



Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Antenas para Redes de Sensores sem Fios

Projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – Telecomunicações

Orientação:

Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Laura Tatiana De Sousa Moreira

dezembro de 2016

Resumo

Com a necessidade de desenvolver nós sensores mais compactos, tem aumentado a procura por antenas mais pequenas. Como a antena é um elemento crucial do módulo de rádio, a qualidade da comunicação de um nó sensor está dependente do desempenho da antena. No entanto, a redução das suas dimensões tem impacto negativo na sua eficiência, constituindo um desafio para os projetistas.

O objetivo principal deste trabalho consistiu no estudo de antenas compactas para a banda ISM (*Industry, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, que possam ser utilizadas num ambiente de espaço livre ou integradas num ambiente típico de um nó sensor. Foram estudadas dezoito antenas, encontrando-se divididas em duas categorias: antenas metálicas e antenas impressas. As nove antenas mais compactas foram embutidas numa caixa com circuitos eletrónicos. Esta análise é importante para avaliar o projeto de uma antena tendo em consideração o ambiente final de utilização devido ao impacto que o ambiente tem sobre as características da antena.

Numa primeira fase construíram-se as várias antenas e analisaram-se as características num ambiente de espaço livre, tendo-se recorrido a uma pesquisa bibliográfica, às simulações eletromagnéticas e à verificação experimental.

Para concluir, as antenas mais compactas das duas categorias foram embutidas numa caixa com circuitos eletrónicos e foram estudadas em diferentes situações, de modo a avaliar a influência do equipamento e da caixa sobre as características das antenas. Estudaram-se as características de cada antena nas várias situações na caixa, fazendo-se uma comparação com as características obtidas no espaço livre. Verificou-se experimentalmente que os diagramas na caixa perdiam as características omnidirecionais nas várias situações e que a frequência central era deslocada para um valor mais baixo. Verificou-se também que as antenas impressas tornavam-se eficientes com a proximidade aos circuitos eletrónicos.

Palavras Chave: Antenas compactas, Simulação de antenas, Construção de antenas, Nó sensor.

Abstract

With the need to develop more compact sensor nodes, the demand for smaller antennas has increased. Since the antenna is a crucial element of the radio module, the quality of the communication of a sensor node depends on the performance of the antenna. However, the reduction of its dimensions has a negative impact on its efficiency, posing a challenge for the designers.

The main objective of this project was to study compact antennas for the 2,4 GHz ISM band that can be used in a free space environment or integrated in a typical sensor node environment. Eighteen antennas were studied, which are divided into two categories: metallic antennas and printed antennas. The nine most compact antennas were embedded in a box with electronic circuits. This analysis is important to evaluate the design of an antenna considering the final environment of use due to the impact that the environment has on the characteristics of the antenna.

In the first phase the various antennas were constructed and the characteristics analyzed in a free space environment, and a bibliographic search was made, to the electromagnetic simulations and to the experimental verification.

To conclude, the most compact antennas of the two categories were embedded in a box with electronic circuits and were studied in different situations, in order to evaluate the influence of the equipment and the box on the characteristics of the antennas. The characteristics of each antenna were studied in the various situations in the box, making a comparison with the characteristics obtained in the free space. It was experimentally found that the diagrams in the box lost the omni-directional characteristics in the various situations and that the center frequency was shifted to a lower value. It was also found that the printed antennas became efficient with the proximity to electronic circuits.

Keywords: Compact Antennas, Antenna simulation, Antenna construction, Sensor node.

Agradecimentos

Com a conclusão deste trabalho concretizo mais um importante objetivo da minha vida, após muito esforço e dedicação. Este objetivo não teria sido concretizado sem o apoio de várias pessoas que quero agradecer.

Ao meu orientador, professor Amândio Azevedo, por todo o apoio, disponibilidade, motivação e conhecimentos transmitidos.

Ao Engenheiro Filipe por toda a assistência prestada durante a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas que me acompanharam ao longo do curso.

Aos meus amigos Pedro Nunes, Natércia Sousa, Gabriela Nunes, Nico Nunes, Raquel Barros, Fábio Vasconcelos, Jorge Valente e Ana Caraban, por me terem apoiado nos vários momentos.

Aos meus queridos pais por me terem apoiado em tudo e por me terem proporcionado os meios para que esta etapa fosse alcançável.

À minha querida irmã por me ter apoiado e ajudado incondicionalmente ao longo de todo o meu percurso académico, tendo tido um papel fundamental no alcance desta etapa.

Ao meu querido namorado Leandro Lopes por me ter sempre apoiado e ajudado em todos os momentos, por sempre acreditar em mim e por nunca me deixar desistir.

Índice

Resumo	ii
Abstract.....	iv
Agradecimentos	vi
Índice	viii
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas	xvi
Lista de acrónimos.....	xviii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura do relatório	2
2 Estado da arte.....	5
2.1 Parâmetros fundamentais de uma antena.....	5
2.1.1 Diagrama de radiação	5
2.1.2 Ganho	7
2.1.3 Impedância de entrada.....	7
2.1.4 Perda de retorno e parâmetro S_{11}	8
2.1.5 Largura de banda	9
2.1.6 Polarização.....	9
2.2 Requisitos das antenas adequadas às RSSF.....	9
2.3 Antena pequena ou compacta	10
2.4 Técnicas de Miniaturização	12
2.4.1 Utilização de materiais dielétricos.....	12
2.4.2 Modificação da geometria da antena.....	13
2.4.3 Utilização do ambiente da antena.....	15
2.4.4 Utilização de efeitos capacitivos, indutivos e de curto-circuito.....	16
2.5 Exemplos de antenas para aplicações de baixa potência e para 2,4 GHz.....	18
2.5.1 Antena monopolo	18
2.5.2 Antena PCB ou impressa.....	19
2.5.3 Antena <i>chip</i>	19
2.5.4 Comparação das características das antenas.....	20
2.6 Substratos de uma antena impressa.....	21
2.7 Adaptação de uma antena	22
2.7.1 Redes de adaptação.....	22
2.7.2 Ajuste das dimensões da antena	23
2.8 Efeito do plano de massa e do invólucro	23

3	Antenas metálicas	27
3.1	<i>Software</i> COMSOL Multiphysics	27
3.2	Sistemas de medição	28
3.2.1	Preparação dos cabos coaxiais	29
3.2.2	Analisador vetorial de rede	30
3.2.3	Câmara anecoica	31
3.3	Monopolo com plano de massa	33
3.4	Monopolo com manga (<i>sleeve monopole</i>)	35
3.5	Antena anel retangular	38
3.6	Antena fio de cobre em “U”	40
3.7	Antena S-P dobrada	42
3.8	Antena com ranhura	44
3.9	Comparação das antenas	45
4	Antenas impressas	47
4.1	Calculadora de linha de transmissão – TX-LINE	47
4.2	Antenas propostas	48
4.2.1	Dipolo FR4	48
4.2.2	Dipolo Duroid RT/5880	51
4.2.3	Antena F	53
4.2.4	Antena G	55
4.2.5	Antena monopolo com plano de massa curto	56
4.2.6	Antena monopolo com plano massa longo	58
4.2.7	Antena anel retangular	60
4.2.8	Antena IFA CPW	61
4.2.9	Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	65
4.3	Comparação das antenas	66
4.4	Determinação da constante dielétrica do substrato FR4	67
5	Efeito nas antenas da presença dos circuitos	71
5.1	Formas de integração das antenas	71
5.2	Antenas metálicas	72
5.2.1	Antena monopolo com manga 1	72
5.2.2	Antena monopolo com manga 2	74
5.2.3	Antena fio de cobre em “U”	75
5.2.4	Antena anel retangular 1	76
5.2.5	Antena com ranhura	77
5.3	Antenas impressas	79
5.3.1	Antena monopolo com plano de massa curto	79
5.3.2	Antena anel retangular	80

5.3.3	Antena IFA CPW 2	81
5.3.4	Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	83
5.4	Desvio da ressonância.....	85
5.5	Ganhos	86
5.6	Procedimento para adaptação das antenas	87
6	Conclusões e trabalhos futuros	89
6.1	Conclusão.....	89
6.2	Trabalhos futuros	91
7	Bibliografia.....	93
	Anexo A.....	99
	Anexo B.....	105
B.1	Antenas metálicas	105
B.1.1	Antena monopolo com plano de massa	105
B.1.2	Antena monopolo com manga 1	105
B.1.3	Antena monopolo com manga 2	107
B.1.4	Antena em anel retangular 1 – com cabo.....	108
B.1.5	Antena em anel retangular 2 – com cabo.....	109
B.1.6	Antena fio de cobre em “U”	110
B.1.7	Antena com ranhura.....	111
B.1.8	Antena dipolo de referência.....	112
B.2	Antenas Impressas	112
B.2.1	Dipolo FR4	112
B.2.2	Dipolo Duroid RT/5880.....	114
B.2.3	Antena F.....	115
B.2.4	Antena G	116
B.2.5	Antena monopolo com plano de massa curto	116
B.2.6	Antena monopolo linear com plano de massa longo	118
B.2.7	Antena anel retangular	119
B.2.8	Antena IFA CPW 1	120
B.2.9	Antena IFA CPW 2.....	122
B.2.10	Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	123
	Anexo C.....	125
C.1	Antenas metálicas	125
C.1.1	Antena monopolo com manga 1	125
C.1.2	Antena monopolo com manga 2	125
C.1.3	Antena anel 1	126
C.1.4	Antena fio de cobre em “U”	126
C.1.5	Antena com ranhura.....	126

C.2 Antenas impressas.....	127
C.2.1 Monopolo com plano de curto e monopolo com plano de massa longo.....	127
C.2.2 Antena anel retangular	127
C.2.3 Antena IFA CPW 1 e antena IFA CPW 2.....	127
C.2.4 Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	128

Índice de figuras

Figura 2.1 – Diagrama de radiação tridimensional e os dois planos principais E e H de uma antena corneta piramidal [3].	6
Figura 2.2 – Antena helicoidal [15].	13
Figura 2.3 – Antena L Invertida (ILA) [15].	14
Figura 2.4 – Estrutura de uma MLA (adaptada) [21].	14
Figura 2.5 – a) Antena H; b) Antena <i>slot</i> [15].	15
Figura 2.6 – Estrutura de uma SMILA (adaptada) [23].	15
Figura 2.7 – Monopolo com carga indutiva [15].	16
Figura 2.8 – Antena F invertido (IFA) [15].	17
Figura 2.9 – Antena PIFA [26].	17
Figura 2.10 – Monopolos: a) Monopolo comercial [31]; b) Antena <i>whip</i> usada no rádio <i>Xbee</i> [32].	18
Figura 2.11 – Módulo transceptor para uma rede de sensores sem fios [35].	19
Figura 2.12 – Antena <i>chip</i> - a) dimensões; b) implementação num protótipo de nó sensor com uma frequência de funcionamento na banda ISM de 2,4 GHz [31].	20
Figura 2.13 – a) Variação da constante dielétrica com a frequência em substratos diferentes [38]; b) Variação do parâmetro S_{11} de uma antena <i>patch</i> de pista impressa em diferentes substratos, com permitividades relativas desde os 2,2 até os 8,8 [39].	21
Figura 2.14 – Esquema da medição da impedância de uma antena com rede de adaptação pelo analisador vetorial (adaptado) [5].	22
Figura 2.15 – Antena IFA na PCB com o traço raspado [41].	23
Figura 2.16 – a) Antena MIFA impressa em três PCB com diferentes tamanhos; b) variação do parâmetro S_{11} em função da frequência para as três PCB com diferentes tamanhos para o plano de massa (pequeno, intermédio e grande) [5].	24
Figura 2.17 – a) Antena MIFA da <i>Cypress</i> dentro do invólucro de plástico; b) parâmetro S_{11} em função da frequência [5].	24
Figura 3.1 – Ambiente de trabalho do COMSOL Multiphysics.	28
Figura 3.2 – a) Antena em forma de F soldada num cabo coaxial RG316; b) antena com ranhura soldada num cabo RG178.	29
Figura 3.3 – Cabos utilizados na medição das características de impedância das antenas das duas categorias.	30
Figura 3.4 – Esquemático das ligações no analisador vetorial para medição das características de impedância das antenas.	30
Figura 3.5 – Esquema da câmara anecoica onde foram realizadas as medições (adaptado) [46].	31
Figura 3.6 – Esquemas das ligações com a utilização da plataforma rotativa na receção da câmara anecoica.	32
Figura 3.7 – Antena monopolo com plano de massa: a) estrutura e respetivos parâmetros; b) protótipo construído.	33
Figura 3.8 – Resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} com a frequência da antena monopolo com plano de massa.	34
Figura 3.9 – Diagramas de radiação da antena monopolo com plano de massa: a) plano H ; b) plano E .	34

Figura 3.10 – Antena monopolo comercial com as dimensões máximas de 110 mm × 10 mm.	35
Figura 3.11 – Monopolo com manga: a) estrutura e parâmetros da antena monopolo com manga; b) antenas monopolo com manga construídas em laboratório.	35
Figura 3.12 – Parâmetros <i>S11</i> das antenas monopolo com manga: a) monopolo com manga 1; b) monopolo com manga 2.	36
Figura 3.13 – Valores da simulação e experimentais do ganho na banda ISM de 2,4 GHz para as antenas monopolo com manga.	37
Figura 3.14 – Geometria e dimensões das antenas retangulares propostas.	38
Figura 3.15 – Antenas anel construídas: a) com conector SMA de 50 Ω; b) com cabo coaxial RG178.	38
Figura 3.16 – Valores experimentais do parâmetro <i>S11</i> das antenas anel metálicas com conector SMA: a) antena anel 1; b) antena anel 2.	39
Figura 3.17 – Resultados experimentais da variação do parâmetro <i>S11</i> para as duas antenas em anel retangular com cabo.	40
Figura 3.18 – Antena fio de cobre em “U”: a) geometria e dimensões da antena; b) antena construída.	41
Figura 3.19 – Variação do parâmetro <i>S11</i> da antena fio de cobre em “U” construída.	42
Figura 3.20 – Antena S-P dobrada; a) esquema tridimensional; b) antena construída;	43
Figura 3.21 – Resultados experimentais da variação do parâmetro <i>S11</i> obtidos para a antena S-P dobrada.	43
Figura 3.22 – Antena com ranhura: a) esquema e dimensões; b) protótipo construído.	44
Figura 3.23 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro <i>S11</i> obtidos para a antena com ranhura.	45
Figura 4.1 – Interface da calculadora TX-LINE.	48
Figura 4.2 – Estrutura da antena dipolo com <i>balun</i> integrado: a) vista frontal; b) verso.	49
Figura 4.3 – Antena dipolo no substrato FR4.	50
Figura 4.4 – Valores simulados de <i>S11</i> para a antena dipolo com o <i>balun</i> integrado e impressa no substrato FR4.	50
Figura 4.5 – Antena dipolo no substrato Duroid RT/5880.	52
Figura 4.6 – Valores simulados e experimentais da variação de <i>S11</i> da antena dipolo com o <i>balun</i> integrado e impressa no substrato Duroid RT/5880.	52
Figura 4.7 – Antena F: a) estrutura e parâmetros da antena; b) antena construída.	53
Figura 4.8 – Valores simulados da variação do parâmetro <i>S11</i> para as duas antenas F e valores experimentais da variação do parâmetro <i>S11</i> para a antena F proposta.	54
Figura 4.9 – Antena G: a) Estrutura e parâmetros; b) antena construída em laboratório.	55
Figura 4.10 – Resultados da simulação e experimentais da variação do parâmetro <i>S11</i> para a antena em forma de G.	55
Figura 4.11 – Antena monopolo com plano de massa curto: a) estrutura e parâmetros; b) protótipo construído em laboratório.	56
Figura 4.12 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro <i>S11</i> em função da frequência para a antena monopolo com plano de massa curto.	57
Figura 4.13 – Variação do parâmetro <i>S11</i> em função das dimensões do plano de massa: a) Variação do plano de massa em largura (<i>Ws</i>) para <i>LG</i> = 3 mm; b) Variação do plano de massa em comprimento (<i>LG</i>) para <i>Ws</i> = 30 mm.	58

Figura 4.14 – Antena monopolo com plano de massa longo.	59
Figura 4.15 – Resultados da simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} para a antena monopolo com plano de massa longo.	59
Figura 4.16 – Antena anel retaguler: a) estrutura e dimensões; b) antena construída.	60
Figura 4.17 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} para a antena anel retangular proposta.	61
Figura 4.18 – Estrutura e parâmetros da antena IFA CPW realizada no <i>software</i> COMSOL Multiphysics.	62
Figura 4.19 – Variação de S_{11} com a frequência para a antena IFA CPW com dimensões de projeto.	62
Figura 4.20 – Antenas IFA construídas: a) IFA 1; IFA 2.	63
Figura 4.21 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} : a) antena IFA 1; b) antena IFA 2.	64
Figura 4.22 – Antena <i>patch</i> com <i>slots</i> : a) estrutura de parâmetros da antena; b) antena construída.	65
Figura 4.23 – Resultados (simulação e experimentais) da variação do parâmetro S_{11} obtidos para a antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	66
Figura 4.24 – Linhas impressas construídas e utilizadas na determinação da constante dielétrica do substrato FR4 na frequência de 2,42 GHz.	68
Figura 5.1 – Representação da posição de uma antena na caixa vista através da tampa: a) Situação 1; b) Situação 2; c) Situação 3.	72
Figura 5.2 – Resultados experimentais das características da antena monopolo com manga 1 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	73
Figura 5.3 – Resultados experimentais das características da antena monopolo com manga 2 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	74
Figura 5.4 – Resultados experimentais das características da antena fio de cobre em “U” no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	75
Figura 5.5 – Resultados experimentais das características da antena anel 1 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; diagramas de radiação no plano H	77
Figura 5.6 – Resultados experimentais das características da antena com ranhura no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	78
Figura 5.7 – Resultados experimentais das características da antena monopolo no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	79
Figura 5.8 – Resultados experimentais das características da antena anel impressa no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	81
Figura 5.9 – Resultados experimentais das características da antena IFA CPW 2 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H	82

Figura 5.10 – Resultados experimentais das características da antena <i>patch</i> com <i>slots</i> no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro <i>S11</i> ; diagramas de radiação no plano <i>H</i> para a frequência de 2,42 GHz.....	84
Figura A.1 – Componentes do <i>Model Builder</i> após a criação do projeto.....	99
Figura A.2 Geometria: a) modelo completo (antena e esfera); b) antena monopolo com manga.	100
Figura A.3 – a) Superfícies metálicas da antena monopolo com manga (azul); b) porta (verde); c) campo distante (amarelo); d) fronteira de dispersão (amarelo);.....	100
Figura A.4 – a) Antena discretizada em tetraedros de diferentes tamanhos; b) Esfera/PML discretizada com hexahedros e com uma malha muito mais larga que a antena.....	102
Figura A.5 – Gráfico de convergência dado pelo erro em função do número de iterações. ..	103
Figura A.6 – Características obtidas para uma antena monopolo com manga: a) valores do campo elétrico na frequência de 2,42 GHz; b) diagrama de radiação e valores do ganho (dBi) na frequência de 2,42 GHz; c) valores da impedância (Ω) e do parâmetro S (dB) obtidos numa gama de frequências.	103

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação entre as antenas monopolo, PCB e <i>chip</i> , adequadas para aplicações sem fios de baixa potência.....	20
Tabela 2.2 – Características dos substratos FR4 e RT/Duroid 5880.	22
Tabela 3.1 – Características físicas e resultados obtidos experimentalmente para as antenas metálicas.	46
Tabela 4.1 – Parâmetros inseridos na calculadora TX-Line para a linha impressa do substrato FR4.	51
Tabela 4.2 – Parâmetros inseridos na calculadora TX-Line para a linha impressa do substrato Duroid/RT 5880.....	51
Tabela 4.3 – Características físicas e experimentais das antenas impressas.	67
Tabela 4.4 – Parâmetros necessários à determinação do valor médio da constante dielétrica do substrato FR4 e na banda ISM de 2,4 GHz.	68
Tabela 5.1 – Valores da frequência de ressonância em espaço livre (sem caixa) e dentro da caixa para as antenas em estudo e respectiva discrepância de frequência em relação ao valor em espaço livre.....	85
Tabela 5.2 – Ganho de pico das antenas (na vertical/sem inclinação) em espaço livre e dentro da caixa.	86

Lista de acrónimos

RF - *Radio Frequency*

ISM - *Industry, Scientific and Medical*

PCB - *Printed Circuit Board*

RSSF – *Rede de Sensores Sem Fio*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

GSM – *Global System for Mobile Communications*

ILA – *Inverted L antenna*

MLA - *Meander Line Antenna*

SMILA - *Smart Monobloc Integrated-L Antenna*

PIFA – *Planar Inverted-F Antenna*

IFA - *Inverted F antenna*

UWB - *Ultra-Wide-Band*

SMA – *SubMiniature version A*

MIFA - *Meander Inverted F antenna*

PML – *Perfectly Matched Layer*

FEM- *Finite Element Method*

VNA - *Vector Network Analyzer*

RP-SMA – *Reverse Polarity - SubMiniature version A*

AUT – *Antenna Under Test*

USB - *Universal Serial Bus*

CPW – *Coplanar Waveguide*

balun – *Balanced-to-unbalanced*

WLAN - *Wireless Local Area Network*

WIMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

RSSI - *Received Signal Strength Indicator*

LQI - *Link Quality Indicator*

1 Introdução

A utilização de redes de sensores sem fios tem vindo a crescer significativamente nos últimos anos devido à necessidade das mesmas em inúmeras áreas, incluindo áreas cruciais da nossa sociedade, como a monitorização de infraestruturas, florestas, gases tóxicos e sinais vitais.

Uma das funções mais importantes das redes de sensores é a comunicação, sendo necessária a transmissão e receção dos dados em tempo real nas aplicações. Num nó sensor a comunicação é estabelecida através do canal de rádio, em que um elemento principal é a antena.

Neste capítulo pretende-se apresentar a motivação por detrás deste projeto, os objetivos principais que se pretende alcançar, e a forma como o trabalho se encontra organizado ou repartido.

1.1 Motivação

Com o desenvolvimento tecnológico, os equipamentos eletrónicos estão cada vez mais discretos, levando à necessidade dos nós sensores serem igualmente compactos para serem integrados nos equipamentos. A diminuição das dimensões do nó sensor obriga também à diminuição dos seus componentes, incluindo a antena. Por este motivo, tem havido um aumento na investigação e desenvolvimento de estruturas cada vez mais pequenas, tendo sido utilizadas várias técnicas para a miniaturização.

A diminuição das dimensões da antena tem implicações na eficiência e na largura de banda, devido à diminuição da resistência de radiação e ao aumento da componente reativa. Por esta razão, a conceção de estruturas compactas, eficientes e com largura de banda suficiente constitui um grande desafio para os projetistas, sendo necessário um compromisso entre estas características.

A eficiência ou ganho de uma antena é um parâmetro bastante importante no estabelecimento da ligação entre os nós, devendo ser maximizado. Quanto maior o ganho, maior é o alcance RF (*Radio Frequency*) e a distância entre os nós sensores e melhor é a qualidade da comunicação, havendo menores perdas de informação que resultam em menores retransmissões de informação. Desta forma, também contribuem para a redução dos custos e do consumo de energia por parte dos nós, que são dois recursos bastante críticos nas redes de sensores. Numa banda partilhada, como é o caso da banda ISM de 2,4 GHz (2,4 – 2,4835 GHz), há uma maior necessidade de antenas com bom desempenho, devido à maior vulnerabilidade a interferências.

As antenas impressas têm vindo a ser bastante investigadas ao longo dos anos, devido às várias vantagens que apresentam comparativamente às outras antenas, como baixo perfil, compactação (dielétricos de permitividade elevada), processo de construção semelhante à placa de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*), baixo custo, entre outras. No entanto, estas antenas têm necessidade de planos de massa de grande dimensão para serem eficientes, fazendo uso do plano de massa da PCB onde estão integradas.

O ambiente de integração de uma antena modifica as suas características, especialmente se a antena tiver dimensões mais pequenas, podendo levar à desadaptação. Assim sendo, torna-se necessário testar as antenas no ambiente final de integração. Isto acontece porque os campos

eletromagnéticos gerados por uma antena tendem a interagir com os materiais nas proximidades, especialmente se forem materiais condutores, como é o caso dos equipamentos eletrônicos que compõem o nó sensor.

Portanto, a escolha da antena adequada para um nó sensor tem de ter em consideração o ambiente final de integração e não apenas as características em espaço livre.

1.2 Objetivos

Este trabalho de projeto tinha como principal objetivo estudar antenas compactas e eficientes para a banda ISM de 2,4 GHz, assim como analisar o impacto que o ambiente tipicamente encontrado no nó sensor tem sobre as características destas antenas, de modo a encontrar as soluções mais adequadas.

Antes de se proceder à escolha das antenas foi necessário realizar um estudo aprofundado nesta área, de forma a compreender as limitações das antenas pequenas ao nível do desempenho, a conhecer as características desejáveis de antenas adequadas às RSSF (Rede de Sensores Sem Fio), a compreender algumas das técnicas de miniaturização das estruturas mais utilizadas, os tipos de estruturas tipicamente encontrados em dispositivos de baixa potência, incluídos os sensores, e as vantagens e desvantagens de cada estrutura, a ter conhecimento de técnicas de adaptação usadas para adaptar as antenas e perceber de que forma a caixa de proteção, o plano de massa e os outros componentes metálicos influenciam a adaptação das antenas.

As antenas foram escolhidas e implementadas a partir da bibliografia e da verificação das características através da simulação eletromagnética no *software* COMSOL Multiphysics. O critério usado incluiu a compactação, o desempenho, a operabilidade em toda a banda ISM de 2,4 GHz, a facilidade de construção e a utilização do substrato FR4, no caso das antenas impressas.

Por fim, pretendia-se analisar as características das antenas mais compactas num ambiente típico de um módulo sensor, de modo a aferir a influência que uma caixa de plástico e os circuitos eletrónicos têm nas antenas pequenas ao nível da adaptação, do ganho e diagramas de radiação, e seleccionar as antenas mais adequadas. Além disso, também é apresentado um procedimento de adaptação que foi demonstrado por algumas antenas impressas testadas na caixa.

1.3 Estrutura do relatório

Este relatório encontra-se dividido em 6 capítulos. A seguir a este capítulo introdutório é apresentado o capítulo composto pelo estado de arte sobre as antenas, mais concretamente os parâmetros que caracterizam as antenas, as características tipicamente desejadas para as RSSF, as definições de antena compacta e os limites físicos associados, as técnicas de miniaturização, os tipos de antenas encontradas nos sensores, a influência do ambiente sobre as antenas e técnicas de adaptação usadas.

No capítulo 3 apresentam-se as antenas metálicas estudadas, com os resultados da bibliografia, da simulação e verificação experimental. Também é realizada uma breve

introdução ao simulador eletromagnético COMSOL Multiphysics e são mostrados os sistemas de medição usados, comuns a todas as antenas deste trabalho.

No capítulo 4 apresentam-se as antenas impressas implementadas, com análise e comparação entre os resultados experimentais e resultados teóricos. No final do capítulo é feita uma comparação entre as antenas estudadas e também é apresentado o método utilizado na determinação do valor da constante dielétrica do substrato FR4 na banda ISM de 2,4 GHz.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos com a inserção das antenas na caixa com equipamento eletrônico, de modo a simular um nó sensor real, em que cada antena foi posicionada na caixa de, pelo menos, duas formas diferentes. Fez-se a comparação dos resultados obtidos nas várias situações e no espaço livre. Também é apresentado um método de adaptação das antenas que foi provado experimentalmente.

Finalmente, no capítulo 6 apresentam-se as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 Estado da arte

Neste capítulo são apresentados vários conteúdos necessários à compreensão e à realização deste trabalho, encontrando-se organizado em oito secções. Na primeira secção é apresentada a definição de uma antena e as propriedades de impedância e de radiação que a caracterizam. Na secção dois encontram-se as características desejadas para as antenas que se destinam às redes de sensores sem fio. Com a necessidade de nós sensores cada vez mais compactos, as antenas devem ser igualmente compactas e, portanto, nas três secções seguintes são apresentados os conceitos que definem uma antena de pequena dimensão, os limites fundamentais das antenas pequenas e as técnicas de miniaturização utilizadas para reduzir as dimensões das antenas no modo fundamental, bem como exemplos de estruturas de antenas resultantes destas técnicas e as suas características (largura de banda, impedância, características de radiação, etc.). Também houve necessidade de estudar as antenas normalmente encontradas nos nós sensores e outros dispositivos RF, as quais são agrupadas em três grupos: antena fio, antena PCB e antena *chip*. Muitas destas antenas apresentam estruturas miniaturizadas, sendo apresentadas na secção cinco. Na seção sete apresentam-se os substratos que serão usados no projeto das antenas e os parâmetros que influenciam o valor da constante dielétrica que condiciona o dimensionamento de uma antena. Na penúltima secção são apresentadas duas técnicas que permitem adaptar as antenas para que estas possam funcionar na banda de interesse. Para terminar, na última secção estuda-se a influência do ambiente sobre as características de uma antena, mais concretamente, o efeito do plano de massa e de um invólucro de plástico.

2.1 Parâmetros fundamentais de uma antena

Uma antena converte correntes variáveis, provenientes de um guia de onda, cabo de alimentação ou linha de transmissão, em ondas eletromagnéticas que se propagam através do espaço livre, transmitindo a energia na direção da antena recetora e vice-versa [1], [2]. As dimensões mínimas da antena devem ser comparáveis ao comprimento de onda para que a potência fornecida à antena seja radiada [1], [3].

As antenas são caracterizadas em função das suas propriedades. Estas propriedades (direcionais) são equivalentes para a antena a funcionar como emissora e como recetora, de acordo com o teorema da reciprocidade [2]. Os parâmetros mais importantes à compreensão deste trabalho são apresentados nas secções que se seguem.

2.1.1 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação de uma antena consiste, normalmente, numa representação gráfica (2D ou 3D) das suas características de radiação em função de coordenadas espaciais (geralmente, as coordenadas esféricas), mas também pode ser caracterizado através de uma função matemática. São várias as características de radiação de uma antena: intensidade de

radiação, densidade de potência radiada, campo elétrico (magnético), diretividade, polarização, etc. [3].

Para a maioria das antenas, esta representação da energia radiada é determinada na região do campo distante [3]. O campo distante é uma região do espaço onde o campo é perpendicular à direção de propagação [2], [3]. Essa região situa-se acima de uma distância de raio R (fronteira interna) e estende-se até ao infinito. O raio R (m) é dado por:

$$R = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2.1)$$

onde D (m) é a maior dimensão da antena e λ (m) é o comprimento de onda no espaço livre [3]. Esta expressão é válida para antenas em que D é muito maior do que o comprimento de onda.

Para as antenas pequenas a distância R é tipicamente considerada como sendo dez vezes superior à fronteira do campo próximo, ou seja,

$$R = \frac{10\lambda}{2\pi} \quad (2.2)$$

As características de radiação das antenas linearmente polarizadas são representadas, com regularidade, em dois diagramas definidos por dois planos principais E e H . O plano E é o plano que caracteriza o vetor do campo elétrico e contém a direção de máxima radiação. O plano H corresponde ao plano do vetor do campo magnético e da direção de máxima radiação. Para caracterização da polarização as antenas estão centradas num sistema de coordenadas (x, y, z) e um dos planos principais deste sistema de coordenadas deve coincidir com um dos planos E e H , como se pode observar na Figura 2.1 [3].

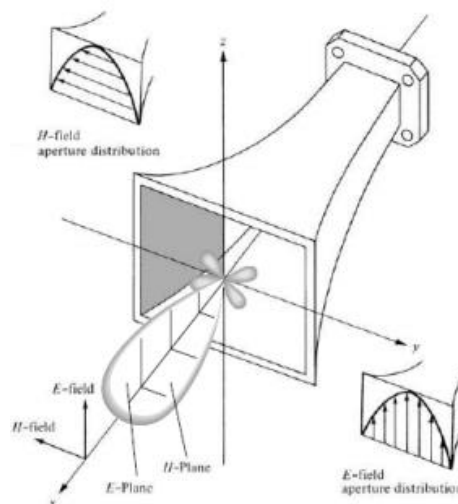


Figura 2.1 – Diagrama de radiação tridimensional e os dois planos principais E e H de uma antena corneta piramidal [3].

Um lóbulo de radiação é uma quantidade de radiação que é delimitada por uma intensidade de radiação relativamente mais fraca nas regiões vizinhas. Existem várias categorias de lóbulos: principal ou maior, secundários, laterais e posterior. O lóbulo principal é

o lóbulo maior e contém a direção da máxima radiação da antena. Os lóbulos secundários são todos os outros lóbulos para além do lóbulo principal [3].

De acordo com a forma do diagrama de radiação, uma antena pode ser classificada de isotrópica, diretiva ou omnidirecional.

2.1.2 Ganho

O ganho é um parâmetro que tem em consideração as características direcionais e a eficiência da antena [3], podendo ser calculado por:

$$G = \eta D, \quad (2.3)$$

onde η é a eficiência (adimensional) e D é a diretividade (adimensional).

Um dos parâmetros mais importantes de uma antena é a eficiência. A eficiência é uma medida da quantidade de energia útil que é radiada pela antena em função da potência que é fornecida por uma fonte de alimentação. A eficiência total tem em consideração todas as perdas, podendo ser decomposta em duas eficiências: a eficiência de reflexão que contabiliza as perdas por reflexão nos terminais de entrada da antena e a eficiência de radiação da antena que considera as perdas (condutividade e dielétricas), dentro da estrutura da antena. De acordo com as normas do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), o ganho é um parâmetro que apenas tem em consideração as perdas dentro da estrutura da antena, não incluindo as perdas por reflexão e as perdas por polarização [3].

A diretividade é um parâmetro que permite determinar a intensidade de radiação de uma antena numa determinada direção. É definida como a razão entre a intensidade da radiação proveniente da antena numa direção e a intensidade de radiação média em todas as direções [3]. A intensidade de radiação média é determinada pela potência total radiada pela antena dividida pela área de uma esfera de raio unitário que corresponde a 4π [4].

O ganho definido na equação (2.3) designa-se por ganho absoluto. Um outro ganho muito utilizado é o ganho relativo que é dado pela razão entre o ganho de potência numa dada direção e o ganho de potência conhecido (ou que pode ser calculado) de uma antena de referência (ex. dipolo, corneta) nessa mesma direção, em que ambas as antenas têm a mesma potência de entrada. Tipicamente, os valores do ganho são medidos tendo como referência uma antena isotrópica e na direção de máxima radiação, indicando a intensidade do campo de radiação da antena comparativamente à antena isotrópica, sendo a unidade de medida o dBi [3], [5].

2.1.3 Impedância de entrada

A impedância de entrada é a impedância apresentada aos terminais da antena, sendo dada pela razão entre a tensão e a corrente no par de terminais, sendo representada por:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.4)$$

onde $Z_A (\Omega)$ é a impedância da antena nos terminais, $R_A (\Omega)$ é a resistência da antena nos terminais e $X_A (\Omega)$ é a reactância da antena nos terminais [3].

2.1.4 Perda de retorno e parâmetro S_{11}

A perda de retorno de uma antena indica a quantidade de potência que é refletida devido à desadaptação da impedância que existe entre a antena e a linha de transmissão, em que a linha apresenta uma impedância tipicamente real e de 50Ω [5]. Portanto, a perda de retorno relaciona a potência refletida com a potência fornecida à antena, sendo dada por

$$RL = 10 \log \left(\frac{P_{inc}}{P_{ref}} \right), \quad (2.5)$$

e a potência radiada é

$$P_{rad} = P_{inc} - P_{ref}, \quad (2.6)$$

onde RL (dB) é a perda de retorno, P_{inc} (W) é a potência incidente, P_{ref} (W) é a potência refletida e P_{rad} (W) é a potência radiada [5].

O parâmetro S_{11} equivale à perda de retorno, com sinal negativo, sendo expresso também em decibéis (dB). O ideal seria que toda a potência fornecida à antena fosse radiada, mas nos sistemas reais existem sempre reflexões, devendo estas ser minimizadas. A referência $S_{11} \leq -10$ dB é muito utilizada para definir a largura de banda de operação de uma antena, significando que a potência máxima refletida é de 90% [5].

Se a potência for apresentada em função da tensão [6], a perda de retorno pode ser representada em função do coeficiente de reflexão Γ (adimensional) [7]:

$$RL = 20 \log |\Gamma| \text{ (dB)}. \quad (2.7)$$

Se a carga está adaptada ($\Gamma = 0$), a perda de retorno é menos infinito. Se a energia é toda refletida ($\Gamma = 1$), a perda de retorno tem o valor de 0 dB [7].

Quando a carga está desadaptada, a onda refletida leva ao aparecimento de ondas estacionárias e a magnitude da tensão na linha de transmissão deixa de ser constante. Com o aumento de $|\Gamma|$, a razão entre a tensão máxima da linha $V_{m\acute{a}x}$ (V) e a tensão mínima $V_{m\acute{i}n}$ (V) na linha aumenta. Uma medida da desadaptação da linha é o SWR definido por [7]:

$$SWR = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{m\acute{i}n}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}. \quad (2.8)$$

Os valores do SWR pertencem ao intervalo $[1, \infty]$, onde para uma carga adaptada o valor do SWR é unitário [7].

2.1.5 Largura de banda

A largura de banda é definida como um intervalo de frequências em torno de uma frequência central (ressonância) para as quais as características da antena apresentam limites adequados. As características podem ser parâmetros associados ao diagrama de radiação (diagrama, largura do feixe, polarização, ganho, eficiência da radiação, etc.) ou parâmetros relacionados com a impedância de entrada da antena (impedância de entrada, SWR , etc.). Portanto, não existe uma única caracterização para a largura de banda [3], [8].

Neste trabalho, a largura de banda é definida em função do parâmetro S_{11} , sendo definida pela gama de frequências para as quais a antena tem um $S_{11} \leq -10$ dB (equivalente a um $SWR \leq 2$), sendo esta definição muito utilizada em vários trabalhos científicos de antenas.

2.1.6 Polarização

A polarização é a orientação do campo elétrico da onda eletromagnética (transmitida ou recebida) no campo distante e segundo uma direção. Mais concretamente, corresponde à figura traçada pela extremidade do vetor do campo elétrico no espaço ao longo do tempo, incluindo o sentido em que essa figura é traçada, quando a onda eletromagnética é observada segundo a sua direção de propagação. Existem diferentes polarizações: elíptica, linear e circular. Na polarização linear o vetor do campo elétrico (ou campo magnético) está sempre orientado segundo uma linha reta, podendo propagar-se na vertical (polarização vertical) ou horizontal (polarização horizontal). Com a polarização circular, o vetor do campo elétrico (ou magnético) traça um círculo em função do tempo. Na polarização elíptica, o campo elétrico traça uma elipse no espaço. Quando a polarização da antena recetora é diferente da polarização da onda incidente proveniente da antena emissora, existem perdas de polarização. As perdas de polarização podem ser totais, uma vez que uma antena polarizada horizontalmente não comunica com uma antena polarizada verticalmente, devido ao princípio da reciprocidade [3], [9], [10].

2.2 Requisitos das antenas adequadas às RSSF

As redes de sensores sem fios têm desafios diferentes de outras redes, especialmente, a potência de consumo e o tamanho do nó sensor. As antenas que compõem os nós sensores são consideradas componentes críticos dado que podem melhorar ou deteriorar o desempenho do sistema de comunicação [11]. As características tipicamente desejáveis para uma antena são:

- **Compacta** - as antenas devem ser fisicamente pequenas ou compactas, devido à necessidade de nós sensores mais discretos e de espaço para as baterias. Uma frequência de operação mais elevada permite reduzir as dimensões, mas tem alguns inconvenientes, como o aumento da perda de percurso e aumento da potência DC de consumo [11];
- **Eficiente** – quanto mais eficiente for a antena, menor é a quantidade de energia desperdiçada. Os nós sensores têm, geralmente, uma potência de transmissão baixa [11];

- **Ganho elevado** – o ganho deve ser o mais elevado possível, possibilitando um maior alcance por parte dos nós sensores e, ao mesmo tempo, permitindo minimizar o efeito do ruído e da interferência de outros sinais [11]. As dimensões da antena estão relacionadas com o ganho. As antenas de menores dimensões têm, geralmente, menor ganho;
- Dependendo do diagrama de radiação, uma antena pode ser classificada em:
 - **Omnidirecional** – as antenas com este diagrama dão uma cobertura praticamente uniforme em todas as direções [11], [12]. São tradicionalmente utilizadas em nós sensores devido às suas menores dimensões, menor custo, fácil implementação e protocolos de transmissão mais simplificados [12]. Além disso, normalmente os nós sensores são dispostos aleatoriamente e podem movimentar-se. Por outro lado, conferem um alcance menor e uma menor imunidade ao ruído e às interferências [11];
 - **Diretiva** – estas antenas transmitem e recebem grande parte da potência numa determinada direção [12]. Esta característica permite aumentar o ganho da antena, contribuindo para o aumento da distância de comunicação (alcance) e para uma maior imunidade às interferências e colisões [11], [12]. Desta forma, aumenta-se a qualidade da transmissão e reduz-se a energia despendida pelos nós sensores, aumentando-se o tempo de vida desses nós, um recurso bastante crítico [12], [13]. Na maioria dos casos, as antenas diretivas têm um ganho consideravelmente superior ao ganho das antenas omnidirecionais [11]. Contudo, existem algumas desvantagens, nomeadamente, uma complexidade crescente, maiores custos e maiores tamanhos [12].
- **Baixo custo** - a rede sem fios é normalmente composta por um elevado número de nós sensores, sendo necessário minimizar os custos [11].

