo num espaço fechado muito diferenciado e que torna a caracterização de sinais RF ainda mais imprevisível.

5.1 Ambiente de Testes

Neste cenário de teste, os quatro nós fixos foram colocados em localizações pré-definidas de modo a haver um espaço de localização regular. O espaço de localização escolhido está ilustrado na figura 5.1, onde estão também assinaladas as suas dimensões.

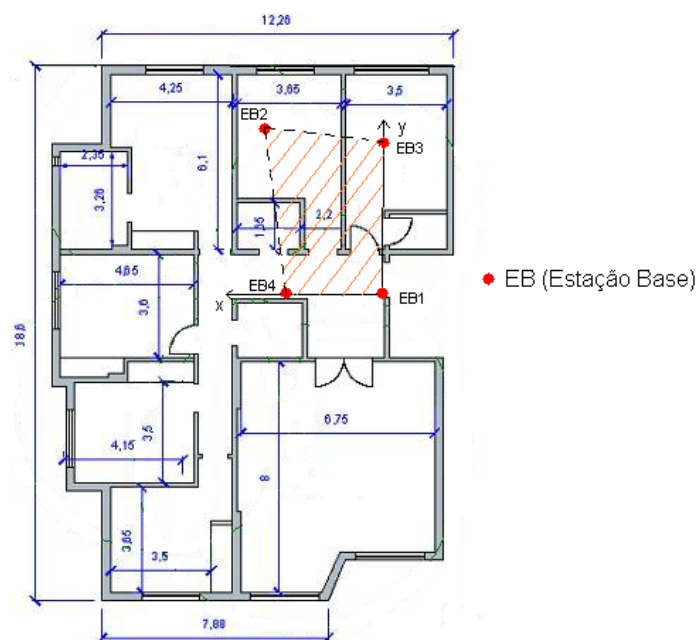


Figura 5.1: Espaço de localização

A tabela 5.1, mostra as coordenadas de cada nó em relação a um referencial 2D (x,y) , cuja origem

5.2 Testes Efectuados

Foram realizados testes (no cenário descrito), de modo a caracterizar a propagação do sinal no espaço de localização escolhido. Para tal, foi necessário recolher valores de RSS dos vários nós fixos a diferentes distâncias do nó móvel. A recolha dos valores de RSS foi feita em três nós fixos e em três direcções diferentes para cada nó, como ilustra a figura 5.3. Devido à área de localização reduzida para testar o protótipo, optou-se por recolher valores de RSS de apenas três nós. Com base neste valores foram calculados os parâmetros do modelo de propagação.

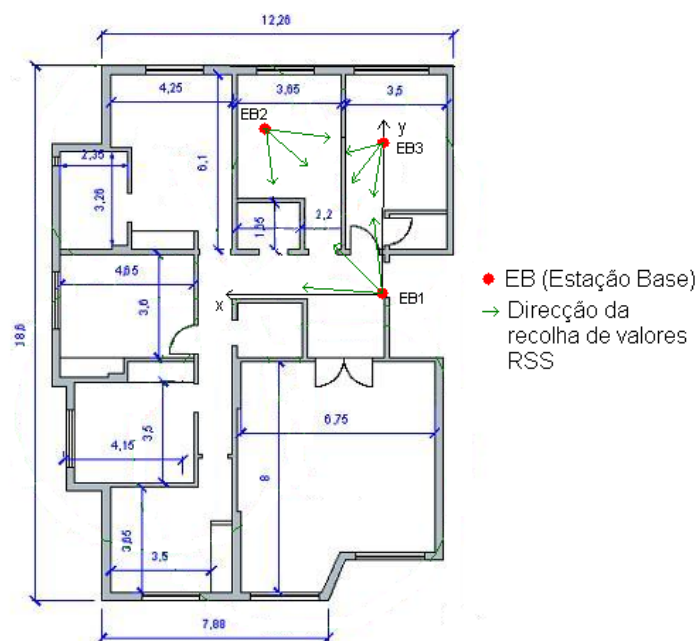


Figura 5.3: Direcções da recolha de valores de RSS

Para ser possível avaliar a capacidade, exactidão e eficácia do sistema de localização foram realizados três tipos de teste diferentes: localização sem a introdução do parâmetro WAF no modelo de propagação, com a introdução do parâmetro WAF na equação no modelo e com a introdução de um parâmetro relativo a um valor médio de WAF. Para tal, como foi referido na secção 4.3, é necessário caracterizar o ambiente de localização ao nível dos sinais RF.

A caracterização dos sinais RF é essencial para se efectuar a localização, só desta maneira é possível prever o comportamento do sinal durante a sua propagação. Essa previsão é feita através da caracterização dos sinais RF, que consiste na recolha de valores de intensidade de sinal (RSS) numa etapa anterior (*off-line*) à localização. Este procedimento não é novidade uma vez que os métodos de localização que utilizam análise de cenário, como o *Location Fingerprint*, baseiam todo o seu algoritmo directamente na informação recolhida na fase *off-line*.

5.2.1 Cálculo do parâmetro de atenuação WAF

De modo a utilizar o modelo de propagação é necessário avaliar a atenuação que uma parede introduz na propagação dos sinais RF. Para tal, foram realizados testes onde o nó móvel era colocado a várias distâncias de um nó fixo para serem recolhidos os valores de RSS. De seguida eram efectuados os mesmos testes mas com a presença de uma parede entre o nó fixo e o nó móvel. O valor do parâmetro WAF a cada distância é então calculado subtraindo os valores recolhidos sem a presença de uma parede pelos valores recolhidos na presença de uma parede. A tabela 5.2 apresenta os valores dos diferentes parâmetros WAF, relativos a cada nó, para as distâncias que interessavam no ambiente de localização escolhido.

Distância (metros)	Nó 1	Nó 2	Nó 3
2,5	-	4,25 dB	-
3	4,42 dB	11,5 dB	13,67 dB
3,5	17,42 dB	-	6,5 dB
4	-	18,08 dB	8,83 dB

Tabela 5.2: Parâmetros WAF

A tabela 5.3 apresenta a média dos valores do parâmetro WAF do conjunto dos três nós.

Nós Fixos	WAF Médio
Nó 1	10,92 dB
Nó 2	11,28 dB
Nó 3	9,67 dB
Todos os Nós	10,58 dB

Tabela 5.3: Parâmetros WAF Médio

5.2.2 Caracterização dos sinais RF sem WAF

Neste fase foram recolhidos valores de RSS às distâncias de 1 a 4,5 metros com um passo de 0,5 metros, de cada nó e em cada uma das três direcções. Os valores de RSS foram recolhidos com um nó a funcionar de cada vez. Desta maneira, foi possível obter uma caracterização da propagação do sinal na área de cobertura de cada nó dentro do espaço de localização escolhido.

A taxa de atenuação e o valor da potência recebida à distância de um metro, foram calculados recorrendo à regressão logaritmica dos valores de RSS recolhidos. Os gráficos das figuras 5.4 e 5.5 e a tabela 5.4 mostram o conjunto de valores recolhidos e os parâmetros calculados para os três nós e para o conjunto de valores de todos os nós juntos.

