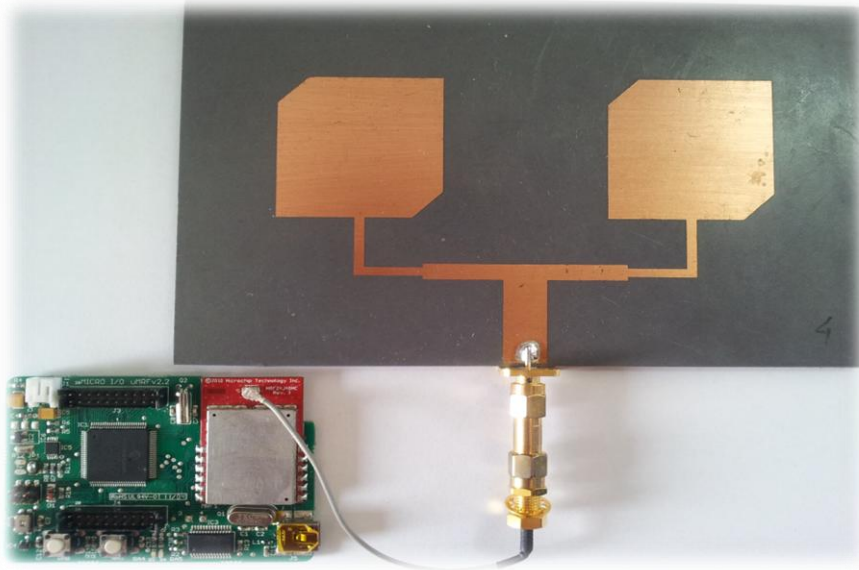


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Identificação de pessoas numa portaria virtual

Luís Pedro do Couto Antunes
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Miguel Duarte Ascenso

Vogal-Arguente: Prof. Doutor José Alberto Fonseca

Vogal-Orientador: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Novembro de 2012

Agradecimentos

Gostaria de agradecer o apoio e compreensão importantíssimo da minha família ao longo do percurso académico, reforçando as minhas motivações pessoais.

Estou grato aos meus colegas e amigos do ISEL pelos momentos partilhados e pelo grande sentido de entreajuda e companheirismo que sempre existiu.

Estou imensamente grato ao meu orientador professor Pedro Pinho pela sua grande disponibilidade e sentido pratico que demonstrou no decorrer da Tese ajudando-me sempre a tomar as melhores decisões e também pela abertura que existiu em transmitir todo o seu conhecimento.

Também quero agradecer à cooperação que existiu com a empresa Micro I/O e dos seus colaboradores, que permitiram tornar este projecto uma realidade.

Agradeço de uma maneira geral a todos os Engenheiros do ISEL pelo apoio que me deram no meu percurso académico contribuindo gradualmente para a minha evolução.

Em conclusão, estou grato à Instituição do ISEL pela oportunidade que me deu ao chegar à concretização dum grande objectivo, que há muito esperava alcançar. O facto da referida instituição colocar ao meu dispor instalações, equipamento e tecnologia contribuindo de uma forma significativa para a minha integração no mundo do trabalho na área de Engenharia, também foi muito importante.

Resumo

Ao longo dos últimos anos tem havido um crescimento elevado na utilização de dispositivos de comunicação sem fios existindo inúmeras aplicações nas mais diversas áreas, sendo cada vez mais uma realidade no quotidiano das pessoas e da indústria.

Neste trabalho é proposto uma adaptação para módulos baseados no protocolo 802.15.4 de forma a adaptar os mesmos com características distintas das que possuem. Nomeadamente são desenvolvidos diferentes tipos de antenas (antena impressa simples, agregado com 2 e 4 antenas) para serem incorporadas nos módulos por forma a permitir a sua utilização num projecto de portaria virtual, que poderá ser utilizado em escolas, hospitais, empresas, por forma a controlar o fluxo de movimentos.

Para além do dimensionamento da antena e a sua adaptação aos módulos são também efectuada alterações no software nos módulos de transmissão e recepção de modo a garantir que o controlo da passagem de utilizadores numa portaria virtual seja feita do modo mais eficiente possível.

O trabalho foi realizado em varias etapas, efectuando-se primeiro um estudo detalhado sobre as comunicações sem fios e nomeadamente sobre o protocolo 802.15.4. Posteriormente foram projectadas as antenas e feita a sua integração nos módulos. Por último foram efectuadas uma campanha de medidas com vista a avaliar o desempenho do sistema.

Palavras-Chave

Protocolo 802.15.4, Antenas impressas, Portaria Virtual, Redes sem Fios

Abstract

Through the last years there has been a wireless communication growth, in a wide different areas and applications, using an enormous number of different devices. We may say without any doubt, that nowadays they are a reality in our personal life, and in the most of our industries.

This work proposes an adaptation module, based on the 802.15.4 protocol in order to upgrade it with different characteristics that they now possess.

The antennas are developed in different types (microstrip antennas, simple aggregate with two or four antennas) to be embedded in modules in order to permit their use in a virtual draft ordinance which could be used in schools, hospitals, companies, having the objective of controlling the flow movements.

In addition to the dimensioning of the antenna and its normal adaptation to the modules, there are also other changes regarding the software. The main objective is that the transmission and reception process is done, ensuring as efficiently as possible, the control of the movements made by the users.

The work was done in several steps, by first doing a detailed study on wireless communications and in particular the 802.15.4 protocol. Subsequently the antennas have been projected in order to have the best adaptation to the modules. Finally practical tests were conducted to ensure the system performance.

Keywords

802.15.4 Protocol, Microstrip Antenas, Virtual Entrance, Wirless Networks.

Índice

<i>Lista de acrónimos.....</i>	<i>xvii</i>
<i>Capítulo 1 Introdução</i>	<i>1</i>
1.1 Motivação.....	1
1.2 Enquadramento.....	3
1.3 Objectivo.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação.....	5
<i>Capítulo 2 Norma IEEE 802.15.4.....</i>	<i>7</i>
2.1 Enquadramento da norma IEEE 802.....	7
2.1.1 Redes WPAN 802.15.....	7
2.2 Estudo da camada Física e a camada de acesso ao meio da norma IEEE 802.15.4	9
2.2.1 Camada Física	10
2.2.2 Camada MAC.....	14
<i>Capítulo 3 Projecto da antena a utilizar.....</i>	<i>19</i>
3.1 Introdução	19
3.2 Antenas impressas.....	21
3.2.1 Especificações de Substrato	22
3.2.2 Dimensionamento da Frequência de Ressonância.....	23
3.3 Dimensionamento da antena.....	24
3.3.1 Antena impressa simples.....	25
3.3.2 Agregado de 2 antenas impressas.....	30
3.3.3 Agregado de 4 antenas impressas.....	33
3.3.4 Síntese	36
.....	37
3.3.5 Resultados medidos.....	37
<i>Capítulo 4 Hardware, Protocolo e Resultados</i>	<i>41</i>
4.1 Hardware.....	41
4.1.1 Modulo emissor.....	41

4.1.2	Modulo receptor	42
4.2	Protocolo	43
4.3	Resultados	46
4.3.1	Medidas em campo aberto.....	46
4.3.2	Teste efectuado com a antena singular	47
4.3.3	Teste efectuado para o agregado de duas antenas.....	48
4.3.4	Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior	49
4.3.5	Valor médio obtido na portaria virtual.....	50
4.3.6	Comparativo das medidas efectuadas em campo aberto e em ambiente externo	51
4.3.7	Valor mínimo e máximo obtido na portaria virtual	53
4.3.8	Medidas numa portaria virtual em ambiente interior	59
	<i>Capítulo 5 Conclusão e trabalho futuro.....</i>	63
	<i>Anexos.....</i>	67
	<i>Referências</i>	73

Lista de Figuras

Figura 1- Exemplo de uma antena instalada numa portaria que identifica a passagem do utilizador.....	3
Figura 2- Gestão e Controlo sobre diversas portarias virtuais.	4
Figura 3 - Enquadramento da rede LR-WPAN na norma IEEE 802 [3].....	9
Figura 4- Norma IEEE 802.15.4 [8].....	9
Figura 5- Faixa de frequências com a respectiva atribuição de canais [3].....	11
Figura 6- Técnica <i>DSSS</i> [9].....	12
Figura 7- Campos que determinam a camada física [3].....	14
Figura 8 - Tipos de dispositivos existentes.....	16
Figura 9- Topologias possíveis com os dispositivos existentes [3].....	17
Figura 10- Estrutura de uma super trama.	18
Figura 11- MRF24J40 2.4GHz Modulo Transceiver	20
Figura 12- Representação de uma Antena impressa.....	22
Figura 13- Efeito do campo de fuga[16].	23
Figura 14- Resultado da constante dielétrica efectiva [16].	23
Figura 15- Dimensão adicional contabilizando os efeitos de campo de fuga [16].	24
Figura 16 - Antena impressa simples com polarização linear.	26
Figura 17 - Dimensões da antena visto de frente (esquerda) e lateral (direita).....	27
Figura 18 – Antena impressa simples.....	27
Figura 19- Adaptação S11 da antena para um porto de 50Ω.....	28
Figura 20 - Relação Axial Ratio da antena de 0.2351dB (1.0556) na frequência 2.41GHz. ...	29
Figura 21- Diagrama de radiação com $\varphi = 0^\circ$ (vermelho) e $\varphi = 90^\circ$ (azul)	29
Figura 22 - Dimensões do agregado de duas antenas visto de frente.....	30

Figura 23 – Agregado de duas antenas impressas	31
Figura 24- Adaptação S11 a -24.236dB à frequência de ressonância de 2.41GHz.....	31
Figura 25- Relação do Axial Ratio 0.7315dB (1.26) na frequência de 2.41GHz.....	32
Figura 26- Diagrama de Radiação para $\varphi=0^\circ$ e $\varphi=90^\circ$	33
Figura 27- Dimensões do agregado de 4 antenas visto de frente.	34
Figura 28 - Adaptação do agregado de 4 antenas de -21.2935dB à frequência 2.41GHz.....	34
Figura 29 - Axial Rate de 0.28 (1.07) à frequência de 2.41GHz.....	35
Figura 30- Diagrama de Radiação para $\varphi=0^\circ$ e $\varphi=90^\circ$	36
Figura 31 - Diagrama de radiação das 3 antenas sobreposto com $\varphi = 0^\circ$	37
Figura 32 - Aspecto do sistema no interior da câmara anecóica	38
Figura 33 - Instalação da antena na câmara anecóica	38
Figura 34 - Comparativo S11 nos resultados obtidos pelo simulado HFSS medido e em Camara Anecóica.....	39
Figura 35- Placa de desenvolvimento do transmissor com a antena impressa simples (esquerda) e com o agregado de duas antenas (direita).....	42
Figura 36- Modulo Receptor com antena incorporada.....	42
Figura 37 - Diagrama de radiação da antena receptora com $\varphi = 0^\circ$ e $\varphi = 90^\circ$ [18]	43
Figura 38- Protocolo entre o módulo emissor e receptor.	44
Figura 39 - Fluxograma representativo do algoritmo do emissor.	45
Figura 40 - Fluxograma representativo do algoritmo do receptor.....	45
Figura 41 - Medidas efectuadas em campo aberto com as devidas distâncias e ângulos.....	47
Figura 42 - Sinal recebido na antena de recepção	48
Figura 43 - Sinal recebido na antena do receptor pelo agregado de duas antenas	49
Figura 44- Medidas efectuadas para a portaria virtual em ambiente exterior	50
Figura 45- Medidas com valor médio numa portaria virtual em ambiente exterior.....	51
Figura 46 - Comparativo de medidas em ambiente exterior em campo aberto e ambiente exterior para as distâncias de 3 e 5 metros.	52

Figura 47- Comparativo de medidas em ambiente exterior em campo aberto e ambiente exterior para a distância de 1.5 metros.....	52
Figura 48 - Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior tendo em conta a instabilidade do sinal.....	53
Figura 49 - Aceitação da ligação entre emissor e receptor.....	54
Figura 50 - Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior tendo em conta a instabilidade do sinal medido em RSSI.....	55
Figura 51- Aceitação da ligação entre emissor e receptor para distâncias superiores a 3 metros	56
Figura 52 - Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior tendo em conta a instabilidade do sinal medido em RSSI.....	56
Figura 53- Aceitação da ligação entre emissor e receptor para distâncias superiores a 5 metros	57
Figura 54- Portaria virtual em ambiente interior.....	60
Figura 55- Equipamento emissor (antena e placa transmissora) instalado na portaria virtual.	60
Figura 56. Medidas efectuadas em ambiente indoor.....	61
Figura 57- Medidas efectuadas em ambiente indoor	61
Figura 58- Exemplo de um atenuador externo (esquerda) e um atenuador interno (direita) ...	65
Figura 59- Diagrama de Radiação [19]......	68
Figura 60- Exemplo da impedância de entrada de uma antena com $(55-7j)\Omega$ à frequência de 2.41GHz.	69
Figura 61- Polarização vertical (esquerda), Polarização Horizontal (direita) [22].	71
Figura 62- Polarização Circular com os vectores do campo eléctrico ortogonais entre si [22].	72

Lista de Tabelas

Tabela 1- Comparativo entre os diferentes tipos de Bandas de Frequência.....	12
Tabela 2- Comparativo das 3 antenas na adaptação a um porto de 50Ω, Axial Ratio, Ganho e LFMP	37
Tabela 3 - Medidas sem configuração de RSSI mínimo na placa receptora	58
Tabela 4- Medidas com configuração de RSSI de 35(89.6 não normalizado) na placa receptora	59

Lista de acrónimos

Acrónimo	Designação
AES	Advanced Encryption Standart
BAN	Body Area NetWork
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CCA	Clear Channel Assessment
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
FFD	Full Funcion Device
GTS	Guaranty Time Slot
HFSS	High Frequency Structure Simulator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial Scientific Medicine
LAN	Local Area Network
LFMP	Largura de Feixe a Meia Potência
LLC	Logical Link Control
LHCP	Left Hand Circular Polarization
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate - Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control

MPDU	MAC protocol data unit
O-QPSK	Orthogonal-Quadrature Phase Shift Keying
PDA	Personal Digital Assistant
PSDU	Physical Service Data Unit
QoS	Quality of Service
RED	Receiver Energy Detection
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RHCP	Right Hand Circular Polarization
RSSI	Received Signal Strength Indication
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

No mundo actual, as comunicações sem fios assumem um papel cada vez mais importante na nossa sociedade. A não existência de uma ligação física entre os diversos dispositivos permitiu uma forte expansão do mercado nas últimas décadas.

As redes locais sem fios apresentam-se como uma boa alternativa às redes convencionais com fios, oferecendo as mesmas funcionalidades, mas fornecendo maior mobilidade, melhor facilidade de instalação e uma boa interligação em redes locais.

Assim, de uma forma geral, podem-se apontar as seguintes vantagens na utilização de uma rede sem fios.

- **Mobilidade** - Dentro da área de cobertura da rede consegue-se comunicar sem restrição e até se pode ter a possibilidade de aceder a locais onde as comunicações com fios não conseguem chegar por dificuldades de implementação;
- **Facilidade de instalação** - Permite que a instalação seja mais rápida e económica, evitando a necessidade de instalar cabos em locais inacessíveis no interior de paredes fazendo um melhor uso do espaço físico;
- **Facilidade de alteração de topologia** - Permite configurar e alterar facilmente uma topologia de rede de modo a satisfazer aplicações específicas. Utilizando-se este requisito facilita-se a sua expansão, para além de apresentar uma manutenção reduzida. Deste modo a rede pode ser mais ampla sem que exista a necessidade de mover ou instalar cabos;

De entre as desvantagens podemos destacar as seguintes:

- **Qualidade de Serviço** - A qualidade de serviço é menor do que a de uma rede com fios.

Os principais motivos devem-se à utilização de uma menor largura de banda devido às limitações existentes na radiotransmissão, bem como a possibilidade de uma elevada taxa de erros originada por efeitos de interferência;

- **Segurança** - Como a informação não é propagada sobre um espaço físico, mas sim em espaço livre, ocorre o perigo da troca de informação entre dispositivos ser intersectada por terceiros, e desse modo, pode-se colocar em risco a segurança da informação;
- **Custo do equipamento** - O equipamento utilizado em redes sem fios é mais complexo e por consequência tem um custo mais elevado em comparação com o equipamento utilizado numa rede com fios.

Devido às características únicas deste tipo de redes e à evolução que estas tiveram ao longo do tempo permitiu a sua aplicação em áreas novas como a domótica, sensorização, medicina, gestão de edifícios e indústria, levando ao desenvolvimento de novos dispositivos e serviços, que utilizam este tipo de redes. De forma a otimizar as redes 802.15.4 é necessário existirem mecanismos de baixo consumo de energia a fim de garantir uma maior autonomia das baterias utilizadas. Sendo que no seguimento dessa permissa surgiram as redes *LR - WPAN (Low Rate - Wireless Personal Area Network)* [1] [2].

As principais características destas redes são:

- Um baixo débito de transmissão.
- Um consumo reduzido de energia.
- Um custo bastante moderado, na utilização de recursos de hardware limitados.

Caracterizando-se por uma baixa latência, baixo consumo de energia, privilegiando-se a duração das baterias [2] [3].

A fim de satisfazer estas exigências surgiu a norma IEEE 802.15.4, que tem como objectivo fornecer especificações para a camada física e para a camada de controlo de acesso ao meio para redes pessoais sem fios [3].

1.2 Enquadramento

Uma das aplicações deste tipo de rede pode ser na localização e identificação de pessoas ou objectos num determinado meio. Neste sentido, com esta dissertação de Mestrado pretende-se implementar o que designa de portaria virtual, na qual deve existir pelo menos um módulo de transmissão e outro de recepção.

As portarias virtuais são destinadas a aplicações tais como em escolas ou em hospitais permitindo detectar se um módulo de *RF* (Radio Frequência) móvel associado a um utilizador passou ou não por um determinado local (porta, portaria) permitindo desta forma controlar o número de pessoas que estão num determinado local, o seu tempo de permanência, etc.

Para se poder implementar uma portaria virtual é necessário ter um módulo de transmissão que periodicamente emite informação para ver se existe algum módulo móvel na proximidade de maneira a detectar a sua presença. Por forma a se poder identificar de modo único um utilizador o diagrama de radiação do módulo de RF do transmissor deve ser o mais apertado possível no plano horizontal, sendo que no plano vertical não é tão limitativo. A Figura 1 exemplifica um utilizador móvel que se prepara para atravessar uma portaria virtual, onde é registada a sua passagem.

Para além das alterações essenciais, que são necessárias efectuar ao nível físico em hardware, também é importante corrigir e adaptar o *firmware* que existe nos módulos de transmissão e recepção de modo a tornar o protocolo existente entre os dispositivos o mais eficiente possível.

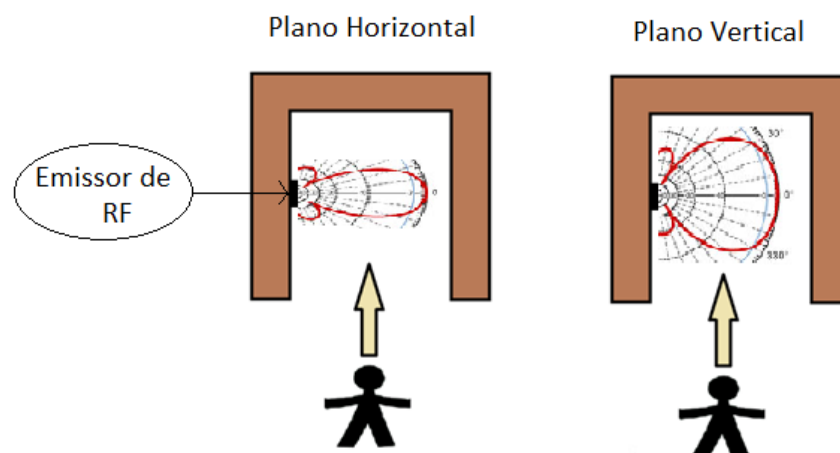


Figura 1- Exemplo de uma antena instalada numa portaria que identifica a passagem do utilizador.

Os módulos de RF, em conjunto com o restante equipamento que permite coordenar e gerir a rede, desempenham funções acima da camada física, como o tratamento de dados, a segurança, o sincronismo, etc.

A informação recolhida permite ao gestor de rede monitorizar e gerir os recursos disponíveis, ter acesso a dados estatísticos e efectuar operações de controlo, tal como exemplifica a Figura 2.

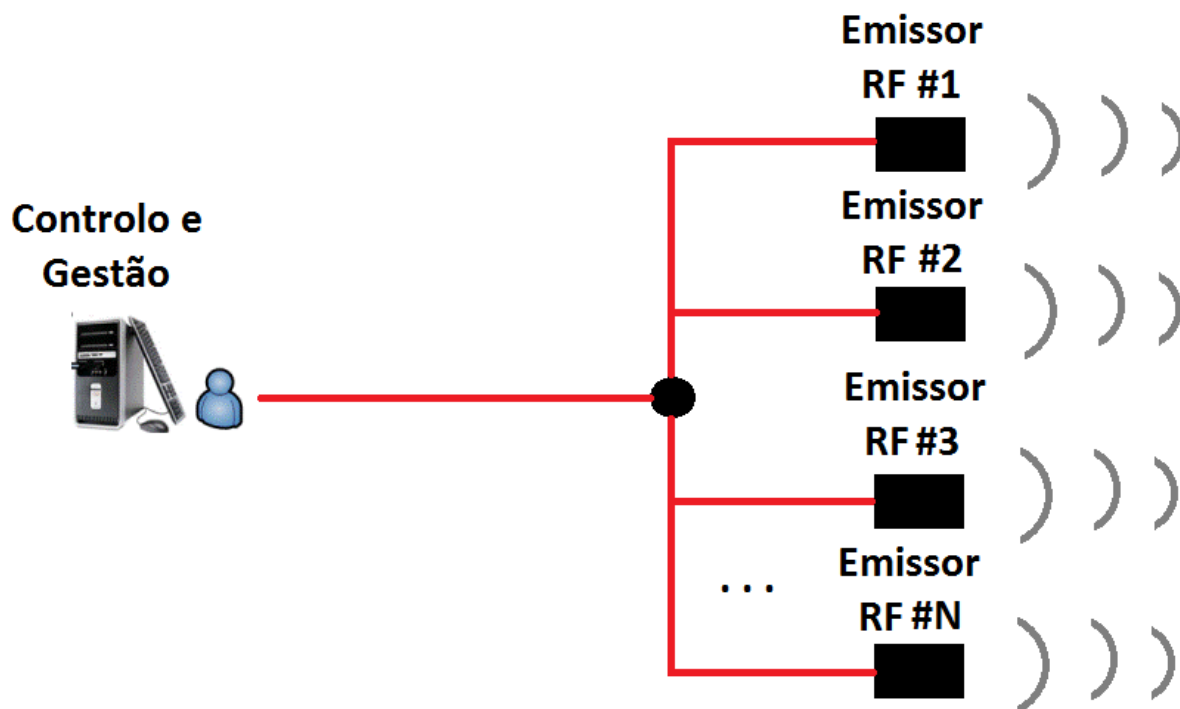


Figura 2- Gestão e Controlo sobre diversas portarias virtuais.