2.3 Antena pequena ou compacta

É necessário saber qual a referência padrão para classificar uma antena pequena. As pessoas classificam normalmente as antenas em relação à escala humana. Por exemplo, uma antena que caiba dentro da palma da mão é considerada fisicamente pequena, enquanto uma antena com 20 metros de altura é considerada fisicamente grande. O tamanho físico de uma antena, assim como o ambiente em que a antena vai ser inserida, são importantes para o projeto mecânico da antena. Contudo, para o projeto elétrico, o tamanho físico trata-se de um elemento secundário. No projeto elétrico de uma antena a escala de interesse é o comprimento de onda no espaço livre λ (m) para a frequência de operação f (Hz), sendo definido por:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.9)$$

onde c (m/s) é a velocidade da luz [14].

As antenas que permitem uma forte compactação e eficiência na radiação são, geralmente, estruturas ressonantes. Com o desenvolvimento de vários estudos acerca de antenas cada vez mais pequenas, comparativamente ao modo fundamental, surgiu a antena eletricamente pequena. Segundo Wheeler, uma antena eletricamente pequena é uma antena menor do que a esfera radiano, que é a fronteira entre o campo próximo e o campo distante, com um raio de [15]:

$$a = \frac{1}{k} = \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (2.10)$$

O raio a (m) é o raio da menor esfera (no espaço livre) que envolve a antena e k (rad/m) é uma constante [11], [15]. Outra definição também usada para classificar uma antena eletricamente pequena é que a sua maior dimensão deve ser igual ou menor que $\lambda/10$ [14]. Uma antena pode ser eletricamente pequena e não ser fisicamente pequena. É o caso de uma antena com uma frequência de operação de 1 MHz ($\lambda = 300$ m) e com a maior dimensão igual a 15 m ($\lambda/20$), sendo esta antena eletricamente pequena e fisicamente grande [14].

Outra caracterização de uma antena com respeito às suas dimensões designa-se de baixo perfil. Normalmente, esta expressão significa que uma antena é pequena (curta) em comparação com o objeto onde é montada/inserida, podendo também ser eletricamente pequena. Contudo, as antenas não são consideradas eletricamente pequenas porque as dimensões em termos de largura podem ser de $\lambda/4$ ou superior [14].

A miniaturização de uma antena é limitada por leis físicas, sendo necessário a definição de alguns limites fundamentais [15].

Tendo em consideração a equação (2.10), uma aproximação para o fator de qualidade Q de uma antena no modo de ressonância fundamental é [11]:

$$Q = \frac{1}{k^3 a^3} + \frac{1}{ka}. \quad (2.11)$$

A largura de banda de impedância é muitas vezes referida como [16]:

$$BW = \frac{1}{Q}. \quad (2.12)$$

Já o ganho máximo que pode ser obtido neste modo é dado por [15]:

$$G = ka(ka + 2). \quad (2.13)$$

Pelas equações (2.11), (2.12) e (2.13), constata-se que a redução das dimensões de uma antena, que equivale à redução do raio a , tem como contrapartidas a redução do ganho e/ou da largura de banda, sendo necessário um compromisso entre o tamanho e estas características da antena (largura de banda e eficiência de radiação) [15]. No caso das antenas eletricamente pequenas, estas possuem impedâncias de entrada mais reativas, dificultando a transferência de potência para a antena [14].

Tendo em conta que as estruturas ressonantes são as que apresentam eficiência ao nível da radiação, devem ser desenvolvidas estratégias para que sejam criadas ressonâncias dentro do menor volume finito possível [15]. Na secção que se segue são apresentadas técnicas para obter antenas mais compactas do que as estruturas no modo fundamental e as características das antenas resultantes dessas técnicas.

2.4 Técnicas de Miniaturização

Existem técnicas que permitem obter antenas mais compactas do que as estruturas de base no modo fundamental (dipolo de meio comprimento de onda, monopolo, anel ressonante, *patch*, *slot*). As técnicas possíveis incluem a utilização de materiais dielétricos de elevada permitividade e magneto-dielétricos de elevada permeabilidade, a modificação da geometria da antena, a utilização do ambiente da antena e a adição de cargas capacitivas e/ou cargas indutivas e de curto-circuitos [11], [15], [16].

2.4.1 Utilização de materiais dielétricos

As antenas compactas podem ser obtidas a partir de uma estrutura de base que opera na frequência fundamental. Independentemente da estrutura, a frequência fundamental corresponde ao comprimento de meio comprimento de onda ($\lambda_g/2$). Este comprimento de onda guiado λ_g (m) corresponde ao comprimento de onda do sinal no meio que envolve a antena ou substrato. A equação deduzida para os meios dielétricos é dada por:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (2.14)$$

onde λ (m) é o comprimento de onda no espaço livre (vazio) e ϵ_{eff} é a permitividade efetiva do meio. Para os materiais magnéticos, a permitividade é substituída pela permeabilidade e, ainda, nos meios magneto-dielétricos consideram-se os dois parâmetros. De acordo com a equação (2.14), à medida que a permitividade do meio aumenta, o comprimento de onda guiado diminui face ao comprimento de onda no vazio. Assim sendo, consegue-se obter antenas com dimensões mais compactas através da utilização de material dielétrico com elevada permitividade [15].

O material dielétrico é o mais utilizado na redução das dimensões das antenas [16]. Infelizmente, com o aumento da permitividade do substrato, a eficiência ou ganho e a largura de banda são severamente afetados, pelo que tem que haver um compromisso entre as dimensões das antenas e as suas características [15].

Uma outra opção que tem sido estudada é o material magneto-dielétrico. Os estudos realizados com antenas *patches* em [16] mostram que as antenas impressas em substratos de material magneto-dielétrico permitem aumentar a largura de banda de impedância, comparativamente às antenas com iguais dimensões em substratos dielétricos.

2.4.2 Modificação da geometria da antena

A modificação do perfil de uma antena permite reduzir as dimensões da antena. A antena é conformada de modo a aproveitar eficazmente o volume disponível. Desta forma, a onda passa a propagar-se num percurso não linear e mais longo [15]. Esta técnica resulta do facto de que uma antena confinada numa circunferência deve ter um volume efetivo máximo para um fator de qualidade mínimo, estando apenas limitada pelo raio da circunferência (secção 2.3) [11], [15].

Alguns exemplos de antenas que resultaram da modificação da geometria de outras antenas são apresentados de seguida.

2.4.2.1 Antena helicoidal

Esta antena deriva do monopolo de um quarto do comprimento de onda, em que o braço vertical é comprimido, sendo este enrolado em torno de um formato cilíndrico (Figura 2.2) [15].

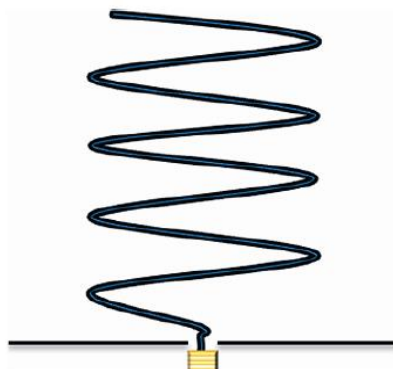


Figura 2.2 – Antena helicoidal [15].

A sua forma altera a impedância, conduzindo a uma resistência mais baixa, implicando, normalmente, a utilização de um transformador de impedância. O correto dimensionamento desta antena permite obter um diagrama de radiação omnidirecional, semelhante ao do monopolo. As dimensões tipicamente usadas no projeto desta antena são em torno de $\lambda/10$ para a altura e $\lambda/40$ para o diâmetro. A sua largura de banda de impedância é inferior ou igual a 8%. Esta antena consegue cobrir toda a banda GSM (*Global System for Mobile Communications*), razão pela qual foi bastante usada nos telemóveis [15], [16].

2.4.2.2 Antena L invertida

A antena L invertida (ILA - *Inverted L antenna*) resulta também do monopolo de um quarto do comprimento de onda, em que o fio vertical é dobrado de forma a ficar paralelo ao plano de massa (Figura 2.3). A antena é composta por uma parte vertical e uma parte horizontal, apresentando o mesmo comprimento elétrico que o monopolo e, portanto, a frequência de ressonância também é a mesma [15], [16].

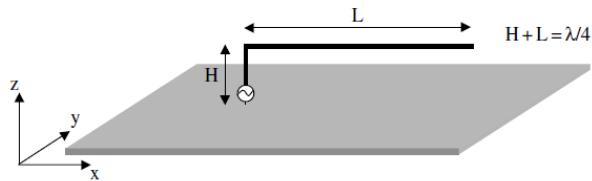


Figura 2.3 – Antena L Invertida (ILA) [15].

Contudo, esta topologia tem os seus impactos. O braço horizontal próximo do plano de massa funciona como uma carga capacitiva e, portanto, a impedância de entrada consiste numa resistência baixa e numa reactância elevada [16], [17]. É necessário um circuito de adaptação para igualar a impedância de entrada da antena à impedância de uma linha de transmissão de 50Ω [18]. A largura de banda é bastante baixa, não excedendo os 1% [16]. O diagrama de radiação desta antena é omnidirecional no azimute, contudo, o diagrama apresenta uma mistura de polarização vertical e horizontal [15], [17].

2.4.2.3 Antena *meander line*

Na antena *meander* (MLA - *Meander Line Antenna*) o fio condutor é dobrado várias vezes, resultando numa estrutura mais compacta, como se pode observar na Figura 2.4 [19]. Como desvantagem, a resistência de radiação, a eficiência e a largura de banda diminuem, sendo tipicamente necessário adaptar a impedância [20]. Esta antena e a antena helicoidal podem ser facilmente fabricadas numa placa de circuito impresso, e também são utilizadas na construção de antenas *chip* cerâmicas [19]. Estas antenas são encontradas nos telemóveis e na banda GSM [16].



Figura 2.4 – Estrutura de uma MLA (adaptada) [21].

2.4.2.4 Antenas *patch* com *notches* e *slots*

As antenas *patch* também podem ser concebidas para que as correntes percorram percursos mais longos, através da inclusão de *notches* e/ou *slots*. Na Figura 2.5 são apresentados dois exemplos: a antena H e a antena *Slot*. A antena H resulta de dois *notches*, ou seja, de duas ranhuras no material condutor nas laterais do *patch*. Desta forma, a onda ressonante percorre um percurso maior entre as extremidades do *patch*, permitindo que o tamanho da antena seja reduzido, sendo o seu comprimento L inferior a $\lambda_g/2$. A antena *slot* segue o mesmo princípio,

mas com duas ranhuras dentro do *patch*. Estes *notches* e *slots* modificam a impedância (parte imaginária) do *patch* de forma diferente [15].

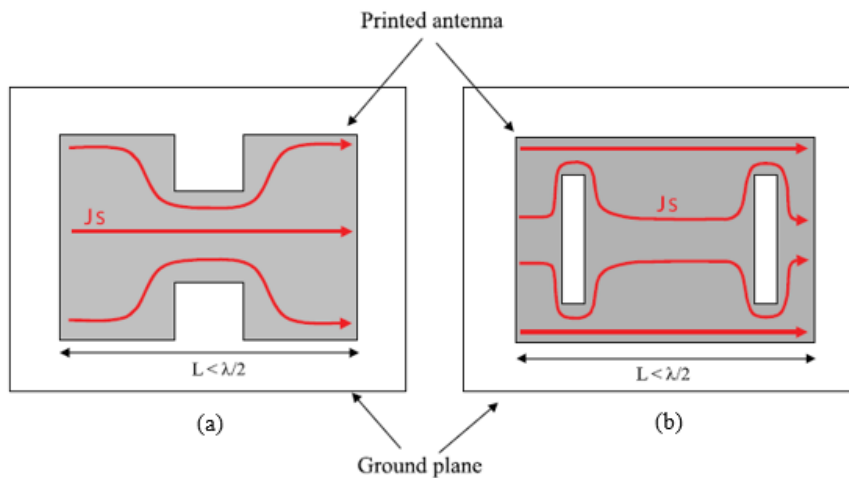


Figura 2.5 – a) Antena H; b) Antena slot [15].

2.4.3 Utilização do ambiente da antena

A eficiência de radiação da antena pode ser melhorada fazendo com que o ambiente onde a antena é inserida participe no processo de radiação. Em alguns projetos, o invólucro da antena faz parte do ambiente da antena. É o caso da antena SMILA (*Smart Monobloc Integrated-L Antenna*) que utiliza um invólucro para radiar a maior parte da energia, funcionando apenas como ressonador para determinar a frequência [11]. Esta antena consiste numa antena PIFA (*Planar Inverted-F Antenna*) com o elemento radiante dobrado e integrada dentro de uma caixa, como é mostrado na Figura 2.6 [22]. Esta antena, para além de ser muito pequena (cerca de $\lambda/5$), é simples e eficiente, podendo ser fabricada como parte integrante de uma caixa metálica que envolve o equipamento eletrónico, reduzindo muito os custos. A afinação da frequência e adaptação da impedância também são muito simples [22].

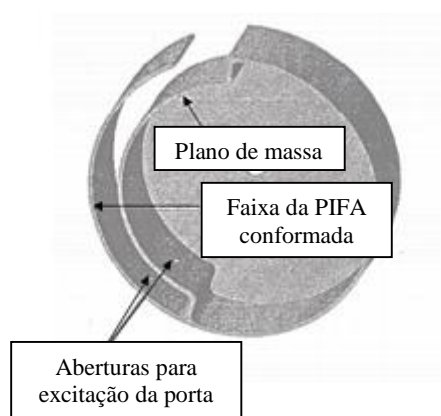


Figura 2.6 – Estrutura de uma SMILA (adaptada) [23].

2.4.4 Utilização de efeitos capacitivos, indutivos e de curto-circuito

A criação de efeitos capacitivos ou indutivos reduz o valor da frequência da antena e, como consequência, a antena torna-se proporcionalmente menor em relação ao comprimento de onda. Podem ser adicionadas cargas indutivas ou capacitivas, mas a modificação da topologia da antena de forma a criar o efeito capacitivo ou indutivo localmente tem sido mais adotada [15].

A adição de curto-circuitos tem contribuído para a compactação das antenas. Já a combinação destes dois, a utilização de curto-circuitos e de efeitos capacitivos ou indutivos, levam à construção de antenas muito mais compactas [15].

2.4.4.1 Antena *whip*

Uma antena que utiliza o efeito indutivo é o monopolo de um quarto do comprimento de onda ou *whip*. Na Figura 2.7 é apresentada uma antena *whip* eletricamente pequena com uma bobina (carga indutiva) na base [15], [24]. Como a impedância de uma antena *whip* eletricamente pequena é altamente reativa e de forma capacitiva, é utilizada uma bobina na base em série com o fio condutor para anular o efeito capacitivo e, ao mesmo tempo, colocar a antena ressonante na frequência de operação [24].

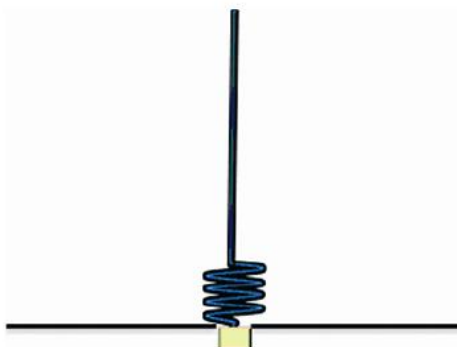


Figura 2.7 – Monopolo com carga indutiva [15].

2.4.4.2 Antena F invertido

A antena F invertido (IFA - *Inverted F antenna*) resulta da modificação da estrutura da ILA, através da adição de um outro segmento em L invertido ao segmento horizontal (Figura 2.8). A colocação do segmento alimentado em paralelo com este segmento vertical (curto-circuito) dá origem a um acoplamento indutivo que fica em paralelo com a capacitância do segmento horizontal, modificando a impedância de entrada que passa a ser quase resistiva, ao contrário da ILA [15], [16], [17], [25].

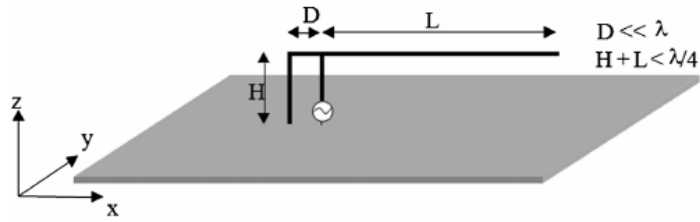


Figura 2.8 – Antena F invertido (IFA) [15].

O ajuste da impedância de entrada faz com que a IFA se tornasse mais popular que a ILA em aplicações que exigem baixo perfil [17]. Uma desvantagem desta antena é a sua baixa largura de banda de impedância de cerca de 2% ou 3% [16].

2.4.4.3 PIFA

A antena planar F invertido (PIFA) pode ser considerada uma variante da antena F invertido, em que o fio horizontal é substituído por uma placa condutora paralela ao plano de terra, como se pode observar na Figura 2.9 [17], [25]. Geralmente, a PIFA é composta por uma *patch* retangular de dimensões $W \times L$, por um plano de terra e por um plano de curto-circuito (ou pinos de curto-circuito), com uma largura W (que varia de W a 0), e que liga a placa retangular ao plano de terra [15]. A placa de curto-circuito está localizada num dos cantos da *patch* retangular e a alimentação coaxial é feita relativamente próxima do plano de curto-circuito [26].

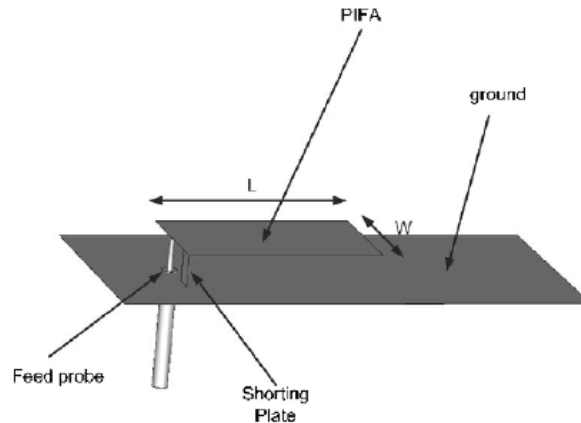


Figura 2.9 – Antena PIFA [26].

A frequência de operação pode ser determinada de forma aproximada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{c}{4(W+L)}, \quad (2.15)$$

onde c é a velocidade da luz (m/s), L (m) e W (m) são o comprimento e a largura do elemento radiante, respetivamente, e f é a frequência de operação (Hz) [26].

A PIFA é uma antena compacta bastante utilizada, principalmente quando é necessário uma forte integração, nomeadamente, nos terminais portáteis (telemóveis e *tablets*) [15], [26].

Em termos de radiação, é uma antena eficiente, no entanto, apresenta uma largura de banda muito estreita de cerca de 5%, não sendo adequada aos sistemas de comunicação sem fios de banda larga ou de ultra banda (UWB - *Ultra-Wide-Band*) [17], [25]. Além disso, tem outras desvantagens como a falta de controlo sobre o diagrama de radiação e a pureza de polarização muito degradada [15]. Contudo, existem vários métodos que permitem melhorar a largura de banda destas antenas, os quais são apresentados em [26].

2.5 Exemplos de antenas para aplicações de baixa potência e para 2,4 GHz

Muitas das antenas utilizadas nas placas de circuito impresso (PCB) e para as aplicações de baixo alcance na banda ISM de 2,4 GHz, como é o caso das redes de sensores sem fios, podem ser inseridas em três categorias: antena monopolo, antena PCB e antena *chip* [5].

2.5.1 Antena monopolo

A antena monopolo consiste num fio sobre a PCB que pode ter várias formas (linear, helicoidal e anel) [5].

A antena externa ligada através de um conector SMA (*SubMiniature version A*), na figura 2.10a), confere o melhor desempenho e alcance RF [27], sendo utilizada quando o desempenho é o requisito mais importante e o tamanho e o custo não são críticos [28]. Este monopolo comercial usa o revestimento de plástico para fazer a adaptação e possui uma manga metálica ou *balun* como plano de massa, tornando-a mais atrativa para as aplicações [3], [29]. O custo de produção é elevado quando comparado com a antena *chip* ou antena PCB [30].

Uma outra antena bastante utilizada é a antena *whip*, normalmente, um monopolo com a configuração apresentada na Figura 2.10b). Esta antena é, tipicamente, utilizada nos dispositivos na perpendicular ao plano de massa.



Figura 2.10 – Monopolos: a) Monopolo comercial [30]; b) Antena *whip* usada no rádio *Xbee* [31].

2.5.2 Antena PCB ou impressa

A antena PCB é uma antena impressa sobre um material PCB que pode ter inúmeras configurações: antena F invertido, antena *meander*, dipolo, etc. [5]. A Figura 2.11 apresenta o exemplo de antena MIFA (*Meander Inverted F antenna*).

Pelo facto de ser uma antena de duas dimensões, comparativamente à antena fio de três dimensões, esta antena, geralmente, requer uma maior área PCB e apresenta uma eficiência mais baixa do que a antena fio. Além do mais, estas antenas são geralmente monopolos com estruturas diferentes do monopolo típico e, por isso, necessitam de um plano de massa sólido para funcionarem corretamente [5].

As antenas impressas têm-se tornado preferenciais nos sistemas de comunicação móveis e nas aplicações de sensores sem fios, devido às várias vantagens que oferecem sobre as outras antenas: baixo perfil, planares, leves, mais fáceis e baratas de fabricar (utilização das mesmas técnicas que as PCB), miniaturização real (substratos com constantes dielétricas elevadas) e capacidade de integração com circuitos [32].

Tem a desvantagem do projeto destas antenas requerer um *software* de simulação para que seja encontrada uma solução que satisfaça os requisitos. O desenvolvimento de uma estrutura da antena com as dimensões ótimas e, ao mesmo tempo, a garantia da fiabilidade das simulações pode ser um processo difícil, para além de ser dispendioso ao nível computacional [28].

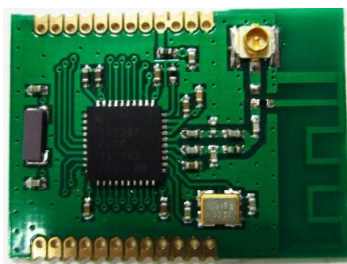


Figura 2.11 – Módulo transceptor para uma rede de sensores sem fios [33].

2.5.3 Antena *chip*

A antena *chip* é uma antena cerâmica que pode incluir uma destas estruturas de antenas: monopolo, antenas F invertido e antena F invertido planar (PIFA) [30]. Na Figura 2.12 mostra-se um monopolo de um quarto do comprimento de onda constituído por um elemento dourado radiante encapsulado em cerâmica [30]. Esta antena é atrativa porque o próprio material dielétrico permite a redução das dimensões, tornando-a mais adequada para uma placa de PCB com um espaço bastante reduzido, até mesmo para frequências de operação abaixo de 1 GHz [28], [34]. Comparativamente às antenas PCB, estas antenas necessitam normalmente de componentes de adaptação, mesmo com uma impedância de 50Ω na banda de frequências desejada, para que a antena tenha um desempenho adequado [28]. Também é muito importante respeitar as recomendações para a inclusão destas antenas na placa, de forma a atingir o melhor desempenho possível (as áreas livres ou limite, a orientação, ter em atenção as interferências, etc.) [30]. São sensíveis ao tamanho do plano de massa RF e não podem ser afinadas através do ajuste das dimensões [5]. Portanto, o custo inicial da antena mais os custos associados à

otimização do desempenho podem resultar num custo total mais elevado do que o custo de uma antena impressa ou PCB [30].

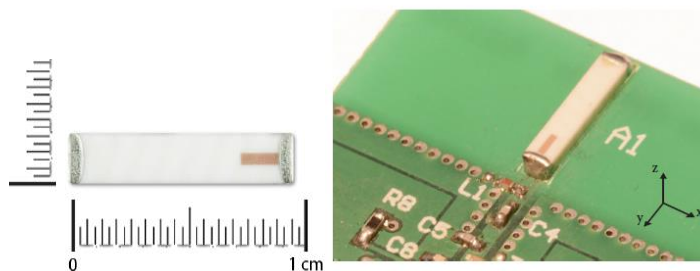


Figura 2.12 – Antena *chip* - a) dimensões; b) implementação num protótipo de nó sensor com uma frequência de funcionamento na banda ISM de 2,4 GHz [30].

2.5.4 Comparação das características das antenas

Na Tabela 2.1 é realizada uma comparação entre as antenas apresentadas acima para aplicações de baixa potência (2,4 GHz), tendo-se como parâmetros de comparação o desempenho, tamanho e custo.

Tabela 2.1 – Comparação entre as antenas monopolo, PCB e *chip*, adequadas para aplicações sem fios de baixa potência.

	Vantagens	Desvantagens
Antena monopolo	<ul style="list-style-type: none"> • Bom desempenho (eficiente, omnidirecional e bom alcance) [28]; • Antena externa, pode ser instalada fora da caixa do sensor [30]; 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de fabrico elevado [28], [30]; • Não é compacta, sendo difícil de integrar em muitas das aplicações [28];
Antena PCB	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo [28]; • Baixo perfil [5]; • Compacta em frequências elevadas [28]; • Bom desempenho pode ser alcançado [28]; 	<ul style="list-style-type: none"> • O projeto de antenas compactas e eficientes é difícil [28]; • Nas frequências mais baixas, as dimensões podem ser elevadas [28];
Antena <i>chip</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bastante compacta [28]; 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho médio [28]; • Custo médio [28];

A antena monopolo é adequada quando se pretende um diagrama omnidirecional com um bom alcance. A antena PCB ou impressa é aquela que oferece o melhor compromisso entre as três características (compactação, desempenho e custo). Já a antena *chip* é a mais compacta e adequada onde um espaço com dimensões reduzidas. Portanto, a escolha de uma antena está dependente dos requisitos da aplicação (existem várias aplicações das RSSF) a que se destina.

2.6 Substratos de uma antena impressa

As dimensões e as características de uma antena (impedância, largura de banda, ganho, etc.) estão dependentes do substrato, mais precisamente, da constante dielétrica ϵ (ou permissividade relativa). Esta propriedade é uma medida da interação do material com o campo elétrico produzido pela antena [35]. Quanto mais elevada é a constante dielétrica, mais devagar a onda eletromagnética se propaga, sendo o comprimento de onda maior e, conseqüentemente, menores são as dimensões de uma antena. A constante dielétrica varia com o tipo e quantidade de materiais que constituem o dielétrico, com a frequência, com a temperatura, etc. [36]. Assim, substratos do mesmo material (ex. FR4), mas com diferentes espessuras, e a operar na mesma frequência vão apresentar constantes dielétricas diferentes. Também substratos exatamente iguais mas com frequências diferentes vão apresentar, geralmente, constantes dielétricas diferentes. Tipicamente, para os vários substratos a constante dielétrica diminui com a frequência. Na Figura 2.13a) mostra-se a variação da constante dielétrica com a frequência para diferentes substratos. Pode-se observar que o substrato FR4 com diferentes quantidades de resina apresenta diferentes valores para a mesma frequência. Já na Figura 2.13b), mostra-se a variação das características de uma antena na frequência com a variação da constante dielétrica ou permissividade relativa.

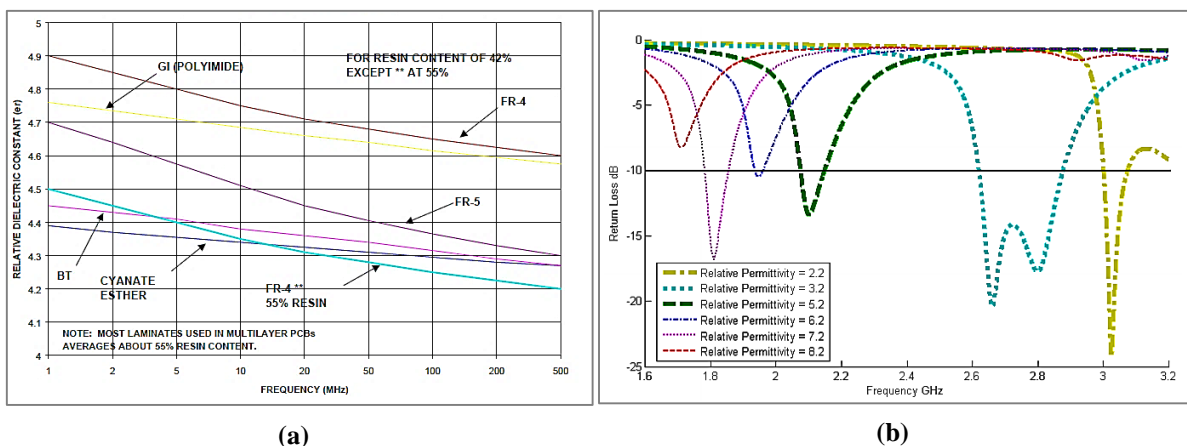


Figura 2.13 – a) Variação da constante dielétrica com a frequência em substratos diferentes [36]; b) Variação do parâmetro S_{11} de uma antena *patch* de pista impressa em diferentes substratos, com permissividades relativas desde os 2,2 até os 8,8 [37].

Para que se possa projetar uma antena é extremamente importante conhecer o valor da constante dielétrica do substrato na frequência de interesse ou de projeto. Normalmente, os fabricantes apenas especificam a constante dielétrica para uma frequência ou gama de frequências que pode não incluir a frequência de interesse ou de projeto. Existem vários métodos utilizados para determinar a constante dielétrica pelos fabricantes de materiais. Um método simples e que pode ser realizado em laboratório é o método de comprimento-fase diferencial.

O projeto das antenas compactas impressas será realizado tendo presente o FR4. O substrato Duroid RT/5880 apenas será usado no projeto e implementação da antena dipolo de referência. As características destes substratos são apresentadas na Tabela 2.2 e os dados foram fornecidos pelos respectivos fabricantes, à exceção do valor da constante dielétrica no substrato FR4 para a frequência de 2,42 GHz que foi retirado da bibliografia [38].

Tabela 2.2 – Características dos substratos FR4 e RT/Duroid 5880.

Parâmetros	FR4	RT/Duroid 5880
Constante dielétrica (ϵ_r)	5,0 (1 MHz) 4,4 (2,42 GHz)	2,20
Fator de dissipação ($\tan \sigma$)	0,02	0,001
Espessura do substrato (h)	1,6 mm	1,57 mm
Espessura da película de cobre (h_c)	7 μm	35 μm

2.7 Adaptação de uma antena

Uma antena pode ser adaptada com a utilização de uma rede de adaptação (*stubs*, condensadores e bobinas) ou através do ajuste das suas dimensões [39].

2.7.1 Redes de adaptação

As redes de adaptação podem ser constituídas por *stubs* RF ou elementos passivos RF (condensadores e bobinas). Estas permitem adaptar um componente RF (fonte ou carga) a uma linha de transmissão de 50 Ω , sendo normalmente colocadas junto aos componentes RF, como se pode ver no exemplo da Figura 2.14, onde uma antena é ligada a um rádio por intermédio de duas redes de adaptação com elementos passivos, uma para o rádio e outra para a antena. A razão deste procedimento deve-se ao facto da impedância complexa variar com a distância do componente (fonte ou carga) nas frequências RF, estando os componentes de adaptação também dependentes dessa distância [5].

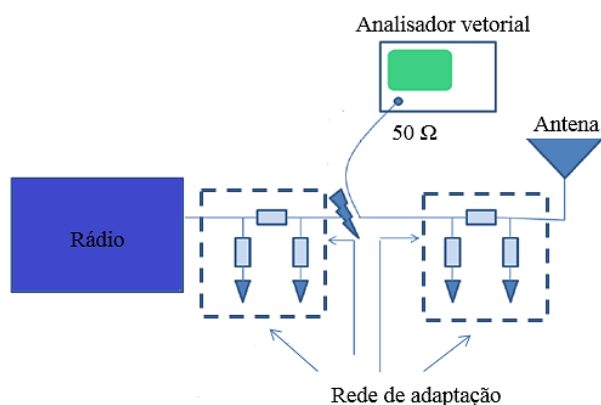


Figura 2.14 – Esquema da medição da impedância de uma antena com rede de adaptação pelo analisador vetorial (adaptado) [5].

Para que ocorra a máxima transferência de potência da antena para o rádio e vice-versa, ambos os componentes devem ter a mesma impedância, ou seja, devem estar adaptados. Assim, para cada componente é utilizada uma rede de adaptação (neste caso, com elementos passivos) para transformar e igualar as impedâncias de ambos os componentes à impedância da linha de transmissão de 50 Ω . Para medir a impedância transformada da antena os restantes componentes

precisam ser desconectados do circuito e um analisador vetorial referenciado a 50Ω mede a impedância à entrada da rede de adaptação da antena [5].

O diagrama de Smith é uma ferramenta gráfica muito útil para projetar de forma simples e rápida uma rede de adaptação com *stubs* RF ou elementos passivos RF (condensadores e bobinas) para adaptar componentes RF a uma linha de transmissão de 50Ω . Basta desenhar a impedância complexa e com este dado consegue-se determinar a topologia (existem várias topologias possíveis) e os valores dos elementos passivos [5].

Estas redes são preferencialmente usadas nas placas de circuito impresso e têm como vantagem o facto de conferirem flexibilidade para adaptar a impedância da antena na presença de outras variáveis (variação do plano de massa, presença de uma cobertura de plástico, diferenças no substrato, etc.). Contudo, têm como desvantagens o espaço ocupado e a complexidade associada ao projeto dos componentes necessários, uma vez que os componentes obtidos por cálculos teóricos (ou por simulação) tendem a diferir significativamente dos componentes exigidos na prática devido à presença de elementos parasitas [5].

2.7.2 Ajuste das dimensões da antena

Uma outra forma de adaptar a impedância de entrada da antena consiste em alterar as suas dimensões. Quando são antenas formadas por um circuito na PCB ou antenas fio, basta apenas ajustar o comprimento, raspando o traço ou cortando o fio, como se pode observar na Figura 2.15. No caso de outras antenas mais complicadas, isto implica a simulação e construção de uma nova antena, sendo uma desvantagem [5].



Figura 2.15 – Antena IFA na PCB com o traço raspado [39].

2.8 Efeito do plano de massa e do invólucro

O desempenho de uma antena é determinado pelo ambiente em que esta se encontra. Os campos eletromagnéticos radiados pela antena interagem com os materiais nas proximidades, podendo alterar a frequência de operação. O projeto da antena deve ter em consideração o ambiente final onde esta vai ser colocada [39]. Pretende-se aqui analisar a sensibilidade das antenas em relação ao tamanho do plano de massa das PCB e ao revestimento de plástico.

Uma antena pode ser modelada como um oscilador LC , em que a frequência de ressonância (f , Hertz) está dependente da indutância (L , Henry) e da capacitância (C , Farad), variando inversamente com o aumento destas duas constantes (L e C). Um plano de massa largo ou um invólucro de plástico fazem com que a capacitância efetiva da antena aumente e a frequência de ressonância diminua [5].

Na Figura 2.16 mostra-se uma antena MIFA da *Cypress* impressa sobre três PCB com planos de massa de tamanhos diferentes e a variação do parâmetro S_{11} em função da frequência para estes três casos. As dimensões das PCB variam desde os 20 mm × 20 mm até os 50 mm × 50 mm [5].

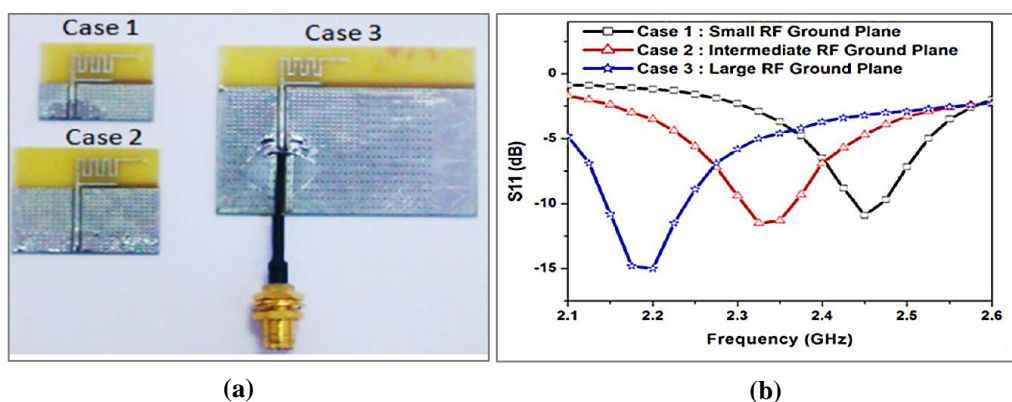


Figura 2.16 – a) Antena MIFA impressa em três PCB com diferentes tamanhos; b) variação do parâmetro S_{11} em função da frequência para as três PCB com diferentes tamanhos para o plano de massa (pequeno, intermédio e grande) [5].

Constata-se que a frequência de ressonância diminui com o aumento do plano de massa. Já o parâmetro S_{11} melhora com o aumento do plano de massa, com uma melhoria significativa no caso do plano de massa maior [5].

Na Figura 2.17 é apresentada uma antena MIFA da *Cypress* colocada dentro do invólucro de plástico de um rato sem fios e a variação do parâmetro S_{11} com a frequência, para esta antena no espaço livre e no interior do invólucro de plástico [5].

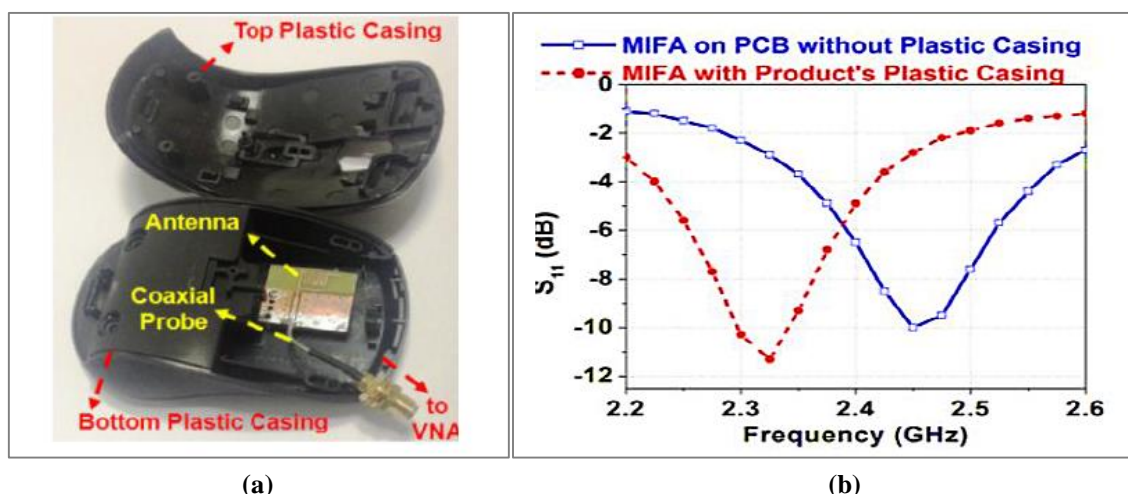


Figura 2.17 – a) Antena MIFA da *Cypress* dentro do invólucro de plástico; b) parâmetro S_{11} em função da frequência [5].

Com o revestimento de plástico, a frequência de ressonância da antena foi deslocada para um valor mais baixo, com o desvio entre 100 MHz e 200 MHz. Como consequência, a antena deve ser novamente sintonizada na banda desejada [5]. Isto acontece com todas as antenas projetadas antes da embalagem (ou revestimento). Contudo, este desvio de frequência depende do tipo de material usado, quer para a embalagem, quer para o substrato [39].

A localização da antena deve ser prioritária aquando do desenvolvimento de um produto, mas, normalmente, é o último componente a ser finalizado. Isto deve-se às dificuldades e à complexidade, muitas das vezes, apresentadas pelo processo de adaptação [39].

Os objetos metálicos nas proximidades ou embalagem metálica devem ser evitados, uma vez que têm um impacto significativo no desempenho da antena, devido às correntes induzidas, funcionando como pequenos radiadores [39].

Um aspeto muito importante a ter em consideração é que as medições de impedância e do parâmetro S_{11} devem ser realizadas com muito cuidado para que não sejam introduzidos erros que podem comprometer o desempenho da antena. Uma antena mal adaptada pode degradar severamente a qualidade de uma ligação entre 10 a 30 dB e reduzir consideravelmente o alcance. A energia refletida nos terminais de entrada da antena também pode afetar o circuito RF [39].

3 Antenas metálicas

As antenas analisadas foram agrupadas em duas categorias, aquelas que foram construídas com elementos metálicos e as antenas impressas. Neste capítulo são apresentadas as da primeira categoria, com o estudo das seguintes antenas: monopolo com plano de massa, monopolos com manga 1 e 2, antenas anel retangular 1 e 2, fio de cobre em “U”, antena S-P dobrada e antena com ranhura.

O *software* COMSOL, na versão 4.4, foi utilizado para apoiar a construção de várias antenas.

Para medir as antenas de ambas as categoriais foram construídos cabos coaxiais, os quais são apresentados neste capítulo, bem como os sistemas de medição utilizados.