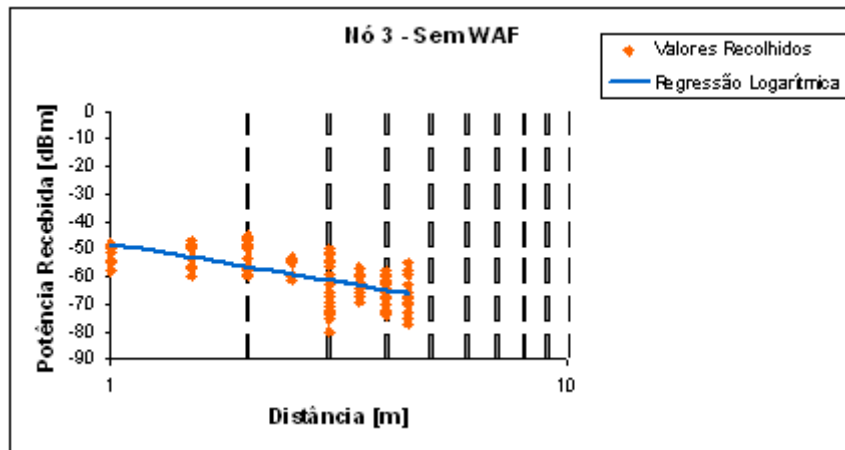


Figura 5.4: Valores recolhidos do Nó 3

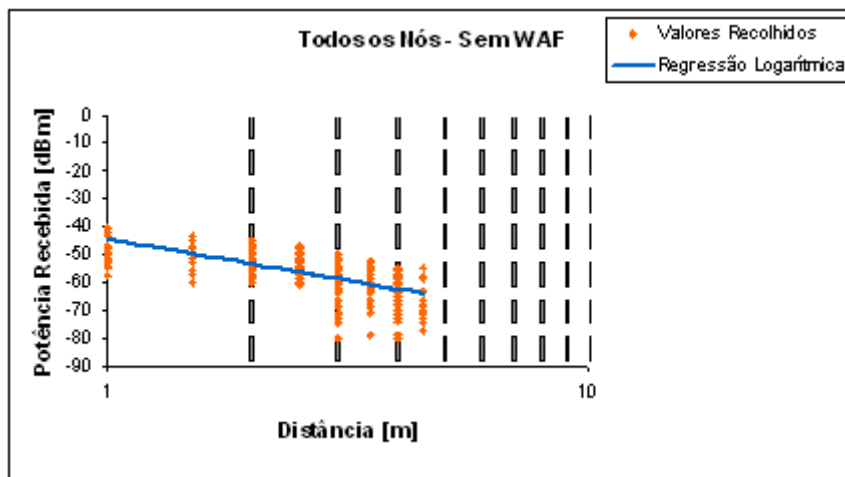


Figura 5.5: Valores recolhidos de todos os Nós

Sem WAF	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Todos os Nós
Factor de atenuação (n)	2,382	3,637	2,806	3,027
Potência Recebida a 1m ($P(d_0)$)	-45,50 dBm	-40,32 dBm	-48,08 dBm	-44,50 dBm

Tabela 5.4: Parâmetros calculados sem WAF

Através dos parâmetros calculados nas quatro situações testadas foi possível traçar a característica do sinal RF em função da distância através do modelo teórico (modelo de propagação) e comparar o seu desempenho com os valores experimentais recolhidos. Os gráficos seguintes comparam os valores do modelo teórico com a média dos valores experimentais a cada 0,5 metros.

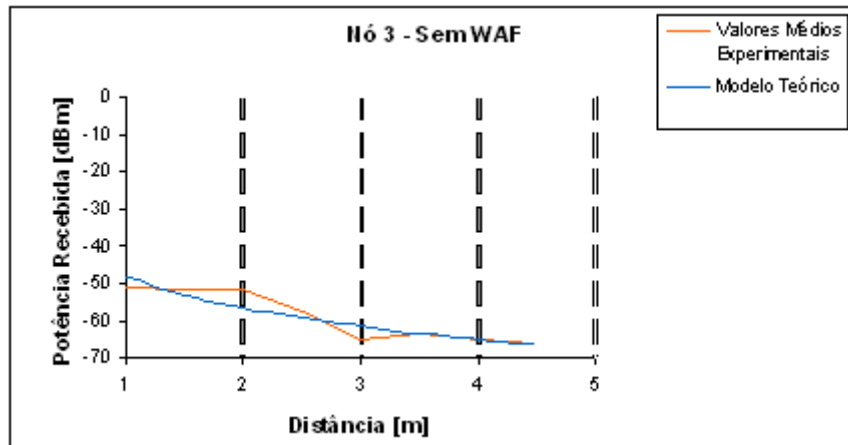


Figura 5.6: Média dos valores recolhidos do Nó 3 sem WAF VS. Modelo Teórico do Nó 3 sem WAF

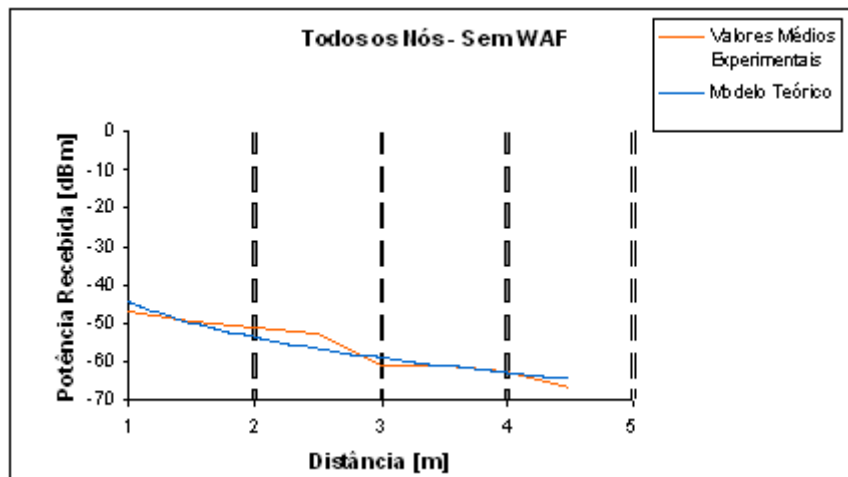


Figura 5.7: Média dos valores de todos os Nós sem WAF VS. Modelo Teórico de todos os Nós sem WAF

5.2.3 Caracterização dos sinais RF com WAF

Esta caracterização foi efectuada exactamente nas mesmas condições da anterior e com os mesmos valores, mas desta vez foi tido em conta o valor de atenuação de parede (WAF). Após a recolha de valores dos três nós, alguns desses valores foram corrigidos. A correcção é feita subtraindo os parâmetros WAF

previamente calculados, aos valores de RSS recolhidos nas posições onde existiam paredes entre os nós fixos e o nó móvel. Nestas condições, os gráficos das figuras 5.8 e 5.9 e a tabela 5.5 mostram os valores de RSS recolhidos com a introdução do factor de correcção WAF, a regressão logarítmica e os parâmetros calculados.

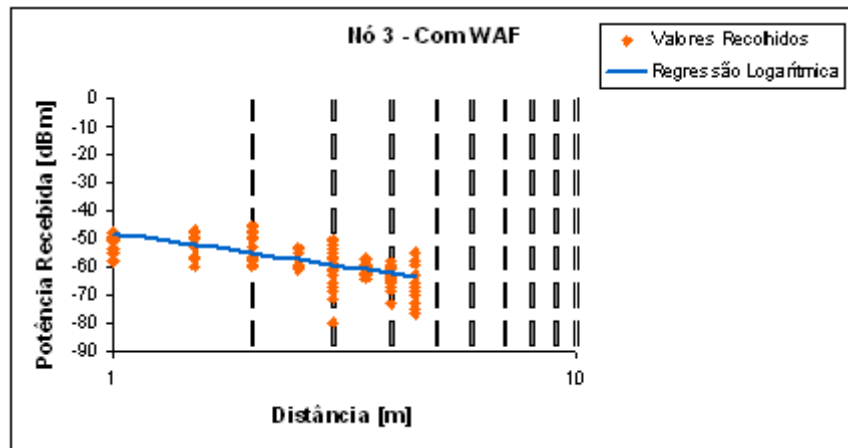


Figura 5.8: Valores recolhidos do N3 com WAF

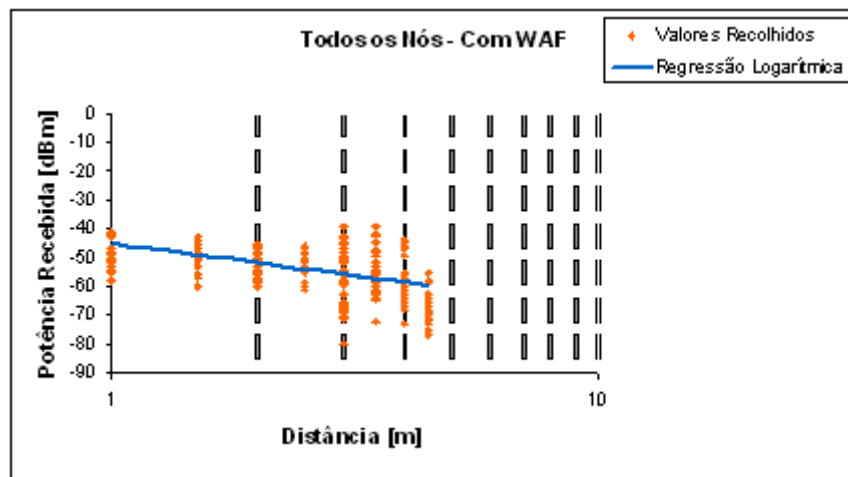


Figura 5.9: Valores recolhidos de todos os Nós com WAF

Com WAF	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Todos os Nós
Factor de atenuação (n)	2,012	2,803	2,391	2,255
Potência Recebida a 1m ($P(d_0)$)	-45,77 dBm	-41,12 dBm	-48,07 dBm	-45,21 dBm

Tabela 5.5: Parâmetros calculados com WAF

Tal como na primeira situação são apresentados os gráficos comparativos dos resultados do modelo teórico, agora com a introdução do factor WAF e a média dos valores experimentais recolhidos após a introdução do factor WAF.