1.3 Objectivo

O objectivo desta dissertação de Mestrado é o desenvolvimento de uma antena adequada à identificação de utilizadores numa portaria virtual, e a sua inclusão e adaptação ao módulo de transmissão já existente e desenvolvido pela empresa Micro I/O.

Para além disso pretende-se fazer a adaptação da referida antena aos módulos existentes, obtendo-se desta forma uma elevada selectividade na identificação do utilizador, desenvolvendo um protocolo e algoritmo adequado a esse fim.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos que se descrevem em seguida:

- No primeiro capítulo apresenta-se o tema, a motivação, enquadramento e objectivo do trabalho.
- No segundo capítulo explica-se a norma 802.15.4. Nesta norma especificam-se as características da camada física e camada de acesso ao meio de uma rede sem fios de baixo custo.
- No terceiro capítulo explicam-se os princípios básicos do funcionamento de uma antena impressa. Apresentam-se também os resultados mais relevantes das antenas dimensionadas, explicando-se as opções tomadas e analisando-se aos resultados obtidos.
- No quarto capítulo é dado a conhecer o hardware desenvolvido e utilizado no projecto da portaria virtual, sendo ainda apresentado o protocolo existente entre o módulo emissor e o receptor, tendo como objectivo a detecção de todos os utilizadores que cruzem a portaria virtual.

No final do capítulo são apresentados todos os resultados e medidas relacionadas com a implementação de uma portaria virtual.

1. No primeiro teste são efectuadas medidas de força de sinal a várias distâncias e para diferentes ângulos para um módulo colocado em campo aberto, onde se tenta evitar ao máximo a interferência do raio indirecto.
 2. No segundo teste é simulada uma portaria virtual em ambiente exterior a fim de testar um cenário real e comparar com o comportamento da situação anterior.
 3. Finalmente no último teste é simulada uma outra portaria virtual, mas desta vez em ambiente interior.
- No quinto capítulo as principais conclusões da dissertação são apresentadas assim como é apresentado alguns pontos relativos ao trabalho futuro que pode ser efectuado no âmbito desta dissertação.

Capítulo 2

Norma IEEE 802.15.4

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) é uma organização profissional sem fins lucrativos, que tem como objectivo promover o desenvolvimento tecnológico em benefício da sociedade. Para tal, são realizadas variadíssimas palestras, conferências e actividades, para além de serem produzidas normas e publicações, que auxiliam na padronização de diversas tecnologias relacionadas [5]. Uma dessas normas é a norma IEEE 802 que é alvo de discussão sumária nesta dissertação.

2.1 Enquadramento da norma IEEE 802

A norma *IEEE 802* tem como objectivo fornecer as especificações para a camada física e de controlo de acesso ao meio de uma rede sem fios. A norma é aplicada aos mais variados tipos de rede dos quais se destacam as seguintes [6]:

- 802.3- Ethernet
- 802.11- Redes locais sem fios (*WLAN*).
- 802.15- Redes de área pessoal sem fios (*WPAN*).

Nesta dissertação será alvo de discussão a norma 802.15, nomeadamente a norma 802.15.4 que normaliza as redes sem fios de débito baixo e consumo reduzido.

2.1.1 Redes WPAN 802.15

A norma *WPAN 802.15* define o padrão de rede de área pessoal sem fios, onde se prevê a ligação entre dispositivos distanciados até 300 metros [2]. O padrão 802.15 existe para garantir as especificações de redes pessoais com baixa potência e custo reduzido [3]. A norma define os seguintes tipos de redes:

802.15.1- É uma rede que se baseia na tecnologia Bluetooth e que permite a ligação sem fios de dispositivos fixos, portáteis e móveis (telemóveis e *PDA*'s);

802.15.2- É uma rede que permite facilitar a coexistência das redes *WPAN* com redes *WLAN*;

802.15.3- Rede dimensionada para débitos elevados (11-55Mbit/s) para aplicações multimédia e que necessitem de uma qualidade de serviço bastante elevada;

802.15.4- É uma rede de complexidade muito reduzida que funciona com débitos binários baixos. Esta característica permite um consumo reduzido permitindo que a bateria dure bastantes meses ou anos. As redes 802.15.4 podem ser utilizadas em dispositivos Zig Bee com alcance máximo de 300 metros [2];

802.15.5- Esta norma permite a coexistência numa rede em malha de uma rede de baixo débito e outra de débito elevado garantindo a intemporalidade, estabilidade e também a escalabilidade entre ambas as redes;

802.15.6- A norma 802.15.6 foca-se nas redes *BAN* (*Body Area Network*) que utilizam sensores espalhados pelo corpo humano, na roupa ou mesmo debaixo da pele. Desta forma o corpo humano torna-se um meio de transmissão ou recepção [15];

802.15.7- A norma 802.15.7 define a camada física e a camada de acesso ao meio de uma rede que permite em espaço livre a comunicação óptica utilizando a luz visível. Este tipo de rede surgiu em Janeiro de 2009;

802.15.8- Registado para um padrão da próxima geração de redes sem fios. Permite facilitar e estimular as apresentações e discussões sobre novas tecnologias sem fios que pode permitir criar novas redes 802.15.

A Figura 3 permite contextualizar a rede *LR-WPAN* na norma *IEEE 802*.

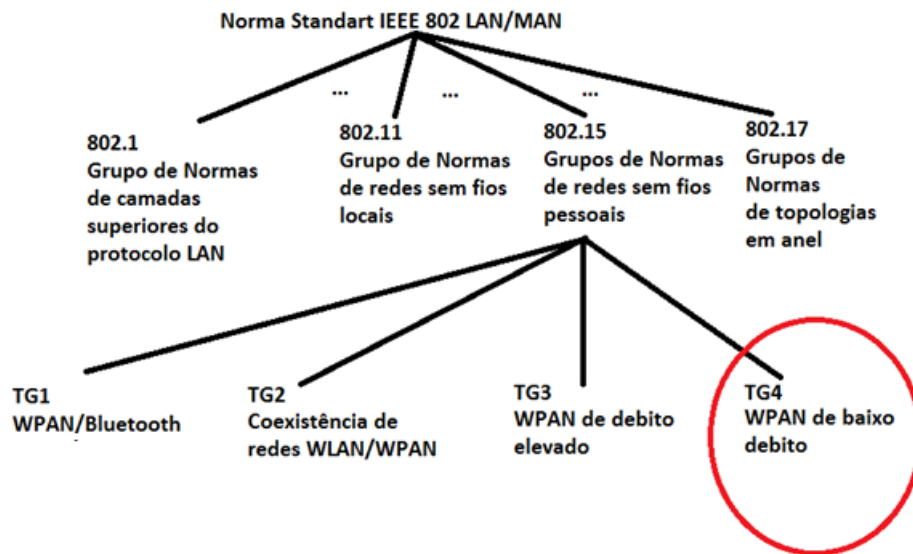


Figura 3 - Enquadramento da rede LR-WPAN na norma IEEE 802 [3].

2.2 Estudo da camada Física e a camada de acesso ao meio da norma IEEE 802.15.4

A Norma IEEE 802.15.4 fornece especificações sobre a camada física e camada de acesso ao meio para redes sem fios de débito baixo e consumo reduzido. Na Figura 4 pode-se verificar as subcamadas definidas dentro da camada física e da camada MAC (*Media Access Control*).

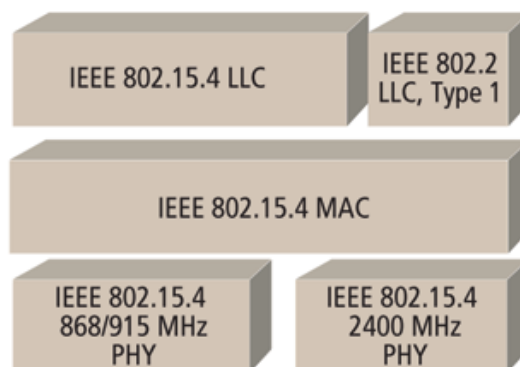


Figura 4- Norma IEEE 802.15.4 [8]

2.2.1 Camada Física

A camada física segue o protocolo 802.15.4 sendo responsável por permitir a transmissão das PDUs (*Protocol Data Units*), que não são mais que unidades de dados. Esta transmissão é efectuada com base em ondas rádio.

O padrão 802.15.4 especifica as seguintes características para a camada física:

- Existência de 3 bandas de frequência contidas em 27 canais.
- Define as modulações distribuídas nas 3 bandas de frequência.
- Possibilidade de configurar diversos níveis de segurança.
- Permite o endereçamento automático dos dispositivos.
- Possibilidade de confirmação de mensagens por intermédio de uma trama do tipo beacon.
- Acesso ao meio efectuado por CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*)

Bandas atribuídas

O IEEE 802.15.4 trabalha sobre as bandas de frequências denominadas como ISM (*Industrial Scientific Medicine*) de 868MHz (Europa), 915MHz (EUA) e 2.4GHz (mundialmente) que não precisa de ser licenciada. Na banda de 868MHz existe só um canal, e este embora permita apenas débitos binários até aos 20 Kbps, devido à sua baixa frequência, é o que sofre menos perdas de atenuação, permitindo oferecer uma maior área de cobertura [7].

Por sua vez nas bandas dos 915MHz e 2.4GHz estão disponíveis 10 e 16 canais respectivamente. Na banda dos 2.4GHz, que é a mais utilizada, o espaçamento entre canais é de 5MHz com uma largura de banda de 2.5MHz, podendo o débito binário pode atingir os 250kbps [7]. A divisão de espectro de frequência nas bandas *ISM* pode ser verificada na Figura 5.

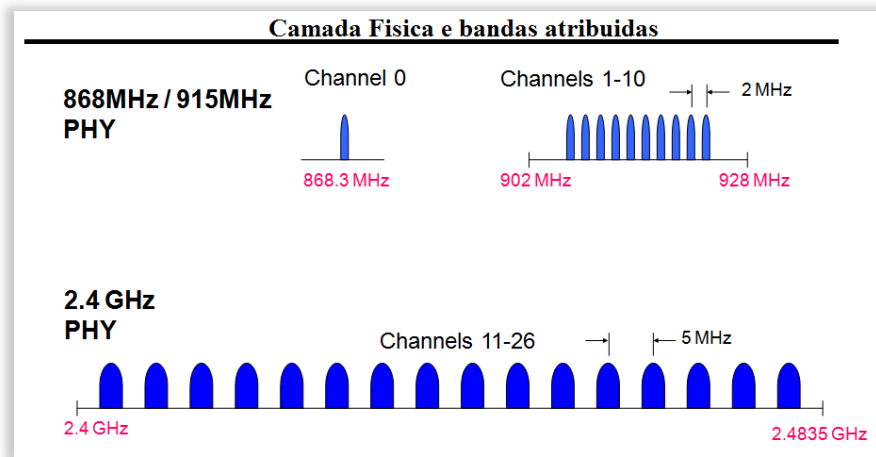


Figura 5- Faixa de frequências com a respectiva atribuição de canais [3].

Modulações utilizadas

As modulações padrão *IEEE 802.15.4* são o *BPSK* (Binary Phase Shift Keying) e o *O-QPSK* (Ortogonal-Quadrature Phase Shift Keying). Em ambas as modulações é aplicado um algoritmo de desvio de fase no transmissor. A grande vantagem de ser utilizada uma modulação em fase em vez de ser aplicada uma modulação em amplitude é que esta permite, que a equalização e a recuperação do sinal seja muito mais eficaz.

A modulação *BPSK* é codificada por apenas um bit e existe um desfasamento entre fases de 180° onde os valores são previamente conhecidos. No caso da modulação *O-QPSK* esta é codificada com quatro bits, o que permite que o débito seja quatro vezes superior por cada amostra, mas em contra partida, a margem de erro para recuperação do sinal seja quatro vezes menor.

Na banda de frequências 2.4GHz existe um ritmo de símbolo de 62.5 kBaund, que corresponde a 250Kbps para modulação de *O-QPSK*. As restantes bandas são moduladas apenas por um bit (*BPSK*), existindo um débito binário de 20Kbps na banda dos 868 MHz e 40Kbps na banda dos 915MHz conforme indicado na Tabela 1 [11].

Tabela 1- Comparativo entre os diferentes tipos de Bandas de Frequência

Banda de Frequências (MHz)	Modulação	Ritmo Binário (Kbps)
868-868,6	BPSK	20
902-928	BPSK	40
2400-2483,5	O- 16QPSK	250

Na camada física pretende-se uma interface de baixo custo com altos índices de integração. Este objectivo é cumprido com a utilização da técnica *DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)* na transmissão que assenta sobre a técnica de espalhamento espectral, que possibilita uma densidade espectral de potência muito baixa espalhando a potência do sinal sobre uma faixa de frequência muito larga [12], conforme se pode verificar na Figura 6.

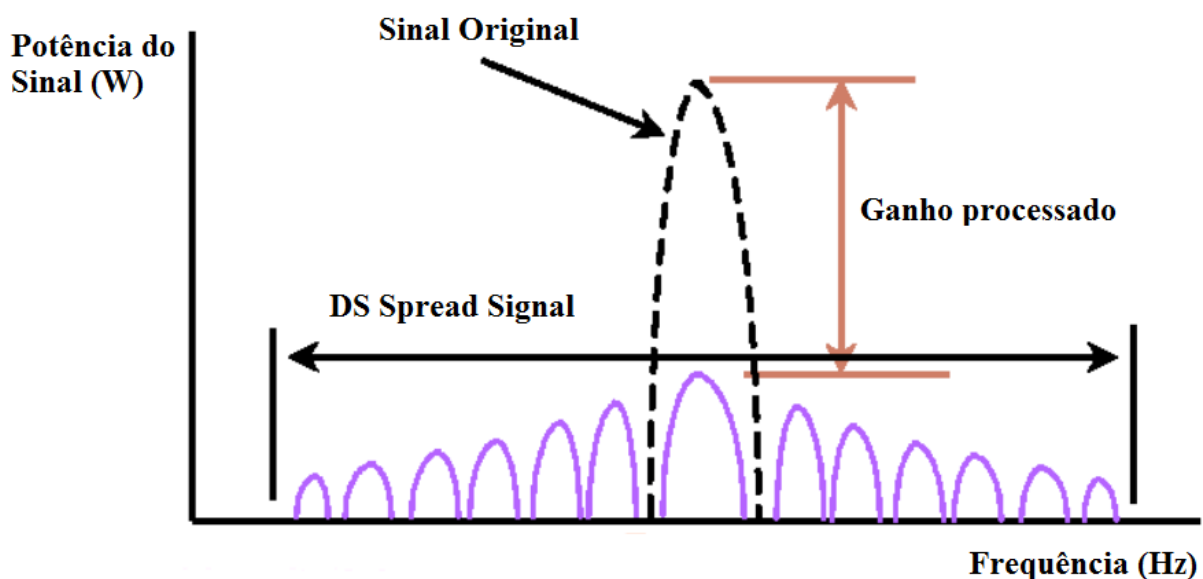


Figura 6- Técnica DSSS [9]

Qualidade da Ligação

O receptor ao receber um pacote devolve outro pacote designado por *LQI (Link Quality Indication)*, o qual permite avaliar a qualidade da ligação.

O pacote *LQI* fornece medições de força e de qualidade dos dados do pacote recebido no

receptor. Esta implementação pode ser feita utilizando um receptor ED (*Energy Detection*) e através da estimação da relação sinal ruído.

Esta medida pode variar entre os valores de 0x00 a 0xff e pode ser usada até à camada de rede ou de aplicação. As medições mínimas e máximas devem estar associadas à pior e melhor qualidade da norma IEEE 802.15.4 e deverá ser uniforme entre estes dois limites.

Detecção de energia do receptor

A detecção de energia do receptor (*ED*) é um atributo utilizado pela camada de rede para seleccionar o canal que se encontra em melhores condições para a transmissão e recepção

O tempo em que é detectada a energia *ED* tem de corresponder a oito períodos de símbolo. O resultado *ED* é representado em hexadecimal com oito bits, variando entre 0x00 a 0xff. O valor mínimo deve indicar a potência recebida com menos de 10dB em relação à sensibilidade especificada pelo receptor. A gama de potência recebida deve ser no mínimo de 40 dB, devendo ter uma escala linear, com uma precisão aproximada de ± 6 dB.

CS (Carrier Sense)

Tem a capacidade de identificar se há ocorrência de transmissão, ou explicitando doutra forma, quando o meio se encontra livre.

Detecção de Canais Livres

A camada física tem a capacidade de detectar se os canais estão ocupados. Esta detecção pode ser conseguida com o *Carrier Sense* com os sinais em *DSSS* ou quando o parâmetro *ED* estiver acima do limite do canal.

Potência do Transmissor e Sensibilidade de Recepção

A norma faz uso da tecnologia *RSSI* (*Received Signal Strength Indication*), tendo a finalidade de detectar a potência do sinal recebido. Aqui a potencia a transmitir tem que

forçosamente ser menor que 0.5mW devendo a sensibilidade no receptor ser maior que -85dB para a banda dos 2.4GHz e -92dBm para as restantes bandas [11].

Campos que determinam a trama da camada física

A trama da camada física exemplificada na Figura 7 é determinada por quatro campos diferentes:

- **Preamble** - Permite a sincronização da trama com uma sequência de 4 bytes conhecida pelo receptor.
- **Start of Packet Delimiter** - Permite determinar o começo dos dados a partir de um byte com valor conhecido.
- **Phy Header** - Indica a dimensão do campo de dados que pode variar entre 0 a 127 bytes.
- **PHY Service Data Unit (PSDU)** – Campo de dados transportado na trama da camada física.

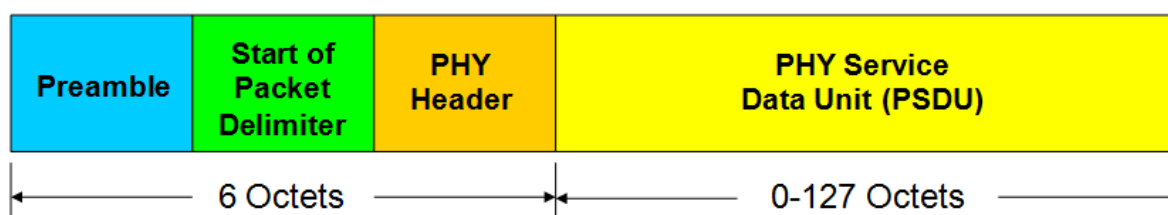


Figura 7- Campos que determinam a camada física [3].

2.2.2 Camada MAC

A camada *MAC* é responsável por todo o acesso à camada física para a transmissão e recepção de dados. Além disso permite controlar o acesso ao meio utilizando mecanismos de prevenção, colisão *CSMA-CA* (*Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance*) onde serão estabelecidas comunicações com a camada física. Além disso é efectuado o sincronismo enviando periodicamente tramas *Beacon*, criando uma relação de vizinhança com os dispositivos adjacentes. Contudo a camada *MAC* não se esgota nestes recursos possibilitando a validação de trama, reconhecimento de entrega de trama, associação e dissociação de dispositivos, gestão *GTS* (*Guaranteed Time Slot*), garante um nível de segurança bastante

elevado ao implementar o algoritmo de segurança que tem como objectivo proteger a confidencialidade, a integridade e a autenticidade das tramas [12].

A camada MAC possibilita dois tipos de serviços:

- **Serviço de informação MAC** - Este serviço permite a recepção e transmissão de unidades de informação do protocolo MAC (*MPDU-MAC protocol data unit*) através do serviço de informação da camada física [12].
- **Serviço de gestão MAC** - Na eventualidade deste dispositivo ser o coordenador da rede PAN, então a camada MAC faz a gestão dos *beacons* da rede [12].

De seguida descreve-se os diferentes tipos de identificadores que podem existir numa rede 802.15.4.

Endereçamento de rede

Um endereço de rede tem como finalidade definir os endereços de destino e origem. Aqui o protocolo 802.15.4 trabalha com 3 tipos de identificadores [13]:

- **Endereço MAC** - É um endereço de 64 bits, tendo um identificador globalmente único. Neste endereço os primeiros 24 bits são fornecidos ao fabricante do dispositivo pela IEEE;
- **Short Address** - É um identificador de 16 bits, denominado também por endereço de nó, sendo utilizado na identificação de um nó dentro de uma rede.

O referido endereço está ligado ao PAN ID. Através deste identificador tem-se a possibilidade de caracterizar um nó permitindo deste modo uma comunicação directa;

- **PAN ID** - É o identificador de 16 bits, utilizado para fazer a separação dos diferentes tipos de rede do mesmo local. Através deste diferente identificador, duas redes podem utilizar o mesmo canal, para a comunicação sem interferências.

Dispositivos de rede

A norma permite a existência de três tipos de dispositivos [11] [13] [14]:

- *PAN* Coordenador *FFD*
- Dispositivo de função completa (*FFD*)
- Dispositivo de função reduzida (*RFD*)

Os diversos tipos de dispositivos existentes que podem ser vistos na Figura 8 e têm as seguintes funcionalidades:



Figura 8 - Tipos de dispositivos existentes

PAN Coordenador FFD - Aqui o coordenador é único na rede. Este dispositivo tem mais funções que qualquer outro. Como coordenador da rede tem a capacidade de criar uma rede de raiz, comutar dados entre redes e ainda tem uma base de dados para armazenar a informação da rede.