3.1 *Software* COMSOL Multiphysics

O COMSOL Multiphysics [40] é um programa de simulação que permite analisar problemas de diversas áreas: acústica, biociência, reações químicas, corrosão, difusão, eletroquímica, eletromagnetismo, dinâmica dos fluídos, transferência de calor, engenharia de micro-ondas, ótica, componentes de rádio frequência, dispositivos semicondutores, propagação de ondas, etc. Isto é possível graças à sua capacidade de resolver múltiplos fenômenos físicos acoplados em simultâneo no mesmo modelo, representando com maior fiabilidade os sistemas do mundo real (ex.: como a resistência elétrica de um condutor varia com a temperatura) [40]. Oferece um ambiente de trabalho completo e de fácil interação com o utilizador, já que não requer conhecimentos aprofundados de matemática ou de análise numérica [40].

A sua interface gráfica é apresentada na Figura 3.1. O *Model Builder* é o componente principal onde o utilizador define o modelo e todos os seus componentes (geometria, materiais, módulo ou física, malha de discretização), resolve, analisa os resultados e cria os relatórios [41]. Do lado direito da janela do *Model Builder* são apresentadas as interfaces físicas para a configuração [40]. Na janela *Graphics* são apresentados os gráficos interativos para os vários componentes do modelo e resultados. No decorrer ou após a simulação podem ser consultadas as janelas de informação [41].

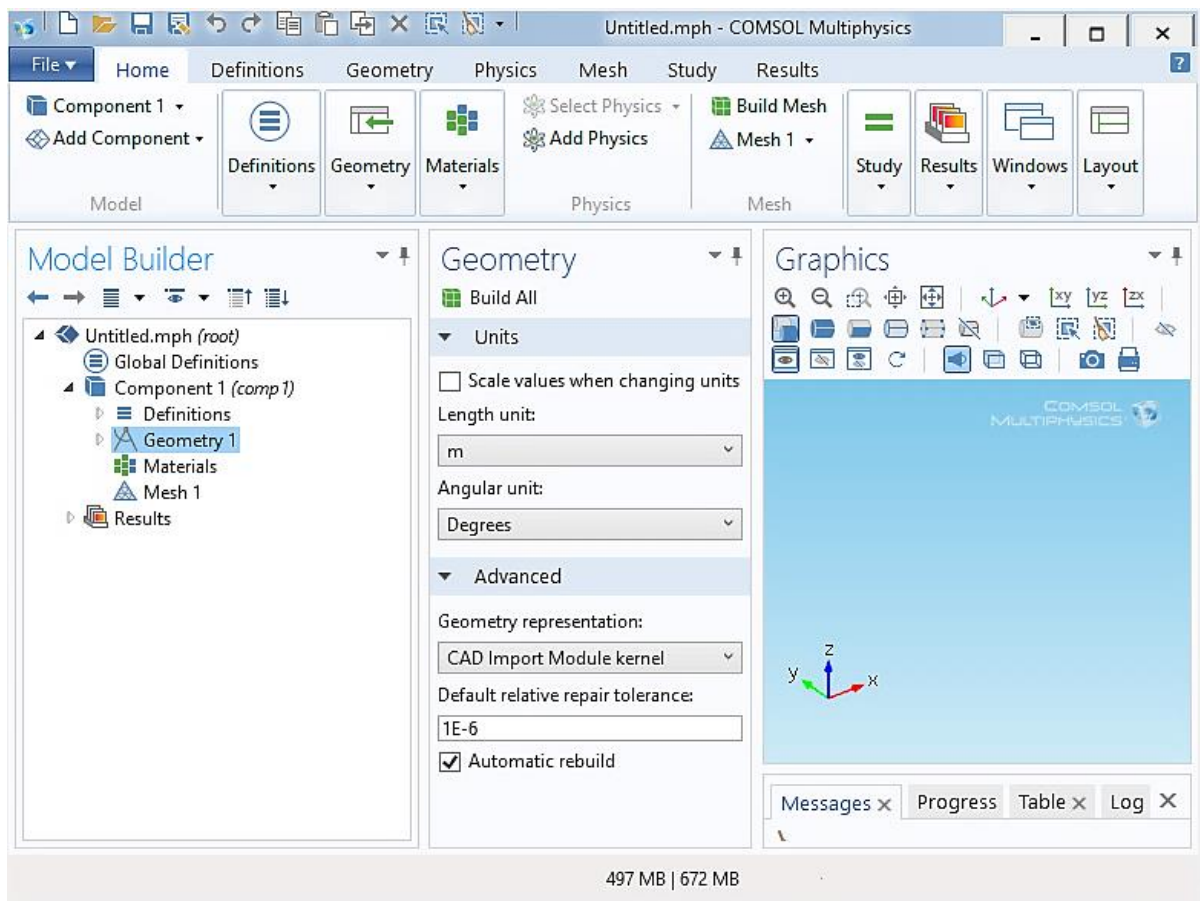


Figura 3.1 – Ambiente de trabalho do COMSOL Multiphysics.

Na sua configuração base, o COMSOL Multiphysics permite a modelação e a análise de potência para muitas das áreas de aplicação. Para as áreas de aplicação específicas encontram-se disponíveis módulos com terminologias, interfaces físicas e soluções mais adequadas. Para a simulação de antenas, o módulo adequado é o RF. Este módulo permite resolver os problemas de praticamente todas as áreas onde existem ondas eletromagnéticas. As equações subjacentes ao eletromagnetismo já se encontram disponíveis em todas as interfaces físicas. Para além das características de pós-processamento padrão, este módulo suporta o cálculo dos valores dos parâmetros S e dos diagramas de radiação para o campo distante. Outros aspetos relevantes são a configuração da onda de excitação das portas em termos de potência e modo, e a possibilidade de utilizar a PML (*Perfectly Matched Layer*) para simular as ondas eletromagnéticas no espaço livre [40].

O módulo RF permite resolver os fenómenos físicos no domínio da frequência (*Electromagnetic Waves, Frequency Domain*), na forma de equações de Maxwell, através do método dos elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*) [42].

Para descrever o processo de construção de uma antena, simulação e obtenção de resultados, o anexo A apresenta a aplicação deste *software* a uma antena monopolo com manga.

3.2 Sistemas de medição

A medição das características das antenas das duas categorias foi realizada com recurso a dois sistemas de medição:

- analisador vetorial de rede (VNA - *Vector Network Analyzer*) - para medição das características de impedância, nomeadamente, a impedância, a largura de banda, o parâmetro S_{11} e o SWR;
- câmara anecoica: para medição dos diagramas de radiação e ganhos.

Para que se consiga medir as características de uma antena é necessário conectá-la aos sistemas de medição por meio de uma linha de transmissão, tipicamente um cabo coaxial com um comprimento múltiplo de meio comprimento de onda no cabo (λ_c). No entanto, os cabos utilizam conectores, dificultando a identificação do comprimento correto. Uma forma de garantir o múltiplo é realizar um curto-circuito numa das extremidades e ajustar o comprimento com o auxílio do analisador vetorial, tendo sido este o método de referência para este trabalho. Além disso, todos os cabos presentes nos sistemas de transmissão foram projetados, em termos de dimensões, para a frequência de 2,42 GHz.

3.2.1 Preparação dos cabos coaxiais

3.2.1.1 Cabos que ligam às antenas

Como as antenas são compactas, o ambiente circundante tem uma maior influência sobre as suas características. Por esta razão, não é aconselhável utilizar cabos e conectores com dimensões comparáveis às antenas, tendo-se optado por utilizar cabos mais finos e conectados diretamente às antenas. Além do mais, a utilização de um cabo que faz parte da antena confere uma maior flexibilidade no posicionamento da antena, aquando da sua integração numa caixa de um nó sensor.

Utilizaram-se diferentes cabos e conectores para as duas categorias de antenas, por se ter colocada a possibilidade de integrar algumas antenas numa rede de sensores funcional. Para as antenas metálicas utilizaram-se cabos RG178 e conectores SMA fêmea de 50Ω , como se pode observar na Figura 3.2a). No caso das antenas impressas usaram-se os cabos coaxiais RG178 e RG316, e conectores RP-SMA (*Reverse Polarity - SubMiniature version A*) macho, como se pode observar na Figura 3.2b). O comprimento dos cabos foi escolhido para ser igual a $2\lambda_c/2$.

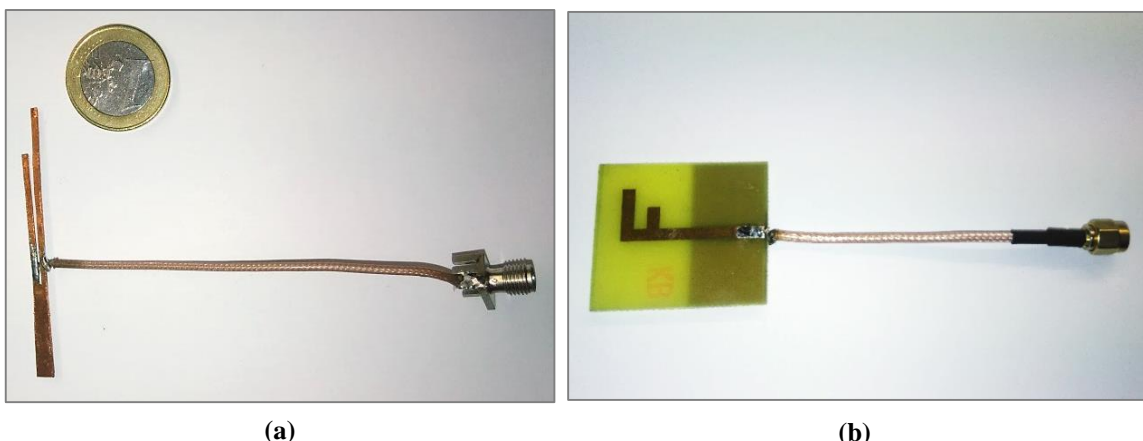


Figura 3.2 – a) Antena em forma de F soldada num cabo coaxial RG316; b) antena com ranhura soldada num cabo RG178.

3.2.1.2 Cabos que ligam ao VNA

Para conectar as antenas ao analisador vetorial de rede foram preparados dois cabos coaxiais RG58, os quais encontram-se representados Figura 3.3. A necessidade de dois cabos coaxiais diferentes deveu-se à utilização de conectores diferentes por parte das antenas das duas categorias, sendo utilizado o cabo 1 para as antenas metálicas e o cabo 2 para as antenas impressas. O conector do tipo N, comum aos dois cabos, faz a ligação ao analisador de rede.

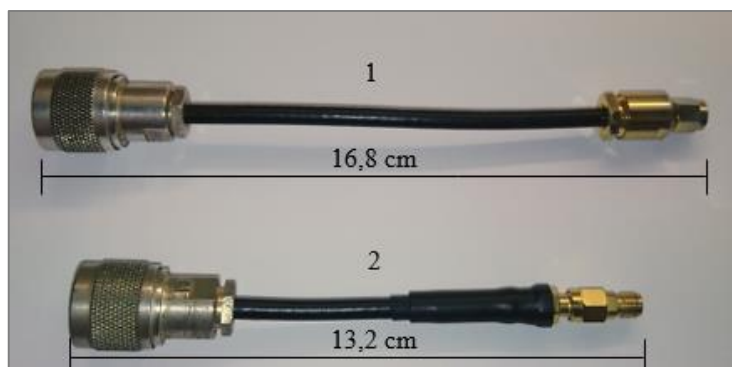


Figura 3.3 – Cabos utilizados na medição das características de impedância das antenas das duas categorias.

Os comprimentos dos cabos correspondem a $4\lambda_c/2$ para o cabo 1 e $3\lambda_c/2$ para o cabo 2.

3.2.2 Analisador vetorial de rede

Após a construção dos cabos de medição, fez-se a medição experimental das características de impedância das antenas no analisador vetorial de rede (VNA) da Rohde Schwarz ZVB4 [43], sendo apresentado o esquema de ligações na Figura 3.4.

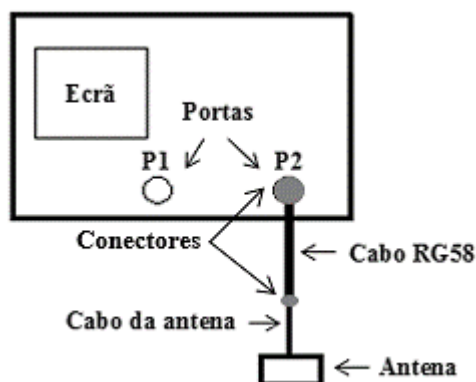


Figura 3.4 – Esquemático das ligações no analisador vetorial para medição das características de impedância das antenas.

Como as antenas monopolo com plano de massa e S-P dobrada têm um conector SMA, estas foram conectadas diretamente ao cabo RG58.

Para garantir uma maior fiabilidade nas medições, fez-se sempre calibração do equipamento antes das medições.

3.2.3 Câmara anecoica

Na câmara anecoica procedeu-se a medição da potência recebida para posterior determinação do ganho e dos diagramas de radiação nos vários planos (XY, YZ e XZ). O esquema de disposição das antenas na câmara anecoica é apresentado na Figura 3.5.

Na emissão são usadas duas antenas, a antena corneta que recebe o sinal do gerador e a antena parabólica que retransmite o sinal proveniente da antena corneta para a recepção, onde se encontra a antena de teste (AUT - *Antenna Under Test*). Na recepção, a quantidade de potência recebida é mostrada no analisador de potência que está ligado à antena por meio de cabo coaxial.

O material absorvente em forma piramidal absorve os raios refletidos para que a antena receba apenas os raios em linha de vista, de forma a simular a propagação das ondas eletromagnéticas no espaço livre. A distância entre a antena parabólica e a antena na recepção é suficiente para que sejam recebidas ondas planas no campo distante.

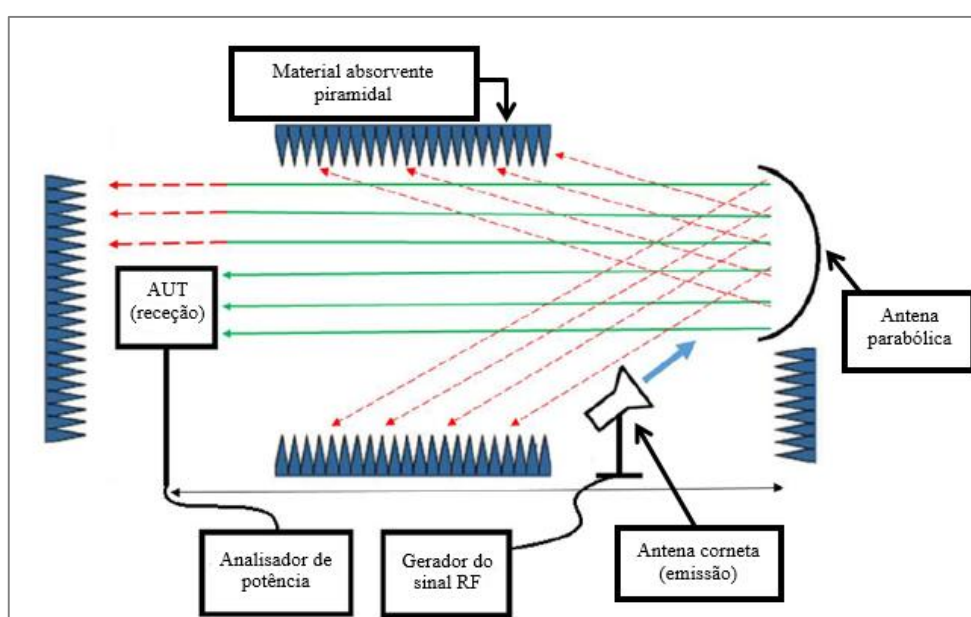


Figura 3.5 – Esquema da câmara anecoica onde foram realizadas as medições (adaptado) [44].

Todas as antenas de teste têm polarização linear e foram medidas com polarização vertical, para estar de acordo com a antena corneta emissora.

3.2.3.1 Medição do ganho

Para determinar o ganho máximo das antenas de teste, quer no espaço livre quer na caixa, utilizou-se como referência uma antena dipolo metálica de ganho conhecido, de 3 dBi para a frequência de 2,42 GHz.

A antena de referência e a antena de teste foram colocadas individualmente na recepção e sob as mesmas condições para a medição da potência recebida: mesma antena e potência de emissão, mesma distância da antena de emissão e mesma altura de recepção. Após a medição das potências das antenas, aplicou-se a fórmula de FRIIS, de forma a obter-se o ganho da antena de teste. Como os parâmetros altura, distância, frequência e potência de emissão são iguais para

as duas antenas e as diferenças de comprimento de onda são desprezáveis, o ganho da antena de teste é dado por:

$$G_{AUT} = P_{R_AUT} - P_{R_RA} + G_{R_RA}, \quad (3.1)$$

onde G_{AUT} é o ganho da antena sobre teste em decibéis (dB), P_{R_AUT} é a potência recebida pela antena sobre teste em decibel-miliwatt (dBm), P_{R_RA} é a potência recebida pela antena de referência em decibel-miliwatt (dBm) e G_{R_RA} é o ganho da antena de referência em decibéis (dB).

3.2.3.2 Medição dos diagramas de radiação

Para a realização dos diagramas de radiação utilizou-se um sistema desenvolvido em paralelo por um outro colega.

Na zona de recepção da câmara anecoica, cada antena foi colocada sobre uma plataforma rotativa com um motor embutido e comandado pelo microcontrolador Arduino. O controlo e a aquisição de valores pelo Arduino e pelo analisador de espectros foram efetuados de forma automática através de um código executado no *Software* Matlab, com o computador conectado via USB (*Universal Serial Bus*).

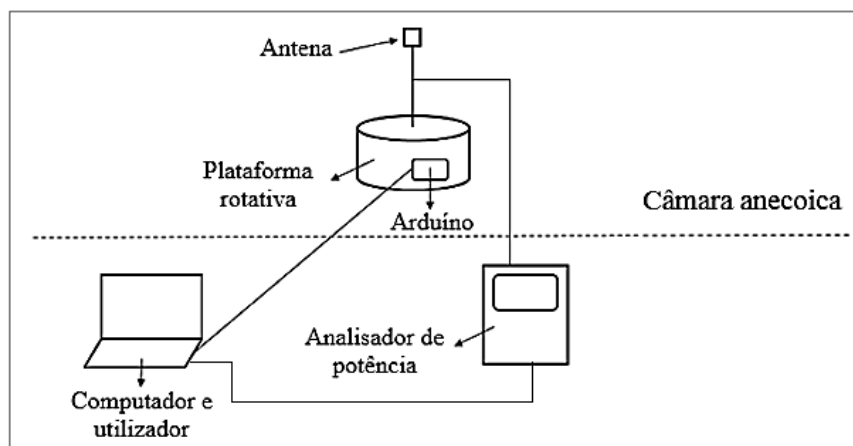


Figura 3.6 – Esquemas das ligações com a utilização da plataforma rotativa na recepção da câmara anecoica.

Como o sistema ainda se encontra em desenvolvimento, fizeram-se vários testes para aferir o seu funcionamento.

Para cada medição do diagrama a plataforma rodou mais do que uma volta completa, sendo necessário fazer a manipulação dos dados de forma manual. Através dos sensores no motor, sabe-se que 1800 pontos correspondem a uma volta e, portanto, através da regra de três simples, o número de amostras correspondente é dado por:

$$\text{N}^\circ \text{ de amostras de potência} = \frac{\text{N}^\circ \text{ total de amostras de potência} \times 1800 \text{ pontos}}{\text{N}^\circ \text{ total de pontos}}. \quad (3.2)$$

Também se evidenciou um atraso inicial na recolha de dados de potência, após o arranque do motor. Este atraso foi confirmado pela realização de vários diagramas obtidos manualmente.

Os diagramas foram realizados no *software* Matlab, tendo-se introduzido a compensação referida e foram normalizados pelo valor máximo de cada plano (XY, YZ e XZ).

A posição inicial de cada antenna num determinado plano é ilustrada no Anexo B, assim como os diagramas obtidos por simulação e experimentalmente. A posição inicial num plano foi determinada pelo simulador eletromagnético COMSOL Multiphysics, de forma se poder entender melhor e comparar os diagramas da simulação e experimentais.

É importante referir que se minimizaram os erros de medição através da realização de pelo menos três medições em cada plano (XY, YZ e XZ) de uma antenna, tendo-se selecionado um diagrama que mostrasse o padrão de repetibilidade.

3.3 Monopolo com plano de massa

Tendo em consideração a teoria das antenas, começou-se por construir uma antenna monopolo com um plano de massa quadrado para servir de referência ao monopolo teórico. Pretendia-se que a antenna fosse compacta e que tivesse as dimensões de $\lambda/4$ (31 mm para a frequência 2,42 GHz), quer para o plano de massa, quer para o comprimento do fio. A estrutura da antenna e os respetivos parâmetros são apresentados na Figura 3.7a). A antenna construída é exibida na Figura 3.7b).

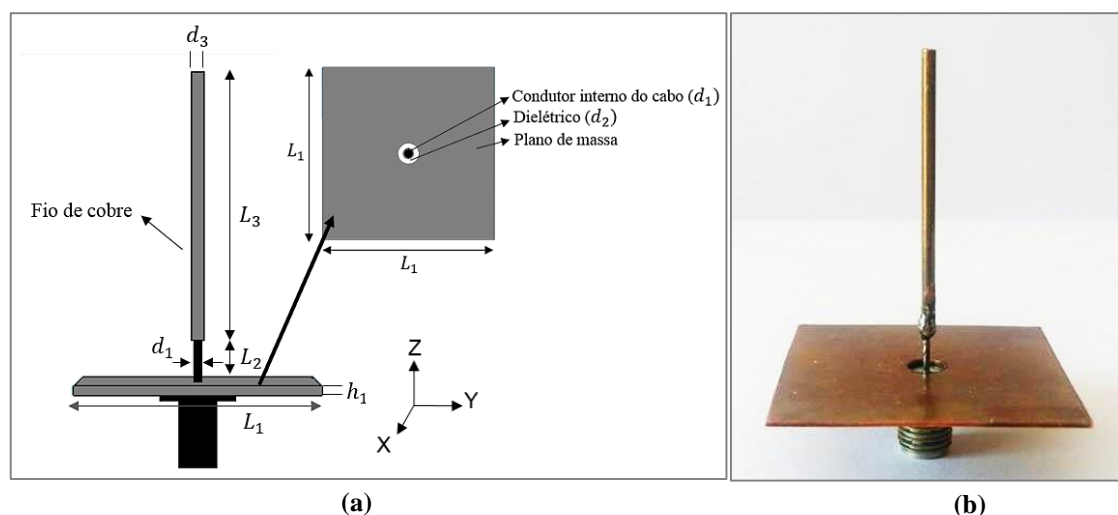


Figura 3.7 – Antena monopolo com plano de massa: a) estrutura e respetivos parâmetros; b) protótipo construído.

As dimensões da antenna são: $L_1 = 31$ mm; $h_1 = 0,5$ mm; $L_2 = 6$ mm; $L_3 = 28$ mm; $d_1 = 1,27$ mm; $d_2 = 4,3$ mm e $d_3 = 1,5$ mm.

Para a construção da antenna utilizou-se uma folha de cobre, um fio de cobre e um conector SMA de 50Ω . O comprimento lateral da folha de cobre é igual a $\lambda/4$, mas o comprimento do elemento linear ($L_2 + h_3$) corresponde a 34 mm, sendo ligeiramente superior a

$\lambda/4$, proporcionando à antena características de impedância mais satisfatórias na banda ISM de 2,4 GHz.

Os resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} com a frequência são apresentados na Figura 3.8.

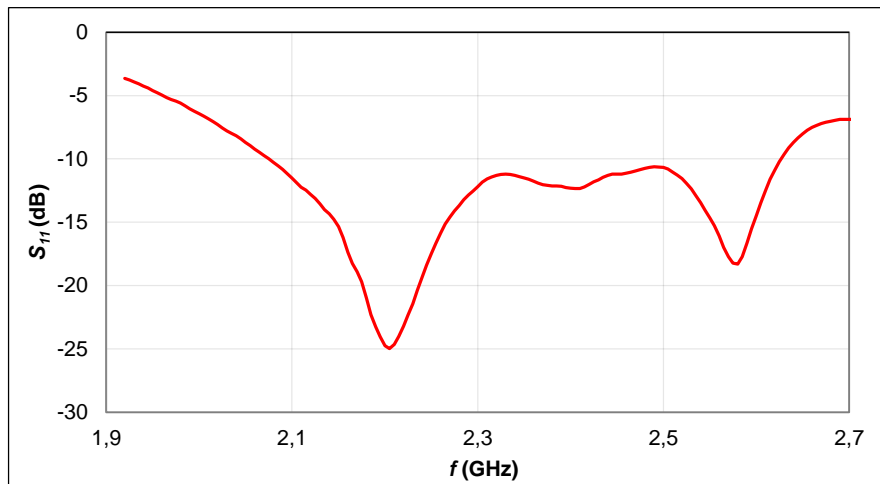


Figura 3.8 – Resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} com a frequência da antena monopolo com plano de massa.

Constata-se que esta antena apresenta três ressonâncias na banda de interesse, que correspondem às seguintes frequências: 2,21 GHz ($S_{11} = -24,96$ dB), 2,41 GHz ($S_{11} = -12,35$ dB) e 2,58 GHz ($S_{11} = -18,31$ dB). A largura de banda é de 550 MHz (2,08 – 2,63 GHz).

Os diagramas de radiação da antena colocada na polarização vertical (Figura 3.7a)) são apresentados na Figura 3.9. No plano H o diagrama é omnidirecional e no plano E (plano YZ) os dois lóbulos característicos estão distorcidos, apresentando mais do que dois nulos. Os valores máximos são obtidos com a antena inclinada para trás de 25° e 120° , em relação à vertical (0°) e ao emissor. Na Figura 3.9b) os valores máximos situa-se nos 240° e 335° , pois o diagrama foi obtido com a antena a rodar em direção ao emissor ou para a frente (ver Anexo B). O ganho máximo medido para a frequência de 2,42 GHz foi de 0 dBi.

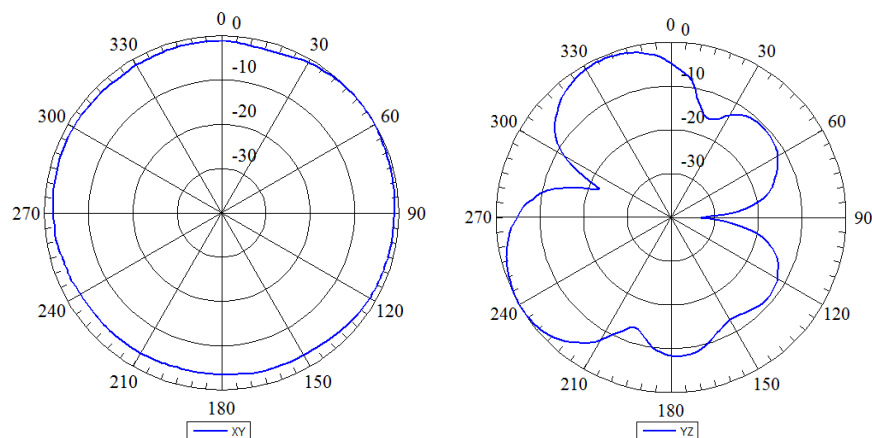


Figura 3.9 – Diagramas de radiação da antena monopolo com plano de massa: a) plano H ; b) plano E .

Devido à utilização de um plano de massa muito reduzido, esta antena monopolo apresenta um diagrama bastante diferente do ideal (com a radiação na direção do plano

horizontal), encontrando-se os lóbulos elevados em relação ao plano horizontal. Além do mais esta antena monopolo não é eficiente [45].

3.4 Monopolo com manga (*sleeve monopole*)

Uma antena encontrada em aplicações na banda ISM de 2,4 GHz é o monopolo comercial apresentado na Figura 3.10. Sem o revestimento de plástico, este monopolo com manga pode ser decomposto em duas partes: o condutor interno do cabo coaxial (parte superior) e a manga metálica ou *balun* (na parte inferior), a qual encontra-se curto-circuitada à blindagem externa do cabo coaxial no topo [3], [29]. Neste caso particular, o condutor interno e a manga têm comprimentos de 26 mm, inferiores ao valor correspondente a um quarto do comprimento de onda no espaço livre para a frequência central da banda ISM de 2,45 GHz. Esta antena tem um diagrama omnidirecional no azimute e um ganho máximo em torno dos 2 dBi.



Figura 3.10 – Antena monopolo comercial com as dimensões máximas de 110 mm × 10 mm.

Nesta secção são apresentadas duas antenas monopolo com manga adequadas à banda ISM de 2,4 GHz. As antenas foram projetadas com recurso ao *Software* COMSOL Multiphysics, em que a estrutura e os respetivos parâmetros encontram-se apresentados na Figura 3.11a). Na Figura 3.11b) são mostradas as duas antenas construídas.

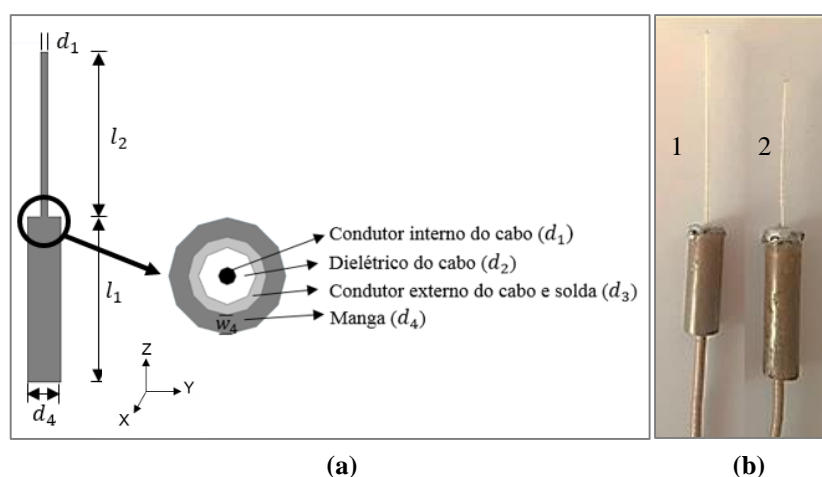


Figura 3.11 – Monopolo com manga: a) estrutura e parâmetros da antena monopolo com manga; b) antenas monopolo com manga construídas em laboratório.

As dimensões da antena manga 1 são: $l_2 = 34,8$ mm; $d_1 = 0,86$ mm; $l_1 = 19,2$ mm; $d_1 = 0,91$ mm; $d_2 = 2,95$ mm; $d_3 = 5,3$ mm e $d_4 = 6,3$ mm.

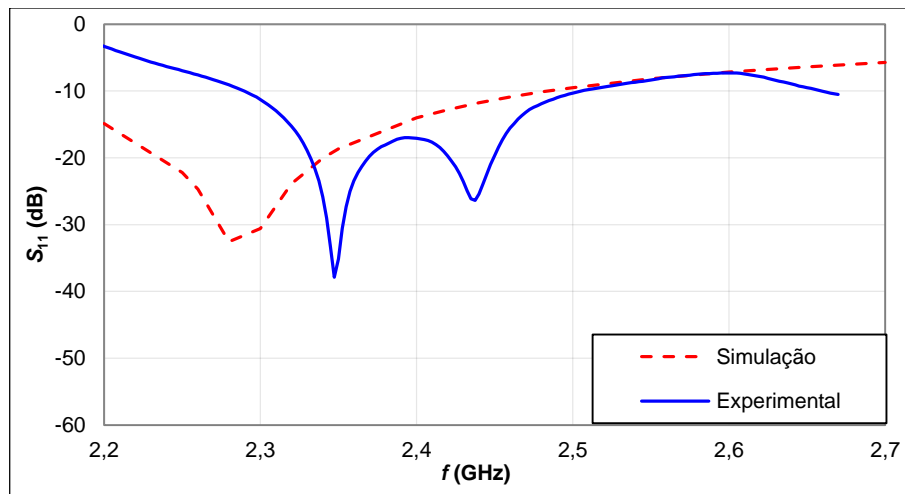
A antena 2 tem as seguintes dimensões: $l_2 = 27,1$ mm; $d_1 = 0,86$ mm; $l_1 = 26,1$ mm; $d_1 = 0,91$ mm; $d_2 = 2,95$ mm; $d_3 = 5,3$ mm e $d_4 = 6,3$ mm.

Estas antenas foram projetadas tendo como referência uma antena monopolo semelhante, mas com as dimensões l_1 e l_2 iguais a $\lambda/4$ no espaço livre (31 mm para a frequência de 2,42 GHz).

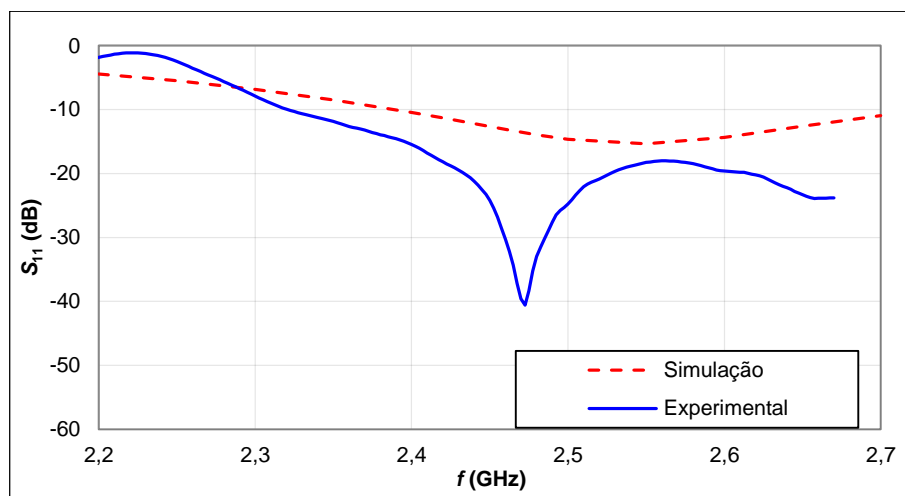
A antena 1 tem uma manga mais curta e um comprimento do fio mais longo. Já a antena 2 tem o comprimento da manga e o comprimento do fio praticamente iguais.

Na construção de cada antena utilizou-se o cabo coaxial RG178, um tubo de cobre para funcionar como manga e uma chapa de cobre para facilitar o curto-circuito do tubo de cobre com a malha externa do cabo.

Na Figura 3.12 são apresentados os resultados obtidos através da simulação e experimentalmente para a variação do parâmetro S_{11} em função da frequência e para as duas antenas construídas. Os resultados de simulação foram obtidos posteriormente à construção das antenas, devido ao fato de se ter modificado ligeiramente as dimensões das antenas, mais concretamente, o comprimento do fio.



(a)



(b)

Figura 3.12 –Parâmetros S_{11} das antenas monopolo com manga: a) monopolo com manga 1; b) monopolo com manga 2.

Analisando os resultados da antena 1 na Figura 3.12a) constata-se que na simulação a frequência de ressonância encontra-se nos 2,29 GHz ($S_{11} = -34,71$ dB) e a largura de banda é de 340 MHz (2,14 – 2,48 GHz). Na prática, a antena apresenta duas ressonâncias na mesma banda de frequências (2,35 GHz e 2,44 GHz), encontrando-se a primeira ressonância distanciada de 60 MHz em relação ao valor da simulação. A largura de banda é de 220 MHz (2,29 – 2,51 GHz), sendo mais estreita em 120 MHz.

A antena 2, de acordo com Figura 3.12b), na simulação tem o valor da ressonância nos 2,54 GHz ($S_{11} = -15,35$ dB) e uma largura de banda de 340 MHz (2,39 – 2,73 GHz). A nível experimental, esta apresenta a ressonância nos 2,47 GHz ($S_{11} = -40,59$ dB), sendo a disparidade de 70 MHz em relação à simulação. A largura de banda medida foi superior a 350 MHz, sendo a frequência mais baixa de 2,32 GHz e prolonga-se acima de 2,7 GHz.

Em relação às características de radiação, ambas as antenas foram medidas com polarização vertical (ver Figura 3.11b)) e têm os diagramas típicos de uma antena monopolo, com um diagrama omnidirecional no plano H (plano XY) e um diagrama em forma de “8” no plano E (plano YZ).

Determinou-se o ganho de ambas antenas na gama de frequências pertencente à banda ISM de 2,4 GHz. O ganho foi medido com as antenas colocadas na posição de máxima radiação. A antena 1 tem a máxima radiação inclinada de 15° para trás em relação ao eixo vertical e ao emissor. A antena 2 tem a máxima radiação na vertical. Na Figura 3.13 mostram-se os valores do ganho das duas antenas obtidos pela simulação e experimentalmente.

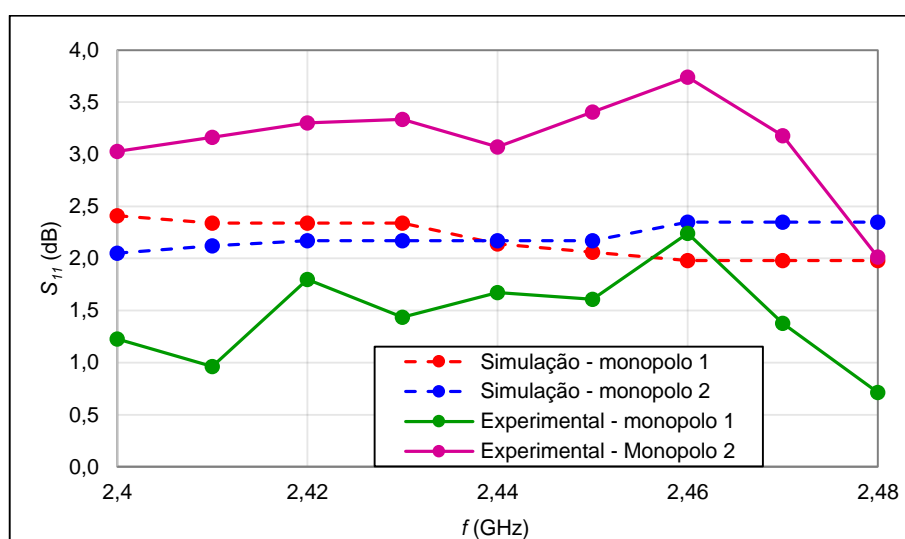


Figura 3.13 – Valores da simulação e experimentais do ganho na banda ISM de 2,4 GHz para as antenas monopolo com manga.

Analisando os dados na Figura 3.13 constata-se que a nível de simulação as antenas apresentam ganhos muito próximos, encontrando-se os valores do ganho entre os 2 e os 2,5 dBi para as duas antenas. Experimentalmente, a antena 2 é a que apresenta melhor desempenho, com um ganho máximo de 3,7 dBi para a frequência de 2,46 GHz e um ganho médio de 3,16 dBi na banda. A antena 1 também tem um desempenho menor, com um ganho máximo de 2,2 dBi igualmente para a frequência de 2,46 GHz, e um ganho médio de 1,4 dBi.

Constata-se que ambas as antenas apresentam valores experimentais mais baixos nas extremidades da banda devido à largura de banda, com a diminuição dos valores do parâmetro S_{11} nestas regiões (ver Figura 3.12).

3.5 Antena anel retangular

Khiewlamyong e Pirak [46] desenvolveram uma antena em anel retangular com as dimensões $45 \times 25 \text{ mm}^2$. Esta antena tem uma estrutura compacta, baixo perfil, desempenho elevado e baixo custo. O comprimento do retângulo desenhado pelo fio de cobre, com 2,337 mm de diâmetro, foi escolhido para ser de um comprimento de onda no espaço livre ($\lambda = 125 \text{ mm}$ para 2,45 GHz), aproximadamente. A impedância de entrada da antena pode ser ajustada através do comprimento (L) e do tamanho da lacuna (g). Já a eficiência está dependente do tamanho da lacuna (g) e da posição do ponto de alimentação [46]. A estrutura e os parâmetros da antena são apresentados na Figura 3.14.

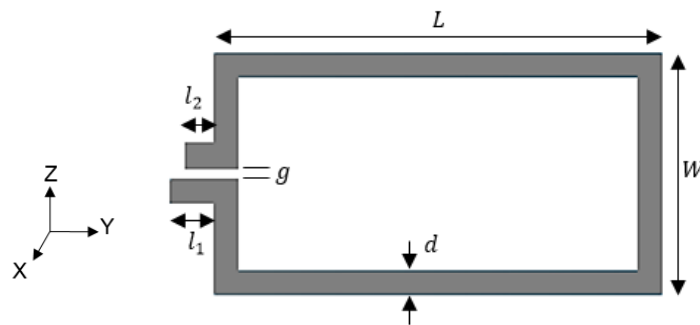


Figura 3.14 – Geometria e dimensões das antenas retangulares propostas.

Os autores referem que a antena tem uma largura de banda de 220 MHz (2,4 – 2,62 GHz), com $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$. No entanto, através dos dados experimentais apresentados em [46], constata-se que a frequência inferior da banda está acima dos 2,4 GHz. Já a frequência de ressonância situa-se entre os 2,5 e os 2,55 GHz e com uma perda de retorno próxima dos -16 dB [46].

Os diagramas de radiação assemelham-se aos de uma antena monopolo e tem um ganho máximo de 3,4 dBi [46].

Relativamente a esta estrutura de antena, foram construídas duas antenas em anel retangular, sendo estas apresentadas na Figura 3.15.