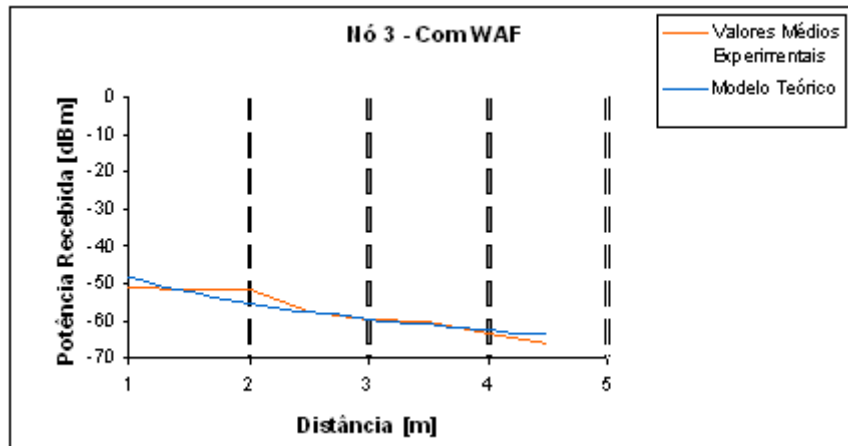


Figura 5.10: Média dos valores médios recolhidos do Nó 3 comm WAF VS. Modelo Teórico do Nó 3 comm WAF

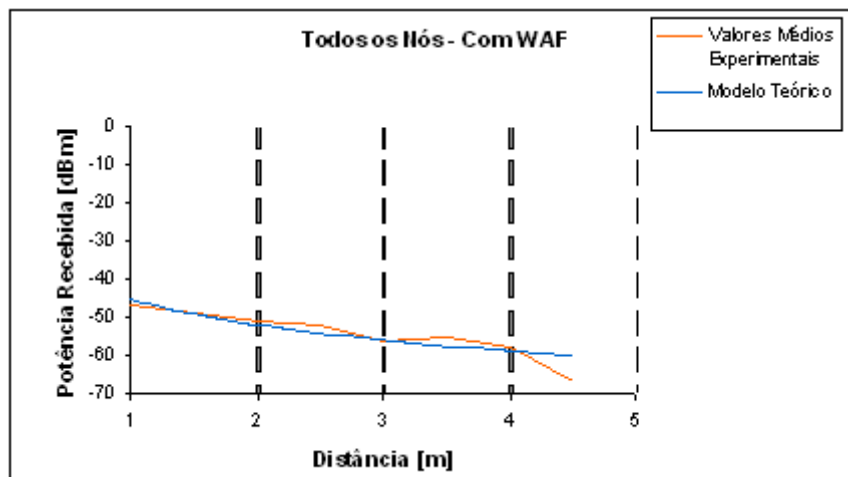


Figura 5.11: Média dos valores médios recolhidos de todos os Nós com WAF VS. Modelo Teórico de todos os Nós com WAF

5.2.4 Caracterização dos sinais RF com WAF médio

Tal como nas duas caracterizações anteriores, foram utilizados os mesmos valores de RSS recolhidos mas desta vez corrigidos com o mesmo valor para o factor de atenuação de parede (WAF). O parâmetro WAF foi novamente introduzido nos locais onde não havia LoS (*Line-of-Sight*), sendo o seu valor a média dos diferentes valores registados por cada nó e também para o conjunto de valores de todos os nós juntos. Nestas condições, os gráficos das figuras 5.12 e 5.13 e a tabela 5.6 mostram os valores de RSS recolhidos com a introdução do factor de correcção WAF médio, a regressão logarítmica e os parâmetros calculados.

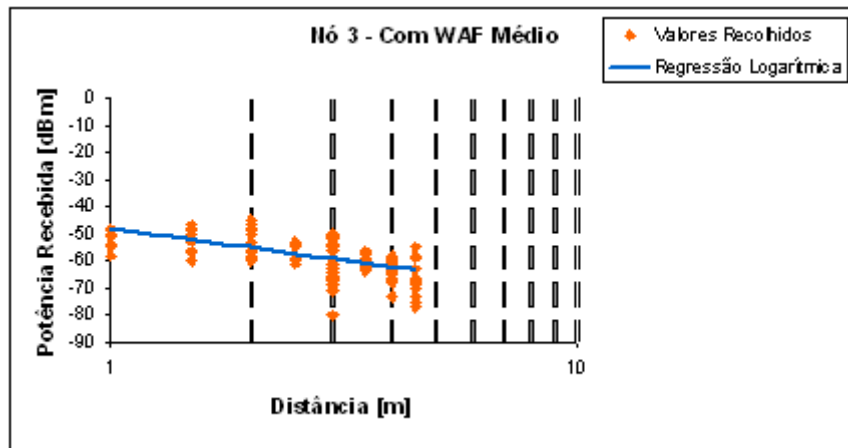


Figura 5.12: Valores recolhidos do Nó3 com WAF Médio

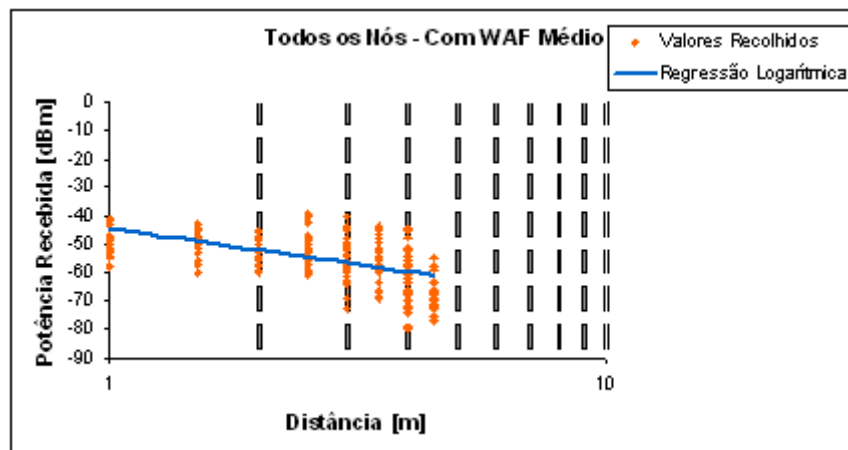


Figura 5.13: Valores recolhidos de todos os Nós com WAF Médio

Com WAF Médio	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Todos os Nós
Factor de atenuação (n)	1,393	2,942	2,350	2,537
Potência Recebida a 1m ($P(d_0)$)	-46,90 dBm	-40,59 dBm	-48,27 dBm	-44,64 dBm

Tabela 5.6: Parâmetros calculados com WAF Médio

São também apresentados os gráficos comparativos do modelo teórico, agora com a introdução do factor de correcção WAF médio, e a média dos valores experimentais recolhidos após a introdução do factor de correcção WAF médio.

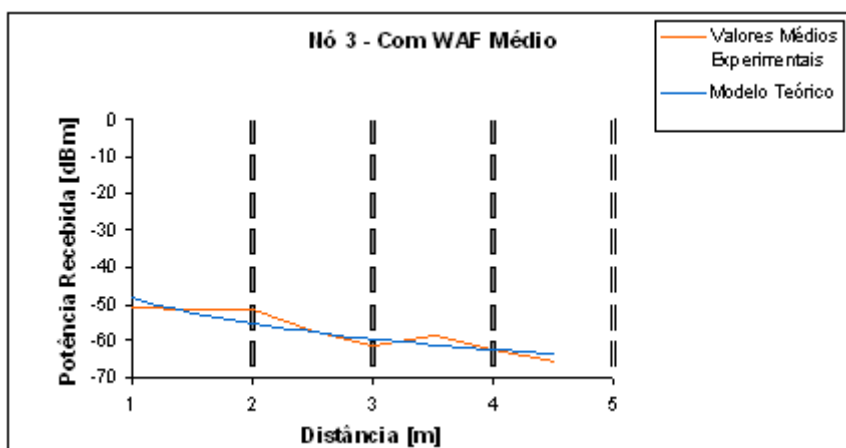


Figura 5.14: Média dos valores médios recolhidos do Nó 3 com WAF Médio VS. Modelo Teórico do Nó 3 com WAF Médio

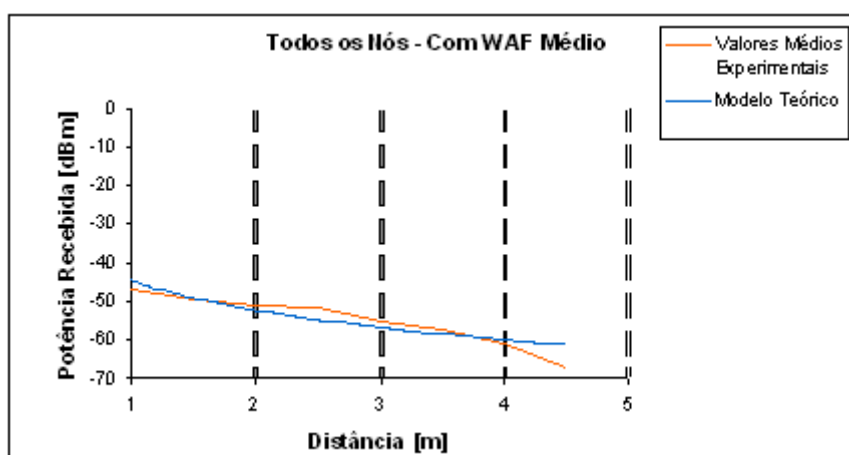


Figura 5.15: Média dos valores médios recolhidos de todos os Nós com WAF Médio VS. Modelo Teórico de todos os Nós com WAF Médio

Durante as caracterizações dos sinais RF, foram calculados os parâmetros do modelo de propagação para cada nó individualmente e para o conjunto de valores de todos os nós juntos. Ao serem calculados os parâmetros para cada nó é obtida uma equação específica para esse nó. Calculando os parâmetros do modelo para o conjunto de valores de todos os nós juntos, é obtida uma equação que pode ser utilizada em todos os nós.