Dispositivo de função completa (FFD) - Este dispositivo funciona em qualquer topologia de rede, tendo a capacidade de coordenar uma rede e ainda pode comunicar com qualquer outro dispositivo.

Dispositivo de função reduzida (RFD) - Os dispositivos *RFD* estão limitados à topologia em estrela. Nunca poderão ser coordenadores de rede, não conseguindo comunicar com outro dispositivo *RFD* e são muito simples de implementar. Estes dispositivos são sempre terminais e são dotados de menor capacidade de memória e potência, tornando-se mais simples e de menor custo, garantindo um consumo de energia ainda mais reduzido, porque estão

desligados a maior parte do tempo. Os *RFD* permitem controlar ou monitorizar dispositivos como sensores, microcontroladores, actuadores e outros.

Topologias de redes

Consoante os requisitos pretendidos, existem várias topologias com o fim de acomodarem as exigências impostas. As redes podem ser mais robustas, com mais ou menos custos ou serem mais ou menos centralizadas ou distribuídas.

As redes podem utilizar topologias em estrela, malha, árvore ou mesmo uma topologia combinada conforme apresentado na Figura 9. Na topologia em estrela existe um dispositivo central que controla e gere toda a rede. Numa rede em malha todos os dispositivos podem ajudar a gerir a rede, desde que não sejam do tipo *RFD*. Na topologia em árvore utiliza-se uma estratégia de encaminhamento hierárquico, comunicando o coordenador com os módulos de encaminhamento e estes com os dispositivos finais. Com a utilização dos módulos que encaminham a informação é possível geograficamente expandir a rede, contudo os dispositivos que encaminham os dados não se conseguem comunicar entre si, apenas com o coordenador. A topologia combinada está reservada para redes mais complexas podendo utilizar-se um misto de várias topologias.

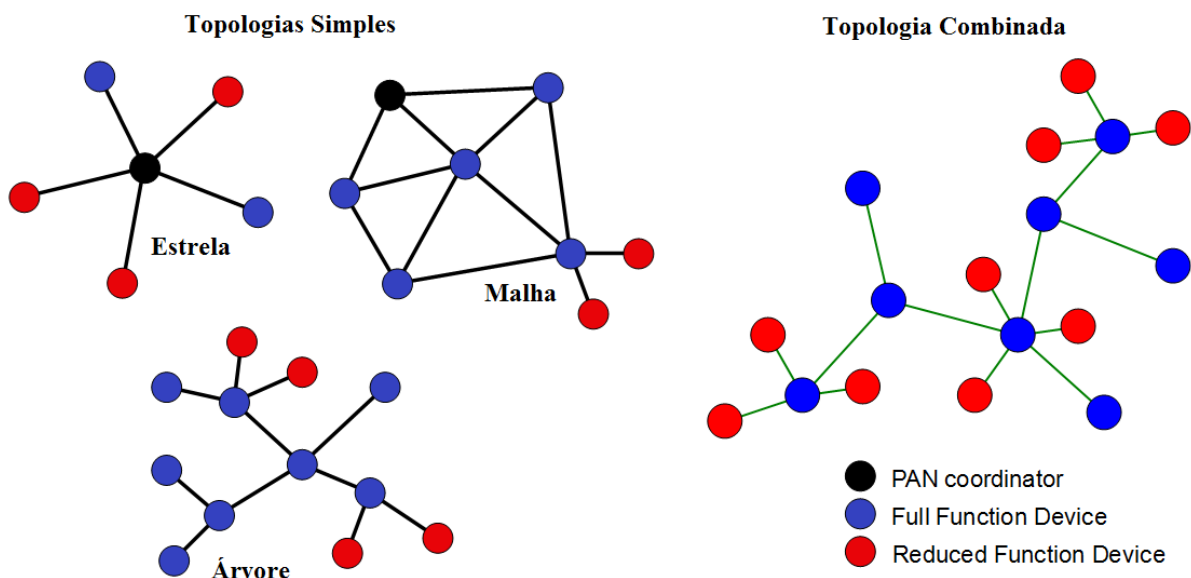


Figura 9- Topologias possíveis com os dispositivos existentes [3].

No presente trabalho não sendo o objectivo dimensionar uma rede, pode-se no entanto referir que se pretende aplicar este tipo de rede numa escola, sendo que o mais indicado será utilizar uma topologia em estrela, onde existe uma unidade coordenadora *PAN* como elemento central, associado a uma base de dados que gere diversos dispositivos *RFD* que recolhem dados dos utilizadores. Ou então se a dimensão da mesma for elevada pode optar-se por uma topologia combinada onde podem ser agregadas varias topologia em estrela.

Tipos de estruturas de tramas

No padrão IEEE 802.15.4 existem quatro tipos de tramas [11]:

- Tramas *Beacom* - Utilizada pelo coordenador de rede para enviar *beacons*;
- Trama de dados- Utilizada por todos os dispositivos para enviar dados;
- Trama *ACK*- Utilizada por todos os dispositivos para confirmar a entrega de dados;
- Trama *MAC*- Utilizada por todos os dispositivos para executar funções referentes à camada MAC;
- Super trama- O seu uso é opcional e permite a coexistência pacífica entre diversos clientes da rede sem fios, quando estes necessitam de qualidade de serviço com outros que não requerem nenhuma prioridade no uso da rede. Na *super trama* é utilizado o mecanismo de reserva de time slots (*GTS- Guaranty Time Slot*) conforme pode verificar na Figura 10 [12].

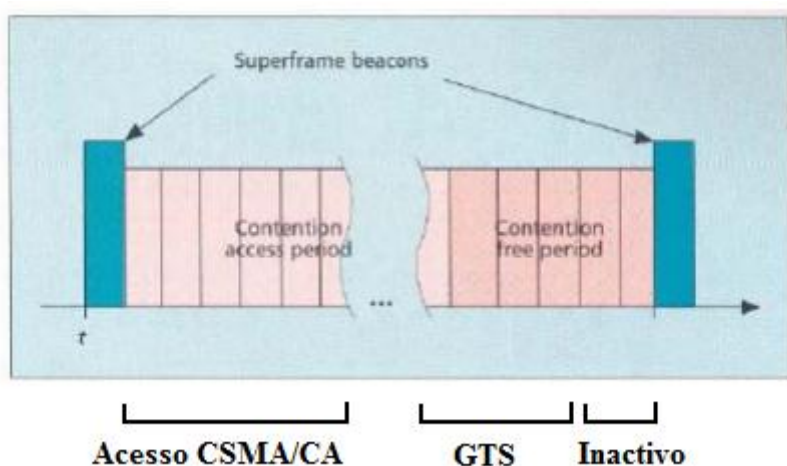


Figura 10- Estrutura de uma super trama.

Capítulo 3

Projecto da antena a utilizar

No presente capítulo são resumidos de uma forma sucinta os princípios básicos de funcionamento de uma antena impressa, onde são explicadas as suas características, as suas vantagens e desvantagens, em relação a outros modelos de antenas e técnicas de dimensionamento.

Posteriormente são apresentados os resultados do dimensionamento de 3 antenas impressas com o objectivo de se chegar a um dimensionamento mais adequado à aplicação. O desempenho destas será um elemento chave para que se consiga detectar com sucesso a passagem de utilizadores numa portaria virtual. Por fim, são apresentados os resultados medidos das antenas recorrendo a uma camara anecóica e efectuado o comparativo com os resultados simulados recorrendo a um simulador electromagnético.

3.1 Introdução

Um dos objectivos desta dissertação de Mestrado é o projecto de uma antena destinada a aumentar a eficiência de uma placa desenvolvida pela empresa Micro I/O, que contém um módulo 802.15.4 que permite aplicar a norma na banda livre dos 2.4GHz.

A placa inicial tem um módulo que já tem incorporado uma antena, tal como se pode ser visto na Figura 11. No entanto a antena apresentada não tem as características necessárias ao bom desempenho do módulo como transmissor, quando o objectivo principal é a sua utilização numa portaria virtual, uma vez que o diagrama de radiação é omnidireccional, sendo que nesta aplicação necessitamos de um diagrama de radiação que seja relativamente directivo.



Figura 11- MRF24J40 2.4GHz Modulo Transceiver

Neste trabalho conclui-se que a antena pretendida deveria radiar apenas para a frente da placa do circuito impresso, com uma *LFMP* (Largura de feixe a meia potência) o mais apertado possível no plano horizontal sendo no plano vertical não seria tão limitativo.

A placa tem uma antena que apresenta um diagrama de radiação omnidireccional e portanto não reúne as características ideais para funcionar em modo de transmissão uma vez que se pretende que o diagrama de radiação esteja confinado a uma direcção limitada pela abertura da portaria virtual. Desta forma pretende-se uma antena que tenha um diagrama de radiação com alguma directividade e que ilumine apenas a entrada da portaria.

Assim torna-se necessário garantir novas características ao módulo de transmissão com o dimensionamento de uma nova antena. Esta deve permitir melhores características para um projecto de portaria virtual. Nesta aplicação uma antena impressa é ideal, porque tem um plano de massa na face inferior e por isso teoricamente não radia para trás o que é bom para a aplicação em causa porque permite que o diagrama de radiação da antena esteja apenas direccionado para os receptores móveis, não radiando para trás. Para além disso, sendo impressa consegue-se que seja leve, que apresente uma dimensão bastante reduzida, de fácil construção, que seja versátil na sua instalação e fácil de integrar no circuito.

Nas antenas dimensionadas podem-se ainda destacar as seguintes vantagens:

- A antena beneficia de um ganho razoável;
- A antena apresenta uma *LFMP* apertada num determinado plano privilegiando desta forma a sua directividade, que vai melhorar o seu índice de selectividade junto de uma portaria virtual;
- A antena deverá apresentar uma polarização circular. Esta característica adequa-se

melhor à mobilidade existente nos receptores móveis, que deste modo ficam independentes da posição em que se encontram.

3.2 Antenas impressas

Nas aplicações de alto desempenho como é o caso da construção de naves espaciais, satélites ou mísseis, a dimensão, custo, desempenho e fácil instalação surgiram como requisitos essenciais. Actualmente existem muitas outras aplicações, comerciais como por exemplo os sistemas de rádio móvel e as comunicações sem fios que têm especificações similares. Para cumprir estes requisitos, as antenas impressas são uma boa solução.

Estas antenas apresentam um baixo perfil, baixo custo de fabrico, são mecanicamente robustas quando montadas em superfície rígidas e se forem desenhadas sobre forma de *patch* existem técnicas que permitem dimensionar facilmente a frequência de ressonância, polarização e impedância de entrada.

Comparativamente com outro tipo de antenas e dependendo do tipo de substrato, as antenas impressas apresentam geralmente como limitações uma eficiência baixa, factor de polarização fraco, uma baixa largura de banda e um ganho moderado. No entanto existem técnicas que permitem melhorar significativamente cada um destes problemas mencionados.

Como mostra a Figura 12, uma antena impressa é formada num dos lados por um material condutor, passando a funcionar como plano de massa. No lado oposto apenas uma parte foi preenchida com material condutor funcionando como elemento radiante. Isto tudo assente sobre um substrato com uma determinada altura (h), com uma constante dieléctrica relativa (ϵ_r) e uma tangente de perdas, δ , uma vez que o substrato pode apresentar perdas.

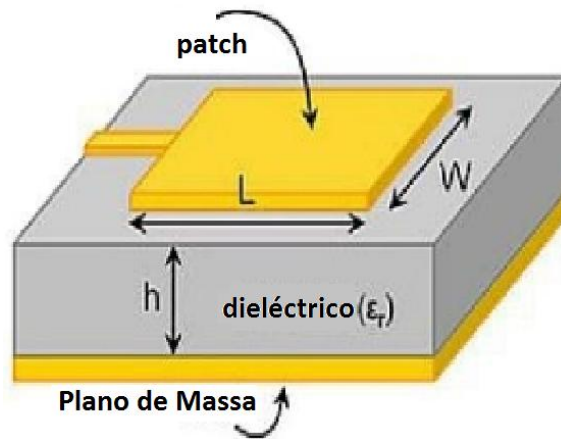


Figura 12- Representação de uma Antena impressa.

Para implementar uma antena mais directiva e portanto com um ganho superior é sempre possível implementar agregados de antenas.

3.2.1 Especificações de Substrato

A escolha do substrato é importantíssimo para o dimensionamento da antena. Pois as suas características físicas são determinantes para o seu bom desempenho.

Neste sentido, se o objectivo for maximizar os efeitos de radiação, a antena terá que ser alimentada por um cabo coaxial, escolhendo-se preferivelmente um substrato com uma altura, h , maior e constante dielétrica menor. Se ao invés, a ideia for implementar apenas uma linha de transmissão, que guie a energia electromagnética, então deve-se escolher de preferência um substrato de características contrárias. Por fim, se o objectivo for implementar as duas situações em simultâneo, com a antena a ser alimentada por uma linha de transmissão, deve-se assumir um compromisso.

Os critérios duma permitividade eléctrica baixa, também o preço e as características mecânicas do material foram tidas em conta para a escolha do substrato.

O substrato escolhido foi o Rogers RT/Duroid 5870, que tem como características uma permitividade relativa de 2.33, uma tangente de perdas de 0.0012 e uma altura de 3.175mm.

3.2.2 Dimensionamento da Frequência de Ressonância

Como as dimensões do *patch* são finitas ao longo do comprimento (L) e da largura (W), irá ocorrer um efeito de fuga das linhas de campo como é visível na Figura 13 [19]. Este efeito faz com que o campo se prolongue para lá da camada condutora superior. Deste modo, aparece o conceito de constante dielétrica efectiva ($\epsilon_{r_{eff}}$), largura efectiva (W_{ef}) e comprimento efectivo (L_{ef}).

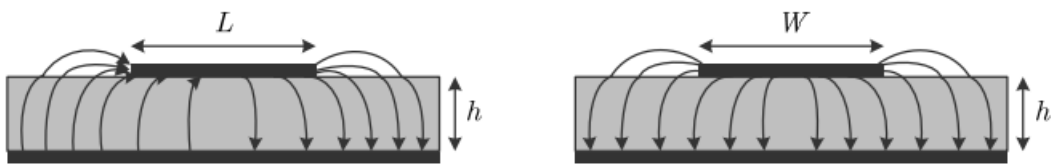


Figura 13- Efeito do campo de fuga[16].

A permitividade efectiva surge devido ao facto dos efeitos das linhas de campo estar em dois meios distintos, o ar e o substrato como se pode verificar na Figura 14. O valor desta permitividade efectiva é calculado com base na equação 1.

$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-0.5} \quad (1)$$



Figura 14- Resultado da constante dielétrica efectiva [16].

A frequência de ressonância deve ter em conta os efeitos de fuga das linhas de campo, que confere uma distância adicional designada por ΔL tal como representa na Figura 15.

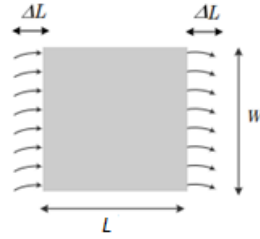


Figura 15- Dimensão adicional contabilizando os efeitos de campo de fuga [16].

A distância adicional (ΔL) devido ao efeito de fuga das linhas de campo é obtida pela equação 2. A partir do valor de ΔL é possível obter o comprimento efectivo da antena, dado pela equação 3.

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (2)$$

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (3)$$

A frequência de ressonância (f_r), tendo em conta o efeito de fuga das linhas de campo é obtida pela equação 4.

$$f_r = \frac{c}{2L_{ef} \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (4)$$

3.3 Dimensionamento da antena

Simulando iterativamente a partir das características do substrato RT/duroid 5870 o processo da construção da antena sofreu inúmeras evoluções até se chegar ao protótipo final.

A primeira etapa consistiu em dimensionar uma antena impressa simples, para uma frequência de acordo com o imposto pela norma 802.15.4. Neste caso optou-se por uma frequência de 2.41GHz. Para além disso pretendia-se promover uma adaptação o melhor possível para 50Ω e com polarização linear.

No seguimento da primeira etapa, a fim de obter polarização circular, efectuou-se o corte em cantos opostos da antena e redimensionou-se a linha de transmissão de modo a manter a mesma frequência de ressonância e adaptação em 50Ω.

Posteriormente de modo a apertar a *LFMP* num dos planos foi elaborado um agregado de duas antenas. A sua construção baseou-se na primeira antena dimensionada, que manteve assim os parâmetros fundamentais. Foram redefinidas novas linhas de transmissão de modo a unir as duas antenas e garantir uma adaptação razoável para a 50Ω .

Por fim, de modo a garantir uma maior directividade da antena em relação ao exemplo anterior, dimensionou-se um agregado de quatro antenas a partir do agregado anterior, sendo redefinido uma vez mais o dimensionamento das linhas de transmissão por forma a manter a adaptação num nível aceitável.

O projecto das antenas foi baseado em simulação electromagnética utilizando o simulador *HFSS (High Frequency Structural Simulador)* [17].

3.3.1 Antena impressa simples

O primeiro ensaio tem como objectivo obter uma antena que fosse ressonante na banda de frequências centrada em 2.4GHz utilizando uma polarização linear. Sabe-se que a norma impõe uma gama de frequências situada entre os 2.4GHz e os 2.4835GHz, onde é permitido seleccionar um dos 16 canais em que cada canal tem uma largura de banda de 2.5MHz. Para que a antena cumprisse estes requisitos foram calculadas as suas dimensões por cálculo analítico. Posteriormente a dimensão da antena foi ajustado em simulação obtendo-se desta forma os valores do comprimento, *L* e largura, *W* com um valor de 38.75 mm. A sua alimentação foi efectuada utilizando-se o cabo coaxial, de modo a garantir uma boa adaptação aos 50Ω . A localização do ponto de alimentação é indicada na Figura 16.

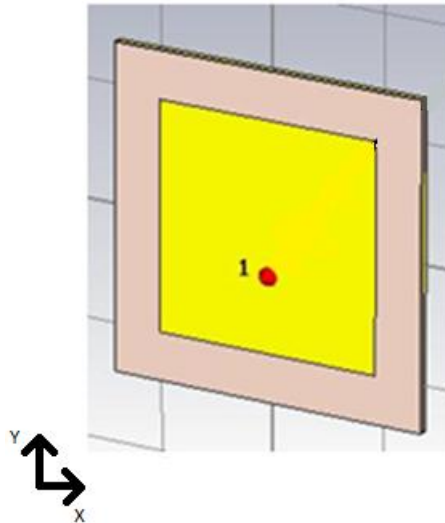


Figura 16 - Antena impressa simples com polarização linear.

Numa segunda fase fez-se o projecto de uma antena impressa simples mas agora com polarização circular de forma a que a frequência desta coincida com a da adaptação da antena. Finalmente decidiu-se alimentar a antena por linha de transmissão, achando-se que é o processo mais apropriado para o desenvolvimento do protótipo final.

A frequência de ressonância e as medidas do pacht da antena foram obtidas primeiramente por cálculo analítico recorrendo-se às equações 1,2,3 e 4. Posteriormente por simulação ajustaram-se os valores de L (comprimento) e W (largura) aos valores ideais, assim como se determinou as dimensões da linha de alimentação.

Na Figura 17 são apresentadas as dimensões da antena, linha de alimentação e também do substrato.

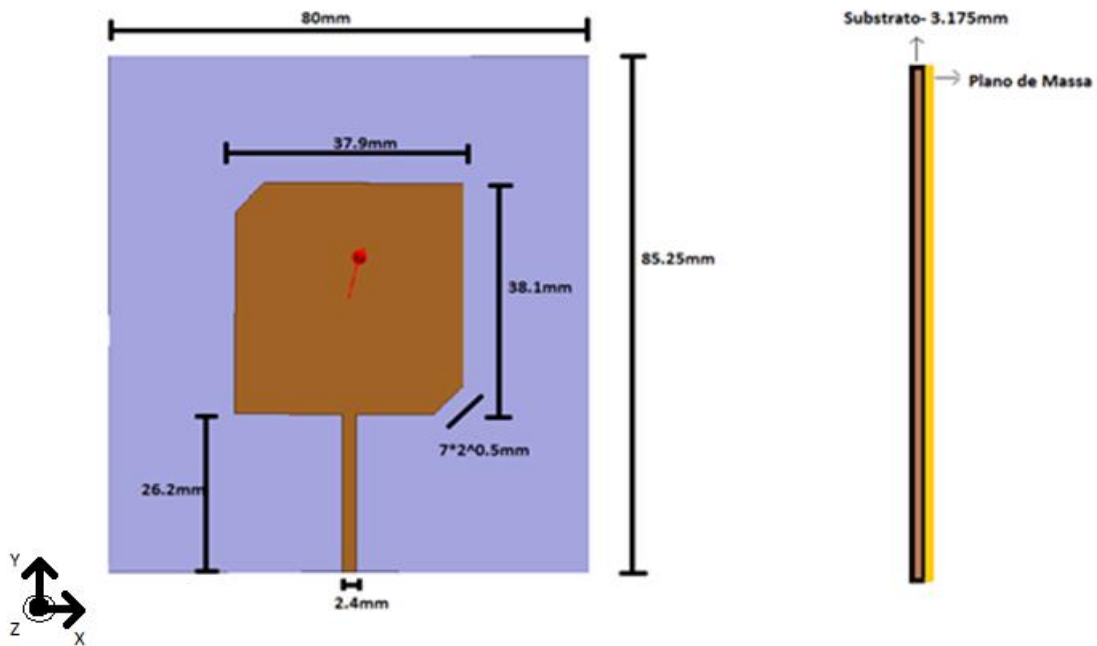


Figura 17 - Dimensões da antena visto de frente (esquerda) e lateral (direita)

A Figura 18 mostra a antena impressa simples, que é alimentada por uma linha de transmissão. Ela é representada pela superfície de cobre assente sobre o substrato Rogers RT/Duroid 5870.



Figura 18 – Antena impressa simples

A alimentação da referida antena é feita por linhas de transmissão.

Principais características deste tipo de alimentação

- Não tem uma influência significativa no diagrama de radiação.
- Não aumentam significativamente o tamanho da antena.