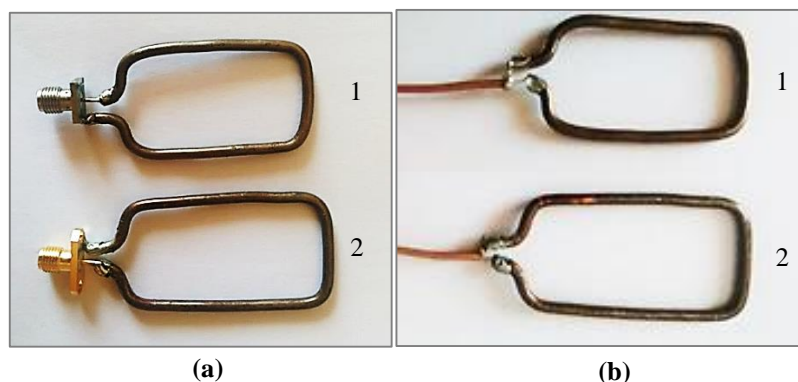


Figura 3.15 – Antenas anel construídas: a) com conector SMA de 50Ω ; b) com cabo coaxial RG178.

As dimensões da antena 1 são: $L = 45,3$; $W = 26,8 \text{ mm}$; $l_1 = 8,4 \text{ mm}$; $l_2 = 3,5 \text{ mm}$; $d = 2,5 \text{ mm}$ e $g = 2 \text{ mm}$.

A antena 2 tem as seguintes dimensões: $L = 50,1$; $W = 27,5$ mm; $l_1 = 8,3$ mm; $l_2 = 4$ mm; $d = 2,5$ mm e $g = 2$ mm.

A antena 1 tem as dimensões muito próximas das dimensões da antena apresentada na bibliografia. Já a antena 2 foi dimensionada a partir dos resultados experimentais da antena 1.

Primeiramente mediram-se as características de impedância de cada antena com um conector SMA de 50Ω (tal como na bibliografia) e, posteriormente, utilizou-se um cabo RG178. Na Figura 3.16 são apresentadas as características medidas com o conector.

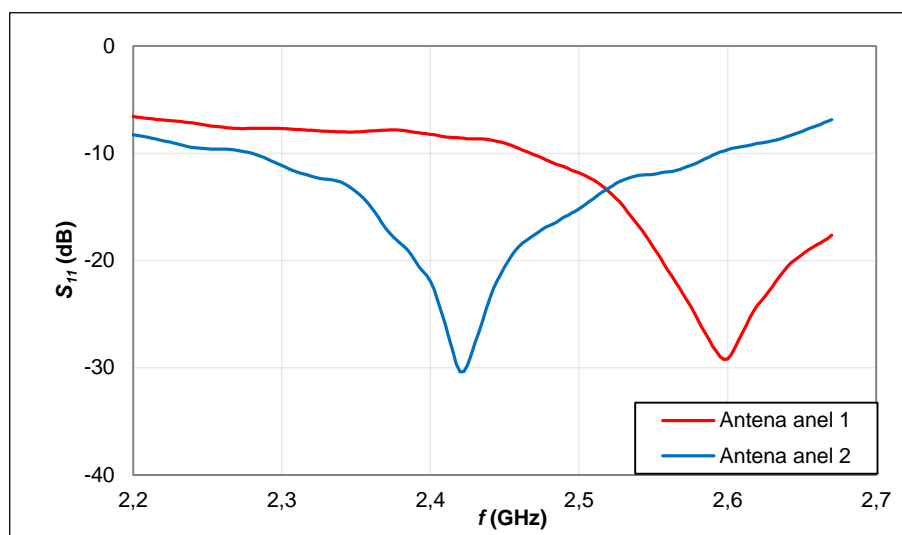


Figura 3.16 – Valores experimentais do parâmetro S_{11} das antenas anel retangular com conector SMA: a) antena anel 1; b) antena anel 2.

Através dos resultados na Figura 3.16 constata-se que a antena 1 não opera na banda de interesse, encontrando-se ressonante na frequência de 2,6 GHz. Já a antena 2 está ressonante nos 2,42 GHz, com um parâmetro $S_{11} = -30,39$ dB (ou $SWR = 1,1$), e tem uma largura de banda de 320 MHz (2,28 – 2,6 GHz), com os valores de $S_{11} \leq -10$ dB. Para que a antena 2 operasse na frequência de 2,42 GHz, as dimensões L e W foram aumentadas em cerca de 8 % ($2,65$ GHz / $2,42$ GHz = 1,08) em relação às dimensões da antena 1.

Com as antenas na polarização vertical (ver Figura 3.15a)) obteve-se o ganho máximo no plano XZ para a frequência de 2,42 GHz, tendo-se registado um valor de 1,8 dBi para a antena 1 e 4 dBi para a antena 2.

Posteriormente, substituiu-se o conector SMA pelo cabo coaxial. Os resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} em função da frequência são apresentados na Figura 3.17.

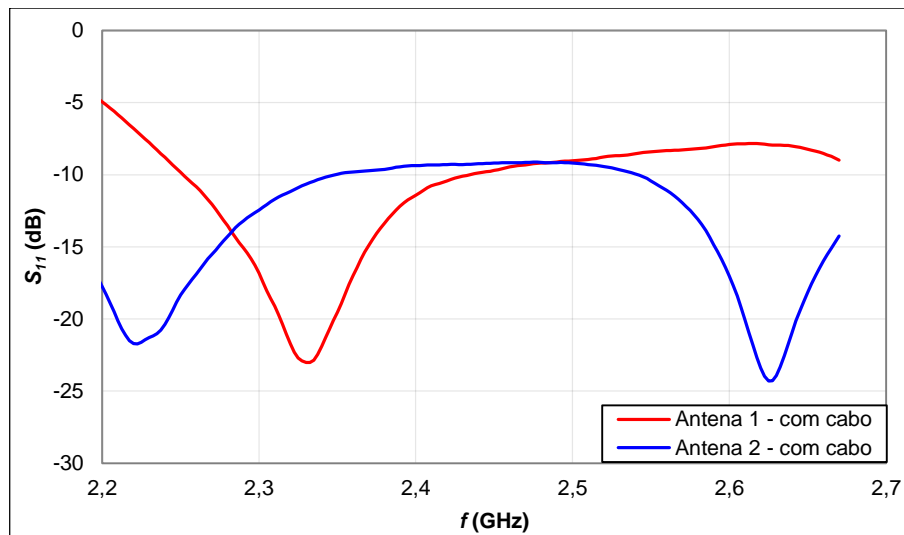


Figura 3.17 – Resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} para as duas antenas em anel retangular com cabo.

Com a substituição do cabo, as antenas 1 e 2 passaram a apresentar características de impedância diferentes. Nesta janela de 500 MHz, a antena 1 tem uma ressonância nos 2,33 GHz ($S_{11} = -23,02$ dB) e uma largura de banda de 190 MHz (2,25 – 2,44 GHz) para $S_{11} \leq -10$ dB, cobrindo apenas parcialmente a banda de interesse. Já a antena 2 tem uma ressonância nos 2,22 GHz ($S_{11} = -21,74$ dB) e outra nos 2,63 GHz ($S_{11} = -24,3$ dB), com as larguras de banda, para um valor de $S_{11} \leq -10$ dB, superiores a 180 MHz (< 2,17 – 2,35 GHz) e 130 MHz (2,54 – > 2,67 GHz), respetivamente.

As antenas são quase omnidirecionais no plano H e no plano E (plano XZ) ambas apresentam dois lóbulos inclinados.

Para a medição do ganho destas duas antenas com cabo, as antenas foram colocadas na posição de máxima de radiação para a frequência de 2,42 GHz. A máxima radiação é dada no plano XZ , correspondendo a uma inclinação de 20° para trás em relação à vertical para a antena 1 e a uma inclinação de 30° para trás em relação à vertical para a antena 2. Obtiveram-se ganhos praticamente semelhantes, ou seja, 2,7 dBi para a antena 1 e 2,6 dBi para a antena 2. No entanto, a antena 1 é preferencial por ser mais compacta.

3.6 Antena fio de cobre em “U”

Uma antena compacta com uma estrutura muito simples e de muito baixo custo pode ser encontrada em [47]. Esta é obtida dobrando um fio de cobre fino (70 mm de comprimento e 0,8 mm de diâmetro), ficando com as dimensões totais iguais a 40×25 mm², como é apresentada na Figura 3.18a). A antena é composta por dois elementos radiantes com comprimentos distintos e separados através de uma porção de curto-circuito que não deve ser muito pequena. O elemento mais curto controla a frequência de ressonância e o elemento mais longo funciona como um plano de massa. O elemento mais curto com a porção de curto-circuito correspondem a $\lambda/4$ para a frequência de 2,44 GHz, aproximadamente. A alimentação é feita entre os pontos A e B através de um mini cabo coaxial de 50 Ω , com o condutor interno e a malha externa soldados nos pontos A e B, respetivamente. A impedância de entrada pode ser

otimizada através do ajuste do comprimento do elemento mais comprido ou da distância de alimentação relativamente ao curto-circuito [47].

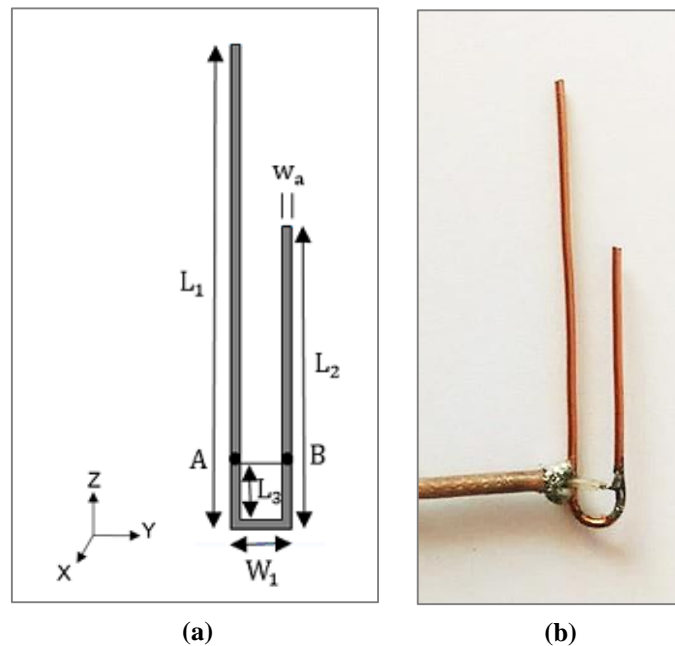


Figura 3.18 – Antena fio de cobre em “U”: a) geometria e dimensões da antena; b) antena construída.

Os valores dos parâmetros desta antena são: $L_1 = 40$ mm; $L_2 = 25$ mm; $L_3 = 3$ mm; $W_a = 0,8$ mm e $W_1 = 5$ mm. Esta antena opera numa única banda com uma largura de 125 MHz (2398 – 2523 MHz), para uma perda de retorno ≥ 10 dB (ou $S_{11} \leq -10$ dB). O ganho máximo varia entre 2 e 3 dBi e a eficiência é superior a 80 % [47].

Nos planos XZ e YZ os diagramas de radiação têm a forma do de um dipolo, com a direção de máxima radiação sobre os eixos X e Y , respetivamente. Já no plano XY , o diagrama é bastante omnidirecional [47].

A construção da antena fio de cobre foi simples, bastando dobrar um fio de cobre com as dimensões indicadas e soldando o cabo coaxial na posição correta. A antena construída é apresentada na Figura 3.18b). O elemento mais curto encontra-se ligeiramente inclinado, proporcionando melhores características de impedância na banda de interesse.

Os resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} da antena construída são apresentados na Figura 3.19.

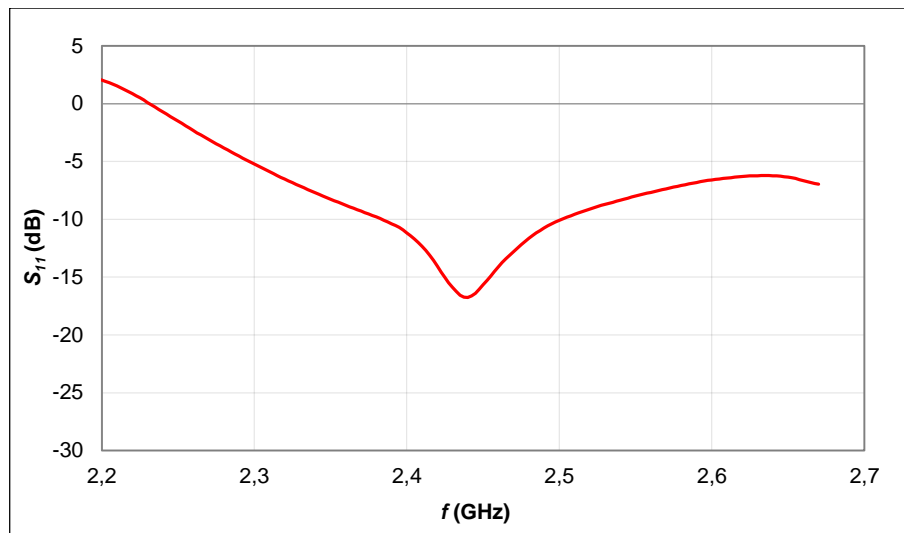


Figura 3.19 – Variação do parâmetro S_{11} da antena fio de cobre em “U” construída.

Esta antena apresenta uma largura de banda de 100 MHz (2,39 - 2,5 GHz) e a frequência de ressonância situa-se nos 2,44 GHz ($S_{11} = -16,75$ dB). Para a frequência de 2,42 GHz registou-se uma impedância de $77,63 - j0,24 \Omega$ e um S_{11} de -13,3 dB.

Os diagramas medidos nos vários planos XY, YZ e XZ, e para a frequência de 2,42 GHz, são apresentados no Anexo B. Comparativamente aos diagramas na bibliografia, o diagrama no plano XY não é omnidirecional e nos planos YZ e XZ os lóbulos encontram-se inclinados.

Em relação ao ganho de pico para a frequência de 2,42 GHz, obteve-se um valor de 1,3 dBi na direção de máxima radiação, com a antena no plano XZ e na vertical, com uma ligeira inclinação.

3.7 Antena S-P dobrada

A estrutura de uma antena suspensa dobrada com as dimensões do plano de massa iguais a $30 \times 30 \text{ mm}^2$ é apresentada na Figura 3.20a) [48]. Esta antena resulta do dobrar dos planos curto-circuitado e de massa da antena S-P convencional, com um comprimento de, aproximadamente, $\lambda/4$. Como resultado o tamanho é reduzido em cerca de 50%, obtendo-se um comprimento de, aproximadamente, $\lambda/8$. Posteriormente, também é adicionada uma porção ao plano de massa para compensar a parte do plano de massa que foi dobrada e que passou a funcionar como plano superior da antena. Para alimentar a antena é utilizado um conector SMA coaxial de 50Ω [48]. Na Figura 3.20) é apresentado o esquema da antena e o protótipo da mesma.

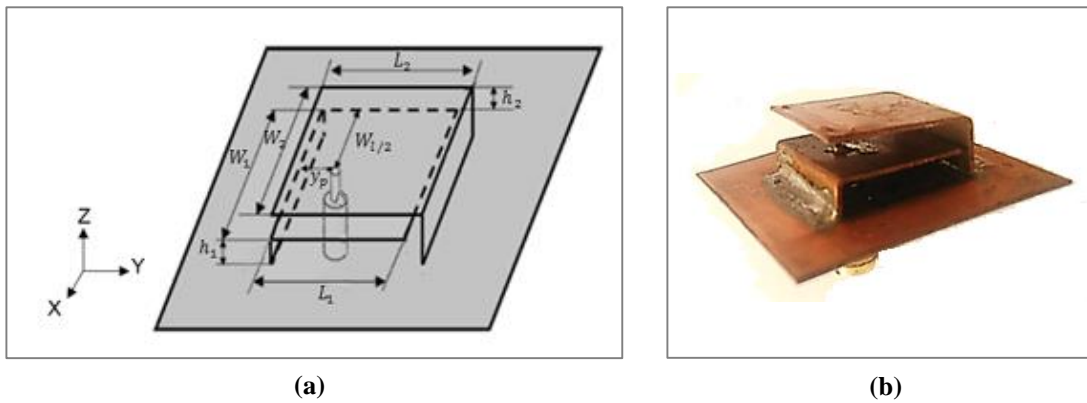


Figura 3.20 – Antena S-P dobrada: a) esquema tridimensional (adaptado) [48]; b) antena construída.

As dimensões da antena são: $L_1 = 14 \text{ mm}$; $L_2 = 15 \text{ mm}$; $W_1 = 15 \text{ mm}$; $W_2 = 15 \text{ mm}$; $h_1 = 2,85 \text{ mm}$; $h_2 = 3,15 \text{ mm}$ e $y_p = 3 \text{ mm}$.

A principal limitação desta antena é o facto de apresentar uma largura de banda estreita de 80 MHz (2,39 GHz – 2,47 GHz), como se pode observar na Figura 3.20a). Além disso tem um diagrama de radiação diretivo e inclinado, com um ganho máximo de 1,2 dBi, para a frequência de ressonância de 2,42 GHz [48].

Como existem vários protótipos desta antena no laboratório, não houve necessidade de construir uma nova antena. Em vez disso, mediram-se as características de várias antenas, sendo apenas apresentados os resultados da antena com melhores características. Na Figura 3.21 são apresentados os dados da variação do parâmetro S_{11} obtidos experimentalmente.

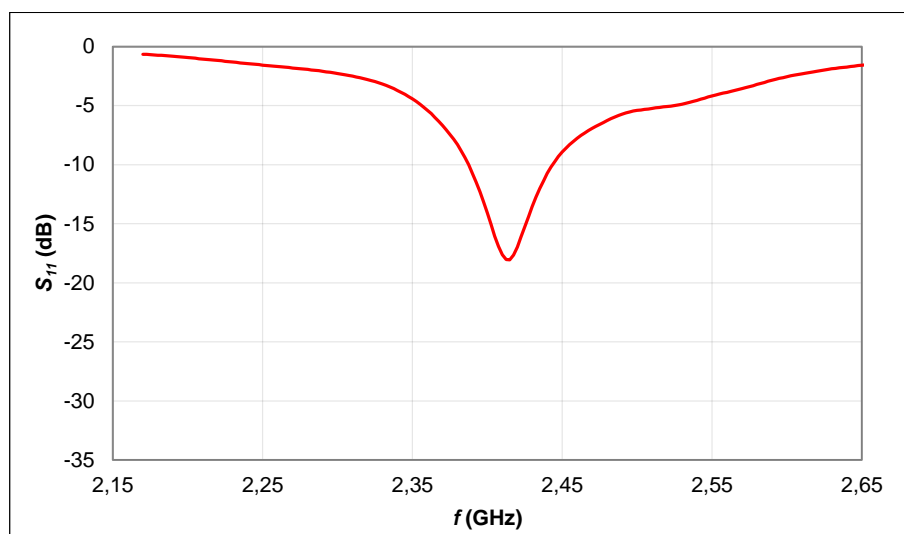


Figura 3.21 – Resultados experimentais da variação do parâmetro S_{11} obtidos para a antena S-P dobrada.

Esta antena tem uma largura de banda de 60 MHz (2,39 – 2,45 GHz), sendo mais estreita em 20 MHz do que a antena apresentada em [48]. A frequência central encontra-se nos 2,42 GHz com S_{11} igual a -18,05 dB.

O ganho máximo medido foi de 3,2 dBi, com a antena inclinada segundo o plano YZ.

3.8 Antena com ranhura

A antena com ranhura apresentada na Figura 3.22 é bastante compacta, com as dimensões de $3 \times 60 \text{ mm}^2$ [49]. Esta antena tem uma estrutura que se assemelha à da antena fio de cobre em “U”, sendo igualmente composta por dois braços radiantes, com uma diferença de comprimento de 10 mm, e uma porção de curto-circuito mais longa e ligeiramente mais estreita. A alimentação também é realizada entre os dois braços e distanciada do curto-circuito.

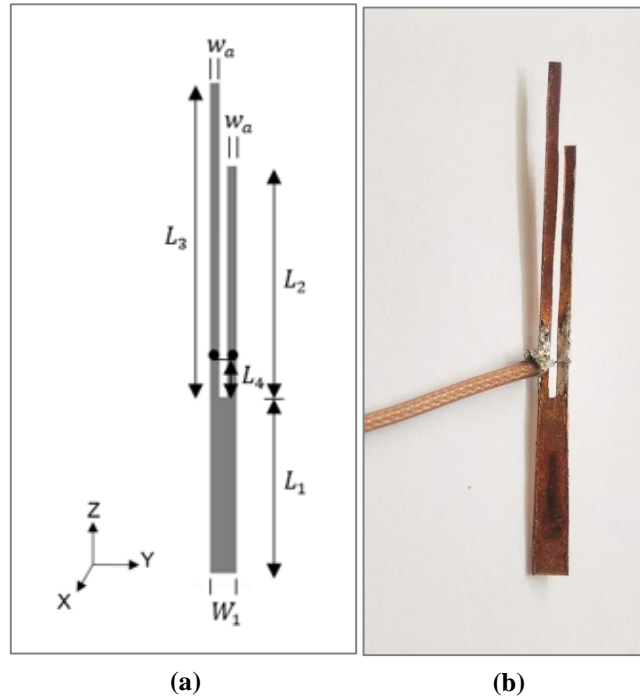


Figura 3.22 – Antena com ranhura: a) esquema e dimensões; b) protótipo construído.

Para além de ser uma antena planar com uma estrutura simples e compacta, esta antena apresenta características bastante atrativas, com uma largura de banda de 400 MHz (2200 – 2600 MHz) e um ganho de, aproximadamente, 3,6 dBi na banda de 2,4 GHz. A frequência de ressonância situa-se entre os 2,4 GHz e os 2,55 GHz, com um valor de S_{11} inferior a -30 dB.

Como não era fornecida a distância da alimentação relativamente ao curto-circuito, decidiu-se fazer a simulação da antena no simulador COMSOL Multiphysics.

As dimensões dos parâmetros desta antena são: $L_1 = 20 \text{ mm}$; $L_2 = 40 \text{ mm}$; $L_3 = 30 \text{ mm}$; $W_a = 1 \text{ mm}$ e $W_1 = 3 \text{ mm}$.

Na Figura 3.23 são apresentados os dados da simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} .

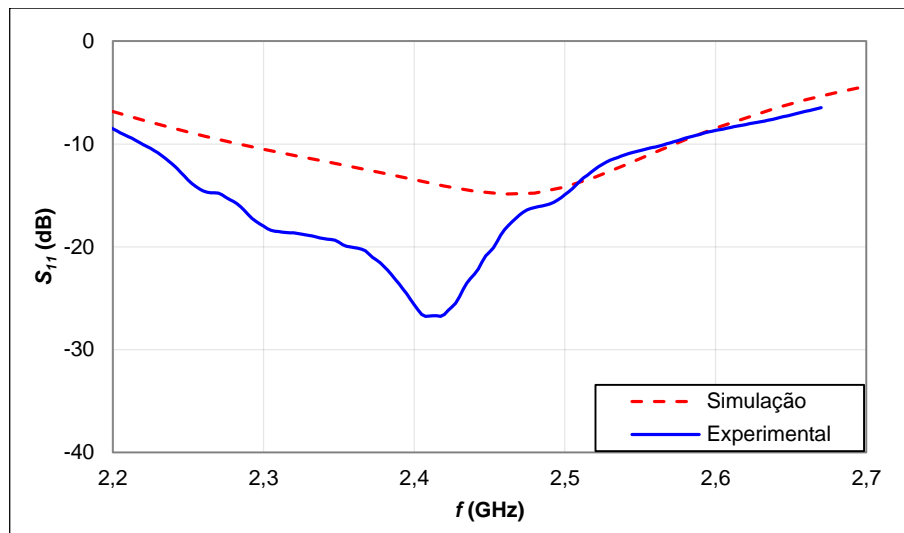


Figura 3.23 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} obtidos para a antena com ranhura.

Segundo a simulação, a ressonância encontra-se nos 2,46 GHz ($S_{11} = -14,88$ dB) e a largura de banda é de 280 MHz (2,29 GHz – 2,57 GHz), com os valores de $S_{11} \leq -10$ dB.

Na prática obteve-se a ressonância nos 2,42 GHz ($S_{11} = -26,77$ dB) e a largura de banda é de 370 MHz (2,2 GHz – 2,57 GHz), com os valores de $S_{11} \leq -10$ dB. A diferença entre os resultados da ressonância é de apenas 40 MHz e a largura de banda na prática excede em 90 MHz.

Os diagramas simulados são praticamente semelhantes aos de uma antena monopolo. Na prática apenas se realizou no diagrama no plano H , sendo este quase omnidirecional.

A máxima radiação é dada no plano YZ , com a antena ligeiramente inclinada para trás em relação à vertical e ao emissor, tendo-se registado um ganho simulado de 2,55 dBi e um ganho experimental de 3,3 dBi para a frequência de 2,42 GHz.

3.9 Comparação das antenas

Na Tabela 3.1 são apresentadas as características das antenas metálicas mais determinantes na escolha das antenas a serem incorporadas dentro de uma caixa com componentes do nó sensor, ou seja, volume (V), largura de banda (LB) e ganho (G). As antenas estão organizadas segundo o volume ocupado e por ordem decrescente.

O volume de cada antena corresponde ao volume de um paralelepípedo onde a antena está inserida e definido pelas dimensões máximas dessa antena.

Tabela 3.1 – Características físicas e resultados obtidos experimentalmente para as antenas metálicas.

Antena	V (mm ³)		LB (MHz)		G (dBi) 2,42 GHz
Monopolo com plano de massa	33154	34,5 × 31 × 31	550	2080 - 2630	0
Antena S-P dobrada	5850	30 × 30 × 6,5	60	2390 – 2450	3,2
Antena anel retangular 2	4015	58,4 × 27,5 × 2,5	> 130	2540 – > 2670	2,7
				< 2170 - 2350	
Antena anel retangular 1	3598	53,7 × 26,8 × 2,5	190	2250 - 2440	2,6
Monopolo com manga 1	2143	54 × 6,3 × 6,3	220	2290 - 2510	1,4
Monopolo com manga 2	2111	53,2 × 6,3 × 6,3	> 350	2320 – > 2670	3,2
Antena fio de cobre em "U"	160	40 × 5 × 0,8	100	2390 - 2500	1,3
Antena com ranhura	45	60 × 3 × 0,25	370	2200 - 2570	3,3

Analisando os resultados da Tabela 3.1, constata-se que a antena monopolo com plano de massa quadrado é a menos compacta e tem o pior desempenho. A antena com ranhura é a mais compacta e apresenta o ganho mais elevado.

Outras antenas que apresentam ganhos bastante satisfatórios são a antena S-P dobrada e a antena monopolo com manga 2. No entanto, a antena S-P dobrada tem como desvantagens um volume considerável e uma largura de banda estreita, não cobrindo toda a gama de frequências da banda ISM de 2,4 GHz.

A antena retangular 1, apesar de não cobrir toda a banda ISM de 2,4 GHz, apresenta um ganho satisfatório e é mais compacta que a antena retangular 2.

De entre as antenas monopolo com manga, a antena 2 é a mais compacta, apresentando uma maior largura de banda e um ganho mais elevado.

A antena fio de cobre em “U” apresenta as características satisfatórias a nível dos três parâmetros (volume, largura de banda e ganho), e tem as vantagens de ser bastante simples e muito compacta e apresenta um ganho de 1 dBi.

Portanto, de entre todas as antenas metálicas estudadas, as antenas com características bastante satisfatórias a nível dos três parâmetros são a antena com ranhura e a antena monopolo com manga 2. Contudo, a antena com ranhura é preferível à antena monopolo com manga 2, pois apresenta um volume 47 vezes inferior, para além de ter igualmente uma largura de banda larga e o ganho ligeiramente elevado.

Para testar dentro de uma caixa, foram escolhidas as cinco antenas mais compactas.

4 Antenas impressas

Neste capítulo são apresentadas as antenas da segunda categoria, sendo apresentadas dez estruturas de antenas impressas: dipolo FR4; dipolo Duroid RT/5880, antena F, antena G, monopolo com plano de massa curto, monopolo com plano de massa longo, antena anel retangular, IFA CPW 1, IFA CPW 2 e antena *patch* com *slots*. As antenas dipolo foram construídas apenas para servirem de referência às antenas desta categoria.

Para todas as antenas fizeram-se as simulações no *software* COMSOL, tendo-se modificado as dimensões na bibliografia das antenas para otimização na banda de interesse, à exceção da antenas G e *patch* com *slots*. No caso da antena dipolo Duroid RT/5880 e das duas antenas IFA CPW, estas foram implementadas a partir de outras estruturas de antenas semelhantes, mantendo a relação de proporcionalidade entre as dimensões de uma antena e o comprimento de onda na linha.

No final deste capítulo é também apresentado o valor médio da constante dielétrica do substrato FR4 para a banda ISM de 2,4 GHz, determinado a partir do método do comprimento-diferencial.

4.1 Calculadora de linha de transmissão – TX-LINE

O programa TX-LINE é uma ferramenta interativa para o sistema operativo Windows que permite analisar e sintetizar diferentes tipos de linhas impressas em material dielétrico [50]. O utilizador pode introduzir as características físicas para determinar as características elétricas de uma linha de transmissão ou vice-versa [50]. Tem como vantagens o facto de ser gratuito, eficiente e de utilização fácil [50].

Esta calculadora foi utilizada para determinar as dimensões das duas linhas de transmissão usadas pelas antenas (linha impressa e CPW – *coplanar waveguide*) e a constante dielétrica efetiva da linha que, por sua vez, permite determinar o comprimento de onda na linha.

Como as dimensões da antena estão relacionadas diretamente com o comprimento de onda da linha, sabendo o comprimento de onda consegue-se determinar as dimensões de uma antena para qualquer substrato. Este procedimento foi utilizado para determinar as dimensões da antena dipolo no material Duroid RT/5880 a partir das dimensões da antena dipolo em FR4, e as dimensões da antena IFA (*Inverted-F antenna*) para o substrato FR4 com as características desejadas.

Na Figura 4.1 apresenta-se a interface gráfica da calculadora para determinar as características de uma linha impressa - *Microstrip*. Para determinar o comprimento (L) e a largura (W) nas características físicas - *Physical Characteristic* é necessário introduzir os parâmetros do material dielétrico – *Material Parameters* (constante dielétrica e tangente de perdas), as características elétricas – *Electrical Characteristics* (impedância, frequência e comprimento elétrico) e, ainda, algumas características físicas (altura do substrato (H) e espessura do cobre no substrato (T)). Para além das dimensões da linha, também são fornecidos outros parâmetros, como a constante de fase, a constante dielétrica efetiva e a perda.

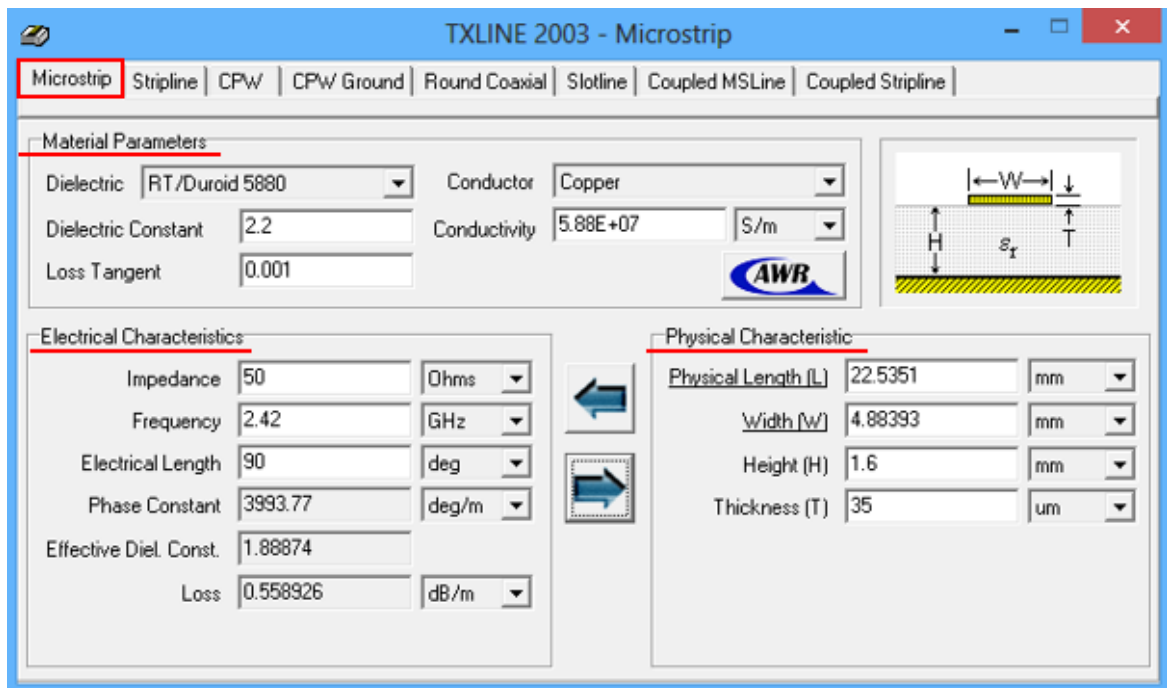


Figura 4.1 – Interface da calculadora TX-LINE.

Todas linhas de transmissão para alimentação das antenas devem ter uma impedância característica de 50 Ω .

4.2 Antenas propostas

As antenas impressas têm-se tornado preferenciais nos sistemas de comunicação móveis e nas aplicações de sensores sem fios devido às várias vantagens que oferecem sobre as outras antenas: baixo perfil, forma planar, mais leves, mais fáceis e baratas de fabricar (utilização das mesmas técnicas que as PCB), miniaturização real (substratos com constantes dielétricas elevadas) e capacidade de integração nos circuitos [32].

Inicialmente estudaram-se antenas compactas usadas por fabricantes de equipamentos como a Texas Instruments. Contudo, estas antenas fazem uso de um plano de massa de maiores dimensões na placa de circuito impresso onde estão inseridas. Por este motivo, essas antenas acabaram por ser excluídas deste estudo, dando-se preferência a antenas compactas impressas em substratos que incluem o plano de massa.

A pesquisa por antenas compactas para a banda ISM de 2,4 GHz e impressas num substrato FR4 com as mesmas características (permitividade e altura) foi bastante exaustiva. Nesta secção são apresentadas as antenas escolhidas, adaptadas e projetadas para esta banda.

4.2.1 Dipolo FR4

Nesta categoria de antenas começou-se por estudar uma antena dipolo para servir de referência. Após várias pesquisas, escolheu-se uma antena dipolo com um *balun* (*Balanced-to-unbalanced*) integrado, por se tratar de uma antena balanceada, impressa num substrato FR4

(constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e altura $h = 1,5$ mm), alimentada por uma linha de linha impressa de 50Ω [51]. A estrutura desta antena é apresentada na Figura 4.2 [51].

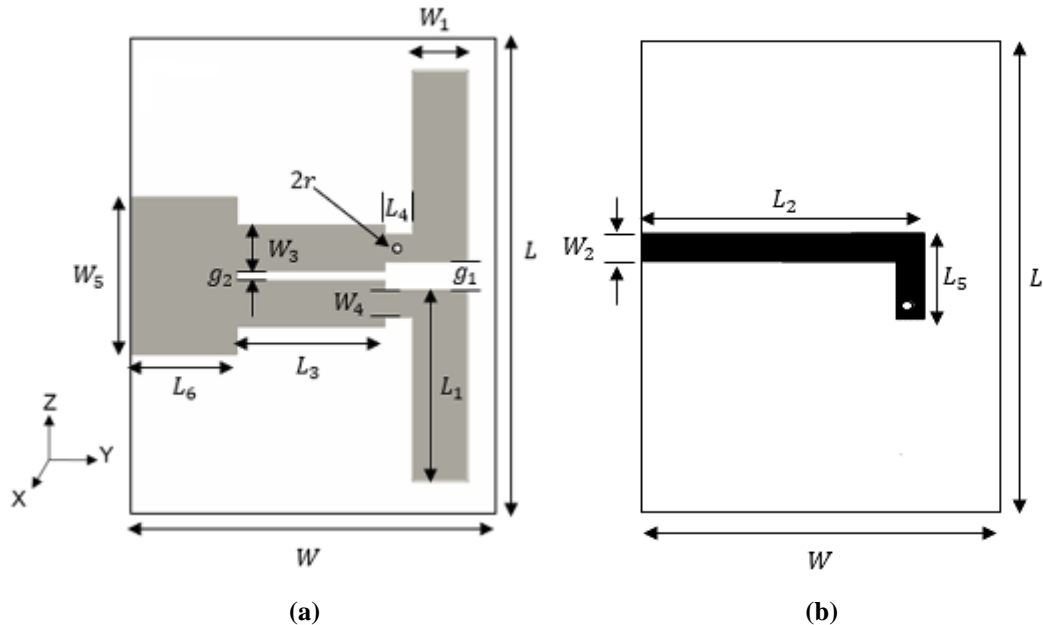


Figura 4.2 – Estrutura da antena dipolo com *balun* integrado: a) vista frontal; b) verso.

As dimensões da antena são: $L_1 = 20,8$ mm; $L_2 = 31$ mm; $L_3 = 16$ mm; $L_4 = 3$ mm; $L_5 = 9$ mm; $L_6 = 12$ mm; $W_1 = 6$ mm; $W_2 = 3$ mm; $W_3 = 5$ mm; $W_4 = 3$ mm; $W_5 = 17$ mm; $g_1 = 3$ mm; $g_2 = 1$ mm e $r = 0,375$ mm.

Numa antena dipolo, o comprimento de um braço (L_1) é semelhante ao comprimento do *balun* (L_3), sendo ambos de $\lambda_g/4$ (λ_g – comprimento de onda no substrato dielétrico). Contudo, como uma das faixas do *balun* sobrepõe a linha impressa que se encontra na superfície inferior do substrato, a constante dielétrica efetiva entre estas duas linhas é mais elevada do que nas restantes linhas que fazem parte da antena, levando a que o comprimento de onda do material (λ_g) nesta região seja menor e, conseqüentemente, as dimensões do *balun*. As dimensões do *balun* podem ser calculadas através das equações da linha impressa, com a faixa do *balun* a funcionar como plano de massa.

Segundo a bibliografia [51], esta antena tem uma largura de banda de 500 MHz, para um parâmetro $S_{11} \leq -10$ dB, e encontra-se ressonante nos 2,4 GHz. Em relação às características de radiação, esta antena apresenta características típicas de uma antena dipolo, com características omnidirecionais no plano H e um ganho de pico de 2 dBi.

No simulador COMSOL variaram-se as dimensões do substrato ($\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,6$ mm) para que a antena ficasse ressonante nos 2,42 GHz. As dimensões do substrato são $L = 42$ mm e $W = 52$ mm.

Na Figura 4.3 mostra-se a antena dipolo impressa em FR4 implementada neste trabalho.

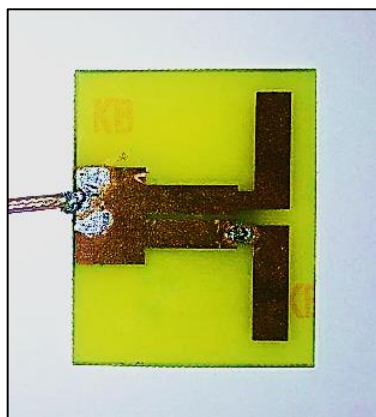


Figura 4.3 – Antena dipolo no substrato FR4.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados de simulação e experimentais para a variação do parâmetro S_{11} .

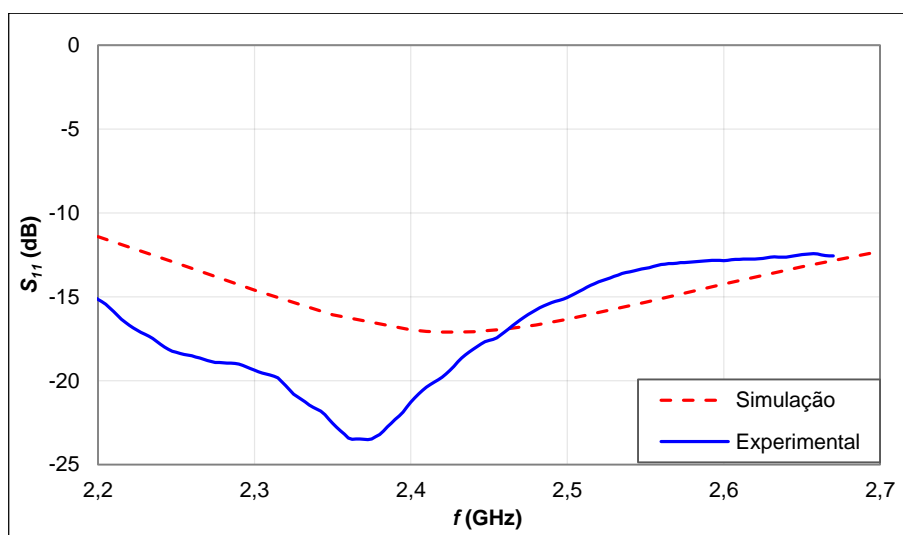


Figura 4.4 – Valores simulados de S_{11} para a antena dipolo com o balun integrado e impressa no substrato FR4.

Segundo os dados da simulação, esta antena tem a ressonância nos 2,42 GHz ($S_{11} = -17,11$) e uma largura de banda de 700 MHz, com o parâmetro $S_{11} \leq -10$ dB. Na prática obteve-se a ressonância nos 2,37 GHz, com um desvio de 50 MHz em relação ao valor da simulação, e uma largura de banda superior a 500 MHz, cobrindo toda a banda ISM de 2,4 GHz.