5.2.5 Resultados da Localização

Após a caracterização dos sinais RF nas diferentes situações em que foram realizadas, foi testado o algoritmo de localização. Para tal, o nó móvel foi colocado em duas posições aleatórias com coordenadas diferentes. O ponto A com coordenadas (1,8;4) metros e o ponto B com coordenadas (0,7;4). O algoritmo de localização foi testado em cada um dos pontos, utilizando o modelo de propagação sem introdução do parâmetro de atenuação WAF, com a introdução do parâmetro de atenuação WAF e com a introdução

do parâmetro WAF médio. Nestas três situações cada um dos três nós fixos seleccionados pelo algoritmo foram caracterizados cada um pela respectiva equação relativa ao modelo de propagação. De seguida o algoritmo foi testado novamente em mais três situações, sem introdução do parâmetro WAF, com o parâmetro WAF e com o parâmetro WAF médio. Neste caso, os três nós fixos seleccionados pelo algoritmo foram caracterizados pela mesma equação relativa ao modelo de propagação. Os resultados são apresentados nas tabelas 5.7 e 5.8.

Ponto A (1,8;4) m	Sem WAF	Com WAF	Com WAF Médio	Todas s/ WAF	Todas c/ WAF	Todas c/ WAF Médio
Coordenadas do Nó Móvel	(3,14;7,25)	(2,29;6,52)	(2,29;6,47)	(6,54;6,50)	(3;-3,63)	(2,90;4,91)
Erro em Coordenadas	(1,34;3,25)	(0,50;2,52)	(0,49;2,47)	(4,74;2,50)	(1,20;-0,37)	(1,10;0,91)
Erro em Distância	3,51	2,57	2,52	5,36	1,26	1,43

Tabela 5.7: Resultados da localização no ponto A

Ponto B (0,7;4) m	Sem WAF	Com WAF	Com WAF Médio	Todas s/ WAF	Todas c/ WAF	Todas c/ WAF Médio
Coordenadas do Nó Móvel	(0,54;5,65)	(-0,53;4,37)	(0,27;4,25)	(0,72;5,86)	(-0,70;4,17)	(0,83;4,23)
Erro em Coordenadas	(-0,16;1,65)	(-1,23;0,37)	(-0,43;0,25)	(0,02;1,86)	(-1,40;0,17)	(0,13;0,22)
Erro em Distância	1,66	1,28	0,50	1,86	1,41	0,26

Tabela 5.8: Resultados da localização no ponto A

5.2.6 Desvios e Erros

Para melhor avaliar a capacidade e eficácia do modelo de propagação foram efectuados cálculos para determinar o desvio entre os valores médios de RSS recolhidos e os valores calculados através do modelo de propagação. O cálculo deste desvio permite determinar os erros entre as distâncias verificadas experimentalmente e as calculadas pelo modelo. Foram também calculados os desvios padrões dos vários valores recolhidos às mesmas distâncias e o erro que estas variações introduzem no modelo de propagação. Estes cálculos foram efectuados para o Nó 3 individualmente e para o conjunto de valores de todos os nós juntos. O Nó 3 foi escolhido em detrimento dos outros dois por ser o que possui maior número de valores de RSS recolhidos experimentalmente. Os cálculos foram efectuados para os modelos sem a introdução do factor de atenuação WAF, com a introdução do factor WAF e com a introdução de um valor médio de WAF.

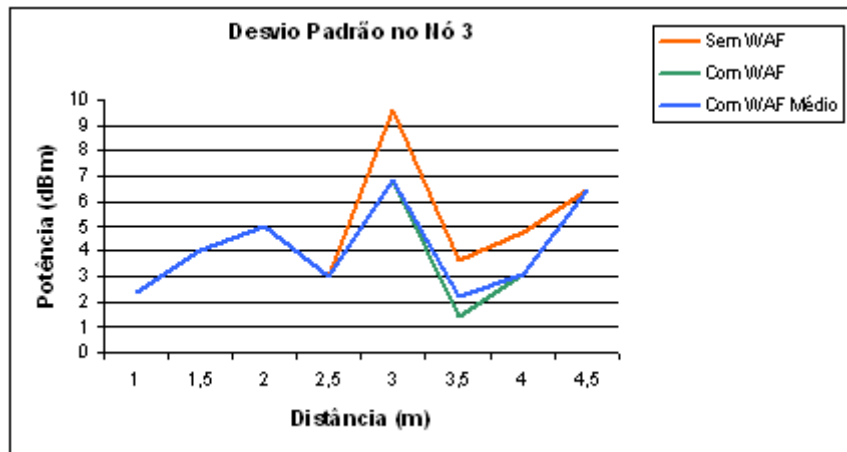


Figura 5.16: Desvio Padrão verificado no Nó 3

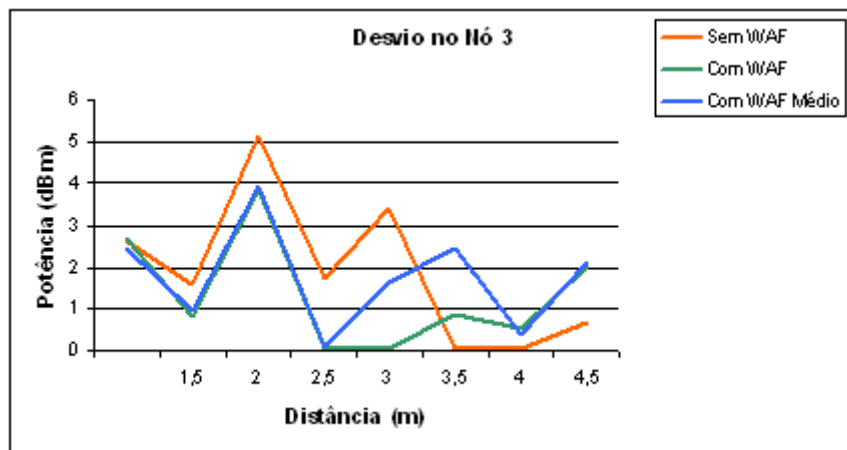


Figura 5.17: Desvio entre valores recolhidos e modelo teórico no Nó 3

Distância	Erro Desvio Padrão Sem WAF	Erro Desvio Sem WAF	Erro Desvio Padrão Com WAF	Erro Desvio Com WAF	Erro Desvio Padrão Com WAF Médio	Erro Desvio Com WAF Médio
1	0,51	0,24	0,62	0,29	0,61	0,27
1,5	0,33	0,18	0,53	0,11	0,52	0,13
2	0,02	0,68	0,22	0,62	0,21	0,64
2,5	0,27	0,33	0,81	0,02	0,82	0,02
3	5,74	0,96	2,86	0,02	3,90	0,52
3,5	1,24	0,02	0,19	0,29	0,09	0,75
4	1,88	0,02	1,65	0,21	1,62	0,16
4,5	2,73	0,24	5,71	0,98	5,92	1,03

Tabela 5.9: Erros verificados no Nó 3 (todos os resultados estão em metros)