O comprimento e a largura da linha de transmissão foram efectuados por simulação. Na parte inicial da linha de transmissão há uma impedância de $Z=(57.7-3.8j)\Omega$, originando uma adaptação de -21.8828dB à frequência de interesse (2.41GHz).

A banda de interesse está toda coberta, tendo um bom nível de adaptação abaixo dos -10dB , com uma largura de banda de 115MHz , como se confirma a partir da Figura 19. Os canais cobertos pela referida largura de banda são 13, respectivamente do 11 ao 23, ficando os restantes (24, 25 e 26) sem cobertura.

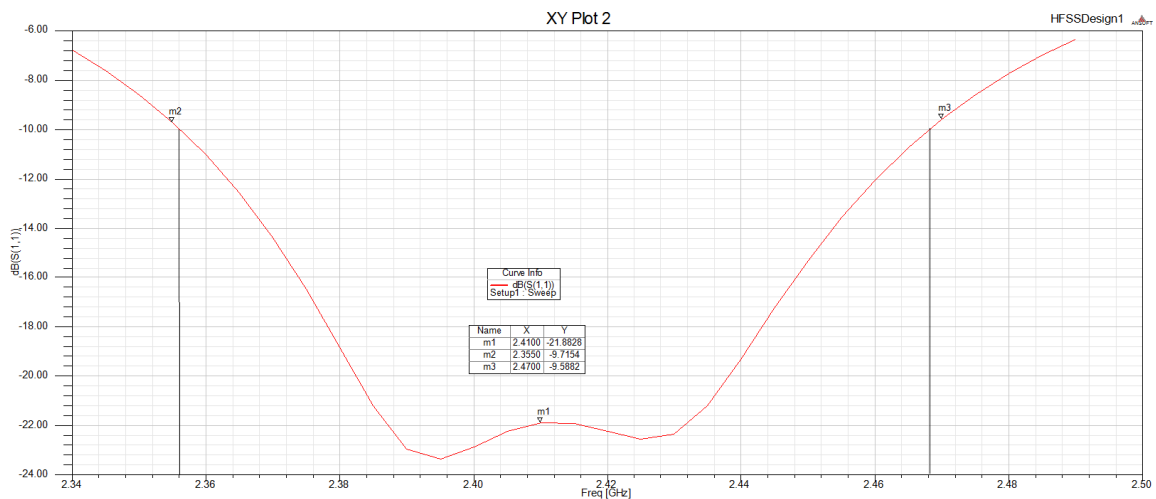


Figura 19- Adaptação S_{11} da antena para um porto de 50Ω .

Axial Ratio

A fim de obter a polarização de interesse, a circular (esquerda), foram efectuados cortes nos cantos em extremos opostos no patch rectangular. Para dimensionar os cortes é necessário ter em consideração que quanto maior for o corte, melhor é a relação Axial Ratio. Por sua vez, à medida que este aumenta, mais difícil será a adaptação à antena, existindo desta forma uma maior influência negativa na adaptação. A Figura 20 mostra que foi obtido um Axial Ratio de 0.351dB à frequência de 2.41GHz , sendo bastante aceitável porque se encontra abaixo dos 3dB .

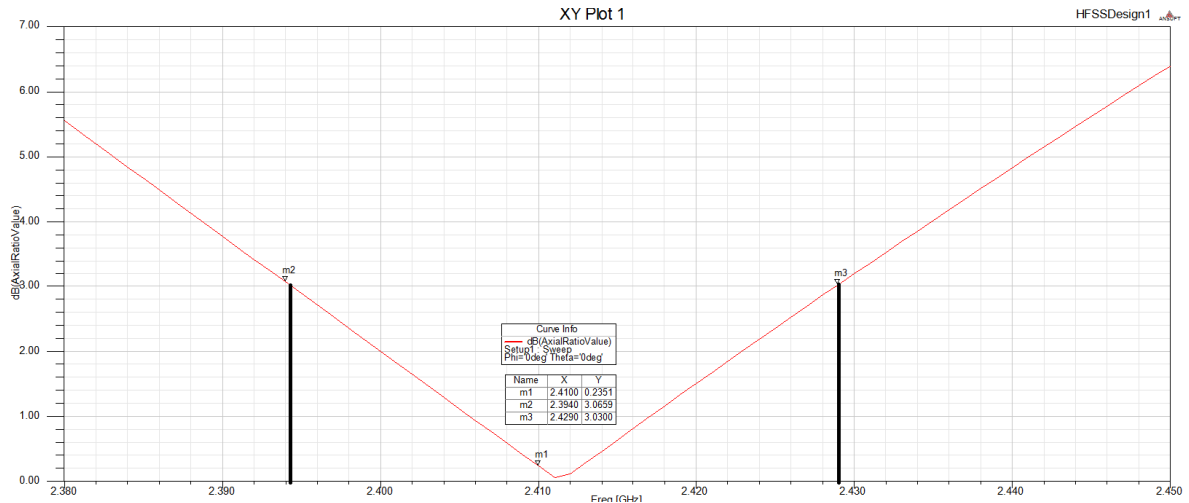


Figura 20 - Relação Axial Ratio da antena de 0.2351dB (1.0556) na frequência 2.41GHz.

Diagrama de Radiação

A Figura 21 mostra que o diagrama de radiação é similar no plano horizontal e vertical, existindo para os dois casos a mesma *LFMP* de 80° e um ganho máximo de 7.75dBi. Também se pode concluir que o diagrama de radiação da antena apenas é projectado para a frente existindo desde já uma melhoria importante para a antena do primeiro modulo desenvolvido pela empresa Micro I/O, que apresenta um diagrama de radiação omnidireccional.

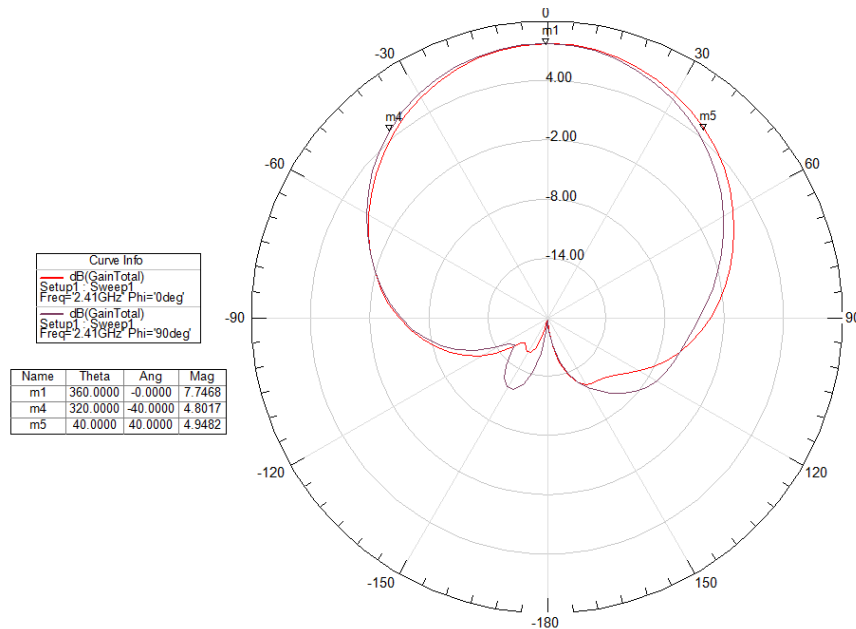


Figura 21- Diagrama de radiação com $\varphi = 0^\circ$ (vermelho) e $\varphi = 90^\circ$ (azul)

3.3.2 Agregado de 2 antenas impressas

O objectivo do ensaio com o dimensionamento de um agregado de duas antenas, é fazer com que a antena fique ainda mais directiva num dos planos. A partir do primeiro dimensionamento, o grande desafio agora prendia-se em alimentar duas antenas a partir de um ponto, por intermédio de linhas de transmissão, sem se perderem as características do primeiro dimensionamento. Nesse sentido, a partir da impedância da linha de transmissão de 50Ω dimensionado no exemplo anterior, foi aplicado um transformador de $\lambda/4$ de 70.7Ω para obter uma impedância final de 100Ω . Como duas linhas em paralelo de 100Ω resultam numa impedância de 50Ω , apenas foi necessário acrescentar uma linha de transmissão com a mesma impedância de modo a obter a adaptação ao porto de 50Ω abaixo dos -20dB .

As medidas do dimensionamento da antena podem ser verificadas na Figura 22.

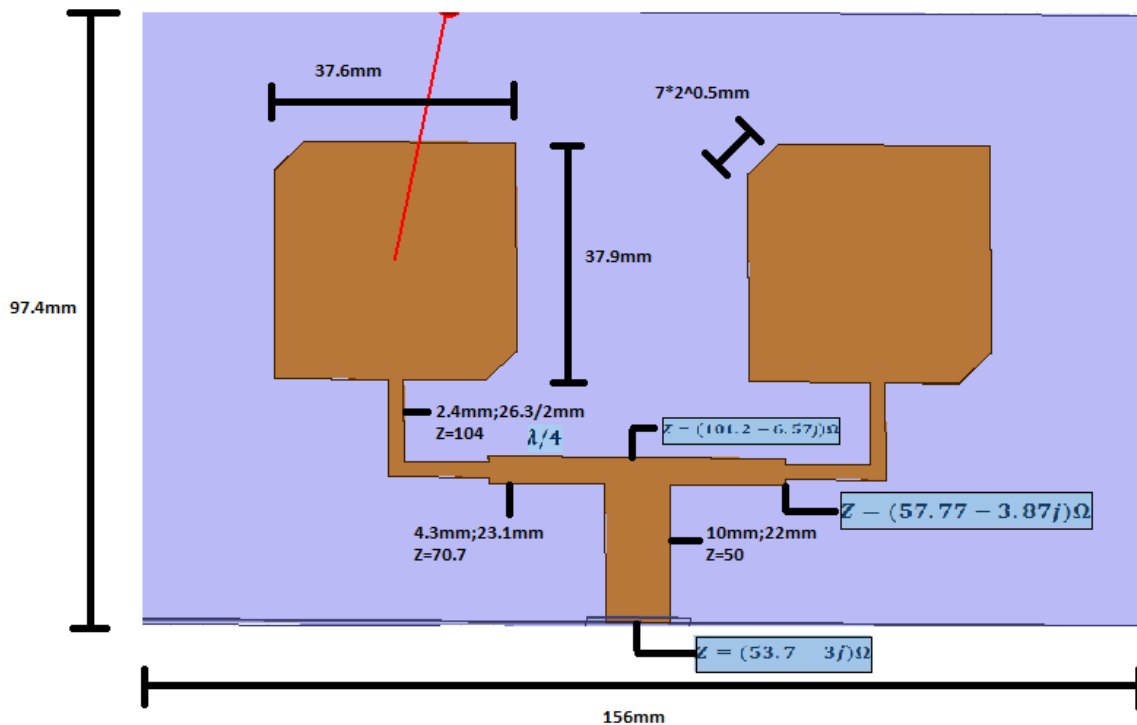


Figura 22 - Dimensões do agregado de duas antenas visto de frente.

A antena construída pelas medidas verificadas na Figura 22 pode ser verificada na Figura 23.

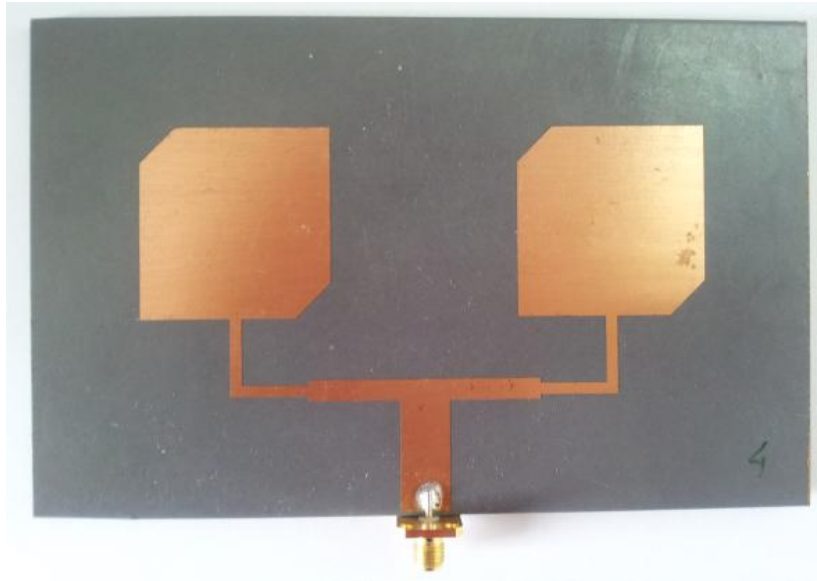


Figura 23 – Agregado de duas antenas impressas

Adaptação da antena a um porto de 50Ω

Como a linha de transmissão é terminada por uma impedância de $(53.7-3j)\Omega$ provoca uma reflexão de -24.23dB no porto de alimentação de 50Ω que é possível verificar na Figura 24.

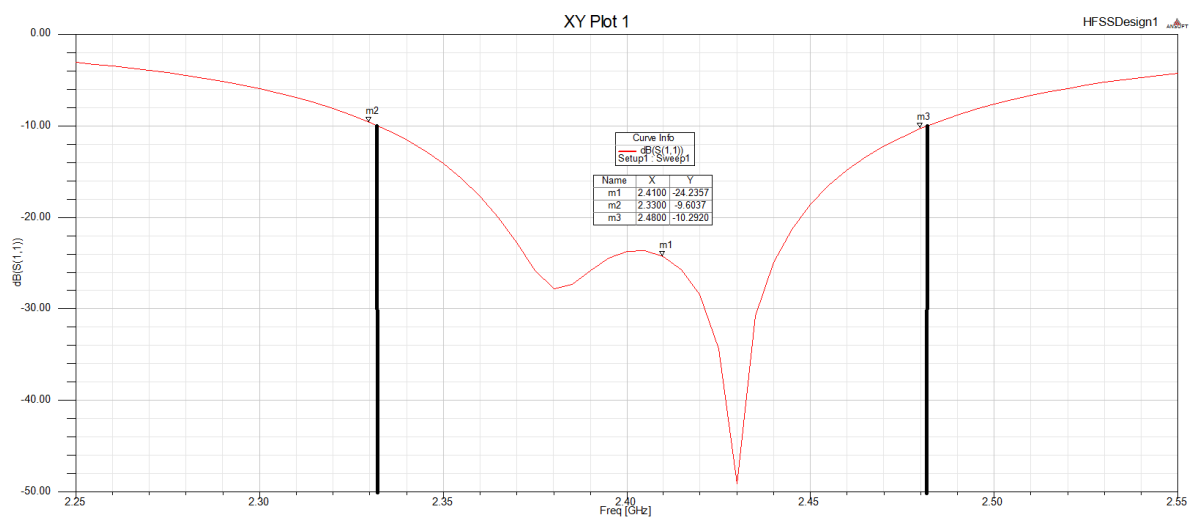


Figura 24- Adaptação S_{11} a -24.236dB à frequência de ressonância de 2.41GHz

Axial Ratio

A Figura 25 comprova que o Axial Ratio à frequência de ressonância é de 0.7315dB (1.26), o que se pode considerar um valor bastante aceitável. A banda de frequências para um Axial Ratio abaixo dos 3dB é de 30.5MHz.

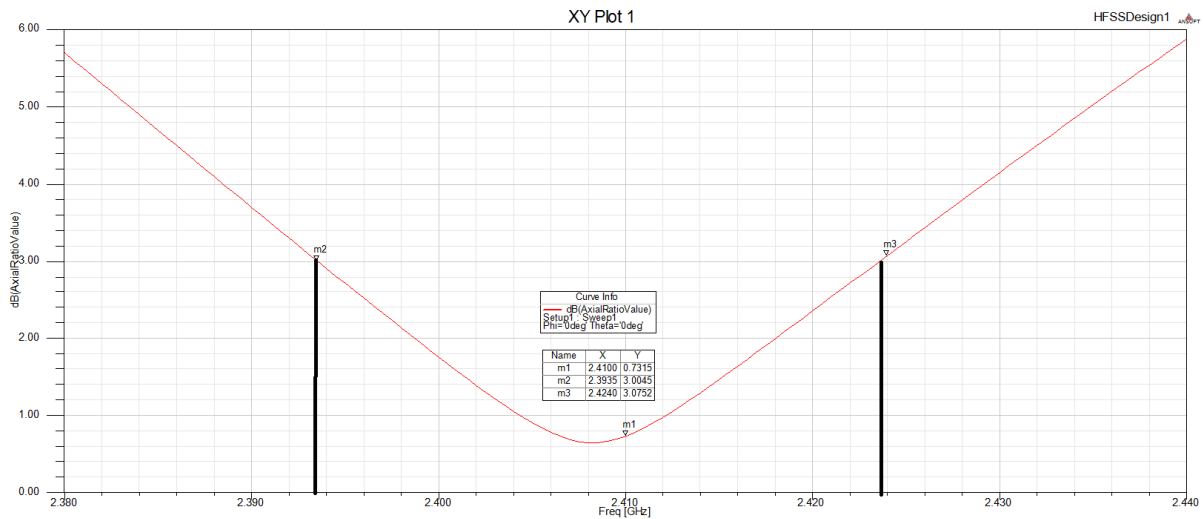


Figura 25- Relação do Axial Ratio 0.7315dB (1.26) na frequência de 2.41GHz.

Diagrama de Radiação

A Figura 26 representa o diagrama de radiação para $\phi=0^\circ$ e $\phi=90^\circ$. Como se pode verificar o diagrama de radiação com $\phi=0^\circ$ é muito mais directivo relativamente ao exemplo anterior passando de uma *LFMP* de 80° para 43° . Em relação ao plano com $\phi=90^\circ$ ocorre apenas uma diminuição de 10° na *LFMP*.

O ganho simulado desta antena é de 10.5dBi que constitui um aumento de 3dB relativamente ao exemplo anterior como seria de prever, ou seja a antena está mais directiva e com uma *LFMP* menor.

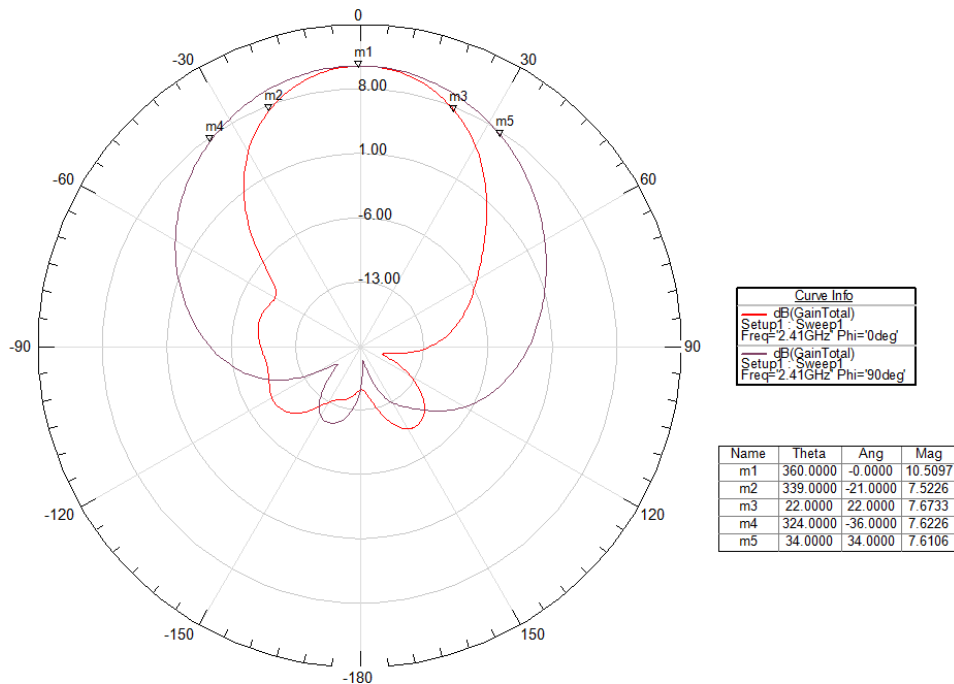


Figura 26- Diagrama de Radiação para $\phi=0^\circ$ e $\phi=90^\circ$.

3.3.3 Agregado de 4 antenas impressas

Finalmente o último ensaio consiste em tornar a antena ainda mais directiva num dos planos. Para o efeito, foram dimensionadas 4 antenas em vez de duas. Dimensionou-se mais uma vez o agregado de 4 antenas obtido a partir do dimensionamento do agregado de duas do exemplo anterior, onde é necessário existir uma adaptação das linhas de transmissão ao porto de 50Ω . Como se pode verificar na Figura 27 existe uma impedância próxima dos 50Ω no ponto **A**, que foi dimensionado a partir do exemplo anterior. A partir deste ponto aplicou-se um transformador de $\lambda/4$ de 70.7Ω , de modo a obter uma impedância no ponto **B** de 100Ω . Do ponto **B** ao ponto **C** dimensionou-se uma linha de transmissão de 100Ω , a fim de preservar a impedância do ponto **B** no ponto **C**. No ponto **C** como existem duas linhas de transmissão em paralelo com a mesma impedância provenientes do agregado de duas antenas, faz com que a sua impedância resultante seja de 50Ω . Para obter uma impedância final no ponto **D**, tendo de ser igualmente de 50Ω acrescentou-se apenas uma linha de transmissão de 50Ω .