Em relação às características de radiação, os diagramas de radiação (simulação e experimental) têm as formas típicas de uma antena dipolo, com uma ligeira inclinação, e podem ser consultados no anexo B.

O ganho máximo registado para a frequência de 2,42 GHz foi 2,12 dBi na simulação e 1,8 dBi na prática. A antena foi colocada com polarização vertical (ver Figura 4.2) e a direção de máxima radiação é dada no plano XZ na vertical.

4.2.2 Dipolo Duroid RT/5880

As dimensões de uma antena dipolo para o substrato Duroid RT/5880 foram determinadas a partir da estrutura da antena dipolo no substrato FR4 (ver Figura 4.2). Para tal, recorreu-se à calculadora TX-LINE. Os parâmetros de entrada e saída da linha impressa no substrato FR4 são apresentados na Tabela 4.1. Para o substrato Duroid RT/5880 os parâmetros da linha impressa são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Parâmetros inseridos na calculadora TX-Line para a linha impressa do substrato FR4.

Parâmetros					
Entrada			Saída		
Parâmetros do material	Constante dielétrica	4,4	Características físicas	Comprimento (L)	16,9 mm
	Tangente de perdas	0,02			
Características elétricas	Impedância	50 Ω		Largura (W)	3 mm
	Frequência	2,42 GHz			
	Comprimento elétrico	90°	Características elétricas	Constante fase	5325,22 °/m
Características físicas	Altura (H)	1,6 mm		Constante dielétrica efetiva	3,36
	Espessura (T)	7 μm		Perda	7,77 dB/m

Tabela 4.2 – Parâmetros inseridos na calculadora TX-Line para a linha impressa do substrato Duroid/RT 5880.

Parâmetros					
Entrada			Saída		
Parâmetros do material	Constante dielétrica	2,2	Características físicas	Comprimento (L)	22,54 mm
	Tangente de perdas	0,001			
Características elétricas	Impedância	50 Ω		Largura (W)	4,85 mm
	Frequência	2,42 GHz			
	Comprimento elétrico	90	Características elétricas	Constante fase	3993,61 °/m
Características físicas	Altura (H)	1,588 mm		Constante dielétrica efetiva	1,89
	Espessura (T)	35 μm		Perda	0,56 dB/m

O comprimento elétrico de 90° corresponde a um comprimento da linha L igual a $\lambda_g/4$, λ_g o comprimento de onda na linha impressa. Relacionou-se o comprimento da linha no FR4 (L_F) com comprimento da linha no Duroid RT/5880 (L_D), que é o mesmo que relacionar o comprimento de onda do FR4 (λ_{g_F}) com o comprimento de onda do Duroid RT/5880 (λ_{g_D}), ou seja:

$$\frac{L_D}{L_F} = \frac{\lambda_{g_D}}{\lambda_{g_F}} = \frac{22,54}{16,90} = 1,33. \quad (4.1)$$

Como o comprimento da linha impressa no Duroid RT/5880 é 1,33 vezes superior ao comprimento da linha em FR4, multiplicaram-se as dimensões da antena FR4 por esta constante. Alguns parâmetros foram exceção, como a largura das faixas do *balun*, que foi dimensionada para ser cerca de 10% mais larga do que a largura da linha impressa, e a distância entre as linhas do *balun* (g_2) e o diâmetro do orifício (r) que foram mantidos.

Os parâmetros desta antena dipolo impressa no substrato Duroid RT/5880 são: $L_1 = 27,8$ mm; $L_2 = 44$ mm; $L_3 = 22,5$ mm; $L_4 = 4,8$ mm; $L_5 = 12,6$ mm; $L_6 = 16,66$ mm; $W_1 = 8,03$ mm; $W_2 = 4,8$ mm; $W_3 = 5,5$ mm; $W_4 = 4,8$ mm; $W_5 = 22,75$ mm; $g_1 = 3$ mm; $g_2 = 1$ mm; $r = 0,375$ mm; $L = 56$ mm e $W = 7$ mm.

A antena dipolo construída no substrato Duroid RT/5880 é apresentada na Figura 4.5. A solda nas hastes do dipolo não fazem parte do projeto, existindo apenas para corrigir imperfeições da antena que resultam do processo de fabricação.

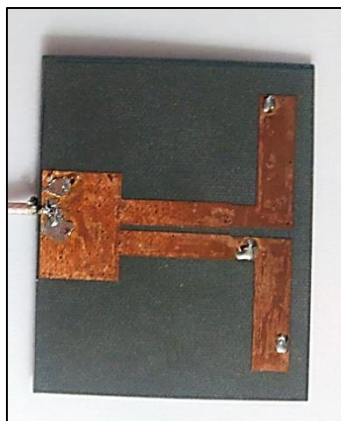


Figura 4.5 – Antena dipolo no substrato Duroid RT/5880.

Os resultados da simulação e práticos da variação do parâmetro S_{11} em função da frequência são apresentados na Figura 4.6.

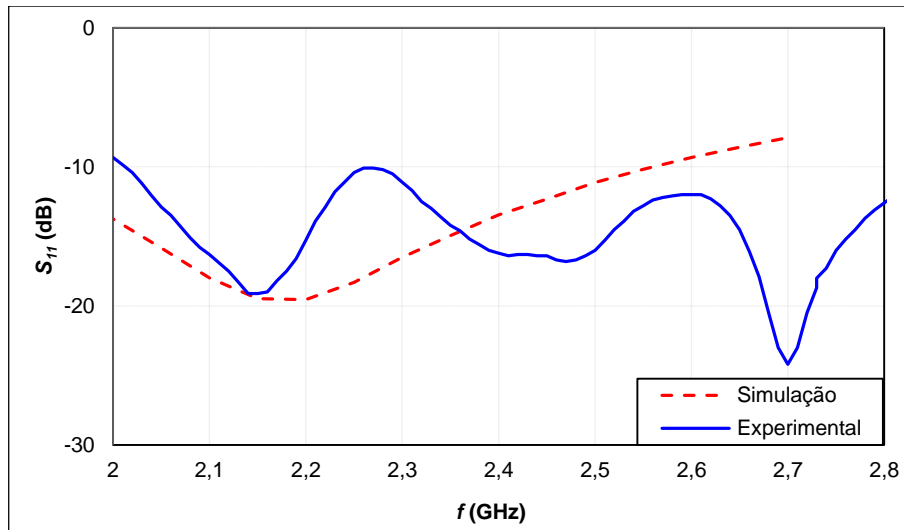


Figura 4.6 – Valores simulados e experimentais da variação de S_{11} da antena dipolo com o balun integrado e impressa no substrato Duroid RT/5880.

Analisando a Figura 4.6, na simulação a antena está ressonante nos 2,18 GHz, com um parâmetro $S_{11} = -19,75$, e tem uma largura de banda é de 670 MHz (1,89 – 2,56 GHz) para $S_{11} \leq -10$ dB. A nível experimental, constata-se que existem três ressonâncias na mesma banda de frequências: 2,15 GHz ($S_{11} = -19,1$ dB), 2,47 GHz ($S_{11} = -16,8$ dB) e 2,7 GHz ($S_{11} = -24,2$ dB). Como resultado a largura de banda é larga e de 840 MHz (2,01 – 2,85 GHz), para um valor de $S_{11} \leq -10$ dB. A ressonância de 2,15 GHz é a que se aproxima da ressonância obtida através da simulação, sendo o desvio de 30 MHz.

Quanto às características de radiação, esta antena apresenta os diagramas de radiação típicos de uma antena dipolo, quer na simulação quer na prática. O ganho máximo registado foi de 1,97 dBi na simulação e 1,9 dBi na prática, para a frequência de 2,42 GHz. A antena foi medida com polarização vertical (ver Figura 4.5) e a direção de máxima radiação é dada no plano YZ e na vertical.

4.2.3 Antena F

Uma antena monopolo com uma estrutura simples em forma de F impressa num substrato FR4 ($\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,6$ mm) é apresentada na Figura 4.7 [52]. Esta antena tem dupla banda de operação graças aos dois percursos utilizados pela corrente, um mais longo com um comprimento de 24,5 mm ($W_g + L_3 + L_1 = 0,2\lambda_1$), que determina a frequência de ressonância mais baixa $f_1 = 2,42$ GHz, e um outro percurso mais curto com 15,35 mm ($W_g + L_4 + L_2 = 0,266\lambda_2$), que é responsável pela ressonância mais elevada $f_2 = 5,2$ GHz.

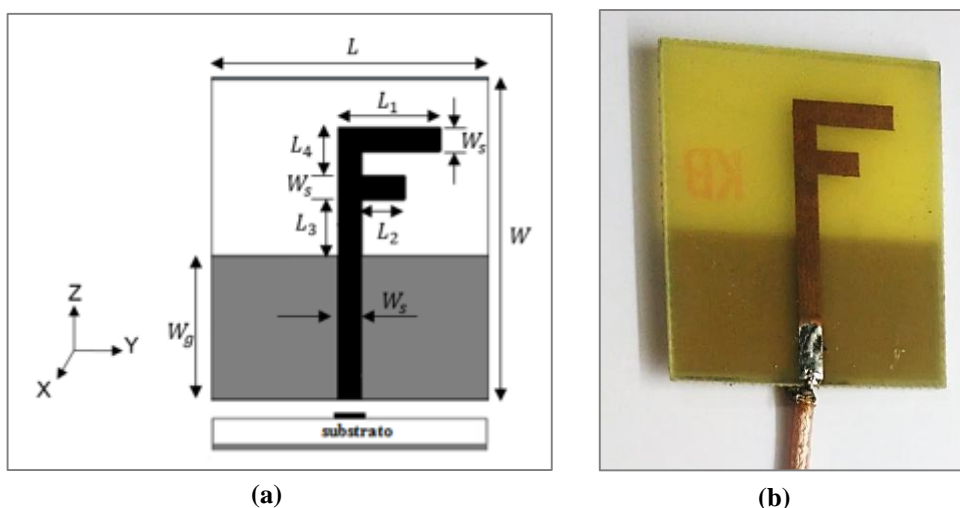


Figura 4.7 – Antena F: a) estrutura e parâmetros da antena; b) antena construída.

As dimensões da antena proposta são: $L_1 = 12,8$ mm; $L_2 = 5,35$ mm; $L_3 = 13$ mm; $L_4 = 7$ mm; $W_1 = 3$ mm; $W_2 = 3$ mm; $W_s = 3$ mm; $W_g = 18$ mm; $W = 40$ mm e $L = 35$ mm.

De acordo com os resultados da bibliografia em [52], esta antena é ressonante na frequência 2,44 GHz ($SWR = 1,9$), tem uma largura de banda de 650 MHz (2,12 GHz – 2,77 GHz) e os ganhos variam entre os 1,5 e os 2 dBi.

Desenhou-se e simulou-se no COMSOL Multiphysics a estrutura da antena com as dimensões da bibliografia, mas não foram obtidos os resultados esperados. Assim sendo, ajustou-se o comprimento do braço L_1 de 10 mm para 12,8 mm para baixar a frequência de ressonância, tendo-se mantido as restantes dimensões, de forma a obter os resultados desejados na banda de interesse.

Na Figura 4.8 é apresentada a variação do parâmetro S_{11} , sendo apresentados os resultados da simulação para as duas antenas (antena com dimensões da bibliografia e a antena proposta) e os resultados experimentais da antena proposta.

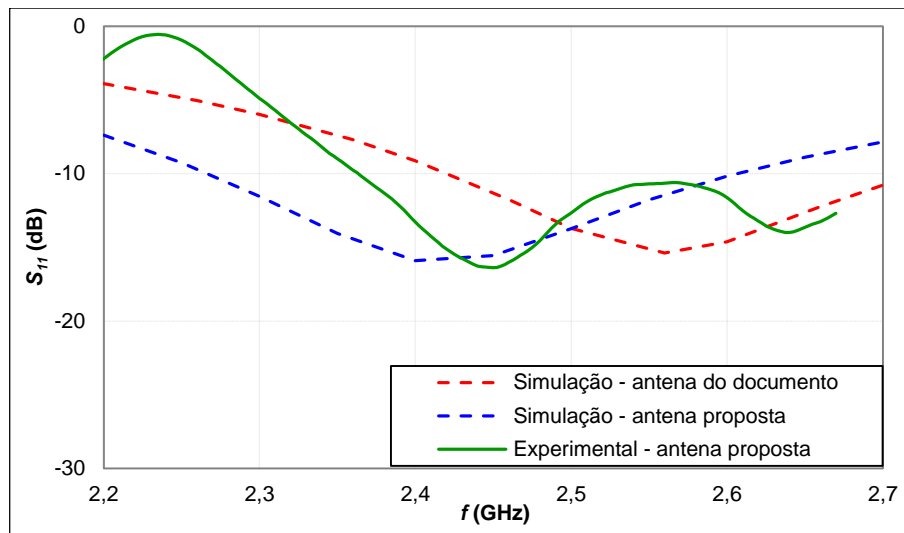


Figura 4.8 – Valores simulados da variação do parâmetro S_{11} para as duas antenas F e valores experimentais da variação do parâmetro S_{11} para a antenna F proposta.

Para a antenna com as dimensões da bibliografia obteve-se a ressonância de 2,56 GHz, com um $S_{11} = -15,37$ dB e uma largura de banda que corresponde a 430 MHz, com a gama de frequências a variar desde os 2,43 GHz até aos 2,86 GHz, para valores do parâmetro $S_{11} \leq -10$ dB. Esta largura de banda é mais estreita do que o esperado e não inclui toda a banda ISM de 2,4 GHz.

Com a adaptação da antenna, na simulação obteve-se a ressonância de 2,42 GHz ($S_{11} = -16,05$) e uma largura de banda de 330 MHz ou 13,64 % (2,27 – 2,6 GHz), para $S_{11} \leq -10$ dB. Esta largura de banda é mais estreita do que o esperado mas inclui toda a banda ISM de 2,4 GHz.

Na prática, a ressonância encontra-se nos 2,45 GHz ($S_{11} = -16,38$ dB) e a largura de banda é superior a 310 MHz (2,36 – 2,67 GHz), para valores do parâmetro $S_{11} \leq -10$ dB. A discrepância entre os valores da frequência central é de 30 MHz e a largura de banda é mais do que suficiente para cobrir a banda ISM de 2,4 GHz.

Os diagramas resultantes da simulação têm formas semelhantes às de uma antenna monopolo, com um plano H praticamente omnidirecional e a máxima radiação no plano XZ é entregue com a antenna na vertical. No entanto, evidencia-se uma inclinação até 15° no plano YZ (consultar anexo B).

Em relação ao ganho, obteve-se um valor máximo na simulação de 2 dBi e um ganho máximo de 0 dBi na prática para a antenna proposta e na frequência de 2,42 GHz. O ganho foi medido com a antenna na polarização vertical (ver Figura 4.7) e inclinada no plano XZ para trás em relação à vertical e ao emissor.

Esta antenna é bastante ineficiente, tendo-se constatado a forte presença de correntes no exterior dos cabos coaxiais de teste, aquando da medição das características de impedância.

4.2.4 Antena G

A estrutura de uma antena G impressa no substrato dielétrico FR4 ($\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,6$ mm) e com dupla banda de operação (2,45/5,8 GHz) é apresentada na Figura 4.9. A antena é alimentada através de uma linha impressa de 50Ω [53].

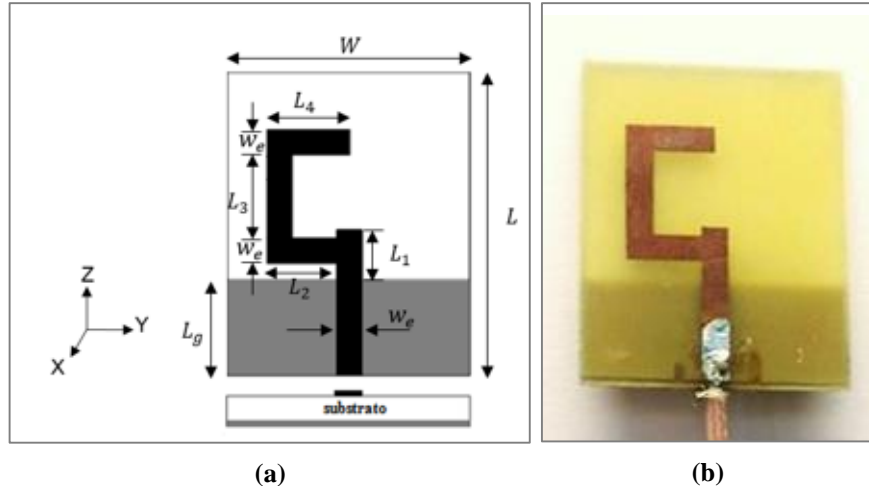


Figura 4.9 – Antena G: a) Estrutura e parâmetros; b) antena construída em laboratório.

As dimensões desta antena são as seguintes: $L_1 = 4,06$ mm; $L_2 = 8,46$ mm; $L_3 = 10$ mm; $L_4 = 10,06$ mm; $L_g = 12$ mm; $w_e = 3,06$ mm; $W = 30$ mm e $L = 38$ mm.

A largura de banda da antena é de 390 MHz (2,31 GHz – 2,70 GHz) para valores do parâmetro S_{11} iguais ou inferiores a -10 dB. A frequência de ressonância é igual a 2,46 GHz para um parâmetro S_{11} igual a -24,57 dB. O ganho cresce suavemente com a frequência, tendo sido registado o valor de 2,76 dBi para a frequência de 2,51 GHz [53].

Fez-se a simulação desta antena no COMSOL Multiphysics e na Figura 4.10 são apresentados os valores da simulação e os experimentais da variação do parâmetro S_{11} para esta antena.

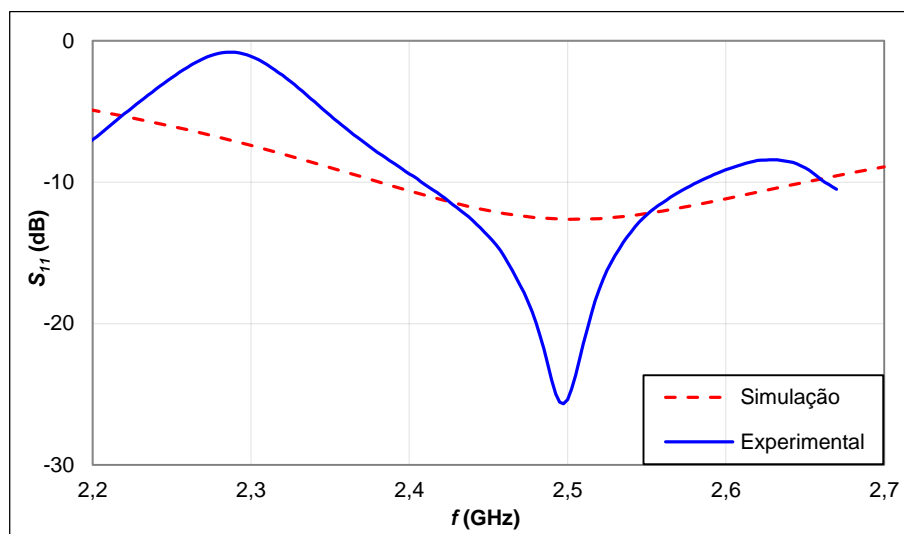


Figura 4.10 – Resultados da simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} para a antena em forma de G.

Segundo os resultados da simulação, a frequência de ressonância encontra-se nos 2,5 GHz, com o melhor valor para $S_{11} = -12,6$ dB, e a largura de banda é de 11,6% (2,37 – 2,66 GHz), para $S_{11} \leq -10$ dB.

Através dos valores medidos, constata-se que a antena tem a ressonância nos 2,5 GHz ($S_{11} = -25,68$ dB) e uma largura de banda de 90 MHz ou 3,6 % (2,41 – 2,58 GHz), com $S_{11} \leq -10$ dB. Os resultados da simulação e experimental da frequência central coincidem, mas a largura de banda é muito mais estreita do que o esperado.

Quanto aos diagramas obtidos por simulação, verificou-se que a antena é quase omnidirecional no plano H , apresenta os lóbulos sem inclinação no plano XZ , mas apresenta uma inclinação até 30° no plano YZ .

Na simulação o ganho situa-se entre os 1,3 e os 1,7 dBi na banda ISM de 2,4 GHz. O ganho máximo registado na simulação foi de 1,48 dBi e na prática foi de 0,3 dBi para a frequência de 2,42 GHz. Na prática a antena foi colocada com polarização vertical (ver Figura 4.9) e o ganho máximo foi obtido no plano XZ com a antena inclinada para trás entre os 0 e os 90° em relação à vertical e ao emissor. Tal como a antena F, esta antena é ineficiente mas bastante compacta.

4.2.5 Antena monopolo com plano de massa curto

No documento [54] são apresentadas antenas monopolo mais compactas do que as antenas impressas vistas anteriormente e para a banda WLAN (*Wireless Local Area Network*) de 2,4 GHz. A antena monopolo com plano de massa curto (Figura 4.11) consiste numa simples faixa de comprimento $\lambda_g/2$ (onde λ_g é o comprimento de onda da linha impressa no material FR4, com a constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e altura $h = 1,6$ mm), com um plano de massa truncado com a largura $\lambda_g/2$, e excitada por uma linha impressa de 50Ω . Esta antena é ressonante nos 2,4 GHz, tem uma largura de banda de 20,8% (2,28 GHz – 2,68 GHz) e um ganho médio de 3,2 dBi [54].

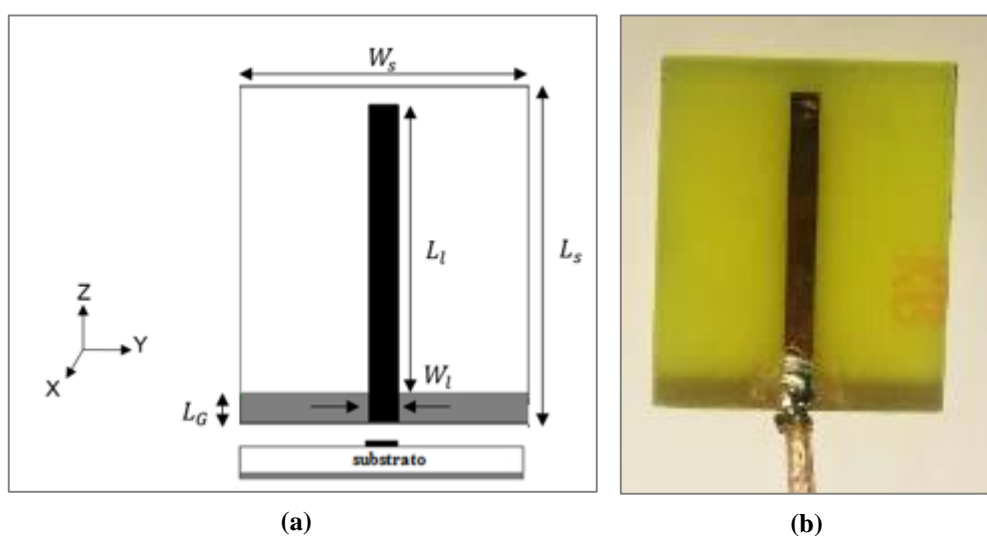


Figura 4.11 – Antena monopolo com plano de massa curto: a) estrutura e parâmetros; b) protótipo construído em laboratório.

As dimensões desta antena proposta são: $L_G = 3$ mm; $L_l = 29,1$ mm; $W_l = 3$ mm; $L_s = 35$ mm e $W_s = 30$ mm.

Comparativamente às dimensões da antena na bibliografia, alterou-se L_l de 30 mm para 29,1 mm, tendo-se mantido as restantes dimensões. O ajuste deste parâmetro foi realizado a partir de resultados experimentais do protótipo de antena construído com as dimensões da bibliografia e com o auxílio das simulações no *software* COMSOL, para que a antena tivesse as melhores características na banda de interesse e na frequência de 2,42 GHz. A razão deve-se ao facto desta antena ter-se mostrado ineficiente, tal como as antenas F e G, apesar das boas características de impedância apresentadas (impedância, parâmetro S_{11}).

Na Figura 4.12 são apresentados os dados obtidos por simulação e experimentalmente da variação do parâmetro S_{11} para esta antena.

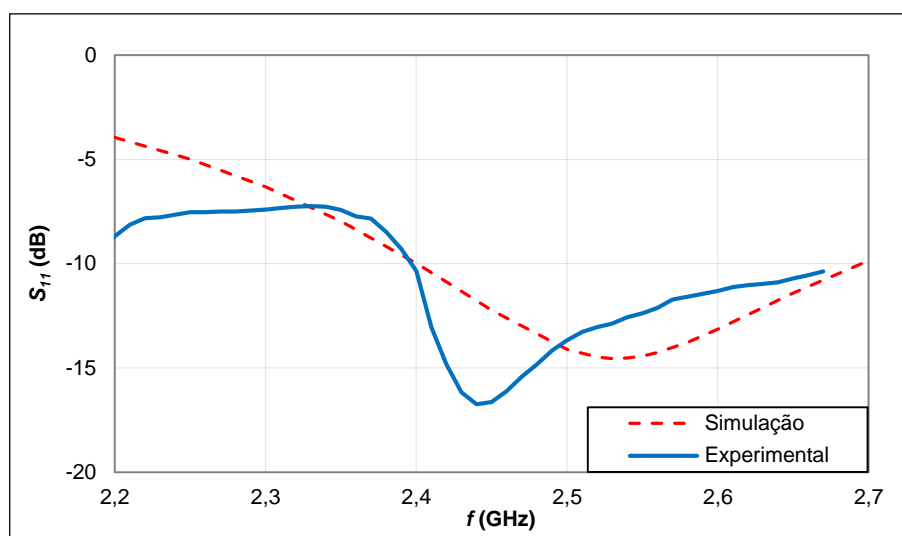


Figura 4.12 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} em função da frequência para a antena monopolo com plano de massa curto .

Pela simulação a frequência central da antena encontra-se nos 2,53 GHz ($S_{11} = -14,55$ dB) e a largura de banda é de 250 MHz (2,4 – 2,65 GHz), com $S_{11} \leq -10$ dB.

Na prática esta antena está ressonante na frequência de 2,44 GHz, com um parâmetro $S_{11} = -16,74$ dB, e apresenta uma largura de banda superior a 270 MHz (2,4 – > 2,67 GHz). A antena está bem adaptada na banda de interesse, mas notou-se uma presença significativa de correntes no exterior dos cabos coaxiais aquando da medição.

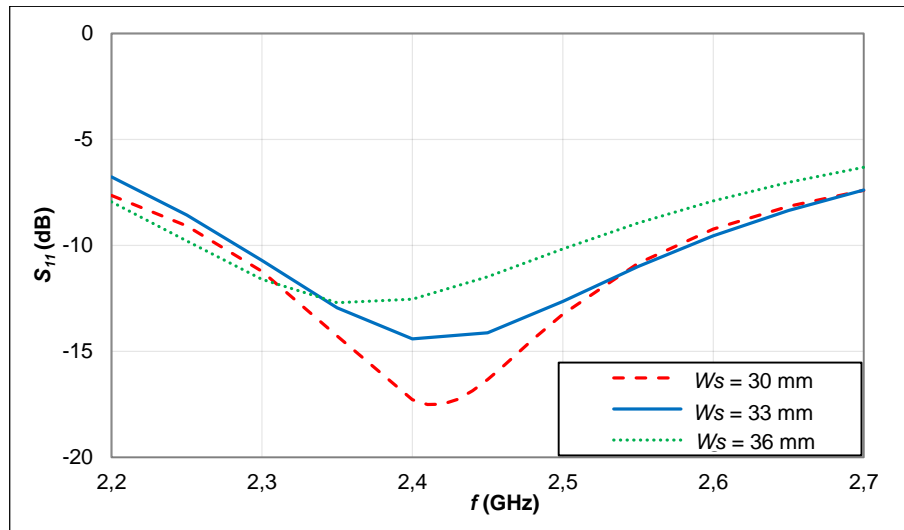
Comparando os resultados da simulação e da prática, existe um desvio na frequência central de 90 MHz e a largura de banda é superior na prática.

Os diagramas de radiação na simulação são semelhantes aos do monopolo típico/teórico. Na prática obteve-se um diagrama quase omnidirecional no plano H (plano XY) e diagramas com os lóbulos inclinados e um pouco distorcidos nos planos XZ e YZ .

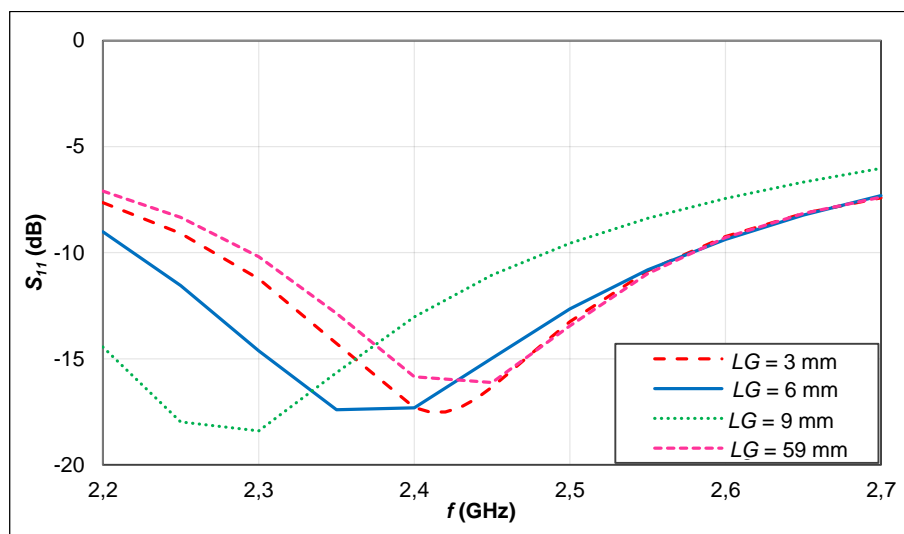
Para a frequência de 2,42 GHz obteve-se um ganho máximo de 1,36 dBi na simulação e -1,3 dBi na prática. Na prática mediou-se o valor máximo no plano XZ , com a antena na polarização vertical e inclinada para trás de 40°.

4.2.6 Antena monopolo com plano massa longo

Perante a ineficiência da antena monopolo com plano de massa curto apresentada secção anterior, resolveu-se variar as dimensões do plano de massa desta antena, devido à importância do mesmo para o bom funcionamento da antena monopolo. No simulador COMSOL, fizeram-se várias simulações para diferentes tamanhos do plano de massa (ver Figura 4.13), tendo-se alterado as dimensões em largura (W_s) e comprimento (L_g).



(a)



(b)

Figura 4.13 – Variação do parâmetro S_{11} em função das dimensões do plano de massa: a) Variação do plano de massa em largura (W_s) para $L_g = 3$ mm; b) Variação do plano de massa em comprimento (L_g) para $W_s = 30$ mm.

Analisando os resultados da Figura 4.13, constata-se que a frequência de ressonância diminui com o aumento das dimensões do plano de massa em comprimento e largura. No entanto, quando se aumenta o plano de massa através do parâmetro W_s observa-se uma diminuição dos valores do parâmetro S_{11} . Já com o aumento de L_g a degradação é muito mais suave.

As dimensões do plano de massa foram ajustadas para que a antena ficasse ressonante na frequência de 2,42 GHz nos resultados de simulação, ou seja, $L_G = 59$ mm e $W_s = 31$ mm. A antena construída é apresentada na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Antena monopolo com plano de massa longo.

Os resultados da simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} são apresentados na Figura 4.15.

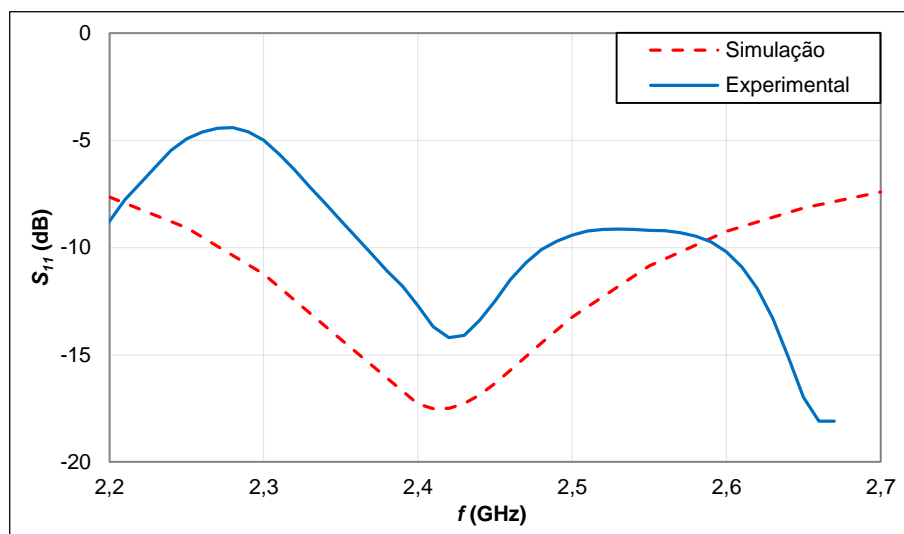


Figura 4.15 – Resultados da simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} para a antena monopolo com plano de massa longo.

Pela simulação obteve-se a ressonância em torno dos 2,42 GHz, com uma impedância $Z = 52,6 + j13,55$, um parâmetro $S_{11} = -17,5$ dB, e uma largura de banda de 310 MHz ou 12,8 % (2,27 - 2,58 GHz).

Na prática a antena tem a ressonância nos 2,42 GHz ($S_{11} = -14,2$ dB) e uma largura de banda estreita de apenas 110 MHz ou 4,55% (2,37 – 2,48 GHz). Os valores da frequência central coincidem, mas a largura de banda é mais estreita na prática.

Os diagramas de radiação foram medidos com a antena na polarização vertical (Figura 4.14). Nos planos YZ e XZ obtiveram-se 4 lóbulos inclinados em relação aos eixos, dois

principais e dois secundários, com a máxima radiação dada pelo plano de massa. No plano XY , o diagrama de radiação é quase omnidirecional.

O ganho máximo para a frequência de 2,42 GHz foi registado no plano XZ com a antena inclinada para trás de 35° em relação à posição vertical. Obteve-se um valor de 3,76 dBi na simulação e 2,82 dBi na prática.

Com o aumento do plano de massa a antena monopolo tornou-se mais eficiente, como era de esperar.

4.2.7 Antena anel retangular

Uma antena constituída por dois anéis retangulares e com ranhuras dispostas na vertical sobre o plano de massa, para aplicações WLAN (2,4/5,2/5,8 GHz) e WIMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (2,5/3,5/5,5 GHz), é apresentada na bibliografia [55]. Esta antena é alimentada através de uma linha CPW de 50Ω e utiliza o substrato FR4 ($\epsilon_r = 4,4$) com as dimensões máximas de $27,1 \times 38,8 \times 1,6 \text{ mm}^3$. Apenas com o anel exterior a antena consegue funcionar nas bandas WLAN de 2,4/5,8 GHz. O anel interior é responsável pela banda de frequências intermédia. Os restantes parâmetros permitem a otimização das características da antena nas bandas de frequências desejadas [55]. Na Figura 4.16 apresenta-se a estrutura da antena proposta, com apenas o anel exterior e sem as ranhuras no plano de massa e o protótipo da antena construído.

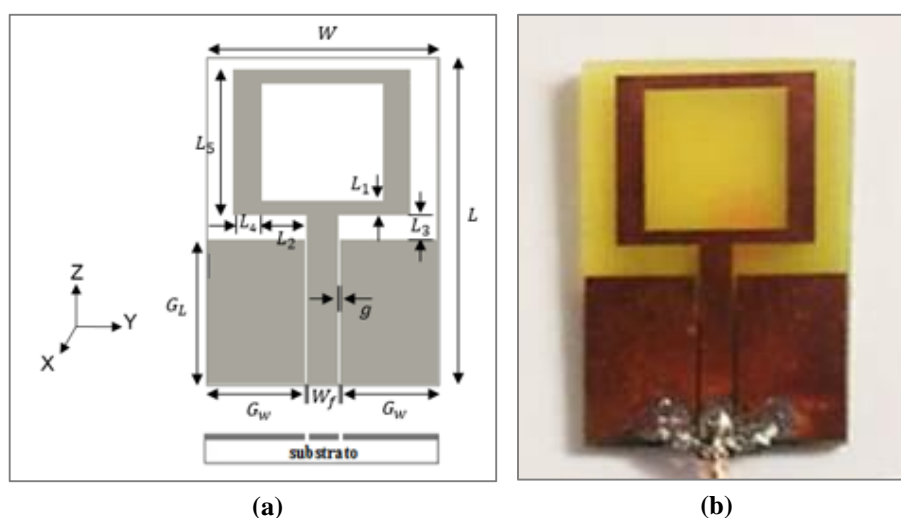


Figura 4.16 – Antena anel retangular: a) estrutura e dimensões; b) antena construída.

De acordo com a bibliografia, a banda inferior da antena corresponde a 500 MHz, com a gama de frequências a variar desde 2,37 GHz até 2,81 GHz. Os ganhos máximos registados para esta banda situaram-se entre os 5 e os 6 dBi. Para a frequência de 2,4 GHz foi indicado um ganho máximo de 5,5 dBi. O parâmetro S_{11} tem o valor máximo próximo de -15 dB [55].

No simulador COMSOL Multiphysics desenhou-se a estrutura da antena com apenas o anel exterior, tendo-se excluído o anel interior e as ranhuras sobre o plano de massa. Como no documento [55] são ocultadas algumas das dimensões da antena, alteraram-se os parâmetros em falta até se obter a antena ressonante na frequência de interesse de 2,42 GHz.

As dimensões desta antena são: $L_1 = 1,7$ mm; $L_2 = 5,5$ mm; $L_3 = 3,2$ mm ; $L_4 = 3$ mm; $L_5 = 17$ mm; $G_w = 11,5$ mm; $G_L = 17$ mm; $W_f = 3,5$ mm; $g = 0,3$ mm; $L = 38,5$ mm e $W = 27,1$ mm.

Os resultados obtidos por simulação e experimentalmente da variação do parâmetro S_{11} são apresentados na Figura 4.17.

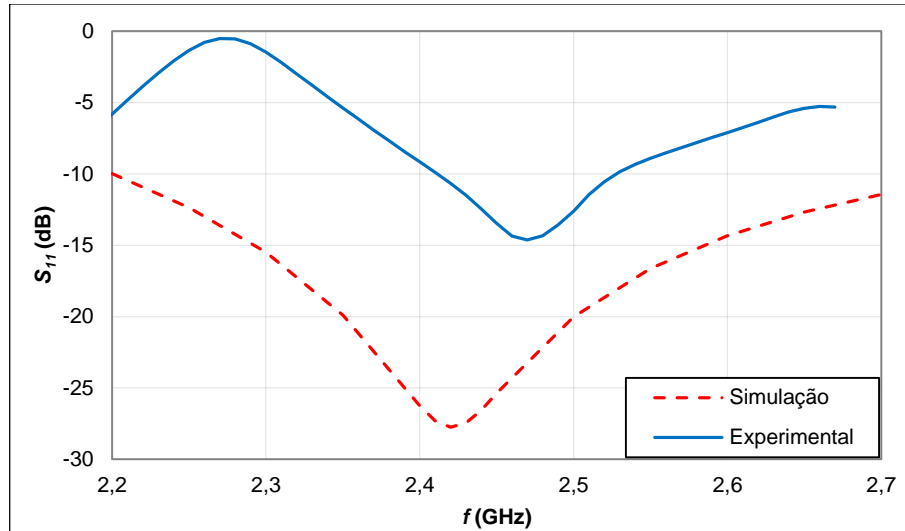


Figura 4.17 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} para a antena anel retangular proposta.

Pelos dados da simulação, a antena tem a frequência central em 2,42 GHz, com o melhor valor igual a -27,75 dB para o parâmetro S_{11} e uma largura de banda de 580 MHz ou 23,97 % (2,2 – 2,78 GHz), com os valores de $S_{11} \leq -10$ dB.

Na prática obteve-se a ressonância nos 2,47 GHz ($S_{11} = -14,61$ dB) e uma largura de banda de 100 MHz ou 4,05% (2,42 – 2,52 GHz). A discrepância entre os valores da frequência central é de 50 MHz e os valores da largura de banda diferem em 480 MHz.

Os diagramas de radiação da simulação e práticos nos vários planos assemelham-se aos diagramas de uma antena monopolo. No entanto, os diagramas práticos nos planos YZ e XZ apresentam os lóbulos inclinados e o diagrama no plano XY não é completamente omnidirecional.

O ganho máximo registado para a frequência de 2,42 GHz foi de 2,69 dBi na simulação e -0,3 dBi experimentalmente. Na prática a direção de máxima radiação encontra-se no plano XZ com a antena na polarização vertical (ver Figura 4.16a)) e inclinada de 30° para trás comparativamente à vertical.

4.2.8 Antena IFA CPW

Em [56] é apresentado o projeto de uma antena IFA, excitada por uma guia de onda coplanar (CPW) de 50 Ω , que é válido para diferentes substratos e frequências. A metodologia é semelhante à que foi usada na antena dipolo, sendo as dimensões determinadas em função do comprimento de onda na linha CPW (λ_g). Este estudo foi complementado com um outro em [57], no qual é apresentada uma antena IFA impressa num substrato FR4 ($\epsilon_r = 4,4$; $\delta = 0,02$; h

= 0,8 mm) e excitada por uma linha CPW, cujas dimensões aproximam-se bastante das dimensões de projeto apresentadas em [56], à exceção da dimensão d_s que foi alterada para $\lambda_g/40$, uma vez que a dimensão do substrato não pode ser inferior às dimensões da antena. A estrutura da antena IFA é apresentada na Figura 4.18.