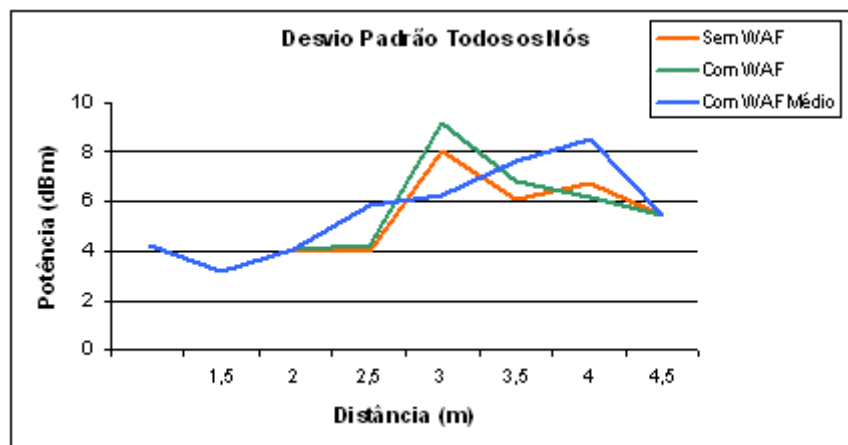


Figura 5.18: Desvio Padrão no conjunto de todos os Nós

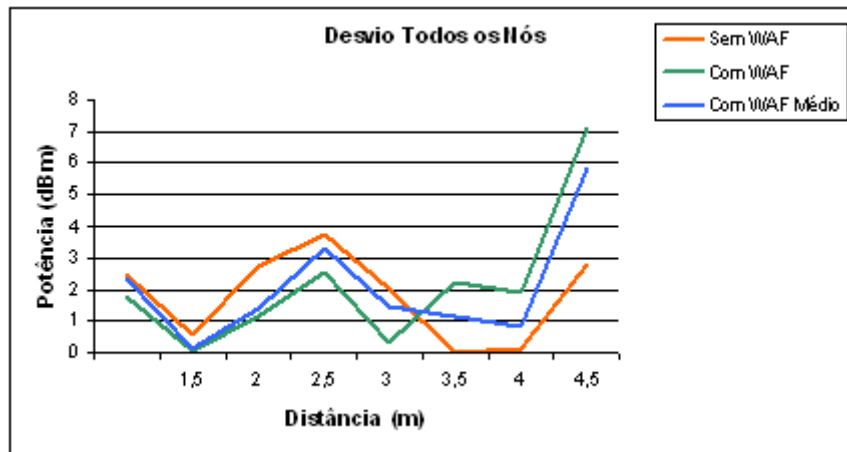


Figura 5.19: Desvio entre valores recolhidos e modelo teórico no conjunto de todos os Nós

Distância	Erro Desvio Padrão Sem WAF	Erro Desvio Sem WAF	Erro Desvio Padrão Com WAF	Erro Desvio Com WAF	Erro Desvio Padrão Com WAF Médio	Erro Desvio Com WAF Médio
1	0,67	0,21	0,85	0,20	0,82	0,24
1,5	0,33	0,07	0,60	0,01	0,53	0,02
2	0,21	0,38	0,69	0,22	0,54	0,24
2,5	0,04	0,62	0,47	0,58	0,64	0,64
3	3,48	0,50	4,90	0,10	1,64	0,37
3,5	2,08	0,01	2,08	0,73	2,76	0,36
4	2,59	0,05	2,72	0,43	5,32	0,31
4,5	3,92	1,06	11,75	4,81	8,05	3,15

Tabela 5.10: Erros verificados no conjunto de valores de todos os Nós (todos os resultados estão em metros)

5.2.7 Análise dos Resultados

Ao analisar os gráficos de comparação entre a média dos valores recolhidos (RSS) e o modelo teórico, é possível observar que em certos locais a introdução do parâmetro WAF veio aumentar o erro mas no conto geral aproximou o modelo teórico da média dos valores recolhidos, atenuando os picos onde os erros eram maiores. Este fenómeno é também comprovado pelos gráficos relativos aos desvios e nas tabelas relativas aos erros, onde se observa uma diminuição na potência (que se traduz numa diminuição do erro) quando se introduz o parâmetro WAF. Essa diminuição é também notada quando se utiliza o parâmetro WAF médio, no entanto menos pronunciada.

É também possível observar nos gráficos e tabelas relativos ao desvio padrão dos valores recolhidos, que o facto de o valor da intensidade do sinal recebido à mesma distância não ser sempre igual, tem influência nos parâmetros do modelo e introduz um erro adicional. Verifica-se também que quando se

utiliza o conjunto dos valores de todos os nós juntos, os resultados não são muito diferentes dos verificados quando se aplica a equação do modelo teórico específica para cada nó.

Há que notar que à distância de 4,5 metros recolheu-se menos informação e de menor qualidade, logo, não é o melhor indicador, nem o melhor sinal que é possível recolher para estimar a distância. A esta distância muitas vezes era difícil contabilizar quantas paredes interferiam na LoS entre o nó fixo e o nó móvel e quais as características das mesmas (se tinham sempre a mesma espessura, se havia móveis ou outros objectos encostados às paredes que pudessem causar atenuação). Por vezes a propagação do sinal mudava de divisão deixando uma sala para se propagar através de um corredor o que faz variar o efeito multipercurso. Este efeito foi bastante mais evidente à medida que nos afastávamos do nó fixo.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho foi proposto com o objectivo de desenvolver um sistema RFID com tecnologia ZigBee que funcionasse como sistema de localização de pessoas ou objectos em espaço fechado. Para tal foi desenvolvido um protótipo de uma rede ZigBee onde cada um dos nós funciona como uma etiqueta RFID.

O trabalho centrou-se no desenvolvimento de um sistema de localização utilizando uma rede ZigBee. Desta maneira, o estudo de sistemas de localização, em especial em espaço fechado foi determinante. Foi apresentada como ponto de partida uma taxonomia em sistema de localização e elaborada uma pesquisa mais aprofundada em sistemas de localização em espaço fechado. A escolha dos métodos utilizados no sistema de localização recaiu na utilização de um algoritmo de localização que utilizasse um modelo de propagação juntamente com um algoritmo de triangulação. Sempre foi preferência, desde o início deste trabalho, a utilização de um modelo de propagação em espaço fechado, em detrimento de outros métodos especialmente os de análise de cenário. Esta preferência deve-se ao facto de se pretender obter um algoritmo de localização que seja flexível e facilmente adaptável a vários cenários de localização.

Após a escolha de um modelo de propagação baseado no modelo de factor de atenuação de parede (WAF), juntamente com o algoritmo de triangulação escolhido, foi desenvolvido o sistema de localização fazendo uso de uma rede ZigBee. O facto de se utilizar tecnologia ZigBee acabou por ser decisivo na escolha dos métodos de localização devido às suas características. De modo a comprovar que as redes ZigBee são ideais, na utilização de sistemas de localização que se baseiam em modelos de propagação, foram efectuados vários tipos de testes.

Os testes centraram-se no modelo de propagação, sendo testadas várias variações do mesmo. Os resultados alcançados vieram provar que a utilização do parâmetro WAF no modelo de propagação pode aumentar em muito a sua exactidão. Desde que seja introduzido de maneira criteriosa, nas localizações onde seja necessário, e com valores que o caracterizem, o mais fielmente possível, para que o resultado final seja de qualidade. Mesmo com a introdução do mesmo valor de WAF (neste caso o valor médio dos parâmetros WAF calculados para cada nó) em todos os locais necessários o modelo provou ser eficaz verificando-se mesmo assim, no geral, melhorias em alguns locais em relação ao modelo sem WAF.

Outro aspecto interessante que é possível concluir, deve-se aos resultados apresentados pelo modelo

quando este é caracterizado pelo conjunto de valores de todos os nós juntos. Os resultados mostram-se bastante aceitáveis e tornam o sistema de localização desenvolvido ainda mais flexível. Tomando a mesma equação do modelo para todos os nós torna mais simples a fase de caracterização dos sinais RF, não sendo necessário fazer uma recolha de valores (RSS) específica de cada nó. Estas características tornam-se muito importantes num espaço fechado onde se pretenda instalar um sistema de localização e onde a sua arquitectura seja toda muito semelhante. Por exemplo, num edifício de escritórios onde todas as divisões tenham mais ou menos as mesmas dimensões, torna possível que só seja necessário fazer a caracterização dos sinais RF numa das divisões utilizando esses parâmetros calculados em todas as pequenas áreas de localização do edifício.

É importante notar que a fase de caracterização dos sinais RF é crucial no bom desempenho do modelo de propagação. É possível concluir que o modelo de propagação é tanto mais exacto conforme a quantidade de valores recolhidos (RSS) nesta fase. Por outro lado também se pode concluir que com poucos valores recolhidos (em comparação com os métodos de análise de cenário) é possível desenvolver um modelo eficaz e flexível, com erros entre os 2,5 e 0,25 metros quando se faz uso do modelo de propagação desenvolvido.