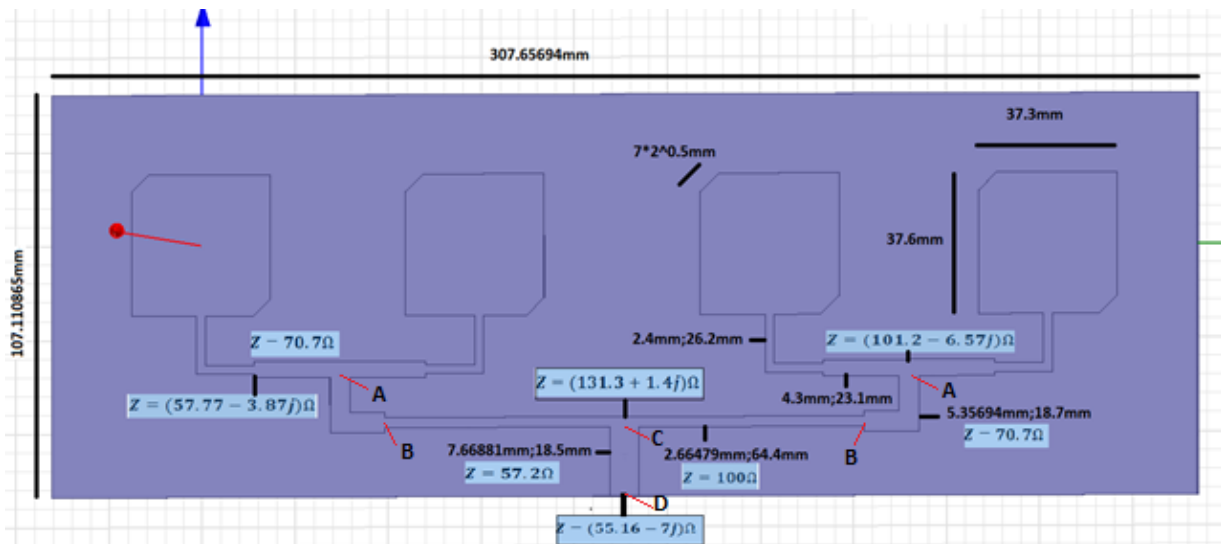


Figura 27- Dimensões do agregado de 4 antenas visto de frente.

Adaptação da antena a um porto de 50Ω

A partir da Figura 28, torna-se possível verificar que a linha de transmissão é terminada com uma impedância de $(55.16-7.05j)\Omega$, o que origina uma reflexão de -21.2935dB no porto de alimentação de 50Ω . A banda de frequências abaixo dos 10dB's está situada em 145MHz

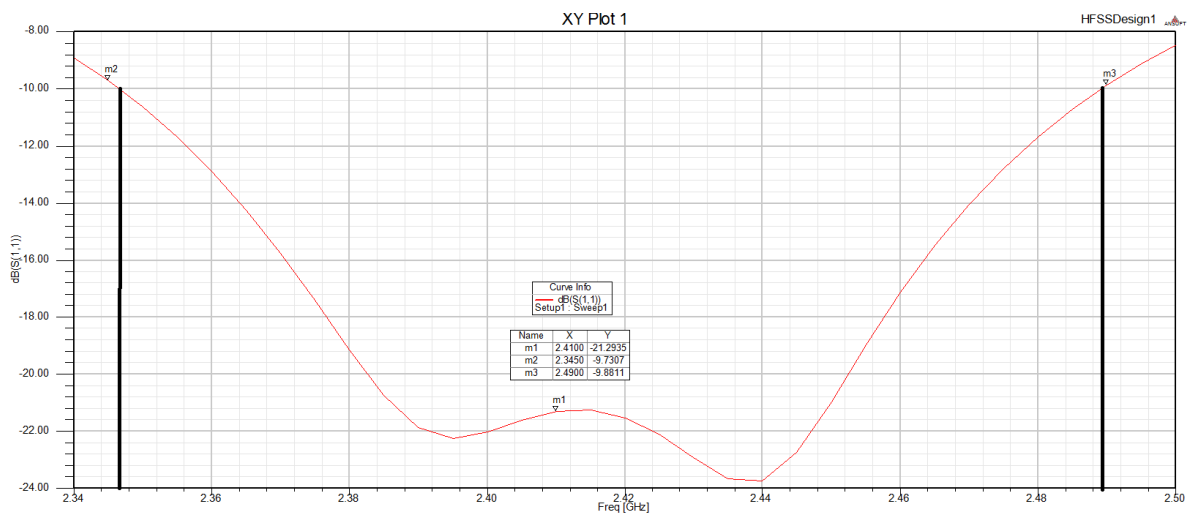


Figura 28 - Adaptação do agregado de 4 antenas de -21.2935dB à frequência 2.41GHz.

Axial Ratio

A Figura 29 permite identificar uma banda de frequências de 33MHz, as quais permitem obter uma razoável polarização circular, pois estas encontram-se abaixo dos 3dB, aumentando assim a escolha do canal a utilizar na norma 802.15.4.

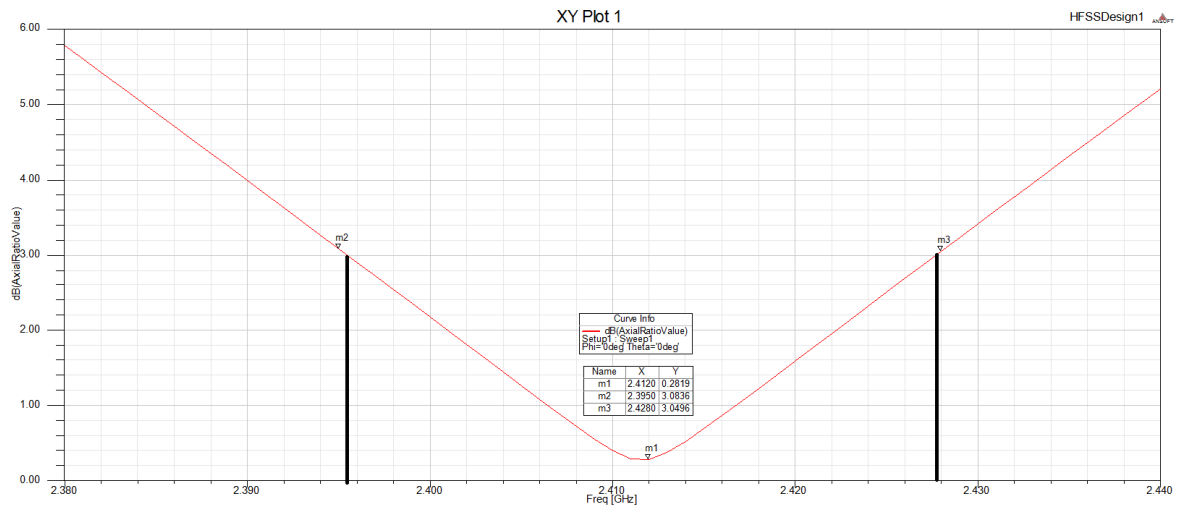


Figura 29 - Axial Rate de 0.28 (1.07) à frequência de 2.41GHz.

Diagrama de Radiação

À semelhança do que aconteceu no exemplo anterior, pode-se verificar na Figura 30 que o diagrama de radiação para “ $\varphi=0^\circ$ ” a antena tornou-se ainda mais directiva com uma *LFMP* a 20° . A *LFMP* para “ $\varphi=90^\circ$ ” manteve-se praticamente inalterável (72°) como seria de prever. Ainda é possível observar que existe um ganho de mais 3dB relativamente ao exemplo anterior. Como resultado antena ficou com um ganho máximo de 13.202 dBi, onde a amplitude dos lobos secundários aumentaram também consideravelmente, o que está de acordo com a teoria dos agregados.

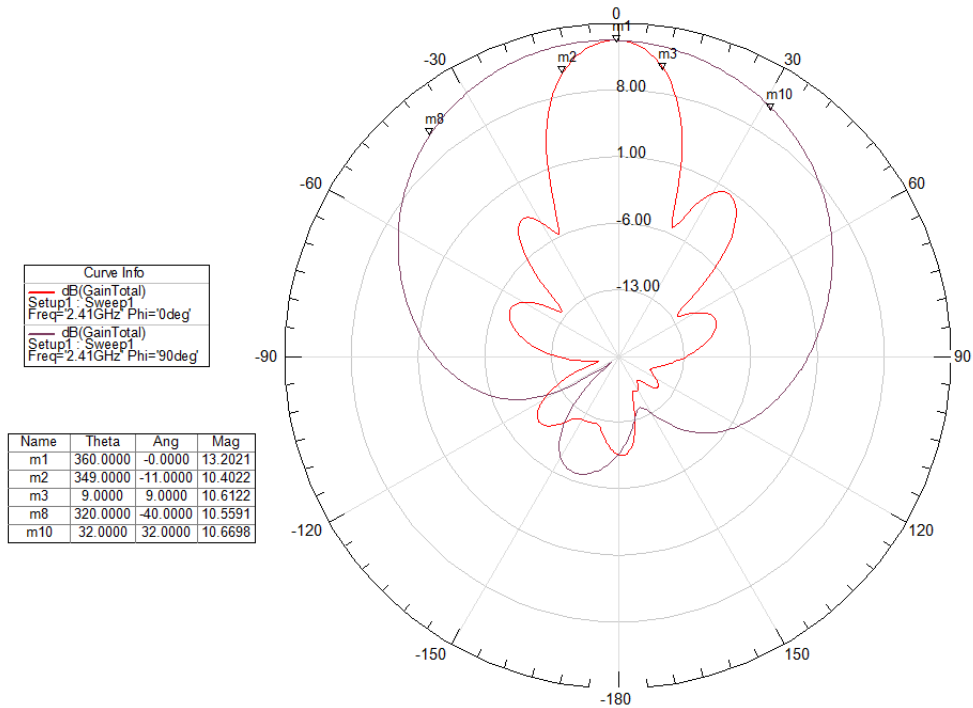


Figura 30- Diagrama de Radiação para $\phi=0^\circ$ e $\phi=90^\circ$

3.3.4 Síntese

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos resultados simulados obtidos nos exemplos anteriores em termos de parâmetros como o S_{11} , Axial Ratio, Ganho e *LFMP*.

Com o apoio da Figura 31 que representa o diagrama de radiação das 3 antenas sobreposto quando $\phi=0^\circ$, é possível verificar a existência dum acréscimo de ganho de 3dB e uma redução na *LFMP* sempre para metade, comparativamente ao exemplo de uma antena para um agregado de duas antenas e de um agregado de duas antenas para quatro, existindo sempre uma aproximação dos objectivos inicialmente propostos.

Tabela 2- Comparativo das 3 antenas na adaptação a um porto de 50Ω, Axial Ratio, Ganho e LFMP

Tipo	S_{11} [dB] (2.41GHz)	LB $S_{11}<-10dB$ [MHz]	Axial Ratio (2.41GHz)	LB (Axial Ratio) <3dB [MHz]	Ganho [dBi]	LFMP ($\varphi=0^\circ/90^\circ$)
Antena singular	-21.8828	115	0.2351dB	35	7.7	80/80
Agregado de 2 antenas	-24.236	150	0.7315dB	30.5	10.5	43/70
Agregado de 4 antenas	-21.2935	145	0.874dB	33	13.2	20/72

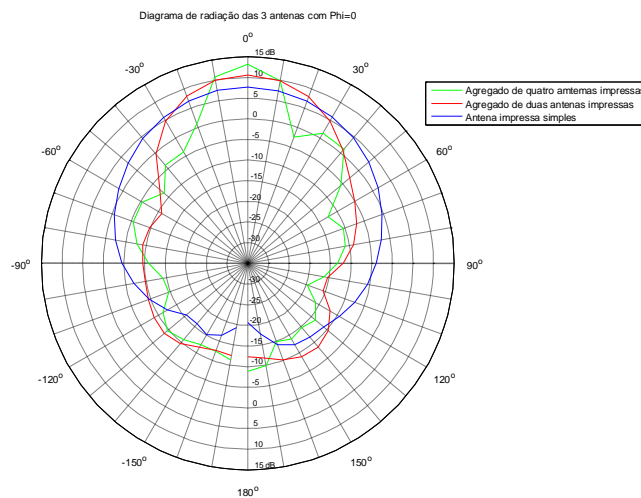


Figura 31 - Diagrama de radiação das 3 antenas sobreposto com $\varphi = 0^\circ$

3.3.5 Resultados medidos

A fim de se conferir os resultados obtidos com o software mediram-se as antenas construídas na camara anecóica do Instituto de Telecomunicações localizado na Universidade

de Aveiro.

A Figura 32 apresenta o interior da camara anecóica onde se efectuaram os testes e medidas.

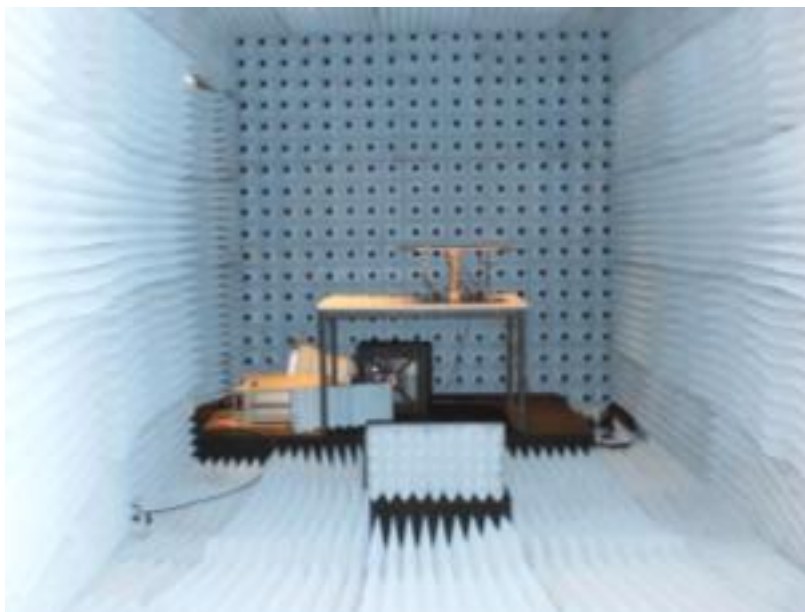


Figura 32 - Aspecto do sistema no interior da câmara anecóica

Para se efectuarem as referidas medidas, foi necessário primeiramente ser feita uma calibração à camara anecóica. Esta calibração é feita tirando medidas sobre uma antena de referência, onde são conhecidas as suas características fundamentais. Seguidamente, é introduzida a antena a testar com a pretensão de recolher as suas características fundamentais. Relacionando as medidas da antena padrão com a antena a estudar é possível recolher as medidas dos parâmetros fundamentais, as quais ficam registadas em computador.

A Figura 33 mostra como foi feita a instalação da antena na camara anecóica.

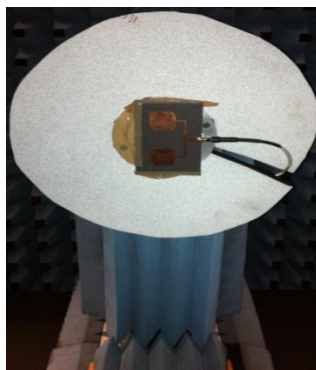


Figura 33 - Instalação da antena na câmara anecóica

O resultado obtido num cenário real na camara anecóica como agregado de duas antenas, reflecte uma boa aproximação nos valores obtidos pelo simulador *HFSS*. A Figura 34 permite verificar que a melhor adaptação em simulação atinge os -35.3dB à frequência 2.43GHz, enquanto que os valores medidos na antena pela camara anecóica atingem a melhor adaptação de -30dB à frequência de 2.404GHz. Baseado apenas nos valores medidos na camara anecóica, sabendo-se que os canais aplicados na norma 802.15.4 estão compreendidos entre as frequências de 2.4GHz e 2.4835GHz, verifica-se que a melhor opção é seleccionar os canais de frequência mais baixa. Por outro lado, é preferível escolher os canais de frequência superior, porque estes não apresentam interferência com os canais da banda da norma 802.11, sendo necessário encontrar uma relação de compromisso.

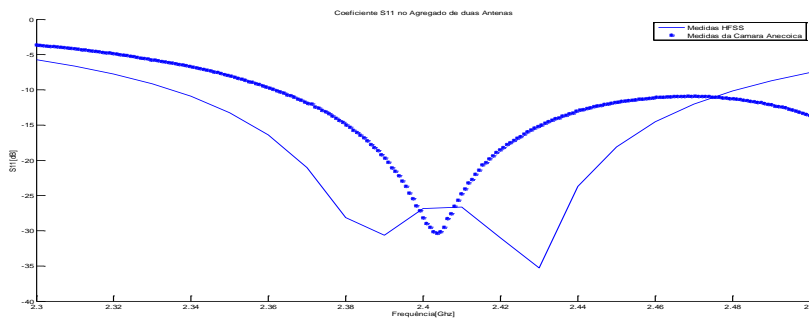


Figura 34 - Comparativo S_{11} nos resultados obtidos pelo simulado HFSS medido e em Camara Anecóica

Capítulo 4

Hardware, Protocolo e Resultados

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer todo o hardware desenvolvido e utilizado no decorrer da Dissertação, bem como o protocolo implementado nos módulos de transmissão e recepção para que a portaria virtual tivesse o melhor desempenho possível. Posteriormente são apresentados resultados medidos para testar o funcionamento real do sistema.

4.1 Hardware

O hardware utilizado no projecto da portaria virtual é composto por um módulo de transmissão e por módulos de recepção, sendo que estes últimos são compostos por uma placa de desenvolvimento onde existe uma antena interna incorporada.

O módulo de emissão está instalado sobre uma plataforma, que se identifica por portaria virtual. Tem como função enviar repetidamente mensagens em broadcast, com o objectivo de verificar se existe algum receptor móvel atravessar a portaria virtual os quais devem responder afirmativamente com a sua identificação (*ID*) se for esse o caso.

4.1.1 Modulo emissor

Para satisfazer as necessidades da portaria virtual foi necessário dimensionar um novo módulo de *RF* adequado à integração das antenas desenvolvidas no capítulo anterior para a placa emissora onde a antena a utilizar agora é um elemento externo à placa de desenvolvimento, como mostra a Figura 35.

Numa portaria virtual como é sabido é pretendido uma antena directiva que privilegia apenas uma direcção.

A grande vantagem do dimensionamento do módulo emissor é o facto de apresentar uma antena, com características mais apropriadas para a sua implementação numa portaria virtual, onde se destaca um diagrama de radiação mais directivo, ganho elevado e uma polarização

circular.

Com base nas duas antenas, das três dimensionadas e explicadas no capítulo anterior a empresa Micro I/O desenvolveu uma nova placa de transmissão. Esta placa é em tudo idêntica ao primeiro módulo RF, mas com a condição de suportar uma antena externa. A placa desenvolvida tem uma saída adaptada a 50Ω na gama de frequências de 2.4GHz, garantindo-se assim uma adaptação quase perfeita para as antenas dimensionadas.

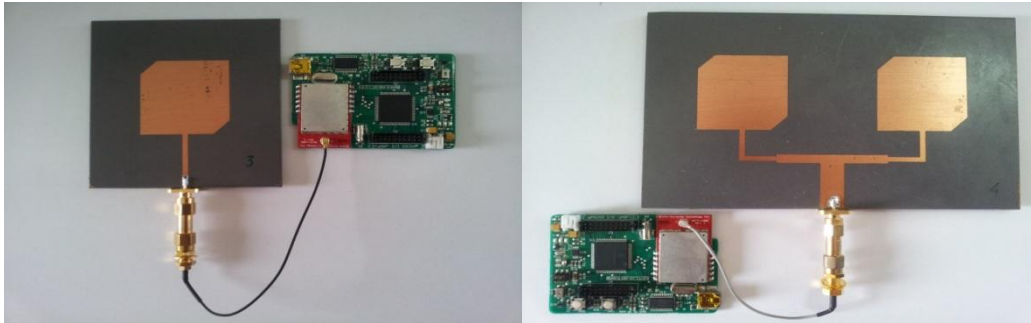


Figura 35- Placa de desenvolvimento do transmissor com a antena impressa simples (esquerda) e com o agregado de duas antenas (direita).

4.1.2 Modulo receptor

O módulo de recepção foi dimensionado pela empresa Micro I/O sendo constituído por uma placa de desenvolvimento com uma pequena antena incorporada, que permite implementar a norma 802.15.4. A Figura 36 apresenta o módulo de recepção.

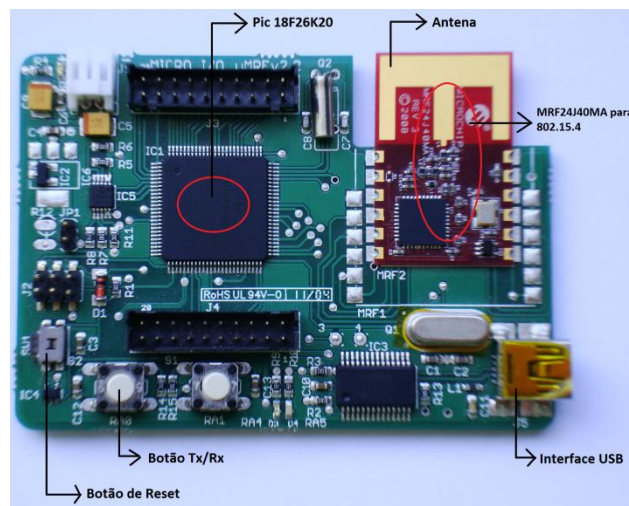


Figura 36- Modulo Receptor com antena incorporada

O módulo receptor contém uma antena, que é um dipolo impresso e como tal apresenta um diagrama de radiação omnidireccional. Estas antenas não apresentam uma direcção privilegiada no seu diagrama de radiação. Nesta situação, são apenas adequadas ao módulo de recepção.

No caso do módulo de recepção a antena adequa-se na perfeição à situação, uma vez que esta tem de estar sempre à escuta em todas as direcções para saber se existe alguma solicitação. Na Figura 37 é possível verificar o diagrama de radiação da antena do módulo receptor.

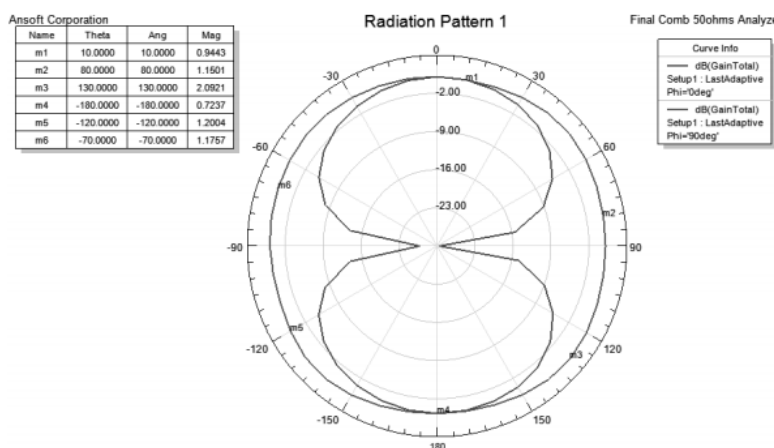


Figura 37 - Diagrama de radiação da antena receptora com $\varphi = 0^\circ$ e $\varphi = 90^\circ$ [18]

4.2 Protocolo

Para que o módulo emissor consiga registar a passagem de todos os utilizadores na portaria virtual é necessário que exista um protocolo comum entre as entidades envolvidas (emissor e receptor). Para tal, antes de se efectuarem testes e medidas com o desempenho do sistema implementou-se um protocolo, que permite ao emissor registar a passagem de todos os utilizadores que passem pela portaria virtual.