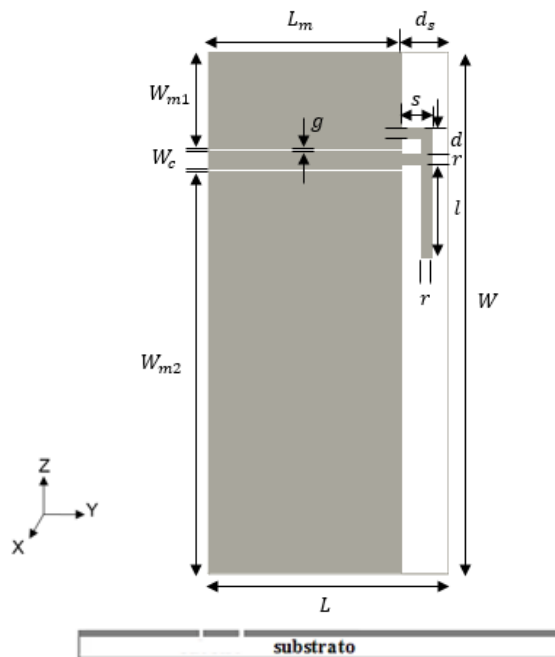


Figura 4.18 – Estrutura e parâmetros da antena IFA CPW realizada no *software* COMSOL Multiphysics.

Determinaram-se as dimensões da antena IFA para o substrato FR4 disponível ($\epsilon_r = 4,4$; $\delta = 0,02$; $h = 1,6$ mm) e para a frequência de 2,42 GHz. As dimensões da antena são: $W_c = 1,9$ mm; $g = 0,25$ mm; $d = 3,3$ mm; $l = 10,3$ mm; $s = 2,1$ mm; $r = 1$ mm; $L_m = 20,7$ mm; $W_{m1} = 10,1$ mm; $W_{m2} = 43,2$ mm; $d_s = 5,2$ mm; $W = 56,3$ mm e $L = 25,9$ mm.

Na Figura 4.19 mostram-se os resultados simulados obtidos para o parâmetro S_{11} através do simulador COMSOL Multiphysics.

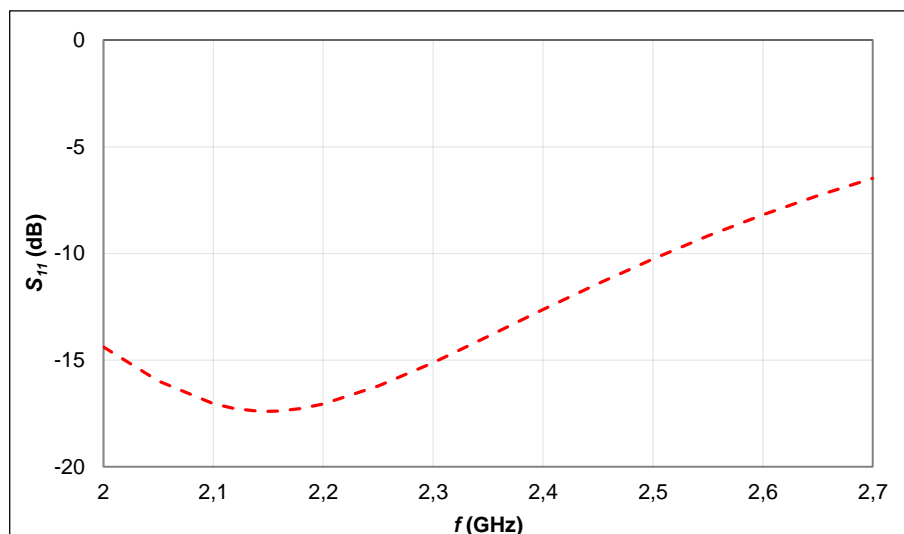


Figura 4.19 – Variação de S_{11} com a frequência para a antena IFA CPW com dimensões de projeto.

A ressonância encontra-se nos 2,15 GHz, estando desviada de 270 MHz em relação à frequência de projeto de 2,42 GHz. A largura de banda é superior a 500 MHz, para valores de $S_{11} \leq -10$ dB.

Tendo em conta que a frequência de ressonância é controlada pelas dimensões dos planos de massa [56], resolveu-se diminuir as dimensões dos planos de massa, principalmente, a largura do plano de massa mais largo (W_{m2}), de forma a deslocar a frequência de ressonância para a banda ISM de 2,4 GHz e, ao mesmo tempo, tornar a antena mais compacta. Contudo, como já se tinha constatado nos testes realizados com a variação do plano de massa da antena monopolo, a redução do plano de massa contribui para uma diminuição dos valores do parâmetro S_{11} e, como consequência, para a diminuição da largura de banda. Também constatou-se que a afinação da frequência é mais difícil, como tinha sido referido na bibliografia [56]. Assim, modificaram-se outros parâmetros do projeto de forma a encontrar estruturas adequadas.

Após várias simulações com a modificação dos parâmetros de projeto, são propostas duas antenas IFA.

A antena IFA 1 tem as dimensões totais iguais a $24,4 \times 47,2$ mm² e apenas alteraram-se os parâmetros W_{m2} e s da antena projetada. As dimensões dos vários parâmetros são: $W_c = 1,9$ mm; $g = 0,25$ mm; $d = 3,3$ mm; $l = 10,3$ mm; $s = 3$ mm; $r = 1$ mm; $L_m = 20,7$ mm; $W_{m1} = 10,1$ mm; $W_{m2} = 43,2$ mm; $d_s = 5,2$ mm; $W = 47,5$ mm e $L = 25,9$ mm.

A antena IFA 2 é mais compacta, com as dimensões máximas iguais a $22,5 \times 42,2$ mm² e os parâmetros: $W_c = 1,9$ mm; $g = 0,25$ mm; $d = 3,1$ mm; $l = 8,8$ mm; $s = 3$ mm; $r = 1$ mm; $L_m = 17,6$ mm; $W_{m1} = 9,8$ mm; $W_{m2} = 30$ mm; $d_s = 4,9$ mm; $W = 42,2$ mm e $L = 22,5$ mm.

As duas antenas construídas são apresentadas na Figura 4.20.

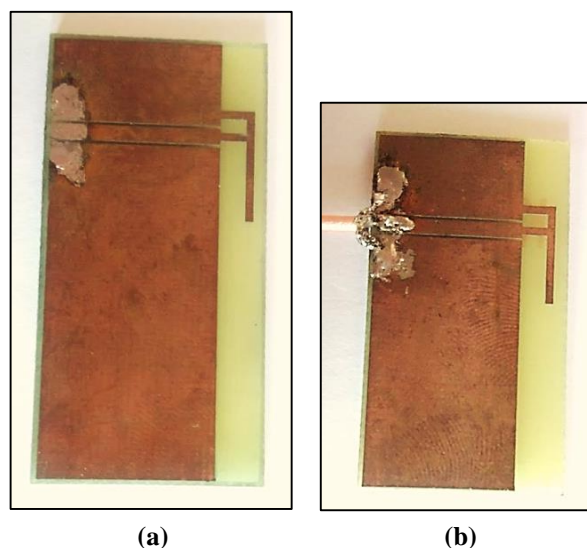
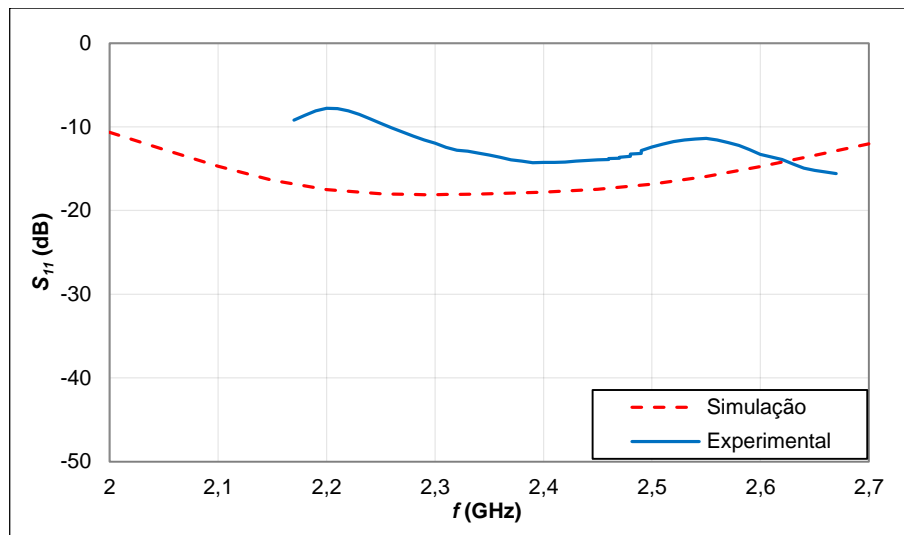
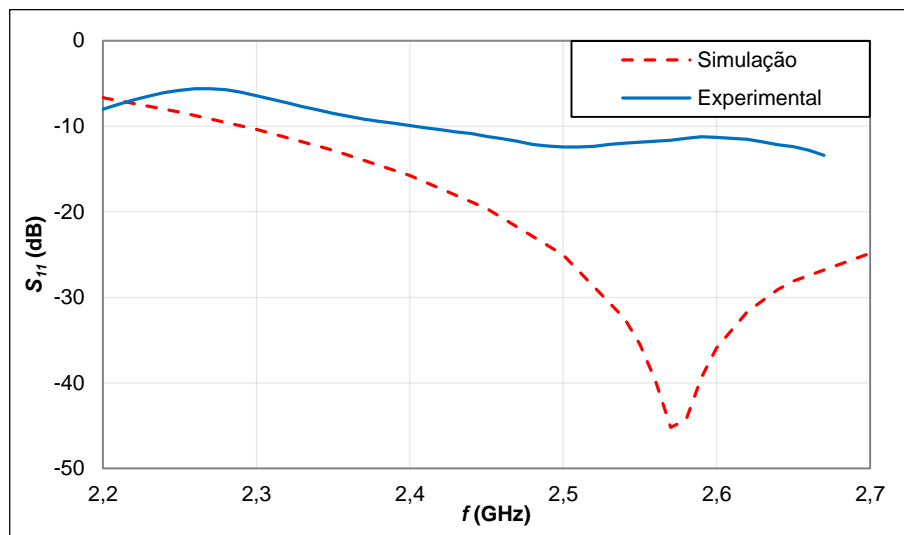


Figura 4.20 – Antenas IFA construídas: a) IFA 1; IFA 2.

Os valores do parâmetro S_{11} obtidos através de simulação no COMSOL Multiphysics e experimentalmente são apresentados na Figura 4.10.



(a)



(b)

Figura 4.21 – Resultados de simulação e experimentais da variação do parâmetro S_{11} : a) antena IFA 1; b) antena IFA 2.

Para a antena IFA CPW 1 (ver Figura 4.10a)), obteve-se a ressonância nos 2,3 GHz ($S_{11} = -18,09$ dB) na simulação e uma ressonância de 2,41 GHz ($S_{11} = -14,23$ dB) na prática. A largura de banda é superior a 700 MHz na simulação e superior 410 MHz (2,26 – > 2,67 GHz) na prática, com $S_{11} \leq -10$ dB. A diferença entre os valores da frequência de ressonância é de 110 MHz e a largura de banda na prática é mais estreita.

No caso da antena IFA CPW 2, na simulação a ressonância encontra-se nos 2,57 GHz ($S_{11} = -45,21$ dB) e na prática situa-se nos 2,51 GHz ($S_{11} = -12,44$ dB), havendo uma discrepância de 60 MHz. A largura de banda é de 820 MHz na simulação e de 260 MHz (2,41 – > 2,67 GHz) a nível experimental.

Em ambas as antenas os diagramas de radiação da simulação e práticos são muito parecidos. No plano H o diagrama prático é omnidirecional para as duas antenas. Nos planos YZ e XZ os diagramas práticos das antenas são parecidos aos do monopolo teórico no plano E . No entanto, no plano YZ os lóbulos são desproporcionais, havendo um lóbulo mais largo do que o outro.

Quanto aos valores do ganho máximo para a frequência de 2,42 GHz, a antena IFA 1 tem um ganho de 2,5 dBi na simulação e 0,6 dBi na prática. Já a antena IFA 2 apresenta um ganho de 2,93 dBi na simulação e 1,4 dBi na prática. Portanto, a antena IFA 2, para além de ser a mais compacta, é a que apresenta maior ganho naquela frequência. Experimentalmente registou-se o ganho máximo no plano YZ e praticamente na vertical.

4.2.9 Antena *patch* com *slots*

Uma antena *patch* compacta com duas ranhuras em forma de L e alimentada através de uma linha CPW de 50 Ω é apresentada na Figura 4.22. As dimensões da antena são de $0,18\lambda \times 0,15\lambda$ ($18 \times 22,5 \text{ mm}^2$), em que λ é o comprimento de onda no material para a frequência de ressonância mais baixa de 2,45 GHz. Opera nas duas bandas WLAN de 2,4 GHz e 5 GHz. Toda a estrutura é impressa do mesmo lado do substrato FR4 ($\epsilon_r = 4,4$; $h = 1,6 \text{ mm}$) [58].

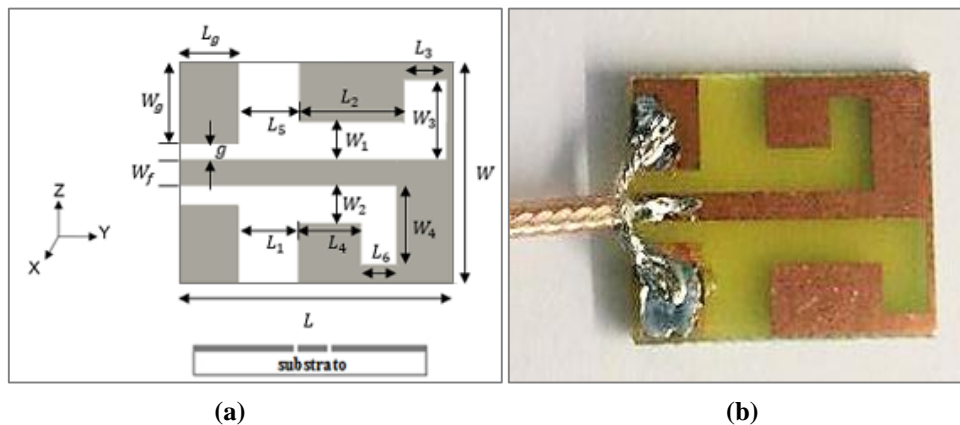


Figura 4.22 – Antena *patch* com *slots*: a) estrutura de parâmetros da antena; b) antena construída.

A antena tem uma largura de banda de 120 MHz (2,3 - 2,5 GHz) para valores de $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$. Os diagramas de radiação desta antena diferem dos diagramas típicos de uma antena monopolo [58]. O ganho médio é de 3,5 dBi para a banda de 2,4 GHz [58].

As dimensões desta antena são as seguintes: $L_1 = 5 \text{ mm}$; $L_2 = 8,5 \text{ mm}$; $L_3 = 3,5 \text{ mm}$; $L_4 = 5 \text{ mm}$; $L_5 = 5 \text{ mm}$; $W_1 = 3 \text{ mm}$; $W_2 = 3 \text{ mm}$; $W_3 = 6,5 \text{ mm}$; $W_4 = 6,5 \text{ mm}$; $L_g = 5 \text{ mm}$; $W_g = 6,5 \text{ mm}$; $W_f = 2 \text{ mm}$ e $g = 1,5 \text{ mm}$.

Realizou-se a simulação da antena no *software* COMSOL Multiphysics e, posteriormente, passou-se à construção e medição da antena. Os dados obtidos através da simulação e experimentalmente referentes à variação do parâmetro S_{11} são apresentados na Figura 4.23.

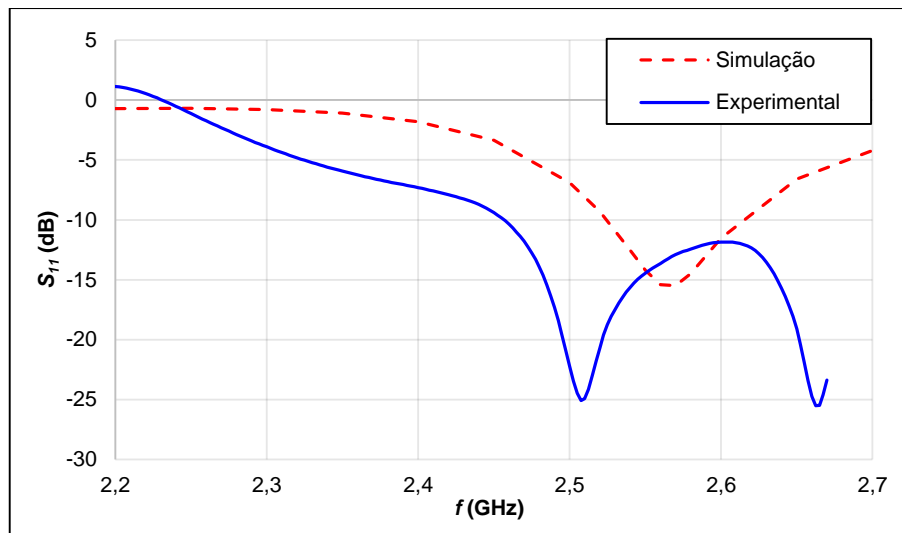


Figura 4.23 – Resultados (simulação e experimentais) da variação do parâmetro S_{11} obtidos para a antena *patch* com *slots*.

Pela simulação constatou-se que a antena é ressonante nos 2,57 GHz, com $S_{11} = -15,49$ dB, e uma impedância de $60,95 + j15 \Omega$. A largura de banda é de 70 MHz ou de 2,72 % (2,53 - 2,6 GHz), não incluindo a banda ISM de 2,4 GHz.

Contudo, devido à forte compactação desta antena, comparativamente às antenas anteriores, e aos elevados valores do ganho apresentados na bibliografia decidiu-se construir e testar a antena sem modificar a sua estrutura.

De acordo com os resultados experimentais, a antena tem duas ressonâncias na mesma banda de frequências, a primeira encontra-se nos 2,51 GHz ($S_{11} = -25,08$ dB) e a segunda nos 2,66 GHz ($S_{11} = -25,51$ dB). A largura de banda é superior a 240 MHz (2,46 - > 2,7 GHz) para um parâmetro $S_{11} \leq -10$ dB. A primeira ressonância encontra-se desviada 60 MHz em relação ao valor de simulação e a segunda ressonância está desviada 90 MHz. Já a largura de banda é muito mais larga do que a obtida na simulação devido ao aparecimento desta segunda ressonância.

Os diagramas de radiação obtidos através da simulação são apresentados no anexo B. A antena tem a máxima radiação no plano YZ e um diagrama diretivo.

O ganho máximo registado na simulação foi de -5,58 dBi e na prática foi de -0,3 dBi para a frequência de 2,42 GHz. A máxima radiação foi determinada no plano YZ, com a antena rodada para trás neste plano (ver Figura 4.22) de 150°, aproximadamente.

A discrepância de resultados deve-se à melhoria das características de impedância da antena na prática, uma vez que o valor de S_{11} na simulação é de -2,48 dB e na prática é de -7,91 dB.

4.3 Comparação das antenas

Tal como para as antenas metálicas, na Tabela 4.3 são apresentadas as características mais relevantes para comparação das 10 antenas impressas apresentadas: volume (V), largura de banda (LB) e ganho máximo (G). As antenas encontram-se ordenadas por ordem decrescente segundo o volume que ocupam.

Tabela 4.3 – Características físicas e experimentais das antenas impressas.

Antena	V (mm ³)		LB (MHz)		G (dBi) f = 2,42 GHz
Dipolo Duroid RT/5880	6225	70 × 56 × 1,588	840	2010 - 2850	1,97
Monopolo com plano de massa longo	4514	31 × 91 × 1,6	110	2370 - 2480	2,82
Antena F	2240	35 × 40 × 1,6	> 310	2360 - > 2670	0
Dipolo FR4	1997	52 × 24 × 1,6	> 500	< 2170 - > 2670	2,12
IFA CPW 1	1843	24,4 × 47,2 × 1,6	> 410	2260 - > 2670	0,6
Antena G	1824	30 × 38 × 1,6	170	2410 - 2580	0,3
Monopolo com plano de massa curto	1680	30 × 35 × 1,6	> 270	2400 - > 2670	-1,3
IFA CPW 2	1519	22,5 × 42,2 × 1,6	> 260	2410 - > 2670	1,4
Antena anel retangular	1300	21,1 × 38,5 × 1,6	100	2420 - 2520	-0,3
Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	648	18 × 22,5 × 1,6	> 200	2470 - > 2670	-0,3

Analisando as características na Tabela 4.3 constata-se que as antenas dipolo em Duroid RT/5880 e monopolo com plano de massa longo são as menos compactas e, por outro lado, a antena anel retangular e a antena *patch* com *slots* são as que ocupam um menor volume. Comparativamente à antena anel retangular, a antena *patch* com *slots* ocupa metade do volume, sendo bastante compacta.

As três antenas mais compactas não estão adaptadas em todos os canais da banda de interesse, principalmente a antena *patch* com *slots*.

Quanto ao ganho, as antenas que apresentam valores de ganho mais elevados são muito volumosas, ou seja, as antenas dipolo e a antena monopolo com plano de massa longo. De entre as antenas mais compactas, IFA CPW 1 é a que apresenta um valor do ganho mais satisfatório de 1,4 dBi. A antena *patch* com *slots* tem um ganho ligeiramente negativo, devendo-se ao facto de não estar adaptada nessa frequência. As antenas F e G são volumosas e ineficientes.

Para testar na caixa escolheram-se as quatro antenas mais compactas.

4.4 Determinação da constante dielétrica do substrato FR4

O valor da constante dielétrica do material FR4 tem sido apresentado na bibliografia como sendo em torno de 4,4 para a frequência de 2,42 GHz, tendo-se utilizado este valor no decorrer do trabalho.

Perante as discrepâncias existentes entre os valores da simulação e experimentais da frequência de ressonância das várias antenas, tendo-se obtido um valor máximo de 110 MHz para a antena IFA CPW 1, resolveu-se determinar o valor da constante dielétrica deste substrato para a frequência de 2,42 GHz. Foi utilizado o método de comprimento-fase diferencial, utilizado pela Rogers Corporation, que é um fabricante de substratos. Neste método medem-se as respostas em fase de duas linhas de transmissão impressas na mesma frequência. Estas linhas apenas diferem no comprimento, com o rácio entre comprimentos igual ou superior a 3:1, incluindo os conectores usados que devem ser idênticos [59].

As duas linhas impressas construídas sobre o substrato FR4 e com uma impedância de 50 Ω são apresentadas na Figura 4.24.

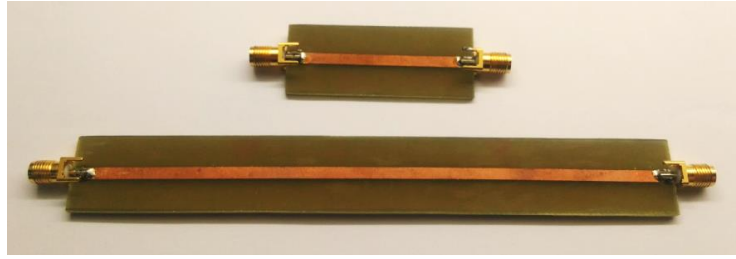


Figura 4.24 – Linhas impressas construídas e utilizadas na determinação da constante dielétrica do substrato FR4 na frequência de 2,42 GHz.

A constante dielétrica efetiva (ϵ_{eff}) pode ser determinada através da seguinte equação:

$$\Delta\phi = 2\pi f \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \Delta L, \quad (4.2)$$

em que f (Hz) é a frequência do sinal, c (m/s) é a velocidade da luz, ΔL (m) corresponde à diferença de comprimento entre as duas linhas e $\Delta\phi$ (rad) é o ângulo resultante da diferença de fase [59].

Com o valor da constante dielétrica efetiva, a partir da equação da linha impressa, consegue-se determinar a constante dielétrica (ϵ_r). Como a relação entre a largura da linha (W) e a altura do substrato (H) é superior a 1, utilizou-se a seguinte equação:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \left(\frac{H}{W} \right) \right)^{-1/2} \quad (4.3)$$

Cada uma das linhas foi conectada às duas portas do analisador vetorial por meio de cabos coaxiais, tendo-se utilizado a porta 2 para a transmissão do sinal (com habilitação da opção *Unwrapped Phase* [59]) e a porta 1 para a receção. Fizeram-se várias medições de fase com diferentes cabos coaxiais, mas mantendo as mesmas condições para ambas as linhas impressas. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de fase medidos, as dimensões das linhas impressas e os parâmetros calculados.

Tabela 4.4 – Parâmetros necessários à determinação do valor médio da constante dielétrica do substrato FR4 e na banda ISM de 2,4 GHz.

L_B (mm)	152,4										
ϕ_B (°)	-55	-91,5	-92	-54	-107,8	-106,5	-107	-87,5	-87,4	-87,4	-88,6
L_S (mm)	50,8										
ϕ_S (°)	115,7	81,4	81,5	117,1	64,4	65,6	63,7	85,6	86,1	84	85,5
$\Delta\phi$ (°)	530,7	532,9	533,5	531,1	532,2	532,1	530,7	533,1	533,5	531,4	534,1
$\Delta\phi$ (rad)	9,26	9,30	9,31	9,27	9,29	9,29	9,26	9,30	9,31	9,28	9,32
ΔL (mm)	101,6										
E_{ff}	3,24	3,26	3,27	3,24	3,25	3,25	3,24	3,27	3,27	3,24	3,28
W (mm)	3,06										
H (mm)	1,6										
E_r	4,27	4,30	4,31	4,27	4,28	4,28	4,25	4,3	4,31	4,27	4,33
\bar{E}_r	4,28										

O valor médio da constante dielétrica de 4,3 encontra-se bastante próximo do valor considerado de 4,4 pela bibliografia, confirmando que as propriedades do substrato não tiveram uma contribuição substancial no erro experimental. Além do mais, a fiabilidade deste método depende da repetibilidade, sendo necessário um maior número de amostras para apurar o valor exato da constante dielétrica para esta frequência.

5 Efeito nas antenas da presença dos circuitos

Neste capítulo apresentam-se os estudos realizados com a integração das antenas numa caixa contendo os circuitos eletrónicos. Foram escolhidas antenas metálicas e impressas para serem testadas dentro da caixa em três situações distintas. Com estes testes pretendeu-se analisar a sensibilidade de cada antena à presença da caixa de proteção e das placas dos circuitos e de outros componentes nas proximidades da mesma. Para cada situação na caixa mediram-se as características de impedância e de radiação e estas foram comparadas com as características obtidas em espaço livre.

5.1 Formas de integração das antenas

De entre as antenas estudadas nos capítulos anteriores, foram selecionadas nove para serem testadas no interior de uma caixa, com as dimensões $98 \times 73 \times 40 \text{ mm}^3$, contendo outros componentes eletrónicos de que são constituídos os nós sensores. As antenas escolhidas foram: monopolo com manga 1; monopolo com manga 2; antena fio de cobre em “U”; antena em anel retangular 1; antena monopolo com plano de massa curto; antena impressa anel retangular; antena IFA CPW 2; antena *patch* com *slots*. Estas antenas foram escolhidas tendo como fator determinante a compactação.

Cada uma das antenas impressas foi posicionada na caixa em três regiões diferentes, mas mantendo a posição inicial, como é apresentado na Figura 5.1, constituindo três situações distintas:

- **Situação 1:** a antena encontra-se numa zona reservada para a antena, ao lado dos circuitos e junto à superfície inferior da caixa (Figura 5.1a));
- **Situação 2:** a antena encontra-se junto à tampa (superfície superior da caixa) e sobrepõe aos circuitos (figura 5.1b));
- **Situação 3:** a antena encontra-se na mesma posição que na situação 1, mas tem o(s) plano(s) de massa sobreposto(s) por circuitos (Figura 5.1c)).

As antenas metálicas apenas foram estudadas nas duas primeiras situações, pelo facto de nem todas as antenas dispõem de plano de massa, como é o caso da antena anel retangular 1, ou não terem um plano de massa bem definido, como por exemplo a antena fio de cobre em “U”.

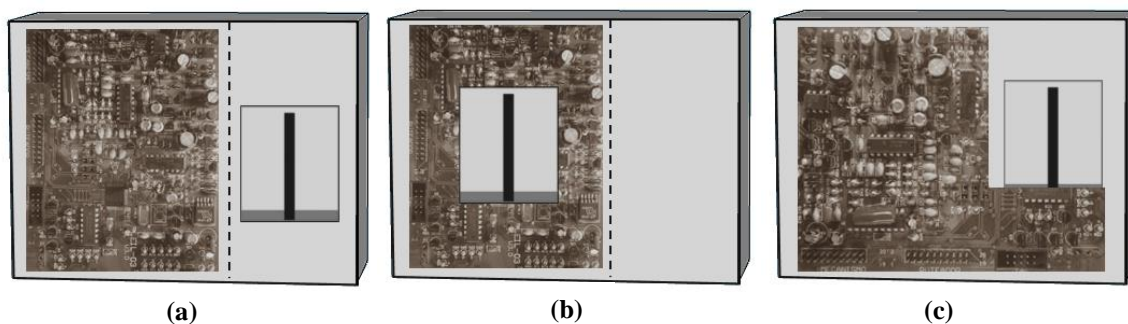


Figura 5.1 – Representação da posição de uma antena na caixa vista através da tampa: a) Situação 1; b) Situação 2; c) Situação 3.

As antenas no interior da caixa estão inicialmente de frente para o emissor (ver Figura 5.1) e a caixa roda no sentido horário. Com a rotação da caixa, a antena modifica a sua posição em relação ao emissor.

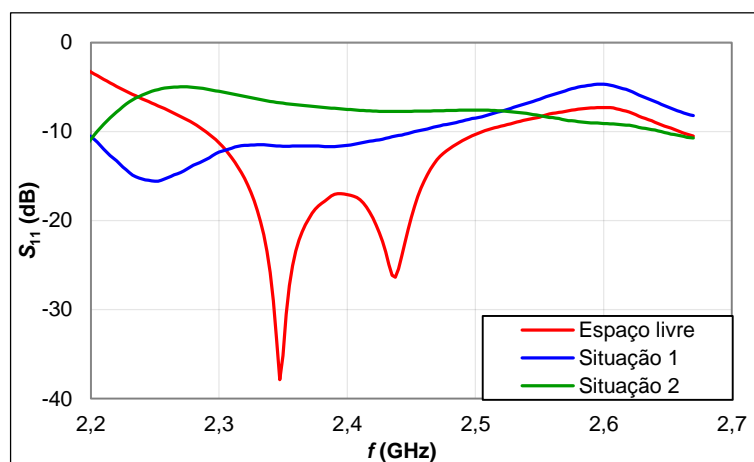
Para cada antena mediram-se as características de impedância (impedância, parâmetro S_{11} e SWR), o ganho e o diagrama de radiação nas três situações no interior da caixa. Para se poder comparar os diagramas de radiação obtidos na presença da caixa com os do espaço livre, normalizaram-se os diagramas em relação ao valor máximo da antena em espaço livre.

5.2 Antenas metálicas

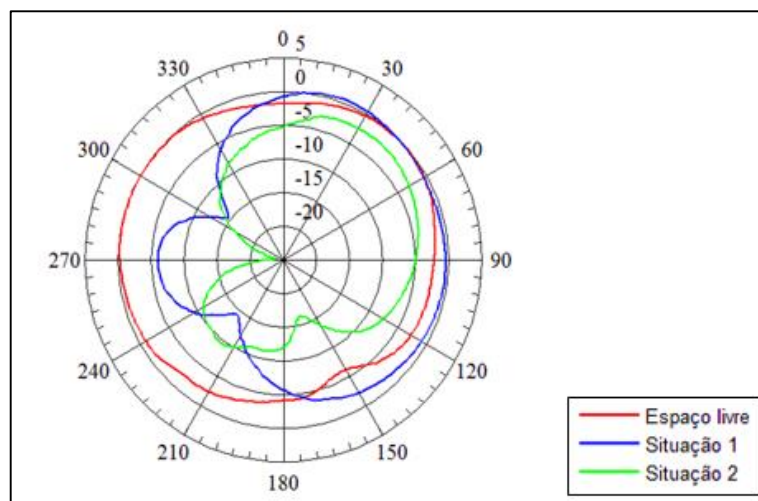
5.2.1 Antena monopolo com manga 1

A antena monopolo com manga 1 foi colocada no interior da caixa na posição vertical, apresentando um avanço de 15° em relação ao ângulo de máxima radiação no plano YZ . A ilustração da posição desta antena na caixa e de outras antenas pode ser consultada no anexo C.

Para se poder analisar e comparar as características da antena monopolo no espaço livre e dentro da caixa, na Figura 5.2 apresenta-se a variação do parâmetro S_{11} e os diagramas de radiação medidos no plano H para a frequência de 2,42 GHz.



(a)



(b)

Figura 5.2 – Resultados experimentais das características da antena monopolo com manga 1 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H .

Analisando os resultados de impedância, constata-se que em ambas as situações a antena tem uma frequência de ressonância mais baixa do que a obtida em espaço livre, sendo de 2,25 GHz para a situação 1 e inferior a 2,2 GHz para a situação 2.

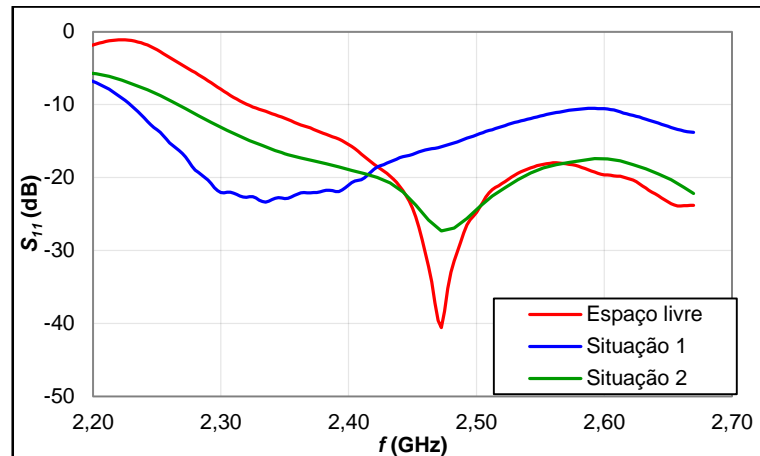
Em relação às características de radiação, com a colocação da antena na caixa o diagrama da antena deixa de ser quase omnidirecional nas duas situações, passando a ser diretivo com um lóbulo principal e com nulos que podem atingir os -25 dB.

Na situação 1 observam-se melhorias de ganho até 3 dB entre os 70° e os 170°. Nos 0° a antena encontrava-se de frente para o emissor e aos 90° ficou de lado, com o equipamento entre a antena e a direção do emissor. O diagrama de radiação sofreu uma redução antes dos 180°, posição em que a antena está de costas para o emissor, e recuperou ao voltar à posição inicial. A maior degradação é notada pela presença de dois nulos nos 220° e nos 310° com um valor de -15 dB. Nos 270° existe um lóbulo secundário, posição em que o circuito se encontra entre a antena e o emissor.

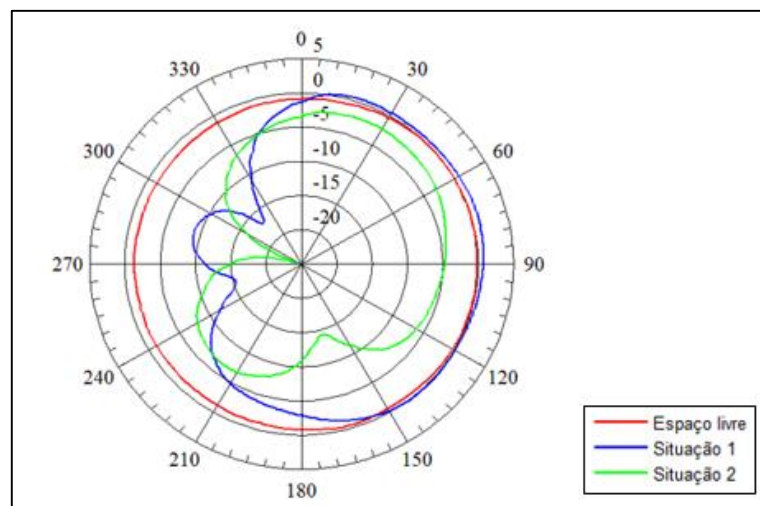
Na situação 2 observa-se uma redução de ganho em relação ao espaço livre em todo o diagrama. Esta redução é menor entre os 0° e os 90°, tendo-se obtido um decréscimo em torno dos 3 dB. Observa-se ainda dois nulos, um menos pronunciado nos 165° com um valor de -16 dB e um nulo mais profundo de valor inferior a -25 dB entre os 270° e os 280°. O primeiro nulo ocorre numa posição logo anterior à da antena ficar completamente ocultada pelo circuito em relação ao emissor, e o segundo nulo ocorre quando a antena e o circuito estão de lado para o emissor. Verificou-se, variando a posição da antena lateralmente em relação ao circuito, que a posição dos nulos é influenciada pela posição relativa da antena com o plano virtual de massa, que é definido pelo circuito. Este apresenta uma distribuição de componentes não homogênea, tornado difícil a resposta simétrica esperada do diagrama de radiação numa perspectiva esquemática. É nesta situação que a antena está mais desadaptada na frequência de 2,42 GHz.

5.2.2 Antena monopolo com manga 2

A antena monopolo com manga 2 foi colocada na caixa na vertical e na posição de máxima radiação. Os dados experimentais da variação do parâmetro S_{11} no espaço livre e na caixa são apresentados na Figura 5.3, assim como os diagramas de radiação no plano H para a frequência de 2,42 GHz.



(a)



(b)

Figura 5.3 – Resultados experimentais das características da antena monopolo com manga 2 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H .

Na situação 1 a antena tem a ressonância mais baixa nos 2,34 GHz, sendo a discrepância de 130 MHz em relação à ressonância no espaço livre. Já na situação 2 a frequência central mantém-se e o parâmetro S_{11} degrada-se em mais de 10 dB. Apesar destas discrepâncias a nível da frequência central, a antena apresenta valores de S_{11} abaixo dos -10 dB na banda em torno dos 2,42 GHz, quer na situação de espaço livre quer para as antenas nas duas situações na caixa.

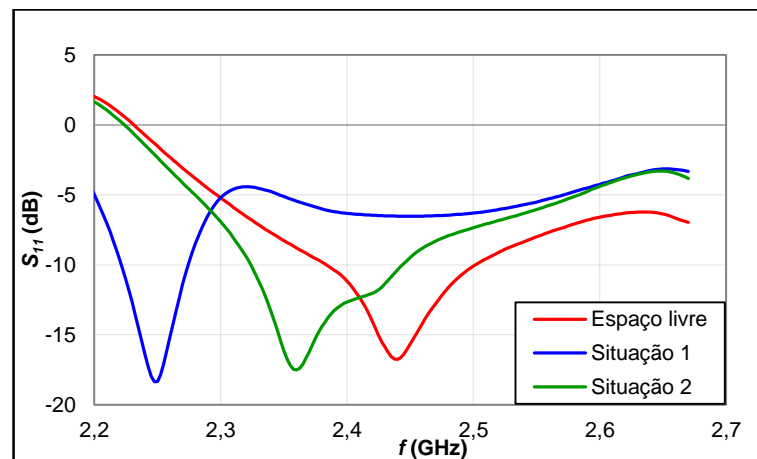
As formas dos diagramas obtidos nas duas situações assemelham-se aos da antena monopolo com manga 1. Na situação 1 a antena, praticamente, mantém as suas características entre 0° e os 160°. Em seguida, o ganho diminui até os 360°, com a existência de nulos em tornos de -15 dB nos 255° e nos 320°.

Na situação 2 observa-se uma redução de ganho em todo o diagrama, comparativamente ao espaço livre. Apesar disso, o decréscimo de potência é menos acentuado entre os 340° e os 90°, correspondendo a um máximo de 5 dB. Estão presentes dois nulos, um mais suave nos 165° ($\cong -15$ dB) e um outro mais profundo ($\cong -25$ dB) entre os 270° e os 300°. Estas depressões nos diagramas estão próximas das posições em que o equipamento está entre a antena e o emissor. Mais uma vez a situação 2 é a que tem o pior desempenho.

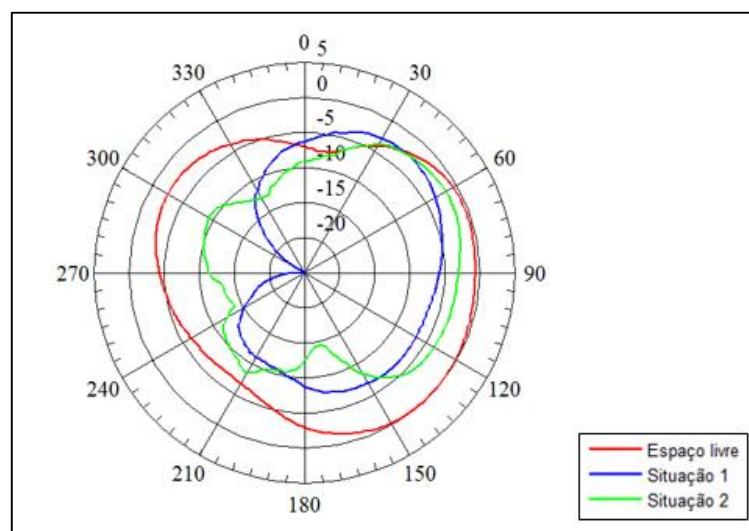
5.2.3 Antena fio de cobre em “U”

A antena fio de cobre em “U” foi posicionada inicialmente na vertical e segundo a direção de máxima radiação no plano XZ.