Os resultados evidenciam também que no momento em que se inicia a localização, é importante que se recolham vários valores de RSS para que seja possível obter um valor médio nesse intervalo de tempo de recolha de valores. A gama de valores possíveis de recolher numa mesma posição pode variar o suficiente de modo a gerar erros significativos. Essa variação deve-se ao efeito multipercorso que tem tendência a aumentar com o aumento da distância entre o nó fixo e o nó móvel. Quanto mais perto os nós se encontrarem uns dos outros, mais facilmente a propagação de um sinal pode ser caracterizada pelo modelo de propagação. Este facto vem provar que o conceito adoptado, de se ter um ambiente de localização reduzido que faz parte de um conjunto, que no seu todo, consegue cobrir áreas bem maiores, é uma opção válida. Esta opção é especialmente interessante no âmbito de uma rede ZigBee, visto que, estas redes podem ter ligadas entre si até milhares de nós diminuindo as distâncias entre cada um, tudo isto a um custo reduzido e com um baixo consumo energético. Como balanço final e tendo por base os estudos e os resultados deste protótipo é minha convicção, que o sistema é tecnicamente viável e tem grande potencial.

6.1 Trabalho Futuro

Muito pode ainda ser feito quer nas áreas de RFID e ZigBee como em sistemas de localização. No que toca a este sistema em concreto, a sua evolução tem de se focar no desenvolvimento de algoritmos de localização cada vez mais eficientes e que sejam de baixa complexidade, reduzindo assim a sua dificuldade de implementação e o seu tempo de processamento. Em termos de software, o sistema pode ser melhorado através da utilização de uma plataforma gráfica com um mapa da área de localização, que forneça uma localização quase instantânea do dispositivo móvel. A tecnologia RFID também pode ser alvo de bastantes inovações, especialmente em relação à informação que pode possuir e actualizar através de sensores implementados nas etiquetas dos dispositivos fixos e no dispositivo móvel.

Uma das principais ambições destes sistemas passará pela sua mobilidade e capacidade de adaptação a novos cenários. Relativamente ao protótipo desenvolvido, este, tem como objectivo futuro deixar de necessitar de um PC portátil ligado ao dispositivo móvel e passar o a ser o dispositivo a efectuar todo o processamento de informação. Desta maneira, é cada vez mais importante a investigação e divulgação de modo a que possa ser possível desenvolver, por exemplo, padrões no que toca aos parâmetros WAF a utilizar em modelos de propagação em espaço fechado, o que iria expandir em larga escala estes sistemas de localização. Finalmente, sugiro que se realize um demonstrador com aplicações concretas de localização em espaço fechado, para avaliar os custos reais e a receptividade do mercado.

Apêndice A

Em sistemas de RFID existem dois métodos de transferência de energia do leitor para etiqueta: através de indução electromagnética ou através da captura de ondas electromagnéticas. Através destes dois métodos que fazem uso das propriedades electromagnéticas associadas a uma antena RF é possível estabelecer comunicações entre dispositivos, estas comunicações são denominadas de *near field* e *far field*. Ambos os modos de comunicação conseguem transferir energia suficiente a uma etiqueta RFID de modo a gerar potências de $10\mu W$ a $1mW$. Através de várias técnicas de modulação, sinais *near field* e *far field* podem também transmitir e receber informação.

Comunicação de *Near Field*

A comunicação de *near field* entre um leitor e uma etiqueta é baseada no princípio da indução magnética. O leitor faz percorrer uma corrente alternada por um enrolamento metálico, originando um campo magnético na sua vizinhança. Se for colocada uma etiqueta, que contenha um pequeno enrolamento metálico no seu interior, na vizinhança do leitor e ao alcance do campo magnético gerado pelo leitor irá verificar-se uma queda de tensão ao terminais do enrolamento da etiqueta. Se esta tensão for rectificada e acoplada a um condensador será armazenada energia para ser utilizada no funcionamento do circuito da etiqueta.

Etiquetas que usam comunicação de *near field* transmitem informação ao leitor através de *load modulation*. Qualquer corrente que acesse o enrolamento metálico da etiqueta irá originar um pequeno campo magnético na sua vizinhança que se irá opor ao campo magnético radiado pelo leitor. O leitor detecta este pequeno campo através do ligeiro aumento de corrente que este introduz no enrolamento metálico do leitor. Este aumento de corrente é proporcional à carga (*load*) aplicada ao enrolamento metálico da etiqueta. Se a etiqueta aplicar uma carga ao enrolamento da etiqueta e variar essa carga ao longo do tempo é possível codificar um sinal representativo da identificação da etiqueta através de ligeiras variações do campo magnético.

Este tipo de comunicação apresenta limitações ao nível do alcance do método de indução magnética e também relativamente à taxa de decaimento do campo magnético com a distância [7], [42].

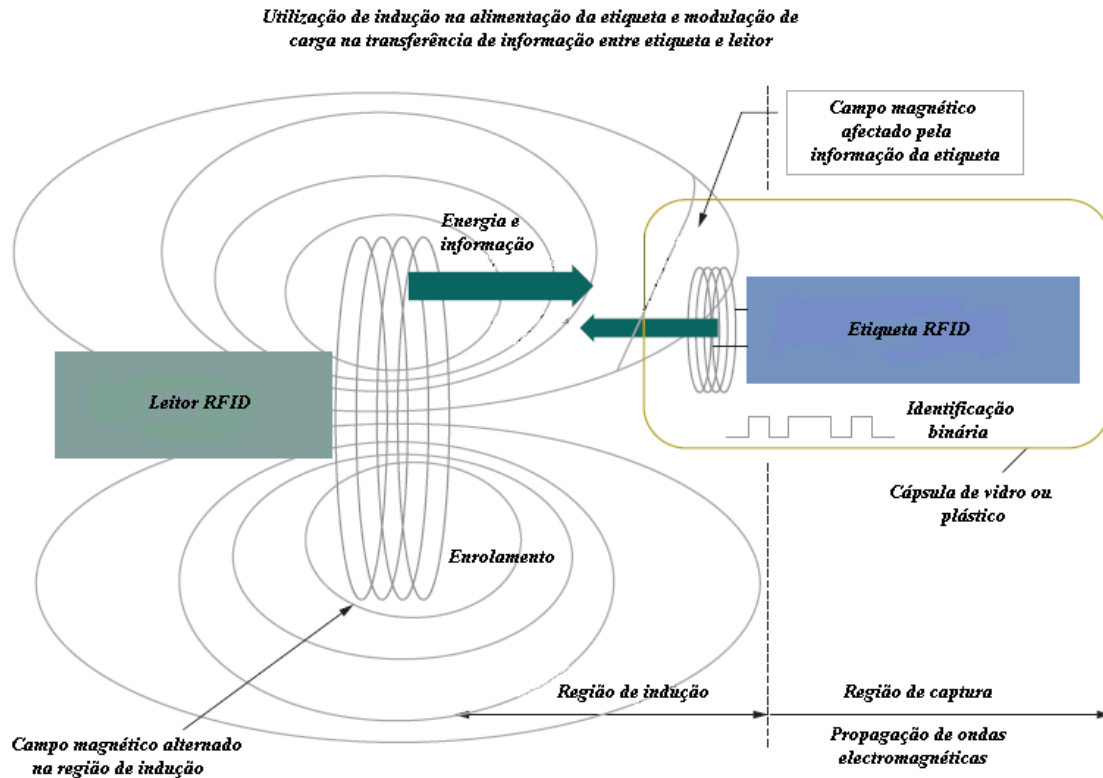


Figura 6.1: Mecanismo de comunicação *near field*[42]

Comunicação de *Far Field*

Etiquetas RFID que utilizam comunicação de *far field* recebem ondas electromagnéticas radiadas por uma antena dipolo do leitor. Uma pequena antena dipolo colocada na etiqueta recebe a energia transportada pelas ondas electromagnéticas na forma de uma diferença de potencial alternada ao longo dos "braços" do dipolo. Através de um díodo que rectifica esta diferença de potencial é possível armazenar energia num condensador. Esta energia é utilizada na alimentação do circuito da etiqueta.

Em etiquetas que fazem uso de comunicação *far field* a técnica utilizada para enviar informação ao leitor é a de *back scattering*. Se uma antena for dimensionada de forma precisa, pode ser sintonizada para uma frequência particular e desta maneira absorver a maior parte da energia que chega à etiqueta a essa frequência. No entanto se existir uma desadaptação de impedâncias a antena irá reflectir alguma da energia de volta ao leitor. O leitor detecta a energia reflectida utilizando um receptor de rádio sensível. Através da alteração da impedância da antena ao longo do tempo, a etiqueta pode reflectir a energia em padrões que codifiquem a identificação da etiqueta [7], [42].