No protocolo o emissor envia uma mensagem de *broadcast* (difusão) e em caso de reconhecimento o receptor responde com uma mensagem de feedback ao utilizador. Na Figura 38 é possível verificar o protocolo entre o emissor e a receptor.

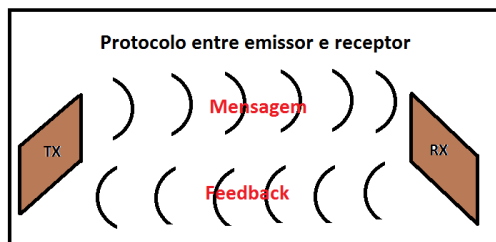


Figura 38- Protocolo entre o módulo emissor e receptor.

Por outras palavras, o emissor difunde uma palavra-chave em broadcast (para todos os utilizadores). O receptor por outro lado compara a mensagem recebida com a sua palavra-chave. Se estas coincidirem o receptor envia uma resposta (*ACK*) que contem a sua identificação (*ID*), que permite identificar a sua presença na portaria virtual. Este *ID* permite ao emissor registar, que determinado utilizador passou na portaria virtual, numa determinada data que será automaticamente registada.

Os fluxogramas das Figuras 39 e 40 representam o algoritmo existente entre o módulo emissor e o receptor. É de realçar, que em todas as mensagens enviadas no protocolo existe sempre um código de acesso, de modo a distinguir a aplicação corrente das restantes aplicações, que funcionem na mesma gama de frequências evitando assim possíveis interferências. Também se pode referir, que ambos os módulos funcionam em modo de transmissão e recepção, recorrendo em ambos os casos ao mecanismo de interrupção. Estes modos funcionam quase em simultâneo fazendo com que a margem de erro seja bastante reduzida.

Analisando o fluxograma da Figura 39 é possível verificar, que o emissor no modo de transmissão está continuamente a enviar o seu código de acesso, que necessariamente tem de ser o mesmo do módulo receptor para permitir a troca de mensagens. O emissor quando se encontra em escuta analisa se existe alguma mensagem útil, tentando reconhecer o código de acesso. Se algum responder com o código de acesso, então o emissor recolhe a identificação do utilizador (*ID*) e regista a sua passagem numa base de dados.

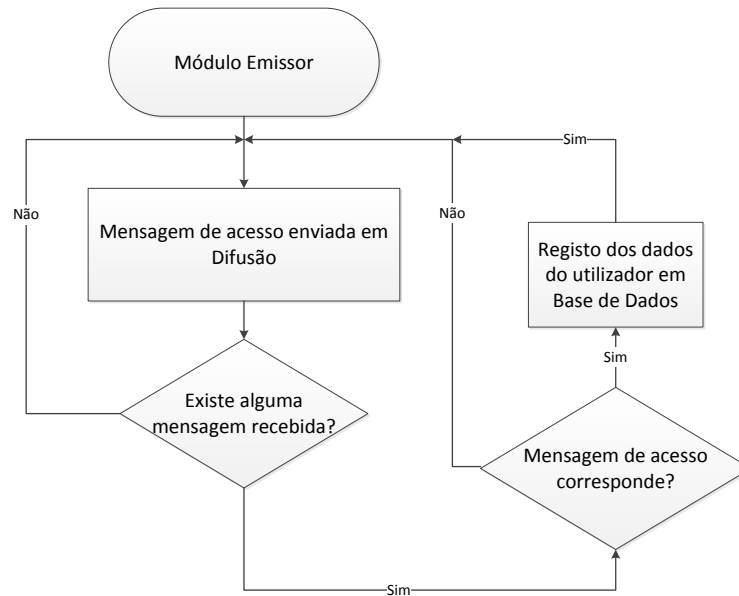


Figura 39 - Fluxograma representativo do algoritmo do emissor.

No outro extremo encontra-se o módulo receptor, que funciona também nos dois modos. Este módulo em modo de escuta verifica se existe alguma mensagem difundida, que contenha um código de acesso igual ao seu. Se esta condição se verificar então o receptor em modo de emissão envia a sua identificação (*ID*) acompanhado com a respectiva palavra de acesso, conforme se pode verificar no Fluxograma da Figura 40.

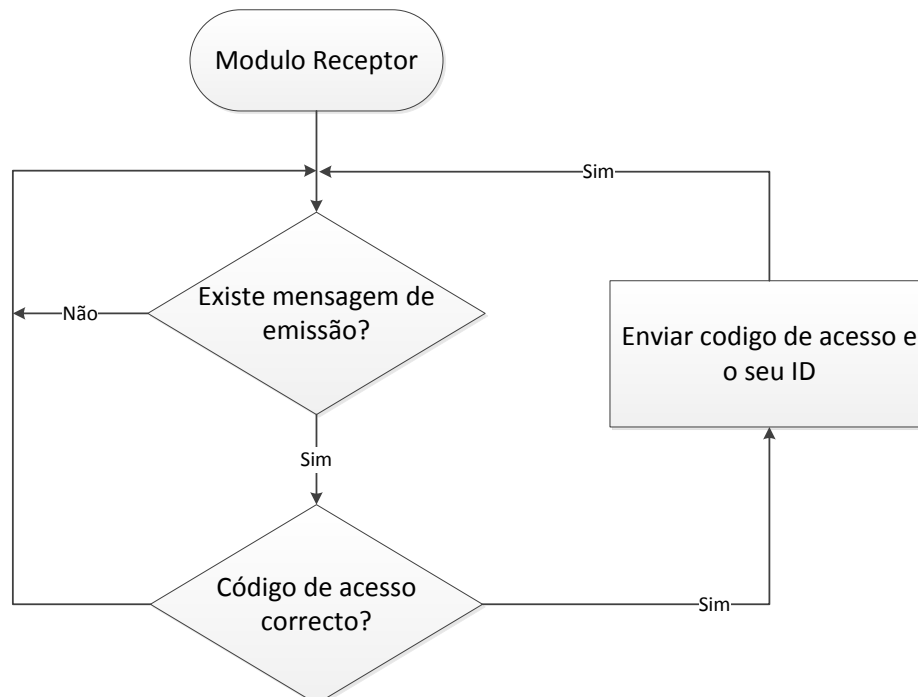


Figura 40 - Fluxograma representativo do algoritmo do receptor.

Ambos os algoritmos foram implementados quer no módulo emissor quer no receptor.

4.3 Resultados

O capítulo que se segue tem como finalidade apresentar resultados práticos sobre diversos cenários, com a finalidade de averiguar a eficácia da antena desenvolvida para o projecto da portaria virtual.

Os cenários propostos foram os seguintes:

- Medidas em campo aberto
- Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior
- Medidas numa portaria virtual em ambiente interior.

4.3.1 Medidas em campo aberto

As medidas em campo aberto têm como finalidade verificar o desempenho das antenas dimensionadas segundo vários ângulos e a distâncias diferentes, tal como ilustrado na Figura 41.

Na obtenção destas medidas é suposto que a potência do sinal medido no receptor represente, o melhor possível a potência associada ao raio directo. Deste modo, é necessário que as medidas sejam feitas sem a interferência de obstáculos e que as mesmas se efectuem em linha de vista.

Todas as distâncias seleccionadas encontram-se na zona distante de radiação, tendo sido utilizadas as distâncias de 1.5, 3 e 5 metros, tal como representado na Figura 41. As medidas efectuadas na direcção frontal da antena são muito mais precisas, sendo efectuadas com uma precisão de 15°. Na parte traseira da antena, não sendo necessária uma análise tão rigorosa optou-se por recolher metade das medidas diminuindo-se assim a precisão angular. A razão prende-se com o facto da antena não radiar para a parte traseira, embora existam sempre campos electromagnéticos de fuga.

Os resultados finais das medidas em cada ponto representam uma média de 10 medições garantindo uma maior confiança nos resultados obtidos, uma vez que o valor lido do *RSSI* apresentou-se bastante instável, embora se desconheça as razões para tal comportamento,

principalmente quando estamos numa situação de campo aberto.

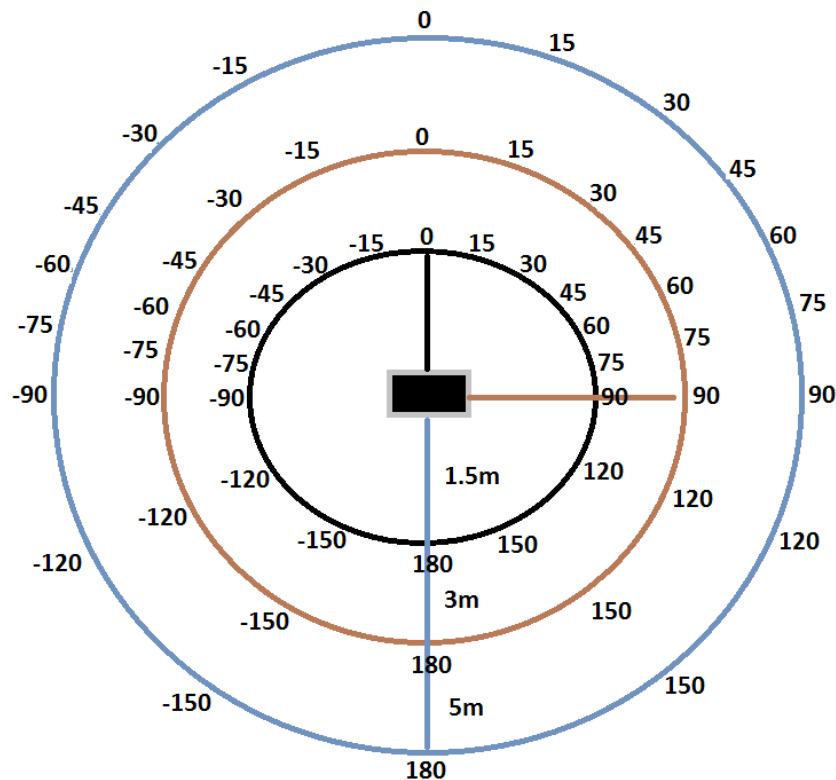


Figura 41 - Medidas efectuadas em campo aberto com as devidas distâncias e ângulos.

Para este cenário foram ensaiadas duas das três antenas dimensionadas e referidas no capítulo 3, nomeadamente a antena simples e o agregado de duas antenas.

Os resultados que são apresentados foram obtidos pela placa receptora obtendo-se a potência do sinal por *RSSI*. Estes valores são normalizados para um máximo de 100 que corresponde ao maior valor de potência recebida. Para desnormalizar os valores obtidos apenas é necessário multiplicar-se o resultado pelo factor 2,56, porque na verdade os valores recolhidos na placa do receptor variam entre 0 e 256 .

4.3.2 Teste efectuado com a antena singular

A partir do teste efectuado em espaço livre sobre a antena impressa simples é possível verificar a partir da Figura 42, que a potência do sinal que chega ao receptor é mais forte para distâncias mais curtas e para os ângulos próximos da directividade máxima da antena como seria de prever. Verifica-se no entanto que as medidas para três e cinco metros estão muito

próximas umas das outras.

Graficamente não é possível verificar o valor correcto da *LFMP*, porque as medidas de *RSSI* são obtidas em unidades logarítmicas. Sabe-se no entanto que o decaimento do valor de *RSSI* em 3dB corresponde a uma diminuição para metade da amplitude do sinal em unidades lineares. Não sendo seguro assim fazer uma leitura directa do gráfico e determinar valores devido à precisão da sua leitura. Verifica-se também que para ângulos entre 90° e 180° e -180° e -90° o nível de sinal cai no mínimo cerca de 30dB, mostrando desta forma que a antena não está a radiar para a parte traseira.

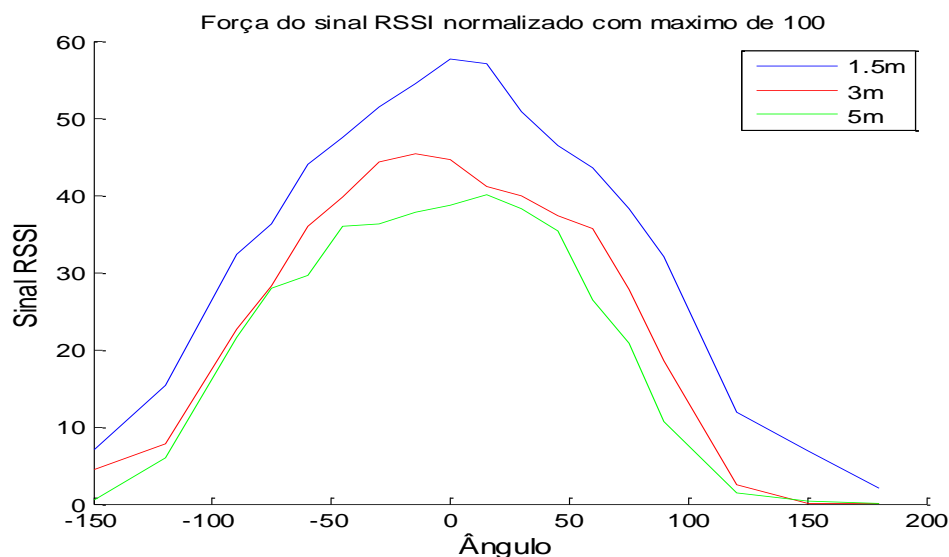


Figura 42 - Sinal recebido na antena de recepção

4.3.3 Teste efectuado para o agregado de duas antenas

Apesar de não ser possível determinar um valor preciso para a *LFMP*, surge no entanto a possibilidade de verificar, que as medidas obtidas com o agregado de duas antenas e apresentadas no gráfico da Figura 43 apresentam uma selectividade muito maior em relação às medidas obtidas com a antena simples verificadas no gráfico da Figura 42, favorecendo desta forma o dimensionamento do projecto da portaria virtual. A potência medida para direcções frontais no plano horizontal tem um decréscimo muito mais acentuado, permitindo assim uma maior selectividade dos receptores móveis, conduzindo a uma eficiência superior.

Nesta situação o nível de decaimento do sinal ainda é maior do que na situação anterior, tal como seria de esperar.

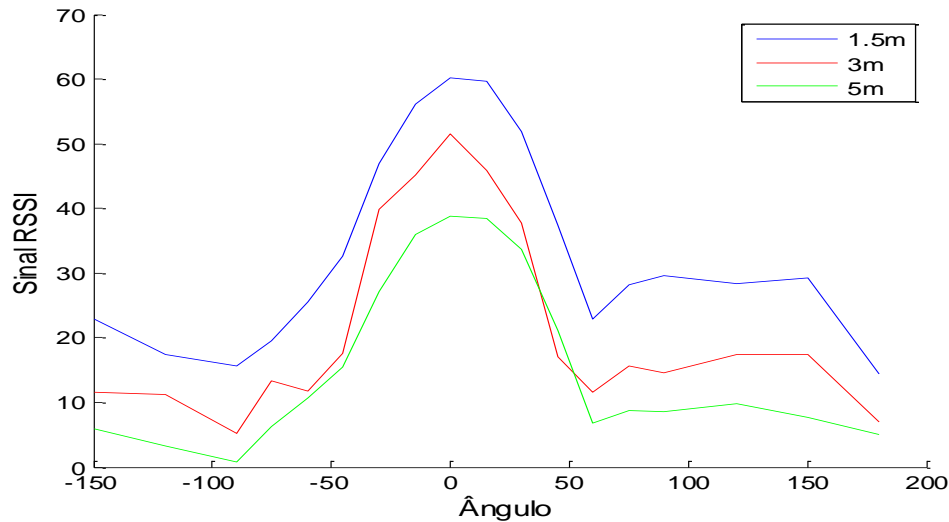


Figura 43 - Sinal recebido na antena do receptor pelo agregado de duas antenas

4.3.4 Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior

O objectivo deste conjunto de medidas é testar o sistema num ambiente exterior real e retirar as conclusões sobre a aplicabilidade da antena. Num cenário real, na maioria das vezes, o sinal que se recebe não é apenas o resultado do raio directo. Este representa a soma de múltiplas reflexões e difracções com os respectivos atrasos o que leva a efeitos construtivos ou destrutivos consoante a fase relativa dos sinais recebidos no receptor e portanto espera-se assim uma maior variação nos valores obtidos de *RSSI*.

Uma vez que a análise da antena comprova que o nível de sinal recebido na parte traseira da antena é muito inferior ao valor da parte frontal, optou-se aqui por fazer apenas medidas entre -90° a 90° , tal como representado na Figura 44. Também tendo em atenção os resultados obtidos nas primeiras medidas, optou-se aqui por apenas apresentar os resultados obtidos com o agregado de duas antenas, uma vez que esta antena permite ter uma *LFMP* mais baixa.

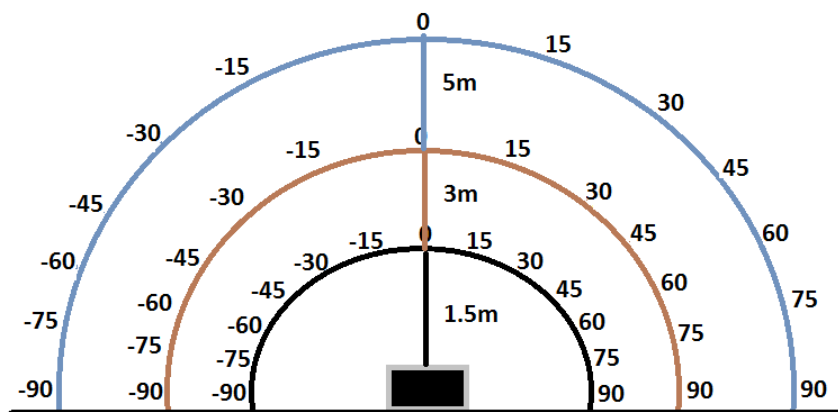


Figura 44- Medidas efectuadas para a portaria virtual em ambiente exterior

Nas medidas para ambiente externo, a fim de se efectuar um estudo mais aprofundado, recolheram-se medidas considerando o valor médio, mínimo e máximo para cada ponto de *RSSI*. Estas medidas são consideradas importantes, porque o nível de sinal para o mesmo ponto apresenta uma grande variabilidade. Deve-se considerar também a mobilidade do receptor, tornando este valor ainda mais inconstante.

4.3.5 Valor médio obtido na portaria virtual

De igual forma foi efectuado uma média de 10 medidas para cada ponto e, apesar destas estarem sujeitas a um ambiente de reflexões múltiplas, conclui-se mais uma vez, que para os ângulos para os quais a antena é mais directiva e simultaneamente para distâncias mais curtas o sinal medido é mais forte, perspectivando-se uma detecção mais eficaz do utilizador que passa pela portaria virtual conforme se pode verificar na Figura 45.

Salienta-se também um aumento do nível de sinal relativamente ao exemplo em campo aberto, na parte “central” de cerca de 15dB, passando de valores de *RSSI* de 60 para 75.

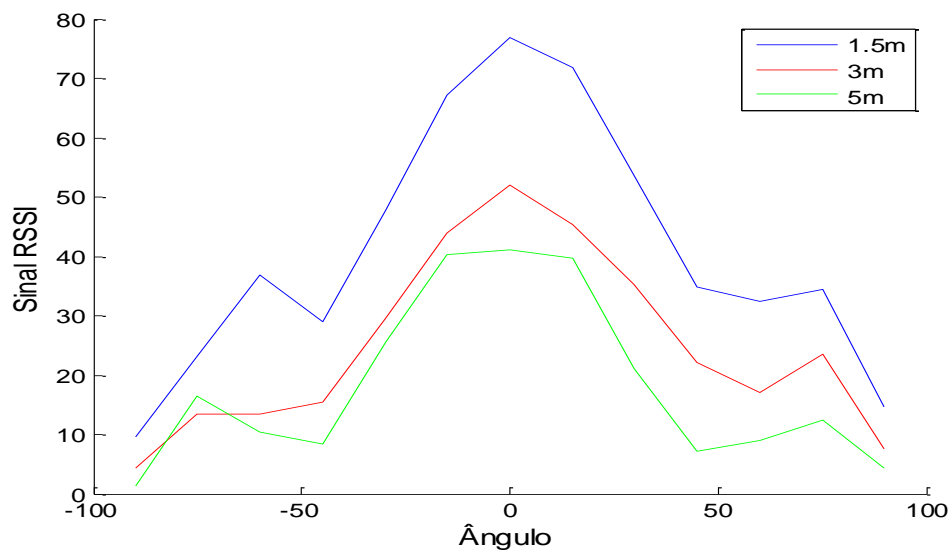


Figura 45- Medidas com valor médio numa portaria virtual em ambiente exterior.

4.3.6 Comparativo das medidas efectuadas em campo aberto e em ambiente externo

Depois de analisados os resultados efectuados para as diversas distancias e ângulos, para as medidas em campo aberto e em ambiente exterior, torna-se necessário comparar os resultados obtidos, com a finalidade de analisar qual o efeito que o multipercurso tem nos resultados medidos.

Fazendo uma análise à Figura 46, que representa uma comparação entre as medidas efectuadas em campo aberto e em ambiente externo para as distâncias de três e cinco metros, chegou-se à conclusão, que o decaimento do *RSSI*, para os ângulos onde a antena emissora apresenta um ganho menor, em ambiente aberto é mais linear, denotando-se assim que existe uma maior estabilidade no sinal recebido. Também se pode concluir que com o aumento da distância ente as antenas, as medidas recolhidas pelo receptor na portaria virtual sofrem de um aumento de instabilidade mais significativo em relação ao ambiente aberto. Este fenómeno deve-se a efeitos de multipercurso. Contudo, apesar dos efeitos verificados, pode-se concluir que estes não são significativos e decisivos nos resultados obtidos na portaria virtual, não contribuindo desta forma, de um modo decisivo nas leituras obtidas no receptor para as distâncias até cinco metros.