Os resultados experimentais obtidos para esta antena encontram-se na Figura 5.4, sendo apresentados os valores do parâmetro S_{11} e os diagramas de radiação para a antena na situação de espaço livre e dentro da caixa.



(a)



(b)

Figura 5.4 – Resultados experimentais das características da antena fio de cobre em “U” no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H.

Com a antena na caixa, a frequência de ressonância desloca-se para frequências mais baixas nas duas situações, desviando-se de 220 MHz na situação 1 e de 80 MHz na situação 2, em relação à frequência de 2,44 GHz. Para a frequência de 2,42 GHz, a antena encontra-se desadaptada na situação 1 e tem o valor de S_{11} reduzido em 2 dB, em relação ao resultado em espaço livre, na situação 2.

Pela análise dos diagramas de radiação apresentados na Figura 5.4b), constata-se que os diagramas em ambas as situações são diretivos, com os valores máximos do lóbulo principal situados entre os 0° e os 90°, em que nesta última posição a antena está de lado entre o emissor e o equipamento atrás. Por outro lado, tal como as antenas monopolo com manga, existe uma degradação dos diagramas entre os 180° e os 360° por via da interferência provocada pelos outros componentes existentes na caixa.

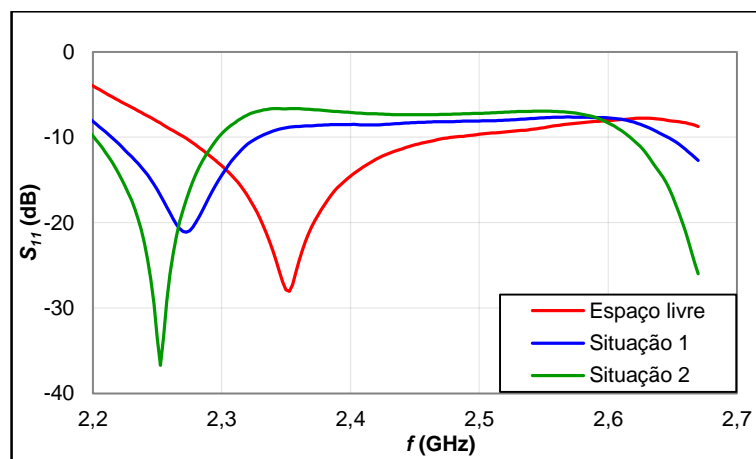
Na situação 1 observa-se aumento de ganho até 3 dB em torno da posição inicial, entre os 355° e os 40°, e uma diminuição de potência nos restantes ângulos. Além do mais, confirma-se a existência de um nulo profundo superior a -15 dB nos 270°, posição em que a antena se encontra de lado e obstruída pelos circuitos.

Na situação 2 não existe qualquer aumento de ganho em relação ao espaço livre, havendo apenas uma manutenção de potência num curto espaço de tempo, entre os 15° e os 40°. Estão três nulos até -15 dB, um nos 170° e os outros dois em torno dos 270°. O primeiro nulo acontece próximo da posição em que a antena está escondida pelo circuito, posicionado entre o emissor e a antena, e os outros nulos aparecem em torno da posição em que a antena e o circuito voltam a ficar de lado para o emissor.

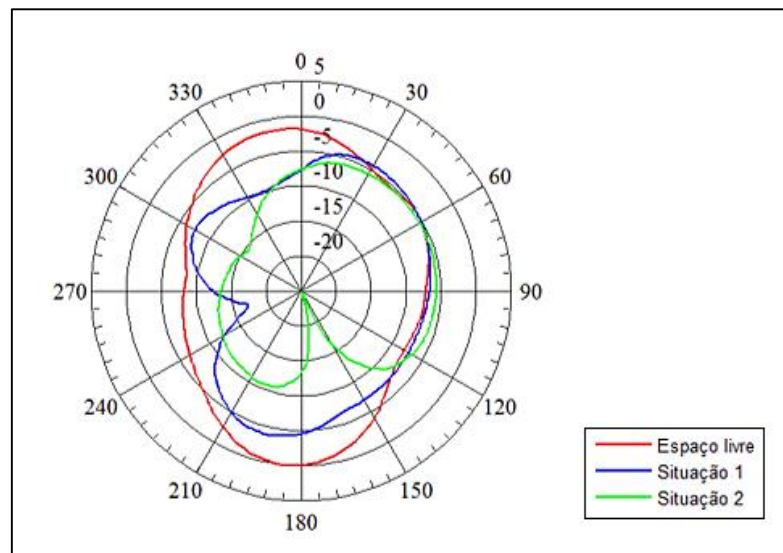
Ambos os diagramas de radiação obtidos com a antena na caixa apresentam um desempenho menos satisfatório.

5.2.4 Antena anel retangular 1

A antena anel retangular 1 foi posicionada inicialmente na vertical e adiantada de 20° em relação à máxima radiação no plano XZ. Na Figura 5.5 apresenta-se a variação do parâmetro S_{11} e os diagramas de radiação medidos no plano H para a antena para a frequência de 2,42 GHz.



(a)



(b)

Figura 5.5 – Resultados experimentais das características da antena anel 1 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; diagramas de radiação no plano H .

Pelos resultados da Figura 5.5a), a antena dentro da caixa apresenta uma frequência de ressonância mais baixa em ambas as situações comparativamente à frequência de 2,35 GHz. Na situação 1 a frequência central é de 2,27 GHz e na situação 2 situa-se nos 2,25 GHz. Quanto à frequência de 2,42 GHz, apenas no espaço livre a antena tem um valor de $S_{11} \leq -10$ dB.

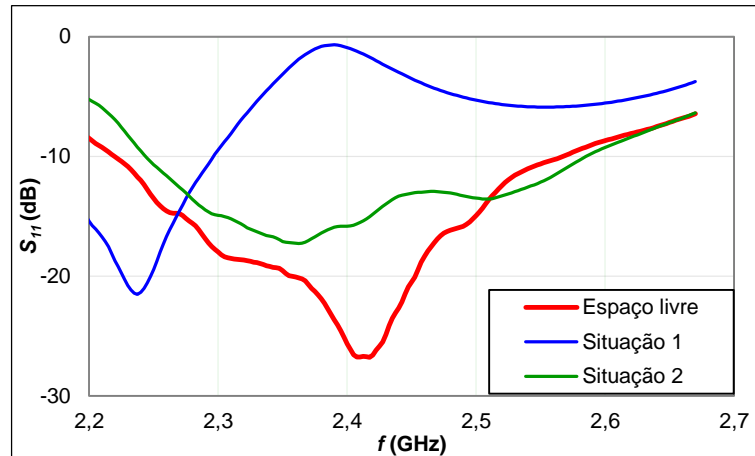
Através dos diagramas na Figura 5.5b) constata-se que na situação 1 a antena praticamente mantém a potência, em relação ao espaço livre, entre os 30° e os 135°. A partir dos 135° existe redução da potência que se prolonga para além da posição inicial. Existem três regiões no diagrama onde a atenuação é maior. A primeira região ocorreu em posições em que a antena ficou praticamente contrária à sua disposição inicial, constatando-se uma diminuição até 5 dB nos 180°, seguindo-se um nulo de -17 dB próximo dos 270°, posição em que o equipamento esconde a antena, e volta a diminuir em 10 dB após os 330°, ou seja, antes da antena regressar à posição inicial.

Na situação 2 observa-se que a antena, praticamente, manteve a potência entre os 20° e os 120° comparativamente ao espaço livre. É evidente a presença de dois nulos, um bastante pronunciado entre os 150° e os 170°, próximo da posição em que a antena fica completamente obstruída pelo equipamento na frente, e um outro menos acentuado de -15 dB nos 310°, após a antena e o circuito se terem ficado de lado para o emissor.

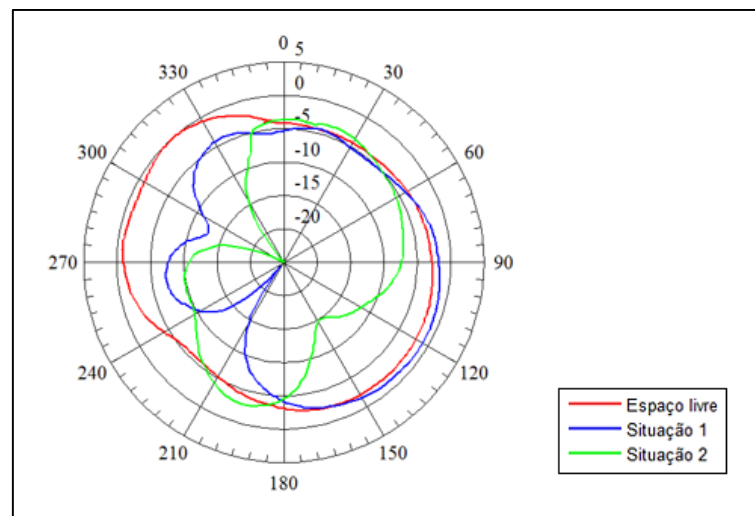
5.2.5 Antena com ranhura

A antena com ranhura foi posicionada inicialmente na vertical e segundo o plano XZ , estando distanciada de -90° (considerando o sentido horário) no plano XY e com uma ligeira inclinação para trás relativamente ao emissor, comparativamente à posição de máxima radiação. Para um melhor esclarecimento, consultar a posição da antena nas duas situações no anexo C.

Os valores experimentais da variação do parâmetro S_{11} no espaço livre e na caixa são apresentados na Figura 5.6, assim como os diagramas de radiação no plano H para todos os casos de estudo.



(a)



(b)

Figura 5.6 – Resultados experimentais das características da antena com ranhura no espaço livre e dentro da caixa (situações 1 e 2): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H .

A antena quando inserida dentro da caixa apresenta a ressonância em frequências mais baixas, sendo na situação 1 onde a frequência apresenta uma maior discrepância face à frequência central de 2,42 GHz em espaço livre e que corresponde a 180 MHz. Na situação 2 o desvio é de 60 MHz, situando-se a frequência central nos 2,36 GHz. Para a frequência de 2,42 GHz, a antena está mais adaptada no espaço livre e muito desadaptada na situação 1.

Analisando o diagrama na situação 1 em relação ao diagrama em espaço livre da antena constata-se que a antena mantém praticamente o ganho entre os 0° e os 180°. A partir dos 180° a potência decresceu significativamente, com a presença de um lóbulo secundário em torno dos 270° e nulos com valores entre os -13 dB e os -25 dB.

Na situação 2 a antena mantém o ganho entre os 355° e os 35° e entre os 190° e os 220°, comparativamente ao espaço livre. Nas restantes regiões do diagrama existiu uma diminuição de ganho severa, com a presença de nulos em torno dos 150° e dos 310°, com valores entre -15 dB e acima de -25 dB. O primeiro nulo surgiu próximo dos 180°, posição em que o circuito estava entre a antena e o emissor, escondendo completamente a antena. O nulo que se segue surge após a antena e o circuito se terem exibido ambos de lado para o emissor, sendo este o mais acentuado.

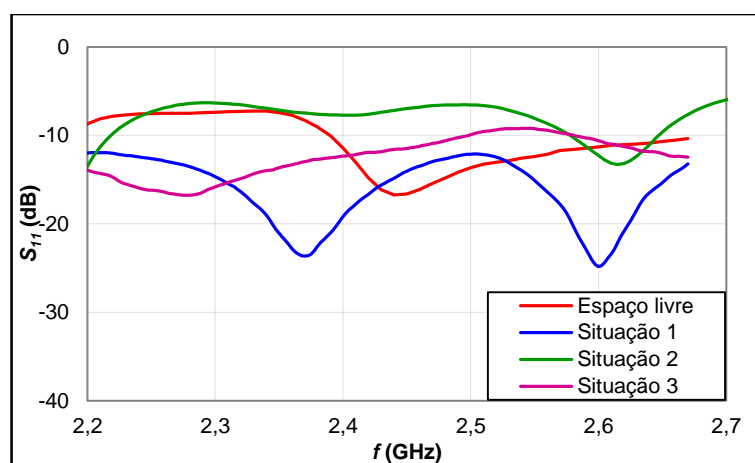
Ambas as situações não favoreceram a antena, com padrões de degradação próximos dos apresentados pelas antenas metálicas analisadas anteriormente.

5.3 Antenas impressas

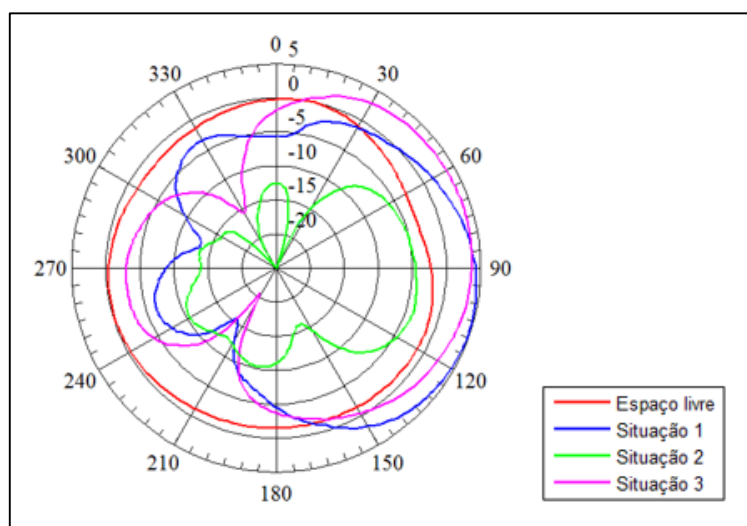
5.3.1 Antena monopolo com plano de massa curto

A antena monopolo com plano de massa curto foi colocada na vertical e segundo o plano XZ, encontrando-se desfasada em avanço de 40° em relação à posição de máxima radiação.

Os resultados experimentais obtidos para o monopolo impresso encontram-se na Figura 5.7, sendo apresentados os valores do parâmetro S_{11} e os diagramas de radiação para a antena, para a frequência de 2,42 GHz, em espaço livre e dentro da caixa nas três situações de estudo.



(a)



(b)

Figura 5.7 – Resultados experimentais das características da antena monopolo no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H.

Analisando os dados da Figura 5.7a), constata-se que uma ressonância da antena encontra-se numa frequência mais baixa em todas as situações na caixa, relativamente ao valor

em espaço livre. A situação 2 é aquela que apresenta um valor mais baixo de 2,17 GHz, sendo a discrepância de 270 MHz em relação à frequência central no espaço livre. Verifica-se ainda que nalgumas situações verificam-se mais do que uma ressonância na janela dos 2,2 a 2,7 GHz, sendo o caso mais evidente o da situação 1. Para a frequência de 2,42 GHz constata-se que a antena apenas na situação 2 apresenta um valor de S_{11} superior a -10 dB, apresentando uma maior desadaptação.

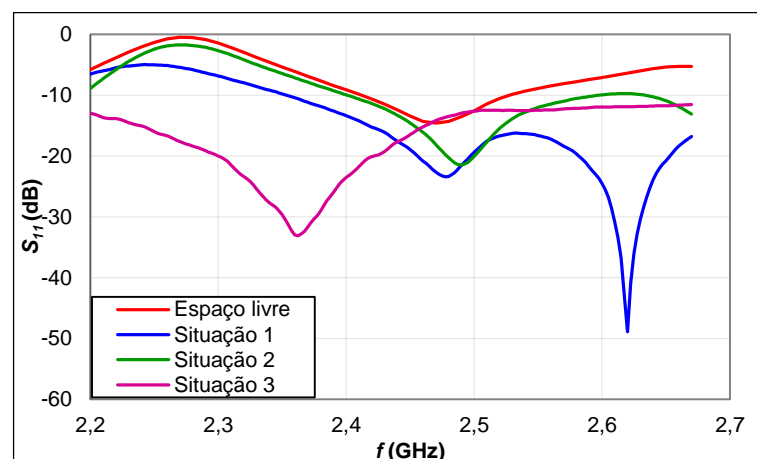
Quanto aos diagramas de radiação da antena na caixa (ver Figura 5.7b)) constata-se que, mais uma vez, os diagramas deixam de ser omnidirecionais devido à interferência eletromagnética. Nas situações 1 e 3 o lóbulo principal tem valores de potência consideravelmente mais elevados comparativamente ao diagrama em espaço livre, tendo sido registado valores superiores a 5 dB nas duas situações, com a posição da antena a variar entre os 0° e os 180°, mais concretamente, entre a posição inicial e a posição em que a antena fica voltada para o emissor. Quanto à degradação do desempenho, observam-se padrões semelhantes nos dois casos, com os nulos em torno dos 270°, posição em que a antena estava de lado e com o circuito a obstruir.

Para a situação 2 obteve-se o pior diagrama, devido à desadaptação da antena, em que este apresenta uma forte atenuação de potência, comparativamente ao espaço livre, em todas as direções. No entanto, a atenuação é menor entre os 30° e os 150°, sendo esta a região onde se situa o lóbulo principal. Observa-se três nulos mais acentuados, dois com uma potência inferior a -25 dB em torno da posição inicial (nos 25° e nos 155°), e outro nos 155° de -16 dB. Os outros nulos estão em concordância com os padrões de diagrama de radiação vistos anteriormente para esta situação, a menos do existente a 25°.

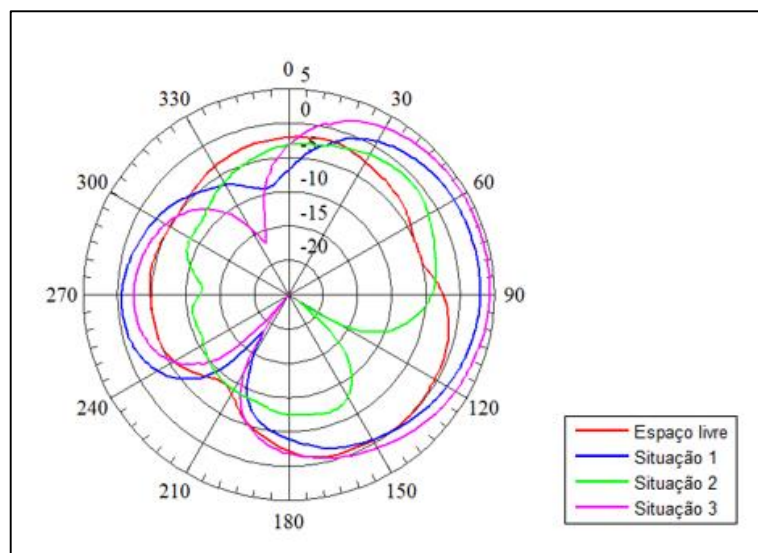
5.3.2 Antena anel retangular

A antena anel retangular foi colocada dentro da caixa na vertical e segundo o plano XZ, ficando adiantada em relação à máxima radiação em 30°.

Na Figura 5.8 apresentam-se as variações do parâmetro S_{11} e os diagramas de radiação da antena em espaço livre e dentro da caixa.



(a)



(b)

Figura 5.8 – Resultados experimentais das características da antena anel impressa no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H .

Para esta antena verifica-se que a frequência de ressonância baixa apenas na situação 3, mantendo-se praticamente inalterada nas duas outras situações, para a frequência de 2,42 GHz. Na situação 1 surge uma ressonância nos 2,62 GHz, como já tinha acontecido para a antena da secção anterior. Para a frequência de 2,42 GHz a antena apresenta melhores características nas situações 1 e 3.

Em relação aos diagramas de radiação, constata-se que, tanto na situação 1 como na situação 3, a antena tem ganhos consideravelmente elevados em relação ao espaço livre. Na situação 1 observa-se um aumento de ganho até 8 dB entre os 20° e os 140°, com a caixa rodada quase meia volta, situação em que a antena apresenta a superfície oposta à da posição inicial, e uma potência superior até 5 dB entre os 225° e os 315°, com o máximo nos 270°, posição em que a antena fica escondida pelo equipamento, estando a caixa de lado para o emissor.

Na situação 3 o diagrama tem uma forma praticamente similar à da situação 1. O ganho da antena nesta situação excede o ganho em espaço livre até 10 dB entre os 5° e os 160°, e até 3 dB entre os 245° e os 305°.

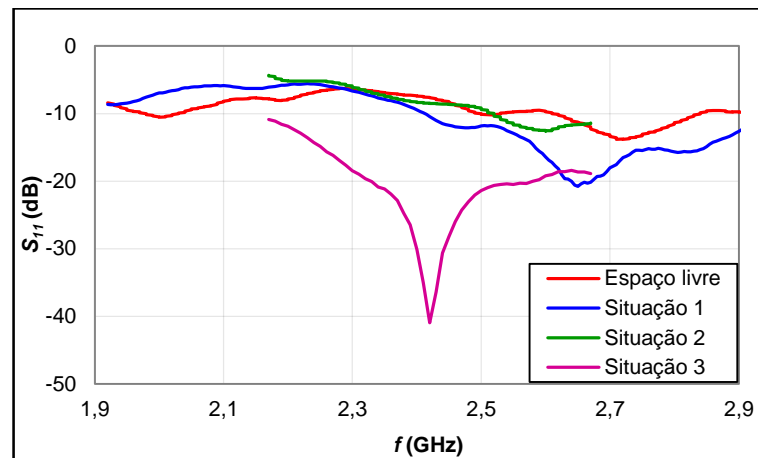
Por outro lado, na situação 2 existe uma diminuição da potência na maior parte das direções do espaço, comparativamente ao espaço livre. Existe um nulo bastante pronunciado nos 120° e uma ligeira depressão de 3 dB nos 270°. No entanto, observou-se um acréscimo de potência até 3 dB entre os 15° e os 85°.

Estes aumentos significativos de ganho nas três situações devem-se ao fato das antenas terem ficado mais adaptadas na caixa.

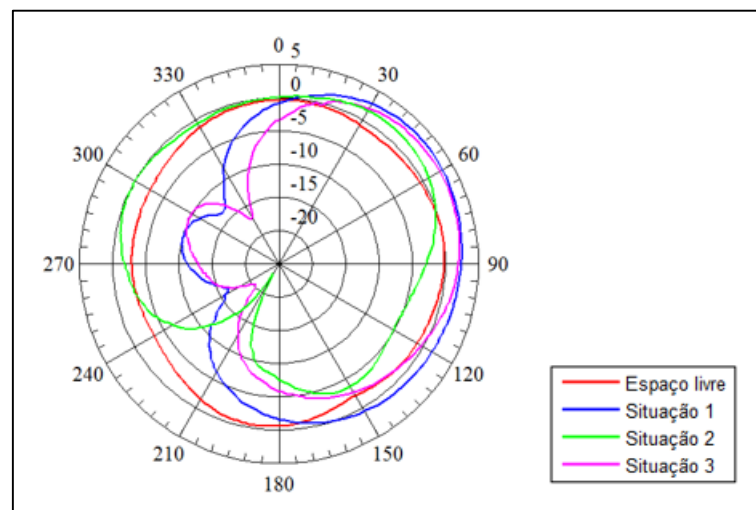
5.3.3 Antena IFA CPW 2

A antena IFA CPW 2 foi colocada na caixa de forma idêntica nas várias situações, tendo-se colocado inicialmente a antena na vertical e segundo o plano XZ, ficando desfasada de 90° em relação à máxima radiação no plano YZ.

Os dados experimentais da variação do parâmetro S_{11} no espaço livre e na caixa da antena IFA CPW 2 são apresentados na Figura 5.9 assim como os diagramas de radiação obtidos para o espaço livre e nas três situações dentro da caixa.



(a)



(b)

Figura 5.9 – Resultados experimentais das características da antena IFA CPW 2 no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; b) diagramas de radiação no plano H .

Os dados do espaço livre e da situação 1 na Figura 5.9a) são apresentados numa gama de frequências maior para se entender melhor a variação da frequência central nas várias situações dentro da caixa.

Constata-se que a frequência de ressonância encontra-se em valores mais baixos nas três situações dentro da caixa em relação à frequência de espaço livre de 2,71 GHz. No entanto, este desvio permite que antena opere mais próxima da banda de interesse. A situação 3 apresenta o valor de ressonância em 2,42 GHz, conferindo uma melhor adaptação, com o valor do parâmetro S_{11} de -40,9 dB, seguindo-se a situação 1 com um valor de -10,45 dB.

Examinando os diagramas de radiação na Figura 5.9b), constata-se que nas três situações o diagrama é diretivo.

As situações 1 e 3 têm diagramas diretivos e bastante análogos, com um acréscimo de potência em relação ao espaço livre até 4 dB em ambas as situações, entre os 5° e os 170° para a situação 1, e entre os 15° e os 125° para a situação 3. A diminuição drástica de potência ocorre

entre os 180° e os 360°, ou seja, a partir da posição em que a antena está numa posição oposta à posição inicial. Nos 270° estão presentes os lóbulos secundários de ambas as situações, com o primeiro nulo situado entre 210° e os 240° e o segundo presente entre os 300° e os 330°, para ambos os casos.

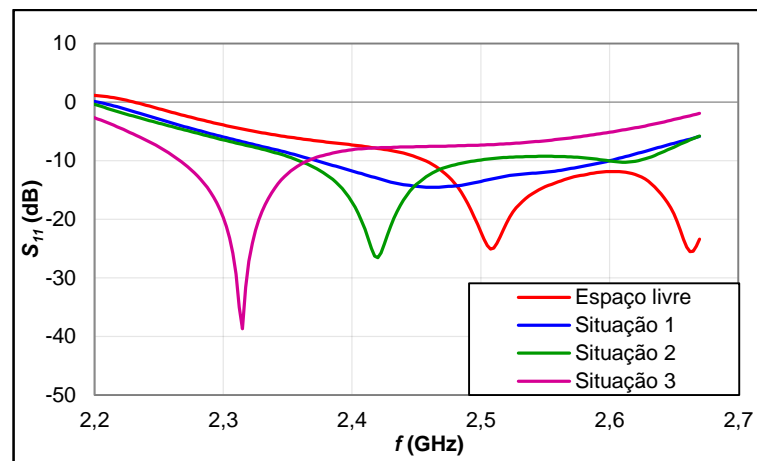
Na situação 2 existe um melhoramento significativo entre os 5° e os 70° e entre 260° e os 330° de cerca de 3dB no máximo. Existe apenas um nulo nos 210°, correspondendo a uma posição posterior à posição em que a antena está completamente tapada pelo equipamento, com este entre o emissor e a antena, nos 180°. Além disso, existe uma atenuação até 4 dB em torno dos 120°, estando em concordância com os padrões de radiação nesta situação apresentados pelas antenas estudadas anteriormente.

Como a antena está menos adaptada no espaço livre, comparativamente às situações na caixa, existe uma melhoria de potência com a adição da caixa.

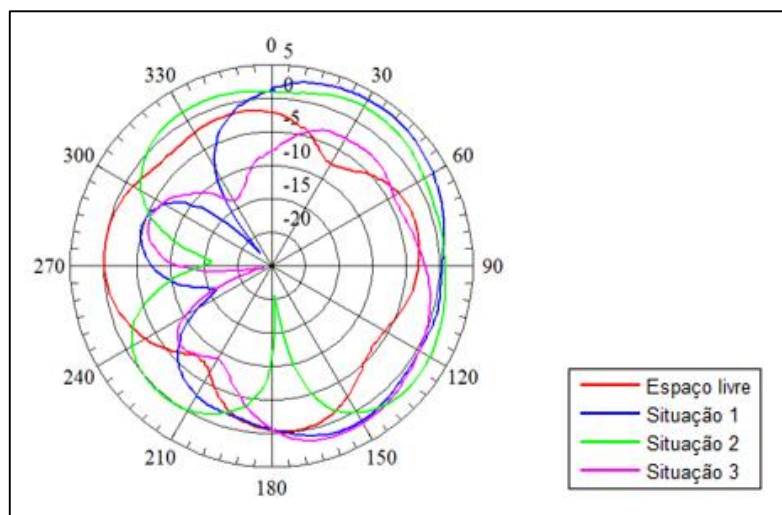
5.3.4 Antena *patch* com *slots*

A antena *patch* com *slots* foi colocada na caixa segundo o plano XZ e na vertical. A máxima radiação é obtida no plano YZ, com a antena rodada para trás de 150°, aproximadamente.

Os resultados experimentais obtidos para esta antena encontram-se na Figura 5.10, sendo apresentados os valores do parâmetro S_{11} e os diagramas de radiação para a antena em espaço livre e dentro da caixa nas três situações de estudo.



(a)



(b)

Figura 5.10 – Resultados experimentais das características da antena *patch* com *slots* no espaço livre e dentro da caixa (situações 1, 2 e 3): a) variação do parâmetro S_{11} ; diagramas de radiação no plano H para a frequência de 2,42 GHz.

Com a antena na caixa verifica-se um abaixamento da frequência de ressonância nas três situações, sendo a situação 3 a que apresenta a ressonância mais baixa de 2,32 GHz, correspondendo a uma discrepância de 190 MHz em relação ao valor da frequência de ressonância mais baixa no espaço livre. Na frequência de 2,42 GHz, a antena está melhor adaptada nas situações 1 e 2.

Pelo estudo dos diagramas de radiação na Figura 5.10b), constata-se que a antena tem diagramas diretivos no interior da caixa. Os lóbulos principais de cada diagrama na caixa têm a diretividade máxima entre os 0° e os 180° .

Na situação 1 existe um aumento de potência, em relação ao espaço livre, superior a 10 dB entre os 345° e os 175° e até 3 dB desde os 345° até 360° . Por outro lado, o ganho é menor entre os 200° e os 345° , com a presença de dois nulos com valores entre -15 dB e -25 dB nos 240° e 325° . Portanto, existe um lóbulo secundário em torno dos 270° , posição em que a antena e o circuito estão de lado para o emissor.

Na situação 2 observam-se ganhos superiores ao espaço livre em mais de 10 dB entre os 305° e os 160° , e valores de potência que excedem até 8 dB entre os 195° e os 250° . Os dois nulos situam-se nos 180° e nos 270° , com valores de potência entre os -16 dB e os -21 dB, ou seja, na posição em que a antena está completamente por detrás do circuito na linha do emissor, e na posição em que o material eletrônico e a antena estão de lado, respetivamente.

Por fim, na situação 3 também se verifica um aumento do ganho em relação ao espaço livre, com um aumento até 5 dB entre os 15° e os 55° e de 6 dB no máximo entre os 85° e os 180° . O ganho diminui a partir dos 180° , posição em que a antena está numa posição contrária à posição inicial e prolonga-se para além da posição inicial até aos 15° . Apresenta dois nulos que praticamente coincidem com os nulos da situação 1, com valores desde os -13 dB até os -25 dB. Observa-se ainda um outro nulo nos 210° com um valor inferior a -10 dB.

Tal como a antena IFA CPW, esta antena ficou mais adaptada na caixa e por isso apresentou melhores características de radiação em relação ao espaço livre. A situação 2 foi a que conferiu a melhor adaptação à antena na frequência de 2,42 GHz e, por isso, esta antena

apresentou melhores características nesta situação em relação às antenas analisadas anteriormente.

5.4 Desvio da ressonância

Para se ter uma perspectiva geral do comportamento das antenas a nível da variação da frequência de operação com a sua integração na caixa, na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados da frequência de ressonância, em espaço livre e nas três situações na caixa, assim como o desvio relativamente à frequência central em espaço livre.

Tabela 5.1 – Valores da frequência de ressonância em espaço livre (sem caixa) e dentro da caixa para as antenas em estudo e respetiva discrepância de frequência em relação ao valor em espaço livre.

Antena	Espaço livre	Na caixa					
		Situação 1		Situação 2		Situação 3	
	f_c (GHz)	f_c (GHz)	Δ_f (MHz)	f_c (GHz)	Δ_f (MHz)	f_c (GHz)	Δ_f (MHz)
Monopolo com manga 1	2,35	2,25	-100	< 2,2 GHz	< -150	-	-
Monopolo com manga 2	2,47	2,34	-130	2,47	0	-	-
Antena fio de cobre em “U”	2,44	2,2	-240	2,36	-80	-	-
Anel retangular 1	2,35	2,27	-80	2,25	-100	-	-
Antena com ranhura	2,42	2,24	-180	2,36	-60	-	-
Monopolo com plano de massa curto	2,44	2,37	-70	2,17	-270	2,28	-160
Antena anel retangular impressa	2,47	2,48	10	2,49	20	2,36	-110
IFA CPW 2	2,71	2,65	-60	2,6	-110	2,42	-290
Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	2,51	2,46	-50	2,48	-30	2,32	-190

Constata-se que em todas as situações dentro da caixa a frequência de ressonância foi deslocada para uma frequência mais baixa comparativamente à frequência em espaço livre, com exceção da antena monopolo com manga 2 e da antena anel retangular impressa. A antena monopolo com manga 2 mantém a frequência para a situação 2 e a antena anel retangular impressa sobe ligeiramente a frequência central nas situações 1 e 2.

Quanto ao maior desvio registado para cada situação, constata-se que a antena com ranhura foi a mais afetada na situação 1 com um desvio de 180 MHz, na situação 2 foi a antena monopolo com plano de massa curto com um valor de 270 MHz e, por fim, na situação 3 destaca-se a antena IFA CPW 2 com um desvio de 290 MHz.

Tal como era esperado pela bibliografia, a frequência de operação desceu na generalidade das antenas com a presença da caixa e de elementos metálicos nas proximidades, devido ao aumento do comprimento elétrico da antena. No entanto, as antenas foram desviadas em frequência de forma diferente, daí as diferenças no desvio de frequência dentro da mesma situação.

5.5 Ganhos

Como não há interesse em ter a caixa com inclinação, mediu-se o ganho de cada antena na caixa nos 0°, 90°, 180° e 270°, de modo a que uma das quatro faces da caixa ficasse na linha do emissor. Fez-se o mesmo para a antena em espaço livre, tendo-se medido o ganho de cada antena em posições idênticas às da antena dentro da caixa. Na Tabela 5.2 apresenta-se o valor do ganho na máxima radiação (G_{max}), o valor máximo relativo a uma das posições (G) e a discrepância entre o valores máximos relativos espaço livre e na caixa. Todos os ganhos foram obtidos para a frequência de 2,42 GHz.

Tabela 5.2 – Ganho de pico das antenas (na vertical/sem inclinação) em espaço livre e dentro da caixa.

Antena	Espaço livre		Na caixa					
	G_{max} (dBi)	G (dBi)	Situação 1		Situação 2		Situação 3	
			G (dBi)	Δ_G (dBi)	G (dBi)	Δ_G (dBi)	G (dBi)	Δ_G (dBi)
Monopolo com manga 1	1,4	0,65	0,75	0,1	-2,9	-3,55	---	
Monopolo com manga 2	3,2	3	3	0	-2,1	-2,1	---	
Antena fio de cobre em “U”	1,3	0,7	-2,95	-3,65	-0,9	-1,6	---	
Antena anel metálica 1	2,6	2,55	0,9	-1,65	-1,8	-4,35	---	
Antena com ranhura	3,3	3,3	0,4	-2,9	-1,6	-4,9	---	
Monopolo com plano de massa curto	-1,3	-2,3	2,95	5,25	-5,6	-3,3	2,35	4,65
Antena anel retangular impressa	-0,3	-1,35	1,5	2,85	-3	-1,65	2,7	4,05
IFA CPW 2	1,4	0,7	2,8	2,1	0,5	-0,2	2,6	1,9
Antena <i>patch</i> com <i>slots</i>	-0,3	-4,9	0,15	5,05	-1,6	3,3	-3,6	1,3

Em relação aos valores obtidos no espaço livre, constata-se que todas as antenas impressas perderam ganho por terem sido colocadas na vertical. Das antenas metálicas apenas o monopolo com manga 1 e a antena fio de cobre em “U” baixaram o ganho.

Comparando os ganhos nas várias situações com o ganho livre, constata-se que ambas as antenas monopolo com manga praticamente mantêm o ganho na situação 1 e diminuem drasticamente o ganho na situação 2. As restantes antenas metálicas mais compactas, apresentam valores consideravelmente mais baixos em pelo menos 1,6 dBi nas duas situações na caixa.

Em relação às antenas impressas, constata-se que todas as antenas apresentam ganhos mais elevados nas situações 1 e 3, em relação ao ganho relativo no espaço livre. No entanto, na situação 2 apenas a antena *patch* com *slots* apresenta um ganho bastante satisfatório, contrariando as outras antenas que apresentam ganhos mais baixos que o valor máximo em espaço livre.

A antena monopolo impresso foi a que mais beneficiou da situação 1, com um acréscimo do ganho de 5,25 dBi. Na situação 2, a antena *patch* com *slots* foi a única que apresentou uma variação do ganho positiva, sendo este valor do ganho superior a 3,3 dBi. Na situação 3 destacam-se a antena monopolo com plano de massa curto e a antena anel impressa com os ganhos melhorados em pelo menos 4 dBi.

As antenas metálicas tiveram piores ganhos na caixa como resultado da desadaptação. Por outro lado, as antenas impressas aumentaram consideravelmente o ganho nas situações 1 e 3, pelo facto de terem ficado melhor adaptadas, tendo em conta que no espaço livre apresentavam-se ressonantes em frequências acima de 2,42 GHz. Além disso, as antenas impressas utilizam os circuitos eletrónicos para alargar as dimensões do plano de massa, sendo favorecidas neste ambiente.

Quanto à situação 2, esta desfavoreceu todas antenas, à exceção da antena *pacth* com *slots*, pelo facto de esta ter ficado bem adaptada.

5.6 Procedimento para adaptação das antenas

Como já tinha sido referido no capítulo 2, existem duas formas de adaptação de uma antena, podendo-se projetar novamente a estrutura da mesma através do simulador ou então através da utilização de redes de adaptação.

Uma rede de adaptação requer mais espaço na caixa, é mais complicada de implementar (discrepâncias entre a teoria e a prática) e requer igualmente um estudo dos componentes necessários. Assim sendo, a primeira opção de adaptação através do simulador é mais adequada devido à simplicidade do método e não requerendo componentes de alta frequência apropriados.

No simulador desloca-se a ressonância da antena para uma frequência mais elevada, através da variação dos parâmetros da antena. O valor da frequência depende do desvio de frequência obtido em relação à antena de teste em espaço livre e da situação em que se pretende adaptar a antena. Também deve-se ter em consideração os desvios observados entre a frequência de simulação e a frequência da antena em espaço livre.

Esta metodologia já foi utilizada pelas antenas IFA CPW 1 e *pacth* com *slots*, que no espaço livre estão ressonantes numa frequência acima da banda de interesse e que acabaram por ficar bastante adaptadas com a caixa na situação 3 e 2, respetivamente.

Para garantir que este procedimento seja bem sucedido, a nova antena projetada deve ser colocada e testada em condições idênticas às da antena de teste. Podem ser necessários alguns ajustes, devendo-se repetir este processo até que os resultados desejados sejam alcançados.

A vantagem deste processo é que torna a antena mais compacta, tendo em conta que as dimensões da antena diminuem com o aumento da frequência de ressonância. Por outro lado, tem como desvantagem o facto de o processo poder ser moroso, pois implica simulações sucessivas no simulador até que seja encontrada a solução pretendida, e no caso de estruturas complexas pode não ser tão fácil deslocar a frequência de ressonância e, ao mesmo tempo, ter as características desejadas em termos do parâmetro S_{11} e largura de banda. O deslocamento da frequência também pode ser realizado através do plano de massa, mas já se constatou que um plano de massa muito reduzido degrada consideravelmente o desempenho de uma antena, especialmente se for uma antena monopolo que é a estrutura de antena mais utilizada pelas antenas impressas

6 Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo apresentam-se as conclusões retiradas da realização deste projeto e os exemplos de trabalhos futuros que podem ter como base este trabalho.

6.1 Conclusão

A concretização deste trabalho teve como objetivos encontrar, desenvolver e medir as características de antenas compactas, quer em espaço livre quer no interior da caixa de um nó sensor, adequadas às RSSF na banda ISM de 2,4 GHz. Para tal, foi necessário fazer um estudo aprofundado acerca de estruturas de antenas compactas, compreender que existe um compromisso entre a redução das dimensões de uma antena e o seu desempenho e perceber que as antenas, especialmente as mais compactas, são sensíveis ao ambiente que as rodeia, sendo obrigatória a integração e avaliação das antenas no ambiente final de funcionamento.

Numa primeira fase foram desenvolvidas e ensaiadas várias antenas no espaço livre, as quais foram divididas em duas categorias: antenas metálicas e antenas impressas. Os resultados da simulação e experimentais foram apresentados para cada antena.

A primeira categoria é constituída por oito antenas, nomeadamente, um monopolo com plano de massa, dois monopolos com manga, duas antenas anel retangular, uma antena fio em U, uma antena S-P dobrada e uma antena com ranhura. A antena monopolo com plano de massa quadrado é compacta em relação à estrutura teórica ideal, mas não é compacta nem tem as características adequadas à RSSF, servindo apenas de referência para as restantes antenas metálicas. As antenas foram desenvolvidas a partir de estruturas teóricas ou obtidas na bibliografia da área de antenas compactas para a banda ISM de 2,4 GHz, tendo-se otimizado as estruturas a partir de resultados experimentais. O simulador COMSOL Multiphysics foi utilizado para ajudar no dimensionamento das antenas monopolo com manga e para determinar a posição de alimentação da antena ranhura. Contactou-se que os resultados experimentais e da simulação estão em concordância.