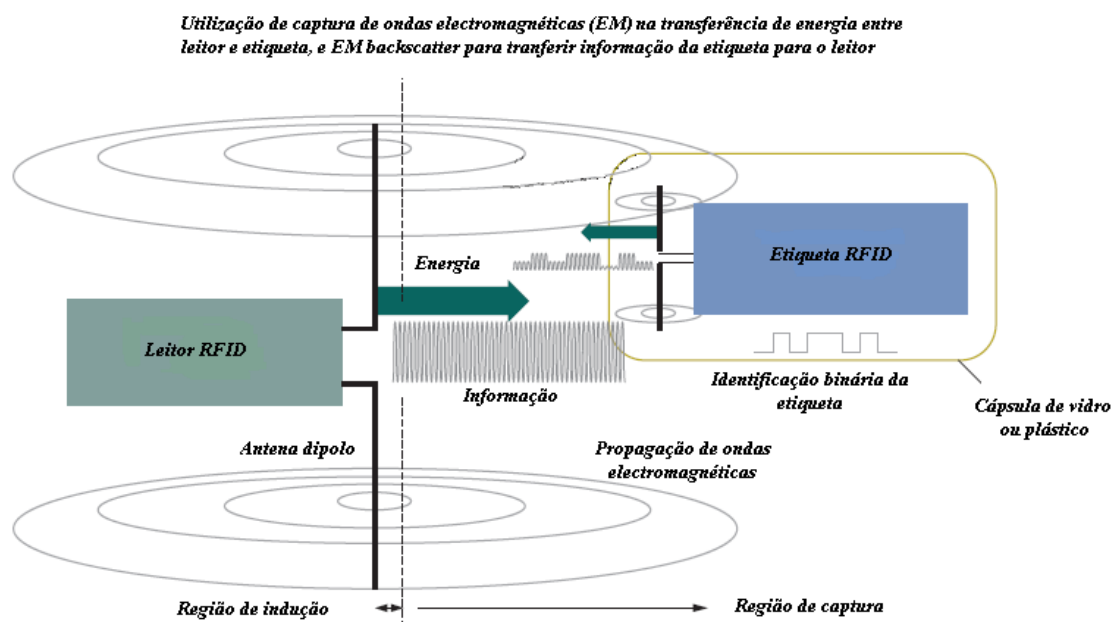
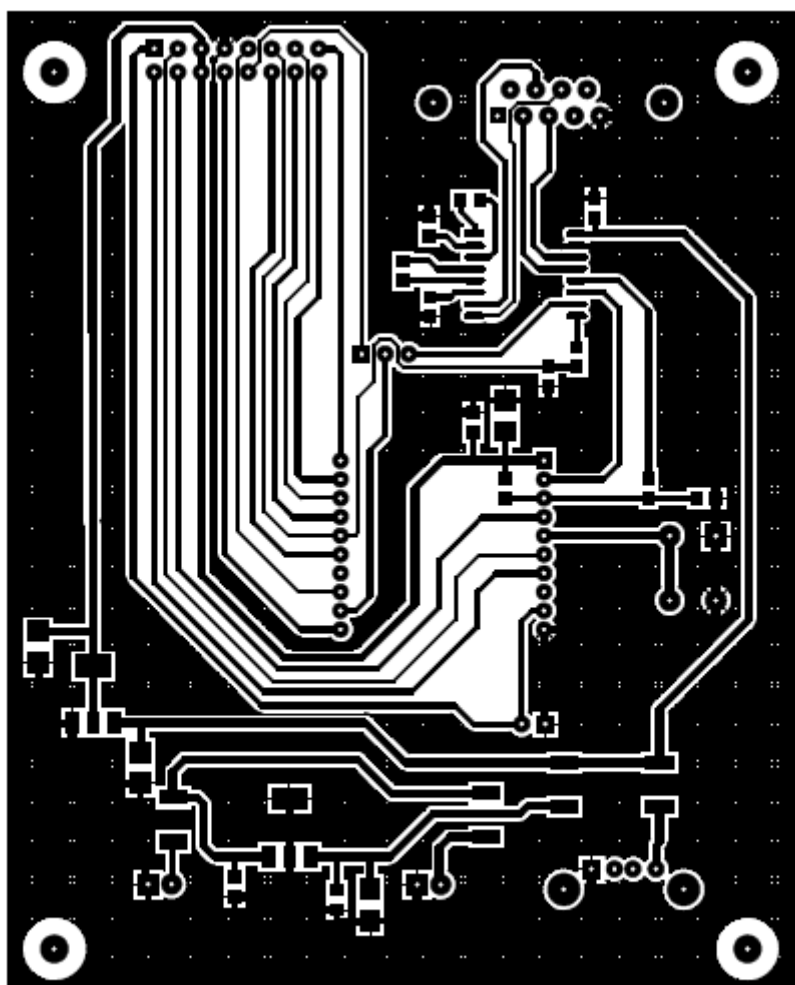


Figura 6.2: Mecanismo de comunicação *far field*[42]