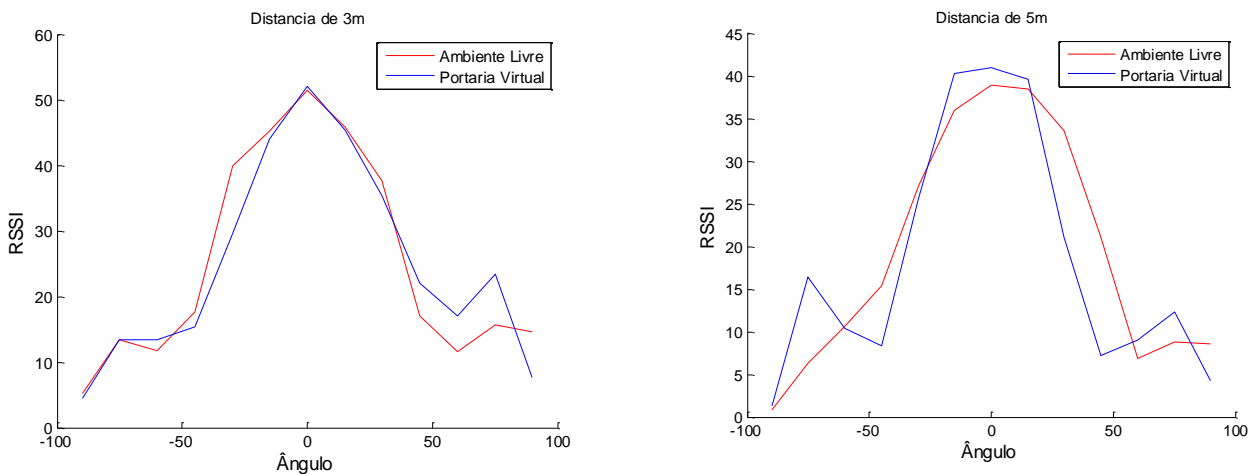


Figura 46 - Comparativo de medidas em ambiente exterior em campo aberto e ambiente exterior para as distâncias de 3 e 5 metros.

Considerando apenas a distância de 1.5 metros, conclui-se que o decaimento do ganho é semelhante nos dois casos, como se pode verificar na Figura 47. Contudo, verifica-se que a percentagem recebida do sinal *RSSI* no receptor para o ganho máximo do transmissor (0°), é substancialmente superior em ambiente exterior em 15dB. Este fenómeno deve-se ao facto de os efeitos multipercurso para esta distância contribuírem mais significativamente e construtivamente no sinal recebido pelo receptor.

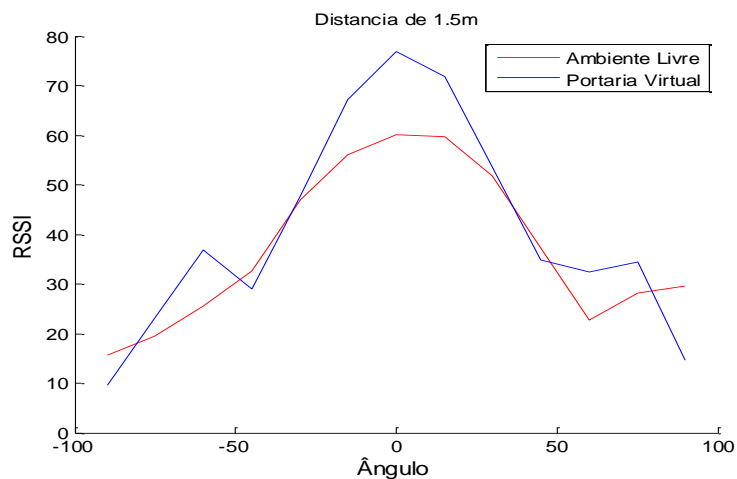


Figura 47- Comparativo de medidas em ambiente exterior em campo aberto e ambiente exterior para a distância de 1.5 metros.

4.3.7 Valor mínimo e máximo obtido na portaria virtual

As medidas da Figura 45 são insuficientes para testar a eficácia da portaria virtual, sendo necessário também ter em consideração a instabilidade do sinal. Neste cenário tiveram-se em conta os valores máximos e mínimos de *RSSI*, medidas para cada ângulo. Para o valor máximo consideraram-se as antenas em linha de vista, retirando-se o melhor valor (ver linha vermelha da Figura 48) e para o mínimo tentou-se esconder a antena receptora da emissora, extraindo-se o valor mínimo (ver linha azul da Figura 48).

Considerando apenas a distância de 1.5m, a partir do gráfico da Figura 48 é possível verificar a instabilidade do sinal medido no receptor por *RSSI*. Sempre que o *RSSI* for superior a zero e se não existir nenhuma filtragem no receptor, então este encontra-se sempre em condições de escutar o emissor. Deste modo poder-se-á concluir que para ângulos inferiores a 60° a placa receptora encontra-se sempre em condições de receber o sinal da placa emissora. Quando as antenas se encontram em linha de vista e considerando-se apenas o melhor sinal (ver linha vermelha na Figura 48) é possível verificar que para uma distância de 1.5m a placa receptora consegue escutar o emissor em qualquer ângulo, o que não é favorável para o projecto de portaria virtual. Assim sendo é necessário implementar novos mecanismos, que permitem restringir o sinal recebido pelo receptor móvel.

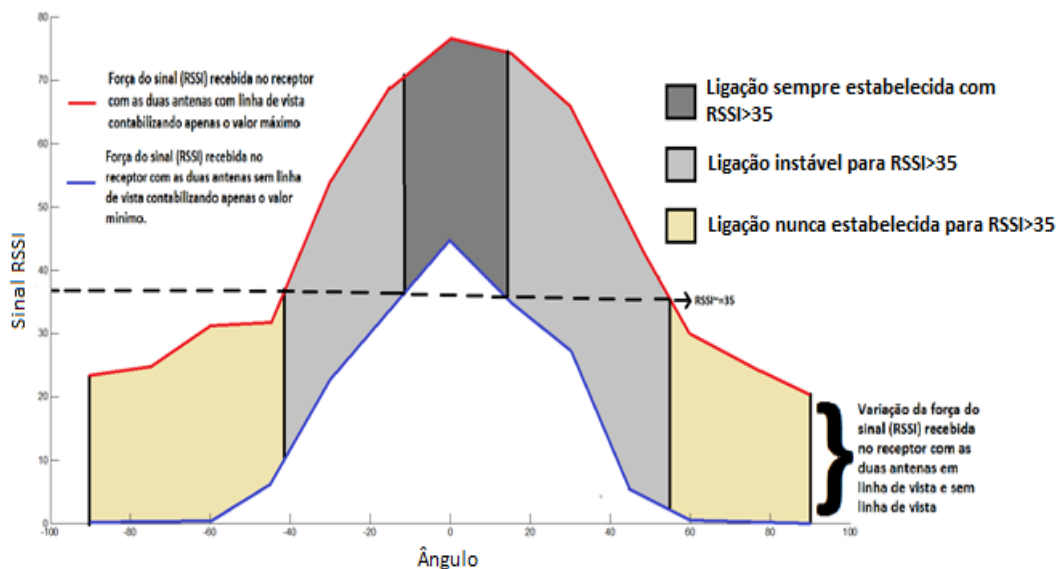


Figura 48 - Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior tendo em conta a instabilidade do sinal medido.

Com a finalidade de apertar o ângulo de escuta do receptor poder-se-á limitar o sinal recebido no receptor no *RSSI*. Configurando a escuta do receptor para valores de *RSSI* superiores a 35, no cenário mais favorável onde as antenas se encontram em linha de vista e que se considera apenas o melhor sinal (ver linha vermelha na Figura 48) o receptor tem a capacidade de descodificar a mensagem do emissor para aberturas angulares inferiores a 40°. Na situação em que o receptor não se encontra em linha de vista do emissor e se considera apenas o valor mínimo a receber pelo receptor (ver linha azul da Figura 48) esta ligação apenas é garantida para aberturas inferiores a 10°. A Figura 49 permite confirmar a abordagem efectuada.

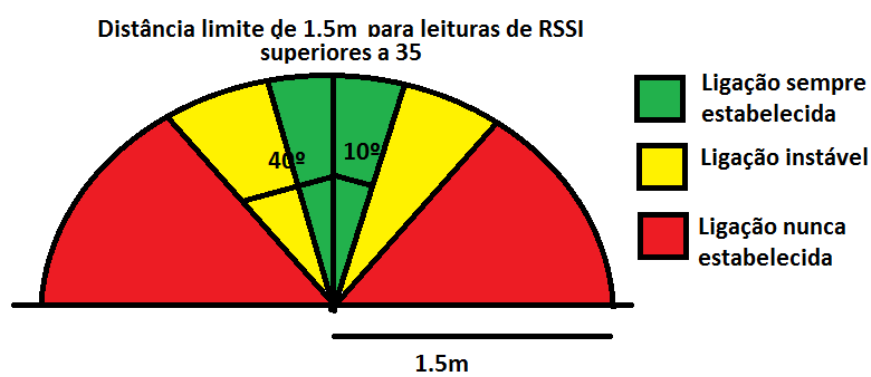


Figura 49 - Aceitação da ligação entre emissor e receptor

Considerando agora a distância de 3 metros pode-se verificar que em linha de vista com o melhor sinal possível (ver linha vermelha na Figura 50), conclui-se que é possível existir comunicação entre emissor e o receptor para qualquer ângulo. No caso da antena receptora não se encontrar em linha de vista do emissor e se considerar apenas o valor mínimo a receber pelo receptor (ver linha azul da Figura 50), só se garante a comunicação se esta se encontrar em ângulos inferiores a 45° em relação à antena emissora.

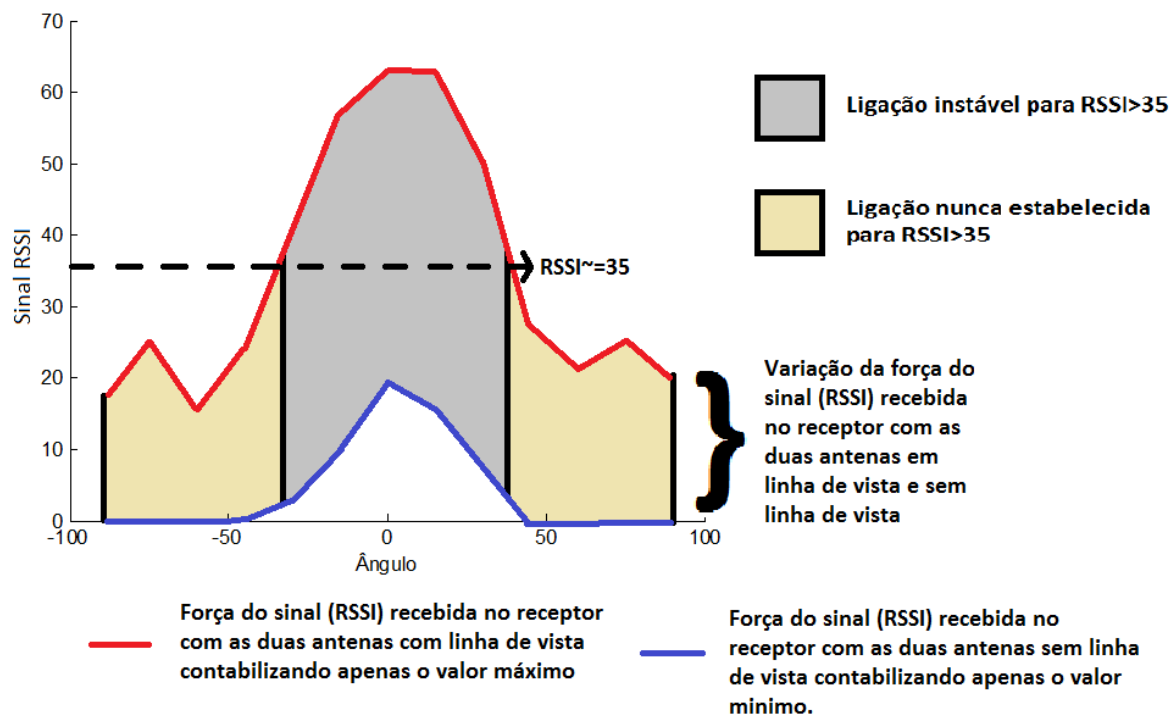


Figura 50 - Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior tendo em conta a instabilidade do sinal medido em RSSI.

No caso da placa receptora permitir apenas receber sinais para um *RSSI* superior a 35 como no exemplo anterior poder-se-á verificar através das Figuras 50 e 51, que quando o receptor se encontra em ângulos superiores a 35° nunca existira comunicação entre a placa receptora e emissora, mesmo no caso destas se encontrarem em linha de vista (ver linha vermelha da Figura 50). Por outro lado para ângulos inferiores a 35° a detecção do utilizador nunca é totalmente garantida (ver linha azul da Figura 50), não sendo preocupante para uma distância de 3 metros.

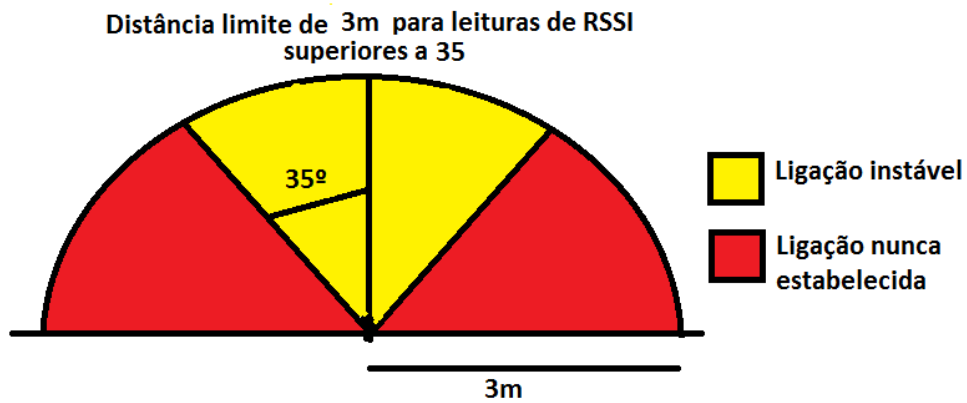


Figura 51- Aceitação da ligação entre emissor e receptor para distâncias superiores a 3 metros

+

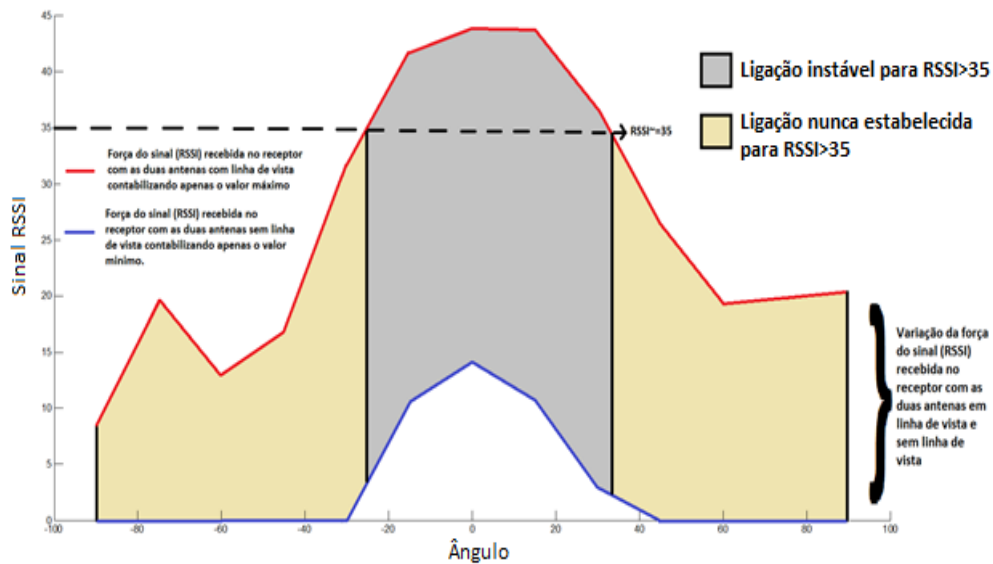


Figura 52 - Medidas numa portaria virtual em ambiente exterior tendo em conta a instabilidade do sinal medido em RSSI.

Se a placa receptora for configurada para receber um *RSSI* superior a 35 verifica-se, que, só se consegue garantir comunicação entre as duas placas se as antenas estiverem em linha de vista e se o receptor se encontrar numa abertura angular inferior a 25°. Caso contrário, a sua passagem pode não ser detectada quando o receptor se cruza na portaria virtual, o que não é preocupante considerando que a distância considerada é de 5m, como se pode verificar na Figura 53.

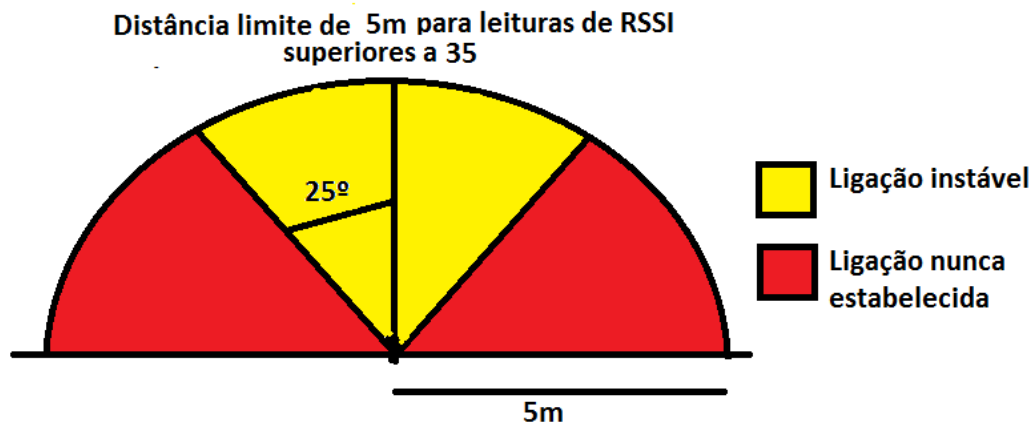


Figura 53- Aceitação da ligação entre emissor e receptor para distâncias superiores a 5 metros

Conclusão

Depois de serem analisadas as medidas para as distâncias de 1.5m, 3m e 5m, pode-se verificar através da Tabela 3 e 4 todos os resultados obtidos sobre uma portaria virtual.

Na Tabela 3 observam-se os resultados na placa receptora, onde não é imposta qualquer limitação de leitura pela força do sinal recebido de *RSSI*. Constata-se que, se as antenas estiverem direccionadas, existe sempre a probabilidade de receber a mensagem emitida pelo emissor, seja qual for o ângulo, com o *RSSI* a decrescer com o aumento da distância. Se o receptor estiver escondido a ligação só é garantida dentro de uma determinada abertura angular em relação à placa emissora. Se a distância aumentar a aceitação da abertura angular tem tendência a decrescer.

Tabela 3 - Medidas sem configuração de RSSI mínimo na placa receptora

Distância (metros)	Ligação em linha de vista	Ligação sem linha de vista
1.5	Ligação sempre disponível Mínimo de RSSI=25 Máximo de RSSI=75	Ligação disponível para $-60^\circ < \alpha < 60^\circ$ Máximo de RSSI=45
3	Ligação sempre disponível Mínimo de RSSI=15 Máximo de RSSI=65	Ligação disponível para $-50^\circ < \alpha < 45^\circ$ Máximo de RSSI=45
5	Ligação sempre disponível Mínimo de RSSI=8 Máximo de RSSI=45	Ligação disponível para $-30^\circ < \alpha < 45^\circ$ Máximo de RSSI=12.5

Se o receptor for configurado para receber um $RSSI > 35$ com o intuito de limitar o sinal recebido na placa receptora, então verificam-se três situações.

- Nunca existe comunicação entre placas.
- Existe comunicação se estas estiverem em linha de vista.
- Existe comunicação sempre qualquer que seja a situação das antenas.

Como se pode verificar na Tabela 4, só é garantida totalmente a comunicação entre a placa emissora e receptora se estas estiverem muito próximas e numa abertura angular muito restrita, algo que interessa para este projecto. Este cenário só se verifica se as antenas se encontrarem a menos de 1.5m e se encontrar em ângulos compreendidos entre -10° e 15° . No caso destas comunicarem unicamente em linha de vista representam sempre um grau de incerteza, que é sempre indesejável num projecto ideal. Note-se que para esta situação a abertura angular tende para diminuir com o aumento da distância. No caso de nunca comunicarem acontece precisamente o inverso.

Tabela 4- Medidas com configuração de RSSI de 35(89.6 não normalizado) na placa receptora

Aplicação do Filtro no receptor para um RSSI>35 (89.6)			
Distância (metros)	Nunca comunica	Comunica em linha de vista	Comunica sempre
1.5	$\alpha < -40^\circ \ \&\& \ \alpha > 55^\circ$	$-40^\circ < \alpha < -10^\circ$ && $15 < \alpha < 55^\circ$	$-10^\circ < \alpha < 15^\circ$
3	$\alpha < -35^\circ \ \&\& \ \alpha > 40^\circ$	$-35^\circ < \alpha < 40^\circ$	-
5	$\alpha < -25^\circ \ \&\& \ \alpha > 35^\circ$	$-25^\circ < \alpha < 35^\circ$	-

4.3.8 Medidas numa portaria virtual em ambiente interior

Numa portaria em ambiente interior as medidas efectuadas são sujeitas ao pior cenário possível, pois o receptor está sujeito às mais variadas reflexões existentes num ambiente fechado.

O cenário de testes escolhido foi uma sala onde se recorreu à sua divisória para instalar o equipamento necessário, para permitir simular a portaria virtual. Dentro da circunferência vermelha da Figura 54 e 55, é possível observar a instalação da antena e da placa emissora. Esta tem como missão detectar a passagem do utilizador numa faixa com o plano horizontal o mais apertado possível.