Apêndice B



ZIGBEE_BOARD_BDT

Figura 6.3: Layout da Placa

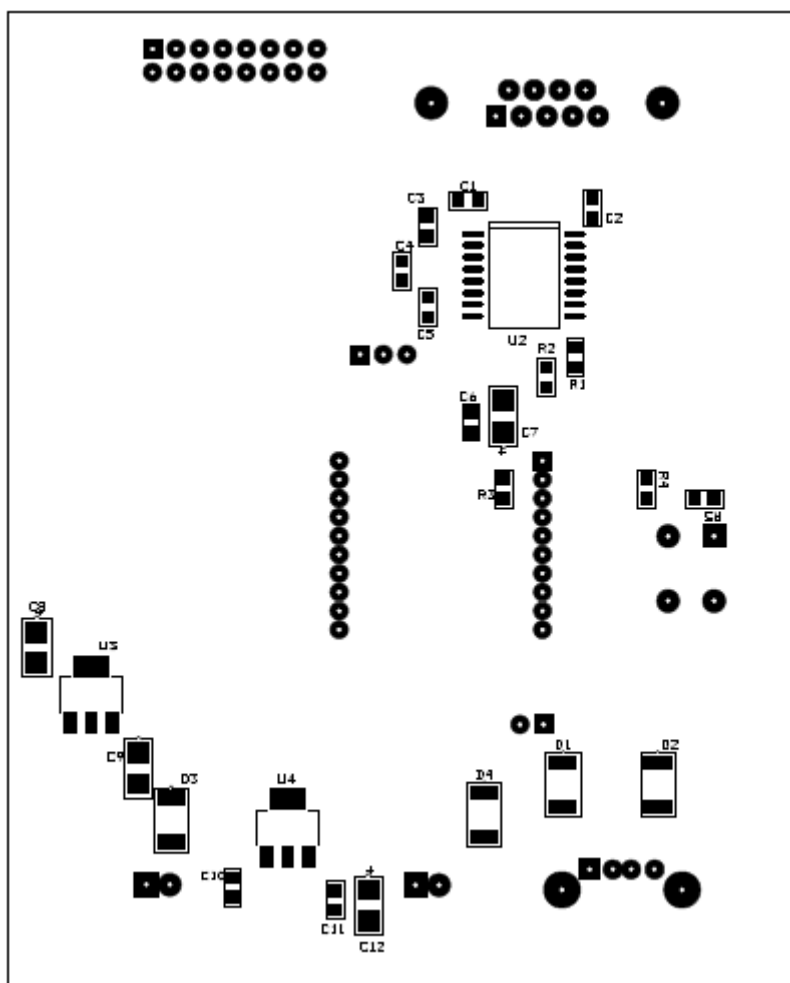


Figura 6.4: Componentes vistos de cima

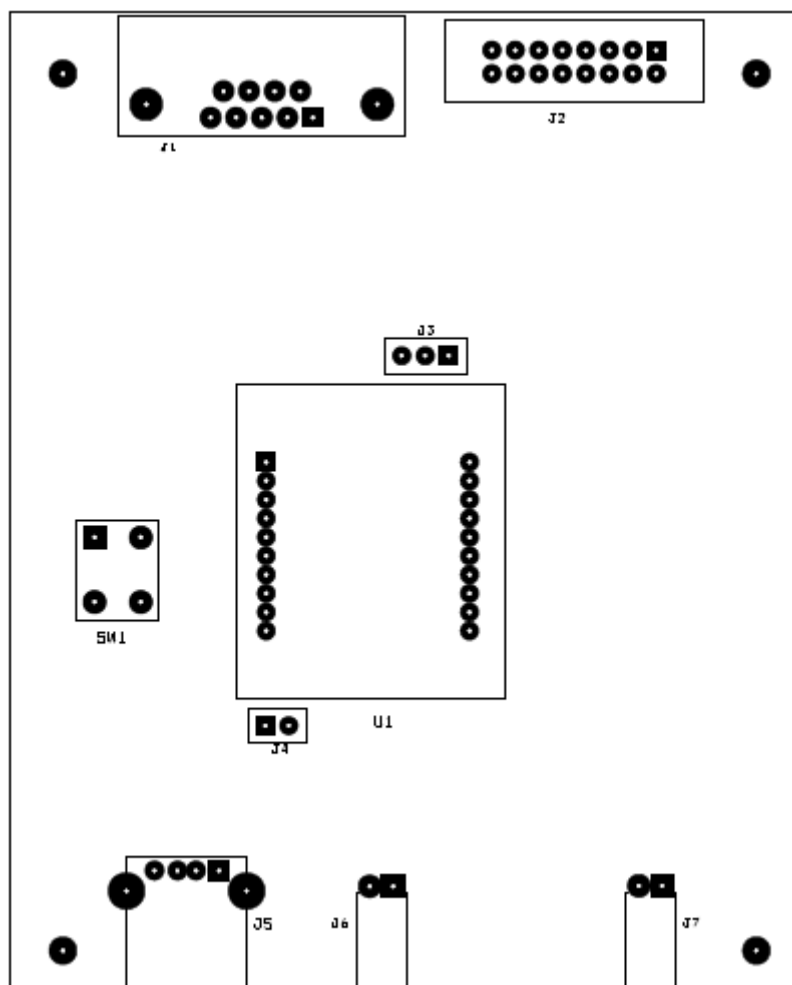


Figura 6.5: Componentes vistos de baixo

Apêndice C

int ObterCoordenadas(Ponto EstBase[], double P0[], double n[]) Lê um ficheiro com as coordenadas dos nós fixos.

HANDLE CommStartup(int COMPortNumber) Faz a abertura e inicialização da porta de comunicação série.

WriteFile(hComm, CmdEntrarAT, (DWORD)strlen(CmdEntrarAT), bytesEscritos, NULL) Entra no modo de comando AT e envia informação da porta série para o módulo XBee.

ReadFile(hComm, Resp, sizeof(Resp), bytesLidos, NULL) Lê a informação enviada pelo módulo XBee para a porta série.

MelhoresEstacoes(pot[0][0], pot[1][0], pot[2][0], pot[3][0], ind1, ind2, ind3) Selecciona os três melhores nós fixos segundo o valor da intensidade de sinal recebido (RSS).

double Distancia(double Pr, double P0, double n) Após receber os parâmetros da equação do modelo de propagação, calcula as distâncias do nó móvel a cada um dos três nós fixos.

int Algoritmo(double d1, double d2, double d3) Com base nas coordenadas dos nós fixos (lidas pela função ObterCoordenadas) e nas distâncias calculadas pela função Distancia, executa o algoritmo de triangulação devolvendo as coordenadas do nó móvel.

Bibliografia

- [1] "European Policy Outlook RFID", in Conf. RFID: Towards th Internet of Things, Berlin, June 25-26, 2007.
- [2] FKILogistex, RFID fot the Real World, FKILogistex, 2005. Available: <http://www.fkilogistex.com>. [Accessed: September 12, 2006].
- [3] Steve Lewis, "A Basic Introduction to RFID Technology and its use in the Supply Chain", LARAN RFID, April 2005.
- [4] "DOD RFID Summit". Available: <http://www.dodrfidsummit.com/>. [Accessed: Decembre 4, 2007].
- [5] "Wal-Mart incentiva fornecedoros a utilizar RFID". Available: <http://www.notebooks-site.com/blog/wal-mart-incentiva-fornecedores-a-utilizar-rfid/>. [Accessed: March 2008].
- [6] "Estado da Arte em RFID", Sybase, 12 de Outubro de 2007. Available: <http://www.portalfid.net>. [Accessed: March 2008].
- [7] "U.S. Homeland Security Industry (Government Private) Market Outlook", Homeland Security Research. Available: <http://www.homelandsecurityresearch.com/uploads/HSRC-200701-T.pdf>. [Accessed: Decembre 4, 2007].
- [8] "Airbus Hires ODIN Technologies for RFID Deployments", RFID Journal. Available: <http://www.rfidjournal.com/article/articleview/3424/>. [Accessed: March 2008].
- [9] "ActiveWave RFID System". Available: <http://www.activewaveinc.com>. [Accessed: Decembre 4, 2007].
- [10] <http://www.byblos.pt>.
- [11] Jeremy Landt, "The history of RFID". IEEE Potentials, October/November 2005.
- [12] D. W. Engels and S. E. Sarma, "Standardization Requirements within the RFID Class Structure Framework", in MIT Auto-ID Labs technical report, Auto-ID Labs, Massachussets Institute of Technology, January 2005.
- [13] M. Ward, R. v. Kranenburg and G. Backhouse, "RFID: Frequency, standards, adoption and innovation", JISC Technology and Standards Watch, May 2006.

- [14] <http://www.electrocom.com.au/rfidfrequencytable.htm>.
- [15] R. Want, "An Introduction to RFID Technology", in IEEE CS and IEEE ComSoc, January - March 2006. Available: <http://www.computer.org/pervasive>.
- [16] "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems, September 8, 2006.
- [17] P. Kinney, "ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works", in Conf. Communications Design Conference, October 2, 2003.
- [18] Shashank Tadakamadla, "Indoor Local Positioning System For ZigBee, Based On RSSI", M.Sc. Thesis report within Electrical Engineering D, Electronics Design Programme, The Department of Information Technology and Media (ITM), Mid Sweden University, October 2006.
- [19] P.Bahl and V. N. Padmanabhan. "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. in Proc. IEEE INFOCOM , 2000, pages 775-784.
- [20] J. Hightower and G. Borriello, "A Survey and Taxonomy of Location Systems for Obiquitous Computing". Technical Report UW-CSE 01-08-03, University of Washington, Computer Science and Engineering, August 24, 2001.
- [21] R. Want, A. Hopper, V. Falcão and J. Gibbons, "The active badge location system", ACM Transactions on Information Systems, vol. 40, January, 1992.
- [22] Peter H. Dana, "Global positioning system overview", 2000. <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>.
- [23] "VHF omni directional ranging (VOR)". Available: <http://www.navfltsm.addr.com/vor-nav.htm>.
- [24] Kurt Partridge, Larry Arnstein, Gaetano Borriello, and Turner Whitted, "Fast intrabody signaling", Demonstration at Wireless and Mobile Computer Systems and Applications (WMCSA), December 2000.
- [25] Roy Want and Dan M. Russell, "Ubiquitous electronic tagging", IEEE Distributed Systems Online, September 2000.
- [26] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting. in Proc. IEEE INFOCOM,2004.
- [27] Lorincz, K., Welsh, M., MoteTrack: A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking, Proceedings of International Workshop on Location and Context-Awareness, May 2005.
- [28] K. Kaemarungsi, "Efficient Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting", in Proc. IEEE International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005.

- [29] M. A. Youssef, A. Agrawala, and A. U. Shankar, "WLAN location determination via clustering and probability distributions," in Proc. IEEE PerCom'03, Dallas-Fort Worth, TX, Mar. 23-26, 2003
- [30] A. Smailagic and D. Kogan, "Location sensing and privacy in a context-aware computing environment," IEEE Wireless Commun. Mag., vol. 9, no. 5, pp. 1536-1284, Oct. 2002.
- [31] R. Battiti, M. Brunato, and A. Villani, "Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless lans," Technical Report, Oct. 2002. [Online]. Available: <http://rtm.science.unitn.it/battiti/archive/86.pdf>.
- [32] D. Madigan, E. Elnahrawy, R.P. Martin et al., "Bayesian Indoor Positioning Systems", IEEE 2005.
- [33] H. Hashemi, The Indoor Radio Propagation Channel, Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 7, pages 943-968 July 1993.
- [34] S. O. Rice, Mathematical analysis of Random Noise, Bell Systems Technical Journal, Vol. 23 (1944), Vol. 24 (1945).
- [35] Seidel S. Y., Rappaport T. S., 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 40, no.2, pages 207-216, February 1992.
- [36] A. G. M. Lima and L. F. Menezes. Motley-Keenan Model Adjusted to the Thickness of the wall, pages 180-182.
- [37] Mikas F., Zvanovec S., Pechac P. Measurement and prediction of signal propagation for WLAN systems. Czech Technical University in Prague, 2002.
- [38] Ren C. Luo, Ogst Chen and Shi H. Pan. "Mobile User Localization in Wireless Sensor Network Using Grey Prediction Method", Department of Electrical Engineering, Nation Chung Cheng University, Taiwan, 2005.
- [39] "XBee XBee PRO OEM RF Module Antenna Considerations", MaxStream Application Note XST-AN019a September 2005. Available : <http://www.maxstream.net>.
- [40] "XBee/XBee-PRO OEM RF Modules", Product Manual v1.xAx - 802.15.4 Protocol. Available : <http://www.maxstream.net>.