Figura 54- Portaria virtual em ambiente interior

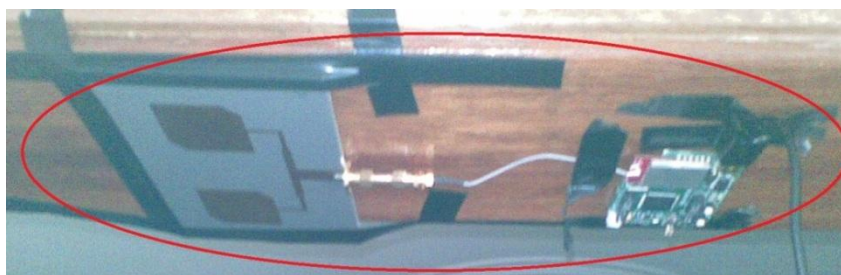


Figura 55- Equipamento emissor (antena e placa transmissora) instalado na portaria virtual.

Nas medidas efectuadas em ambiente interior, os pontos de medida do receptor foram distribuídas ao longo de uma sala com 4 metros de comprimento e dois metros de largura, podendo ser verificados a vermelho na Figura 56.

O emissor foi colocado ao meio da sala direccionado para o chão a uma altura próxima de dois metros. Este está sinalizado a verde igualmente na Figura 56.



Figura 56. Medidas efectuadas em ambiente indoor

Para esta análise para cada ponto de medida foi tida em conta as oscilações e a instabilidade do sinal recebido. Na Figura 57 pode-se verificar através das medidas efectuadas o valor máximo e mínimo de *RSSI* que a placa receptora pode receber em cada ponto.

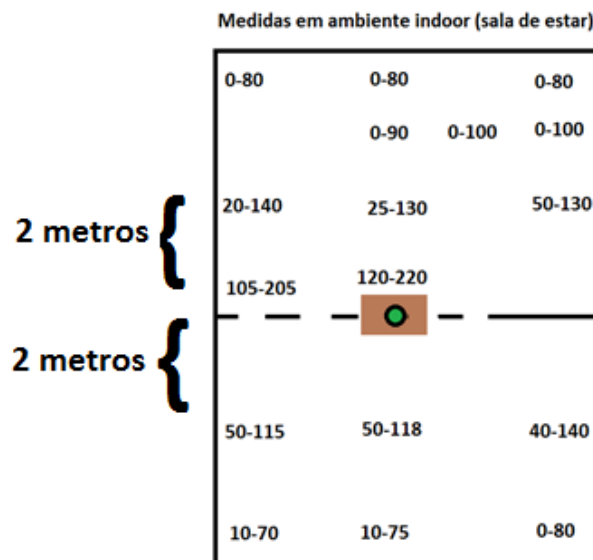


Figura 57- Medidas efectuadas em ambiente indoor

Segundo as medidas recolhidas em ambiente indoor constata-se que existe uma grande instabilidade no sinal recebido por parte da placa receptora. Assim sendo, é desejável ajustar um valor mínimo de *RSSI* a receber pelo receptor. Para o efeito, é difícil escolher o melhor valor para *RSSI*, porque para medidas até dois metros o mesmo sinal pode chegar até valores de 140, que ultrapassem o valor mínimo que a antena receptora recebe quando passa pela portaria virtual (ver valores da Figura 57). Se for configurado um valor muito elevado na placa receptora, corre-se o risco do utilizador não ser detectado na portaria virtual. Por outro lado, se este valor for demasiado baixo, a portaria virtual aumenta o seu alcance correndo o risco de interagir com receptores que não têm intenção de atravessar a portaria virtual. Para este efeito deve-se configurar um *RSSI* que abranja uma cobertura menor possível, sem prejudicar a identificação do utilizador na sua passagem. Para este cenário o valor mais aceitável é configurar a placa receptora para receber valores de *RSSI* superiores a 120. Devido ao alcance excessivo apresentado pelas duas antenas, também é aconselhável limitar ao máximo a potencia enviada nas duas placas. Para a finalidade apenas é necessário configurar o módulo 802.15.4 existente nas duas placas. Para além do controlo em software também convém limitar o valor de *RSSI* por hardware. Para este efeito existe uma solução que não foi ensaiada neste trabalho, que consiste em utilizar atenuadores internos e externos na placa receptora e emissora respectivamente.

Capítulo 5

Conclusão e trabalho futuro

No sector das telecomunicações, e mais concretamente nas redes de comunicações móveis as redes *LR-WPAN* assumem cada vez mais um maior destaque devido às suas características de baixo débito binário e baixo consumo. Estas redes devido às suas características permitem o desenvolvimento de aplicações em áreas como a domótica, sensorização, medicina, gestão de edifícios e na indústria.

O presente trabalho teve como objectivo melhorar o desempenho dos módulos 802.15.4 já existentes e dimensionados pela empresa Micro I/O. Estes deviam permitir o registo de utilizadores na passagem por uma portaria virtual. Contudo, o desempenho destes módulos mostrava-se pouco eficiente, por apresentar uma antena com um diagrama de radiação omnidireccional. Este tipo de antenas não apresenta uma direcção privilegiada no seu diagrama de radiação, não satisfazendo assim as exigências duma portaria virtual.

Para o efeito foram dimensionadas novas antenas de modo a conferir novas características aos módulos já existentes. Estas antenas permitiram que os módulos se tornassem mais directivos, que apresentassem um ganho elevado e ainda uma polarização circular conferindo deste modo um aumento de eficiência na portaria virtual.

Com os novos módulos dimensionados elaborou-se um protocolo entre o emissor e receptor de modo a permitir ao emissor conseguir registar do modo mais eficiente possível a passagem dos receptores móveis pela portaria virtual.

De seguida foram efectuadas uma campanha de medidas em campo aberto, numa portaria virtual em ambiente exterior e numa portaria virtual mas em ambiente interno, concluindo-se que a instabilidade existente nos valores lidos de *RSSI* em ambiente interior é superior ao ambiente exterior, devido à existência duma maior interferência de reflexões múltiplas, onde a intervenção do raio indirecto é mais notória. Outra conclusão a retirar para as duas situações mencionadas é que o sinal recebido pelo receptor é mais forte à medida que a distancia entre a

placa emissora e receptora tende a diminuir e também quando a placa receptora tende em se aproximar do angulo do ganho máximo da antena emissora.

Através dos testes efectuados foi possível verificar, que um dos principais obstáculos para obtenção de resultados óptimos numa portaria virtual é o excesso de sinal existente entre o emissor e receptor, não sendo possível implementar uma portaria virtual tão eficaz como se pretendia. Para tal, reduziu-se ao máximo a potência a transmitir pelas duas placas por software e ainda se limitou a leitura no receptor do valor de *RSSI*, que permite implementar uma portaria virtual mais selectiva sem que esta coloque em risco a não detecção do utilizador.

Trabalho futuro

Uma melhoria a implementar no futuro é introduzir atenuadores nos módulos emissores e receptores. Estes atenuadores permitiram reduzir consideravelmente a potência do sinal na frequência de interesse e ainda controlar a sua atenuação pretendida digitalmente por software.

Funcionalidade de uma portaria virtual com base em RFID

Existem dois tipos de atenuadores, os externos e os internos.

No caso dos atenuadores externos com uma atenuação até aos 64dB são os mais aconselháveis, quando são introduzidos no módulo emissor. Este modulo como esta fixo na portaria virtual, não está sujeito à mobilidade e por ter a antena externa à placa desenvolvida permite utilizar um atenuador externo sem que para isso exista a necessidade de dimensionar uma nova placa emissora.

O módulo receptor como é transportado pelo utilizador, está sujeito a uma grande mobilidade, sendo necessário que este seja o mais compacto possível, exigindo-se um atenuador interno. Para implementar este atenuador, dado que todos os elementos são internos da placa receptora, torna-se necessário dimensionar uma nova placa receptora. Este atenuador é controlado digitalmente pela placa receptora e permite uma atenuação até 32dB.

Na Figura 58, pode-se exemplificar um atenuador externo e outro interno, que poderiam ser aplicados no projecto de portaria virtual.



Figura 58- Exemplo de um atenuador externo (esquerda) e um atenuador interno (direita)

Anexos

Estudo da Antena

A antena é um dispositivo passivo normalmente metálico, que possui as características necessárias para satisfazer e complementar uma cadeia de Transmissão/Recepção de comunicação sem fios.

Esta deve permitir o envio de ondas electromagnéticas de um meio guiado para o meio livre do modo mais eficiente possível na transmissão, na recepção deve ocorrer o processo inverso [19].

As antenas possuem características que as distinguem das demais, nas quais se reflectem em propriedades como o diagrama de radiação, directividade, ganho, polarização, impedância de entrada e largura de banda. Estas propriedades dependem de características como a dimensão da antena, o desenho da antena, o modo como é alimentada, se existe um reflector, do material e também se a antena é derivada de um agregado de antenas ou se é simplesmente única. Todas estas considerações foram tidas em conta para o desenvolvimento da antena e são detalhadas no capítulo 3.

No decorrer do presente anexo serão analisadas cada uma das propriedades descritas.

Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação representa o modo como uma antena distribui o campo eléctrico ou potência pelo espaço. Esta representação é expressa em modo gráfico em planos 2D ou 3D.

O diagrama de radiação deve ser analisado em diversos planos e neles se destacam os planos $\phi=0$ e $0<\theta<360$, $\phi=90$ e $0<\theta<360$ ou $\theta=0$ e $0<\phi<180$ segundo o sistema de coordenadas cilíndricas.

O diagrama de radiação é composto pelo lobo principal, secundário e traseiro. O lobo

principal contém a direcção máxima de radiação, sobre este é possível verificar a *LFMP*, que determina a abertura angular, que o lobo oferece a metade da potência máxima. Os lobos secundários são todos aqueles que não são o primário. Normalmente o número de lobos secundários aumenta à medida que a antena se torne mais directiva.

Finalmente o lobo traseiro é o secundário que normalmente tem a direcção oposta ao lobo principal.

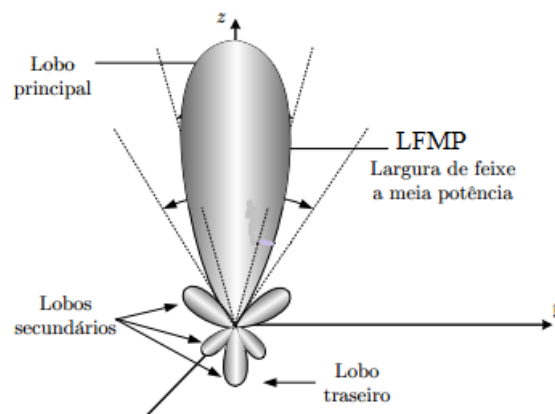


Figura 59- Diagrama de Radiação [19].

A partir do diagrama de radiação é possível verificar-se se a antena é Isotrópica, Omnidireccional ou Directiva.

Uma antena Isotrópica não apresenta nenhuma direcção privilegiada, uma Omnidireccional apresenta a máxima direcção sobre um plano e uma antena directiva apresenta um máximo sobre uma determinada direcção.

Impedância de entrada

O dimensionamento do parâmetro de impedância de entrada é importantíssimo. Este, determina a adaptação, que a antena tem sobre o circuito de alimentação. Quanto melhor for a adaptação menores serão as perdas existentes na carga oferecida à antena.

A impedância é composta por uma parte real e uma parte imaginária. Quando se dimensiona a impedância de entrada de uma antena deve-se tentar aproximar ao máximo a parte real ao valor oferecido pela carga, reduzindo ao máximo a componente imaginária.

$$Z_{in} = R + jX \quad (5)$$

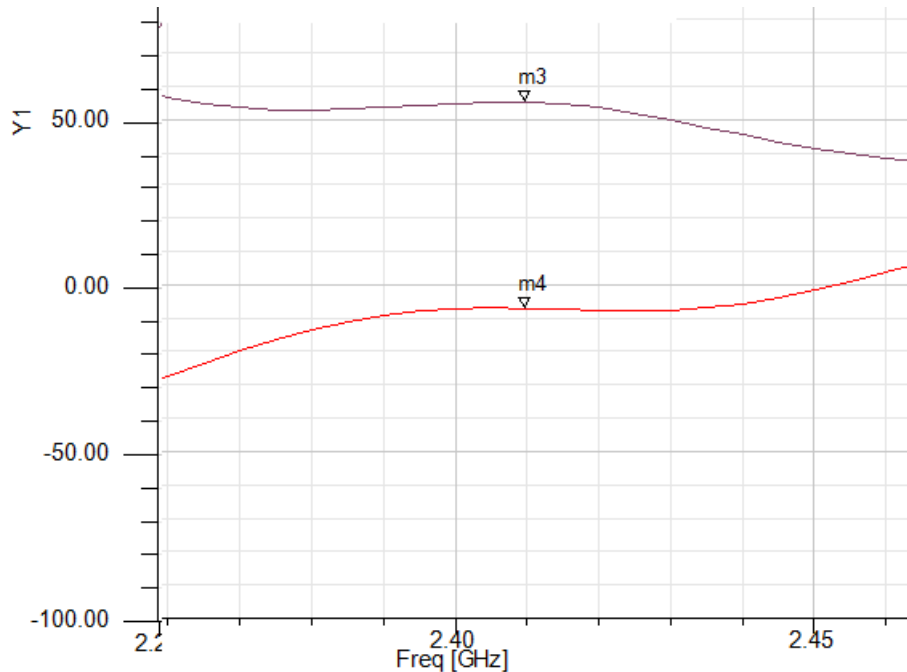


Figura 60- Exemplo da impedância de entrada de uma antena com $(55-7j)\Omega$ à frequência de 2.41GHz.

SWR

A partir do coeficiente de reflexão (ρ), é possível relacionar a amplitude entre a onda emitida e a onda reflectida. Sabe-se que o coeficiente de reflexão óptimo existe quando a onda emitida é totalmente transmitida, não existindo deste modo a existência de reflexões. Para tal, a impedância de carga (Z_L) tem de ser igual à impedância da fonte (Z_0) obtendo-se deste modo um coeficiente de reflexão nulo.

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

Para um ρ não nulo existe sempre uma desadaptação, existindo uma interferência entre a onda incidente e reflectida. Neste contexto, existe uma interferência entre as duas ondas conhecida por onda estacionária. A envolvente da onda estacionária é periódica quando a distancia entre dois máximos ou dois mínimos adjacentes é de meio comprimento de onda. Neste contexto surge o SWR (Standing Wave Ratio), o qual relaciona os máximos e mínimos

da onda envolvente estacionária, podendo-se determinar assim as perdas devido à reflexão da onda [20].

$V(Z, t) \rightarrow$ *Envolvente de onda estacionaria.*

$$SWR = \frac{\max |V_x(Z, t)|}{\min |V_x(Z, t)|} \leftrightarrow SWR = \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad (7)$$

Para uma adaptação óptima o SWR seria unitário, mas na prática tal adaptação é impossível de implementar, porque para além de outros factores, normalmente esta é feita para uma gama de frequências que correspondem a uma largura de banda, sendo razoável implementar um SWR de 2 para o pior caso.

Ganho e Directividade

A densidade de potência é uma grandeza que depende do ponto em que é observada. Deste modo a intensidade de radiação tem de ser associada a uma determinada direcção (U). Esta define a potência radiada por unidade de angulo solido, ou seja, um steradiano [21].

$$U(\theta, \phi) = r^2 S(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (9)$$

A directividade permite focar o lobo principal. Esta quantifica de quanto é que uma antena radia numa dada direcção e relaciona a intensidade de radiação, que a antena produz numa determinada direcção como se fosse produzida por uma antena isotrópica radiando a mesma potência [21].

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (10)$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_o} \leftrightarrow D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (11)$$

A directividade é máxima para um θ e ϕ que maximize a intensidade de radiação.

$$D_{max} = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{rad}} \quad (12)$$

Com a finalidade de contabilizar as perdas da antena existe um rendimento associado, onde se multiplicarmos o rendimento da antena à directividade obtemos o ganho da antena.

$$G(\theta, \phi) = \mu \cdot D(\theta, \phi) \leftrightarrow G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (13)$$

$$\mu = \frac{\text{Potência radiada pela antena}}{\text{Potência fornecida à antena}} \quad (14)$$

Polarização

A antena emissora e a antena receptora terão que ser concordantes no tipo de polarização. O tipo de polarização da antena depende da variação em amplitude e na direcção que o vector ou vectores do campo eléctrico sofrem ao longo do tempo.

A Figura 53 representa a polarização vertical e horizontal onde o campo eléctrico se propaga no plano horizontal (eixo dos x's) e plano vertical (eixo dos y's).

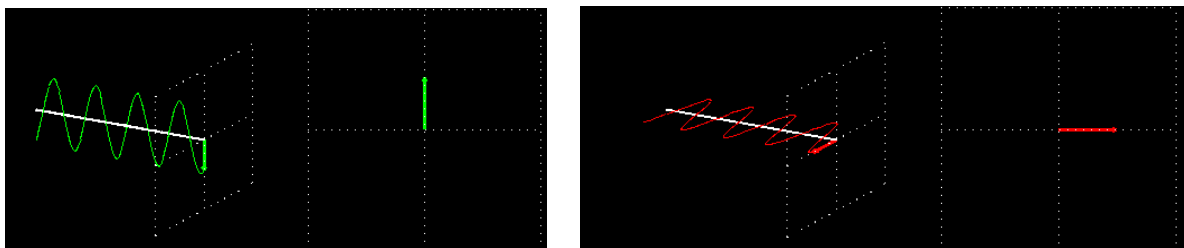


Figura 61- Polarização vertical (esquerda), Polarização Horizontal (direita) [22].

Para a existência da polarização circular têm que existir dois vectores ortogonais com amplitudes iguais, se esta condição não se verificar, então estamos perante uma polarização elíptica. Estas condições podem ser verificadas a partir do Axial Ratio, onde numa polarização circular perfeita esta relação toma um valor unitário (relação de amplitudes entre vectores). A polarização circular por sua vez pode ser polarização circular esquerda (LHCP) ou direita (RHCP).

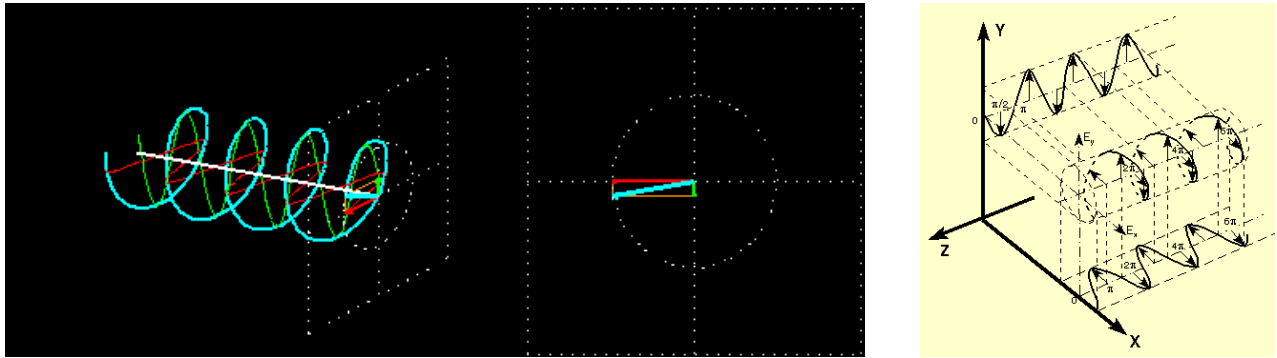


Figura 62- Polarização Circular com os vectores do campo eléctrico ortogonais entre si [22].

Largura de Banda

A largura de banda é todo o intervalo de frequências para o qual o sinal se mantém dentro dos limites aceitáveis. Normalmente existem dois critérios importantes para definirem os limites, os quais conjugam com a adaptação da antena (S11) abaixo dos -20dB e um axial ratio abaixo dos 3dB no caso de ser utilizada uma polarização circular. A largura de banda é definida pela diferença entre a frequência inferior admissível e a frequência máxima.

$$\text{Frequência Central } (F_c) = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (15)$$

$$LB = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_c} \cdot 100 \quad (16)$$

Referências

- [1] Gomes José António da Cunha Teixeira - “Criação de uma rede mesh wireless”, Universidade do Minho Novembro 2010
- [2] Serrador António - “Apontamentos de Sistemas de Transmissão de Banda Larga”, Isel Novembro 2009.
- [3] Wikipedia- “IEEE 802.15”
- [4]- DEETC- “Resumo da proposta da Dissertação MT42” ISEL Julho de 2011
- [5] Wikipedia- “IEEE”
- [6] Wikipedia- “IEEE 802”
- [7] Wikipedia- “IEEE 802.15.4”
- [8] Dick Caro is an ISA Life Fellow. This article comes from his new book Wireless Networks for Industrial Automation, ISA Press, 2004.
- [9] Ribeiro Pedro “Acetatos de Tecnologias Avançadas de Redes (Redes Wirless Lan)”, Isel
- [10] Ergen Sinem Coleri " ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary", September 10, 2004
- [11] Kleber Luís Henrique e Heck Leandro Sehnem “Automação Residencial”, Faculdade de Engenharia de Computação, Fevereiro de 2007
- [12] Gomes Gonçalo Luís Santos “ Sistema RFID com Tecnologia ZigBee”, IST, Novembro de 2008
- [13] Tonon Rafael Coffi, “Rede de Sensores de Temperatura utilizando o protocolo POPNET”, Universidade de São Paulo, 2011
- [14] Saleiro Mário e Ey Emanuel, “ZigBee” , Universidade do Algarve
- [15] Pioner Lucas e Trentin Marco António Sandini, “Body Área Networks” , Instituto de Ciências Exactas e Geociências
- [16] Antenas Theory- Analysis and Design Second Edition- “Constantine A.Balanis

- [17] Ansoft Corporation, “user’s guide”- High Frequency Structure Simulator”, software version 13.0, 2010
- [18] Microchip- “MRF24J40MA Data Sheet”
- [19] Carlos Mendes- “Apontamentos de Antenas”, Isel Setembro 2010.
- [20] Pedro Pinho- “Dissertação sobre Antenas para um terminal Move!”, Universidade de Aveiro 2000
- [21] Pedro Pinho- “Apontamentos de Propagação e Radiação”, Isel 2009
- [22] <http://www.qsl.net/py4zbx/antenas/polarizacao.htm>