As antenas metálicas, comparativamente às antenas da segunda categoria, têm uma construção mais morosa, mas permitem adaptar mais facilmente as estruturas, tendo-se variado experimentalmente os seguintes parâmetros: comprimento do fio ou placa metálica, a dimensão da abertura e a posição da alimentação. Por esta razão, estas antenas estão mais adaptadas na banda de interesse.

As várias antenas propostas foram comparadas em termos de volume ocupado, largura de banda e ganho. Em termos de valores médios, sem contabilizar com a antena de referência, obteve-se um volume de 2560 mm³ e um ganho de 2,7 dBi para a frequência de 2,42 GHz. As antenas menos compactas são a S-P dobrada e as antenas anel retangular e, apesar de apresentar um ganho satisfatório acima de 2,6 dBi, não cobrem toda a banda ISM de 2,4 GHz. A antena S-P dobrada apresenta uma banda estreita e as antenas anel retangular estão ressonantes numa frequência abaixo da banda desejada, devido à utilização do cabo coaxial para alimentação. As antenas monopolo são intermédias, com volumes comparáveis ao valor médio, mas em particular a antena 2 tem um desempenho bastante elevado, com um ganho de 3,3 dBi, para além de ter um diagrama quase omnidirecional. As antenas mais compactas são a antena fio de

cobre em “U” e a antena com ranhura, com volumes inferiores ao valor médio de 16% e 57%, respectivamente. Para além de ser uma antena bastante compacta, a antena com ranhura tem o ganho mais elevado de 3,3 dBi, contra os 1,3 dBi da antena fio em forma de “U”. Portanto, de todas as antenas, a antena com ranhura é a mais compacta e a que tem o melhor desempenho. Além do mais, é uma antena fácil de comercializar.

Na segunda categoria são apresentadas dez antenas, duas antenas dipolo em substratos diferentes, uma antena F, uma antena G, uma antena monopolo com plano de massa curto, uma antena monopolo com plano de massa longo, uma antena anel retangular, duas antenas IFA CPW e uma antena *patch* com *slots*. As antenas dipolo impressas no substrato FR4 e Duroid RT/5880 foram construídas apenas para servirem de referência às antenas desta categoria. Todas as antenas foram desenvolvidas a partir de outras estruturas obtidas na bibliografia e foram submetidas à simulação eletromagnética no *software* COMSOL Multiphysics. Apenas as antenas G e a *patch* com *slots* têm as dimensões da bibliografia, tendo-se redimensionado todas as outras antenas. Constatou-se que os resultados da simulação e da prática estão em concordância, tendo-se apurado que um desvio máximo de 110 MHz para a frequência de ressonância, encontrando-se este valor dentro da margem de erro de trabalhos publicados.

Contrariamente à maioria das antenas, que foram obtidas a partir de estruturas impressas no mesmo substrato FR4 ($\epsilon_r = 4,4$ e $h = 1,6$ mm), a antena dipolo em Duroid RT/5880 e as antenas IFA CPW foram projetadas a partir de antenas impressas em substratos diferentes ou com diferentes características e com uma linha de alimentação de 50 Ω . Como as dimensões de uma antena podem ser determinadas em função do comprimento de onda na linha de transmissão, foram determinados os comprimentos de onda na linha de ambos os substratos e foi estabelecida uma relação entre ambos para aplicar aos parâmetros que constituem a estrutura da antena. Em relação aos resultados obtidos por simulação, constatou-se que as estruturas resultantes da aplicação deste procedimento ficaram ressonantes numa frequência abaixo de 2,42 GHz, encontrando-se ambas desviadas de 270 MHz. A antena dipolo em Duroid RT/5880, por se tratar de uma antena de referência e por apresentar uma largura de banda suficiente para cobrir a banda de interesse, foi construída com as dimensões de projeto. No caso da antena IFA CPW com as dimensões de projeto, apesar de igualmente cobrir a banda ISM de 2,4 GHz pelos resultados da simulação, reduziram-se, principalmente, os planos de massa para deslocar a frequência de ressonância para a banda de interesse, tendo-se obtido as antenas IFA CPW 1 e 2, duas estruturas mais compactas. Portanto, este método tem um erro associado que pode ser tolerado pelas antenas de banda larga, mas é necessário redimensionar a estrutura para se obter antenas mais bem adaptadas na banda de interesse.

Com exceção das antenas dipolo, as primeiras antenas compactas implementadas experimentalmente, como foi o caso da antena F, da antena G e da antena monopolo impressa com plano de massa curto, mostraram-se ineficientes, com a forte presença de correntes não balanceadas no exterior dos cabos e ganhos insatisfatórios. Perante a dificuldade em encontrar antenas impressas eficientes, decidiu-se aumentar o plano de massa da antena da antena monopolo com plano de massa curto. Como resultado, obteve-se uma antena eficiente e com ganho elevado. Este estudo veio confirmar a necessidade de planos de massa de maiores dimensões pelas das antenas impressas, especialmente, as antenas monopolo.

Tal como as antenas da primeira categoria, as antenas impressas também foram comparadas entre si, tendo como parâmetros o volume ocupado, a largura de banda e o ganho. Constatou-se que para o grau de compactação que apresentam, à exceção das antenas de

maiores dimensões, estas antenas são menos eficientes que as antenas metálicas. Devido a limitações de tempo, a antena *patch* com *slots* foi construída mesmo com os resultados de simulação insatisfatórios, devido ao fato de ser bastante compacta e de terem sido apresentados resultados bastante satisfatórios para o protótipo construído.

Outro aspecto relevante foi a determinação da constante dielétrica do substrato FR4 para a frequência de 2,42 GHz através do método do comprimento-diferencial. Esta técnica permitiu validar o valor considerado de 4,4 (bibliografia) para a banda ISM de 2,4 GHz, tendo-se obtido um valor de 4,3. Tendo em conta que o projeto das antenas impressas está dependente da constante dielétrica, este método ou outro deve ser realizado antes de qualquer implementação no simulador ou experimental, sendo de extrema importância.

Fizeram-se testes com as antenas metálicas e impressas mais compactas numa caixa com circuitos tipicamente encontrados num nó sensor, de modo a avaliar o impacto deste ambiente sobre as características das antenas. Os parâmetros de análise incluíram a frequência central, o parâmetro S_{11} , o diagrama no plano H e o ganho.

Em relação à frequência de ressonância, tal como era esperado, constatou-se que para a maioria das antenas o valor diminuiu nas várias situações na caixa em relação ao valor em espaço livre. No entanto, obtiveram-se variações diferentes para as antenas.

Quanto aos diagramas de radiação, constatou-se que estes ficaram diretivos na caixa. A razão pela qual isso acontece é que o plano de massa por detrás da antena torna o feixe de radiação diretivo, sendo esta a razão pela qual o lóbulo principal encontra-se entre os 0° e os 180° , na generalidade das antenas. Por outro lado, a degradação do desempenho aumentou com obstrução da antena pelo equipamento eletrónico, situado entre a antena e o emissor, entre os 180° e os 360° .

Os diagramas nas situações 1 e 3 têm praticamente a mesma forma, por se tratarem de situações praticamente idênticas. A distinção entre as duas situações é mais visível ao nível da deslocação da frequência, sendo o desvio maior na situação 3, devido ao aumento do comprimento elétrico da antena.

Na situação 2 constatou-se a presença de nulos profundos próximo dos 180° e dos 270° . Em torno 180° era esperado devido obstrução total da antena pelo equipamento. Nos 270° pensa-se que isto está relacionado com a disposição não homogénea dos circuitos.

Outro aspecto que é importante referir é que as antenas impressas melhoraram significativamente o ganho, contrariamente às antenas metálicas, por terem ficado mais adaptadas com a caixa, devido à utilização dos circuitos eletrónicos como plano de massa.

Portanto, as antenas impressas são mais adequadas para serem usadas neste ambiente, pelo fato de poderem ser integradas com o plano de massa e pelas várias vantagens que oferecem, como baixo custo e baixo perfil.

6.2 Trabalhos futuros

Como trabalho futuro sugere-se a integração de algumas destas antenas em nós sensores de uma rede funcional e avaliação da qualidade das ligações sem fios, através das métricas disponibilizadas pela camada física da rede, como o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e o LQI (*Link Quality Indicator*). Estes parâmetros são importantes pois consideram o impacto

de fenómenos presentes no percurso das ondas eletromagnéticas, como a perda de percurso, ruído, interferências, desvanecimento, propagação multipercurso e efeito de Doppler.

Pode ser realizado um estudo que determina a escolha de uma ou várias antenas em função da aplicação de utilização, para além, da orientação, das características de radiação e do ambiente circundante das antenas.

Propõe-se também a integração das antenas compactas nos circuitos eletrónicos (PCB) para que beneficiem de um plano de massa de maiores dimensões que já faz parte do nó sensor, de modo a aumentarem a sua eficiência, e avaliação do sistema.

7 Bibliografia

- [1] S. R. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- [2] J. A. R. Azevedo, “Apontamentos da Disciplina de Radiação e Propagação - Fundamentos Básicos de Antenas”, 2016, [Online], URL: <http://moodle.cee.uma.pt/mod/resource/view.php?id=1737>, Consultado em: Julho de 2016.
- [3] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, Canada: John Wiley & Sons, 2008.
- [4] S. I. S. Inácio, “Projeto de Antenas para Comunicações RF Subaquáticas,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [5] T. Pattnayak and G. Thanikachalam, *Antenna Design and RF Layout Guidelines*, [PDF], URL: <http://www.cypress.com/file/136236/download>.
- [6] T. S. Bird, “Definition and Misuse of Return Loss,” *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2009.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2012.
- [8] A. A. Moura, *Antenas e Propagação*, Universidade do Porto, Porto.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna theory - analysis and design*, 2th ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [10] P. J. Bevelacqua, “Polarization - EM Waves and Antennas”, [Online], URL: <http://www.antenna-theory.com/basics/polarization.php>.
- [11] I. T. Nassar, “Small Antennas Design for 2.4 GHz Applications”, University of South Florida, South Florida, 2010.
- [12] D. I. Curiac, “Wireless Sensor Network Security Enhancement Using Directional Antennas: State of the Art and Research Challenges,” in *Sensors*, vol. 16, n° 488, pp. 1-15, 2016.
- [13] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco and A. Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey,” in *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 537-568, 2009.
- [14] D. B. Miron, *Small Antenna Design*, Newnes, 2006.
- [15] J. M. Laheurte, *Compact Antennas for Wireless Communications and Terminals*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [16] L. Huitema, *Progress in Compact Antennas*, Intech, 2014.
- [17] A. T. I. Gobien, “Investigation of Low Profile Antenna Designs for Use in Hand-Held Radios,” 1997.

- [18] P. D. Vita, Antenna selection guidelines, 2012, [PDF], URL: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/82/38/3f/9f/fd/4d/4f/ab/DM00068254.pdf/files/DM00068254.pdf/jcr:content/translations/en.DM00068254.pdf.
- [19] “Compact Integrated Antennas,” 2012, [PDF], URL: <http://cache.nxp.com/assets/documents/data/en/application-notes/AN2731.pdf>
- [20] L. E. Frenzel, “Printed-Circuit-Board Antennas,” 2005, [Online], URL: <http://electronicdesign.com/boards/printed-circuit-board-antennas>.
- [21] S. Tondare and N. V. S, “Meander Line Antenna for LTE Communications,” International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 2, n° 3, pp. 411-416, 2014.
- [22] J. F. Zurcher, O. Staub and A. K. Skrivervik, “Smila: A Compact and Efficient Antenna for Mobile Communications,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 27, n° 3, pp. 155-157, 2000.
- [23] M. C. Huynh, “Wideband Compact Antennas for Wireless Communication Applications,” Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2004.
- [24] R. D. Straw, The ARRL Antenna Book, 19th ed. Newington: ARRL - The American Radio Relay League, 2000.
- [25] D. N. Khan, “Design of Planar Inverted-F Antenna,” International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, 2014.
- [26] R. Waterhouse, Printed Antennas for Wireless Communications, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [27] T. Pattnayak, Antenna Design Guide, [PDF], URL: <http://www.cypress.com/file/190311/download>.
- [28] A. Andersen, Selecting antennas for low-power wireless applications, [PDF], URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt296/slyt296.pdf>.
- [29] R. Perez, Handbook of Electromagnetic Compatibility, Academic Press, Inc., 1995.
- [30] T. M. C. Parra, “Antenna Design for a Wireless Sensor Network Node,” Lisboa, 2014.
- [31] [Online], URL: <http://www.ittgroup.ee/en/wireless-modules/182-xbee-series-1-module-whip-antenna.html>.
- [32] C. Reig and E. Ávila-Navarro, “Printed Antennas for Sensor Applications: A Review,” IEEE Sensors Journal, vol. 14, n° 8, pp. 2406 - 2418, 2014.
- [33] [Online], URL: http://www.aliexpress.com/store/product/zigbee-module-SZ1-CC2530-wireless-transceiver-modules-wsn-wireless-sensor-networks/124994_932737340.html.

- [34] L. Desclos, *Advances in High-Performance Ceramic Antennas for Small-Form-Factor, Multi-Technology Devices*.
- [35] O. V. Tereshchenko, F. J. K. Buesink and F. B. J. Leferink, "An Overview of the Techniques for Measuring the Dielectric Properties of Materials," *IEEE*, 2011.
- [36] L. W. Ritchey, "A Survey and Tutorial of Dielectric Materials Used in the Manufacture of Printed Circuit Boards," *Circuitree Magazine*, 1999.
- [37] B. Ahmed, I. Saleem, H. Zahra, H. Khurshid and S. M. Abbas, "Analytical Study on Effects of Substrate Properties on the Performance of Microstrip Patch Antenna," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 5, n° 4, pp. 113 - 122, 2012.
- [38] A. Azman, M. Z. A. A. Aziz, M. K. Suaidi, A. Salleh, H. Nornikman and F. Malek, "CPW-FED Compact Monopole Antenna for Dual-Band WLAN/WiMAX Applications," *IEEE 2015 International Conference on Computer, Communication, and Control Technology*, Sarawak, 2015.
- [39] J. Lienau, "Antenna Matching Within An Enclosure," 2016. [Online], URL: <https://www.lsr.com/white-papers/antenna-matching-within-an-enclosure>, Consultado em: Julho de 2016.
- [40] "COMSOL Multiphysics - User's Guide," 2012.
- [41] "Introduction to COMSOL Multiphysics," 2016, [PDF], URL: <https://cdn.comsol.com/documentation/5.2.1.262/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>
- [42] "The Perfectly Matched Layer," [Online], URL: <https://www.comsol.com/blogs/using-perfectly-matched-layers-and-scattering-boundary-conditions-for-wave-electromagnetics-problems/>.
- [43] "Vector Network Analyzers ZVB - Specifications," Rodhe & Schwarz, 2005.
- [44] D. H. V. Santos, "Controlo do Diagrama de Radiação de Agrupamento de Antenas," *Universidade da Madeira, Funchal*, 2015.
- [45] P. J. Bevelacqua, "The Monopole Antenna," [Online], URL: <http://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php>, Consultado em: Julho de 2016.
- [46] A. Khiewlamyong and C. Pirak, "Loop Antenna Design for Smart Energy Meter," in *International Conference on Circuits, System and Simulation*, Singapore, 2011.
- [47] J. H. Chou and S. W. Su, "Very Low-Cost Copper-Wire Antenna for 2.4-GHZ WLAN Operation," *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 2107-2109, 2008.
- [48] J. M. G. Agrela, "Circuitos de Alimentação para Agrupamentos de Antenas," *Universidade da Madeira, Funchal*, 2011.

- [49] [Online], URL: http://www.qsl.net/va3iul/Antenna/Printed_and_Microstrip_Antennas/Metal-Plate_Antenna_2.4GHz.gif.
- [50] TX-LINE: Transmission Line Calculator, [Online], URL: <http://www.awrcorp.com/products/optional-products/tx-line-transmission-line-calculator>.
- [51] C. Votis, V. Christofilakis and P. Kostarakis, "Geometry Aspects and Experimental Results of a Printed Dipole Antenna," *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, vol. 3, pp. 204-207, 2010.
- [52] J. R. Panda and R. S. Kshetrimayum, "A Printed F-Shaped Dual-band Monopole Antenna for RFID and WLAN Applications," in *Int'l Conf. on Computer & Communication Technology [ICCCT'10]*, Guwahati, 2010.
- [53] J. R. Panda, A. S. R. Saladi and R. S. Kshetrimayum, "A Compact Printed Monopole Antenna for Dual-band RFID and WLAN Applications," *Radioengineering*, vol. 20, pp. 464-467, 2011.
- [54] M. N. Suma, R. K. Raj, P. C. B. Manoj Joseph and P. Mohanan, "A Compact Dual Band Planar Branched Monopole Antenna for DCS/2.4-GHz WLAN Applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, n° 5, pp. 275-277, 2006.
- [55] S. Jo, H. Choi, J. Lim, B. Shin, S. Oh and J. Lee, "A CPW-Fed Monopole Antenna with Double Rectangular Rings and Vertical Slots in the Ground Plane for WLAN/WiMAX Applications," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1-7, 2015.
- [56] W. E. Hajj, C. Person and J. Wiart, "A Novel Investigation of a Broadband Integrated Inverted-F Antenna Design: Application for Wearable Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, n° 7, pp. 3843-3846, 2014.
- [57] C. Roblin, J. M. Laheurte, R. D'Errico, A. Gati, D. Lautru, T. Alvès, H. Terchoune and F. Bouttout, "Antenna design and channel modelling in the BAN context – Part I: Antennas".
- [58] J. L. Jaw, F. S. Chen and D. F. Chen, "Compact Dualband CPW-Fed Slotted Patch Antenna for 2.4/5GHz WLAN Operation," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 23, p. 1947–1955, 2009.
- [59] Juliann, "Rogers Corporation," 2011, [Online], URL: <http://blog.rogerscorp.com/2011/05/27/test-dielectric-constant-with-microstrip-circuits/>, Consultado em: Fevereiro de 2016.
- [60] "Dipole Antenna," [PDF], URL: https://www.comsol.pt/model/download/332881/models.rf.dipole_antenna.pdf.
- [61] "Microstrip Patch Antenna," [PDF], URL: https://www.comsol.com/model/download/333041/models.rf.microstrip_patch_antenna_inset.pdf.

- [62] W. Frei, “Ports and Lumped Ports for Wave Electromagnetics Problems,” [Online], URL: <https://www.comsol.com/blogs/ports-and-lumped-ports-for-wave-electromagnetics-problems/>.
- [63] W. Frei, “Modeling of Coplanar Waveguides,” [Online], URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-coplanar-waveguides/>.
- [64] W. Frei, “Simulation Tools for Solving Wave Electromagnetics Problems,” [Online], URL: <https://www.comsol.com/blogs/simulation-tools-for-solving-wave-electromagnetics-problems/>.
- [65] Automated Meshing for Electromagnetic Waves, Frequency Domain Simulations, [Online], URL: <https://www.comsol.com/video/automated-meshing-electromagnetic-waves-frequency-domain-simulations>.
- [66] W. Frei, “Solutions to Linear Systems of Equations: Direct and Iterative Solvers,” [Online], URL: <https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/>.
- [67] F. E. S. Santos, “Aplicação do COMSOL à Simulação de Antenas - Agrupamento de Antenas,” 2013.

Anexo A

A primeira coisa a se fazer quando se abre a interface do *software* COMSOL *Multiphysics* é criar um projeto. Na criação do projeto escolhem-se as dimensões espaciais do modelo, o tipo de módulo (física) e o tipo de estudo. Escolheu-se um modelo tridimensional (3D), dentro do módulo de rádio frequência (RF) selecionaram-se as ondas eletromagnéticas no domínio da frequência (*Electromagnetic Waves, Frequency Domain*) e o estudo no domínio da frequência (*Frequency Domain*). Após a criação do projeto, é aberta a janela de interface, onde o *Model Builder* tem um aspeto semelhante ao apresentado na Figura A.1.

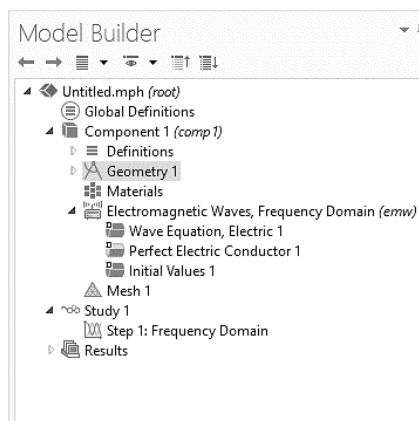


Figura A.1 – Componentes do *Model Builder* após a criação do projeto.

Posteriormente toda a construção, simulação e obtenção dos resultados do modelo é realizada com recurso ao *Model Builder* e por etapas:

1. **Definição das variáveis (*Global Definitions* -> *Parameters*)** – para facilitar a construção e otimização do modelo convém definir as variáveis e o valor associado às mesmas.
2. **Construção da geometria (*Component 1* -> *Geometry 1*)** – aqui o utilizador utiliza as várias figuras geométricas e operações disponíveis para a construção da antena. Para além da estrutura da antena, também é desenhada uma esfera em volta da antena (centrada) com um raio múltiplo de $\lambda/4$ (λ – é o comprimento de onda para a frequência de 2,42 GHz) e uma espessura em torno de $\lambda/8$, com base nos exemplos fornecidos pelo COMSOL em [60] e [61]. A esfera é utilizada para definir o campo distante da antena (delimitado pela superfície interna da esfera) e a camada de dispersão (superfície externa). O campo distante é importante para a determinação das características de radiação (ganho e diagramas de radiação) da antena. A camada de dispersão permite que as ondas eletromagnéticas propagam-se para fora do modelo sem qualquer reflexão, permitindo a simulação de uma antena num meio infinito ou espaço livre. Na Figura A.2 encontra-se a geometria de uma antena realizada no COMSOL *Multiphysics*.

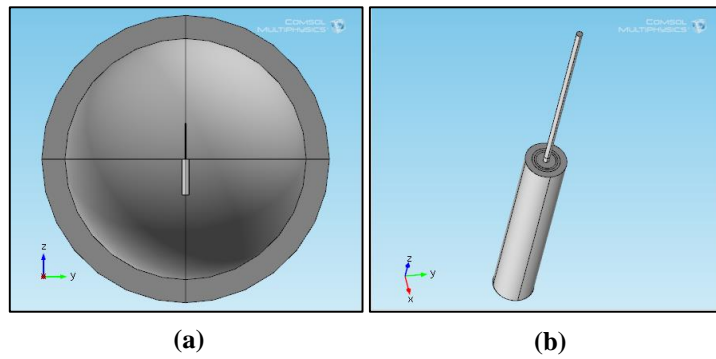


Figura A.2 Geometria: a) modelo completo (antena e esfera); b) antena monopolo com manga.

3. **Escolha dos materiais (*Component 1 -> Materials*)** – por defeito toda a geometria é atribuída ao primeiro material criado ou adicionado. Toda a estrutura deve ser atribuída ao material ar, sendo este o primeiro material. Os materiais dielétricos, caso seja necessário, devem ser definidos/escolhidos e atribuídos à geometria posteriormente. Todos os materiais apenas fazem uso de três propriedades: permeabilidade relativa, permitividade relativa e condutividade elétrica. No caso desta antena monopolo, criou-se um material dielétrico para atribuir ao dielétrico do cabo coaxial RG178 na geometria da antena. A constante dielétrica foi calculada com auxílio de uma calculadora de impedância para o cabo coaxial, tendo-se obtido um valor $\epsilon_r = 2$. A permeabilidade relativa é unitária e a condutividade elétrica é nula, tal como o exemplo em [61]. As zonas condutoras (ou metálicas) são definidas na física do módulo RF (*Electromagnetic waves, Frequency Domain*).
4. **Física (*Component 1 -> Electromagnetic waves, Frequency Domain*)**: neste componente do módulo RF definem-se as superfícies metálicas da antena, a porta de entrada, o campo distante e a superfície de dispersão. Na Figura A.3 mostra-se a ilustração gráfica resultante da definição destes quatro componentes.

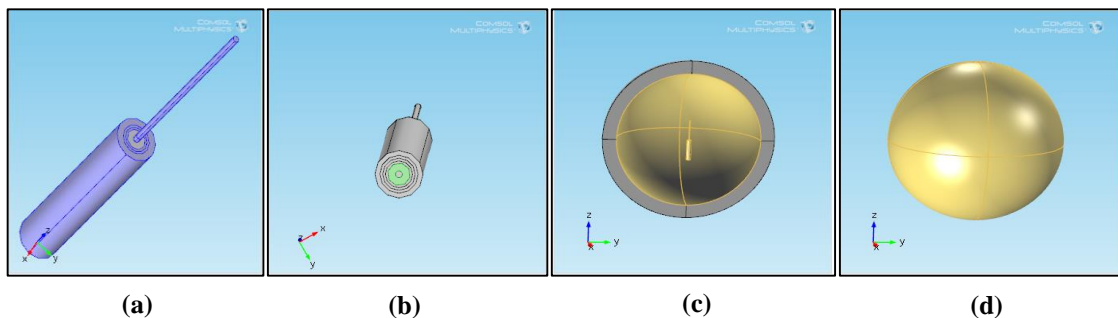


Figura A.3 – a) Superfícies metálicas da antena monopolo com manga (azul); b) porta (verde); c) campo distante (amarelo); d) fronteira de dispersão (amarelo);

- **Condutor elétrico perfeito (*Perfect Electric Conductor 2*)**: todas as superfícies condutoras da antena são colocadas como condutores perfeitos;

- **Porta (*Lumped Port 1*)** – a definição de uma porta permite determinar a impedância e parâmetro S para uma frequência ou gama de frequências à entrada de uma antena.

O módulo RF oferece duas portas ou fronteiras para as ondas eletromagnéticas passarem sem reflexão: *lumped port* e *port*. A porta aglomerada (*lumped port*) é adequada quando apenas se conhece a forma dos campos eletromagnéticos num dos limites do modelo, mas se desconhece a magnitude e a fase desses campos [62]. Para este tipo de porta existem três condições fronteira: *coaxial boundary condition*, *uniform* e *user-defined*. [62].

No caso da utilização de um **cabo coaxial**, deve-se utilizar a condição de fronteira coaxial (*coaxial boundary condition*). Esta condição deve ser sempre aplicada a uma face anelar ou circular [62].

A opção **uniforme** (*uniform*) pode ser utilizada em superfícies que servem de ponte entre duas faces condutoras, como é o caso das antenas impressas sobre um substrato, em que as duas faces do substrato dielétrico apresentam material condutor. O campo elétrico apresenta uma magnitude uniforme entre as duas faces condutoras [62].

A opção definido pelo utilizador (*user-defined*) permite ao utilizador introduzir manualmente a altura, largura da alimentação e ainda a direção do vetor do campo elétrico. Esta opção é adequada para definir a alimentação da antena dipolo metálica, por exemplo [62].

Para todas as antenas (metálicas e impressas) utilizou-se a porta aglomerada e as condições coaxial e uniforme, com uma impedância característica de 50Ω . A condição coaxial foi utilizada nas antenas monopolo com manga e nas antenas impressas alimentadas por CPW. A condição uniforme foi utilizada nas antenas impressas alimentadas por linha microfita. No caso das antenas impressas alimentadas por CPW, como apenas existe material condutor numa das superfícies do substrato, não se pode aplicar a condição uniforme. Tendo em conta as opções disponibilizadas pelo *software* [63], optou-se por adicionar, com base em testes realizados, ao modelo da antena um conector SMA de 50Ω e utilizar a condição coaxial.

- **Campo distante (*Far-Field Domain*)** – Toda a superfície interna da esfera delimita o campo distante da antena.

- **Fronteira de dispersão (*Scattering Boundary condition*)** – esta fronteira é aplicada a toda a superfície externa da esfera para minimizar a reflexão das ondas eletromagnéticas que se propagam para fora do modelo. Como não é completamente eficaz, estando a sua eficácia dependente do ângulo de incidência das ondas eletromagnéticas, é necessário utilizar uma PML em simultâneo [42].

5. **PML (*Perfectly Matched Layer*)** - A PML foi aplicada igualmente à superfície externa da esfera. Este domínio garante que todas as ondas eletromagnéticas que saem são absorvidas, sendo muito eficiente e preferível à fronteira de dispersão. Desta forma, permite simular o comportamento da antena no espaço livre (sem reflexões), como é o caso meio na câmara anecoica [42].
6. **Malha para discretização (*Mesh 1*)** - a malha permite discretizar a geometria do modelo em pequenos elementos. A discretização é realizada consoante as dimensões do modelo (1D, 2D ou 3D). No caso das geometrias 3D, os domínios são discretizados em

tetraedros, hexaedros, prismas ou pirâmides. As fronteiras (*boundaries*) são discretizadas em triângulos e quadriláteros, tal como para uma geometria 2D [40].

Para a realização da *mesh* utilizou-se a opção malha controlada pelo utilizador (*user-controlled mesh*) para discretizar as várias partes do modelo de forma manual. Isto porque a opção malha controlada pela física é muito limitada e não permite adequar a malha às várias partes do modelo [64].

A estrutura da antena foi discretizada em elementos tetraédricos, devido ao seu baixo erro de dispersão, comparativamente aos hexaedros ou prismas [64]. Quanto à resolução da malha, o tamanho máximo dos elementos utilizado 5 para a estrutura de cada antena situou-se entre $\lambda/10$ [44] (λ é o comprimento de onda para a frequência de 2,42 GHz) e $\lambda/5$ [64]. Ainda na estrutura da antena, foram usados elementos de diferentes tamanhos consoante as dimensões da fronteira, tendo-se optado por usar elementos mais finos nas fronteiras mais finas, como se pode observar na Figura A.4a) [64].

Com base nos vários exemplos disponibilizados pelo COMSOL [61] e [65], usaram-se elementos hexaedros para a esfera/PML (*swept*), uma malha larga (*coarse*) e uma distribuição (*distribution*) de 5 elementos (ver Figura A.4b)).

O tamanho dos elementos deve oferecer o melhor compromisso entre precisão e requisitos de memória [64], caso contrário, a simulação muito morosa e pode não convergir.

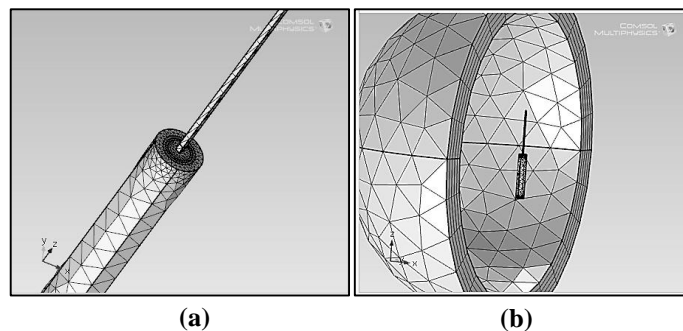


Figura A.4 – a) Antena discretizada em tetraedros de diferentes tamanhos; b) Esfera/PML discretizada com hexahedros e com uma malha muito mais larga que a antena.

- 7. Estudo (Study 1)** - no estudo basta definir a frequência ou gama de frequências que se pretende estudar. O tipo de solucionador usado por defeito é iterativo que permite uma aproximação gradual da solução, necessitando de uma menor utilização da memória, contrariamente aos solucionadores diretos também disponíveis. Contudo, nem sempre conseguem resolver os problemas da física, não conseguindo convergir, sendo necessário alterar as configurações de controlo consoante o tipo de física [66]. Na Figura A.5 mostra-se um gráfico de convergência obtido para a antena monopolo.

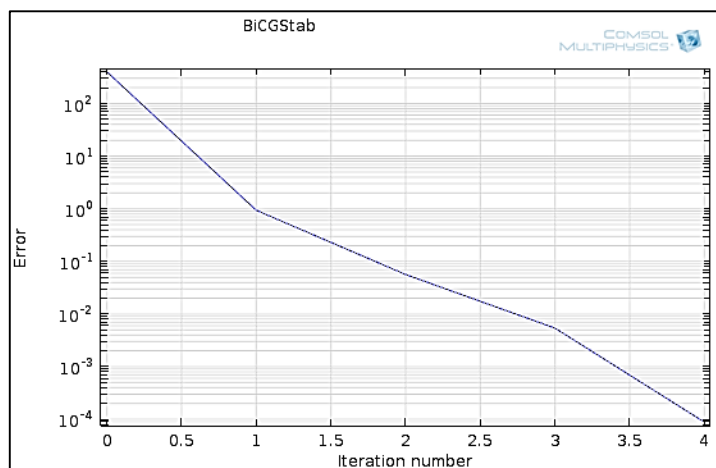


Figura A.5 – Gráfico de convergência dado pelo erro em função do número de iterações.

8. **Resultados (Results 1)** - por defeito, após a convergência do modelo, é apresentado o campo elétrico para a frequência ou frequências estudadas. Na Figura A.6 mostra-se os resultados obtidos para características de uma antena monopolo com manga. Para visualizar o diagrama de radiação é necessário adicionar um gráfico (2D ou 3D). Para que sejam apresentados os valores do ganho da antena em dBi no gráfico 3D (ver Figura A.6b)), é preciso adicionar a respetiva equação [67]:

$$20 \cdot \log_{10}(emw.normEfar/\sqrt{60 \cdot 0.01}) + 10 \cdot \log_{10}(1 - \text{abs}(emw.S11)^2), \quad (A.1)$$

onde $emw.normEfar$ é o valor do campo elétrico e $emw.S11$ é o valor do parâmetro S . Em relação ao parâmetro S e à impedância, os valores são obtidos em *Derived Values - > Global Evaluation*, sendo apresentados numa tabela (ver Figura A.6c)).

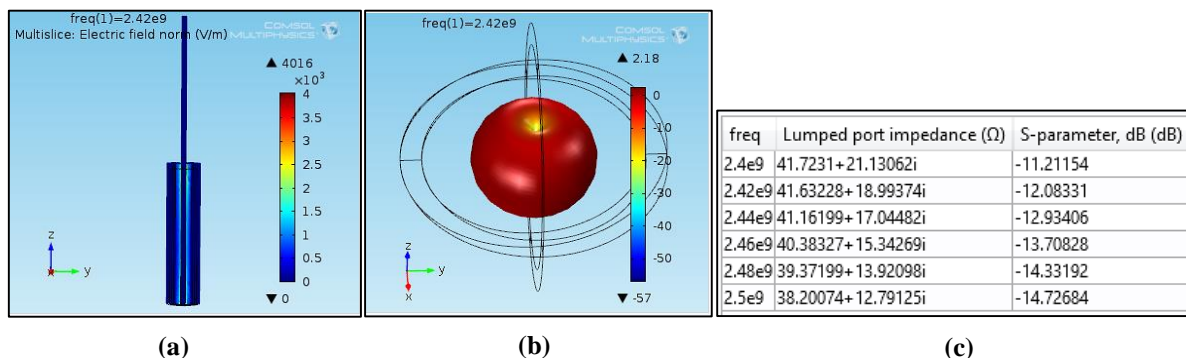


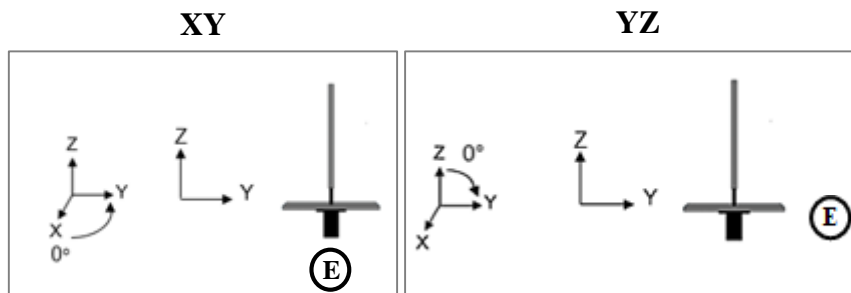
Figura A.6 – Características obtidas para uma antena monopolo com manga: a) valores do campo elétrico na frequência de 2,42 GHz; b) diagrama de radiação e valores do ganho (dBi) na frequência de 2,42 GHz; c) valores da impedância (Ω) e do parâmetro S (dB) obtidos numa gama de frequências.

Anexo B

B.1 Antenas metálicas

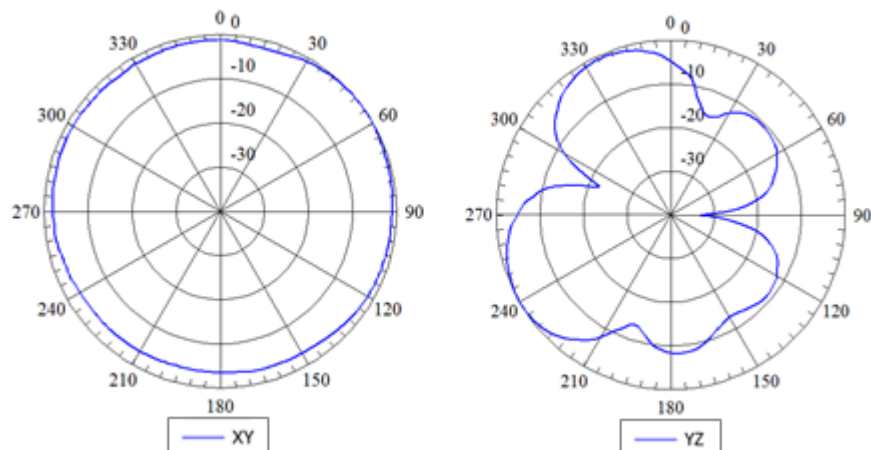
B.1.1 Antena monopolo com plano de massa

- Posição inicial das antenas nos diferentes planos XY, YZ e sentido de rotação nos eixos:



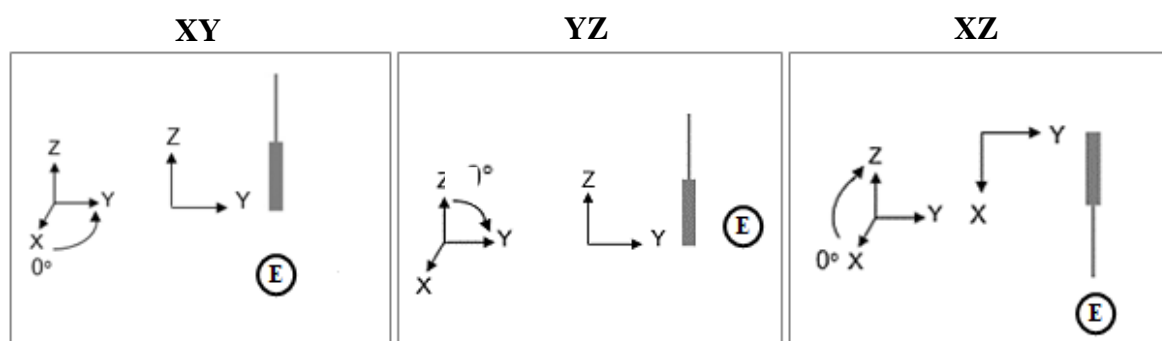
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas experimentais:



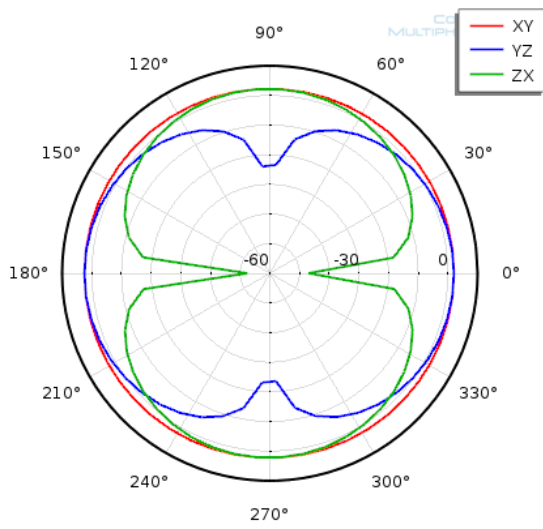
B.1.2 Antena monopolo com manga 1

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

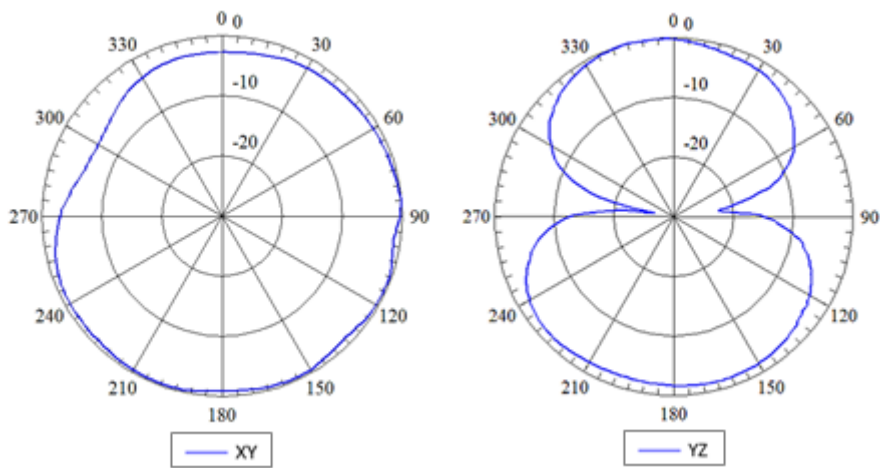


E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

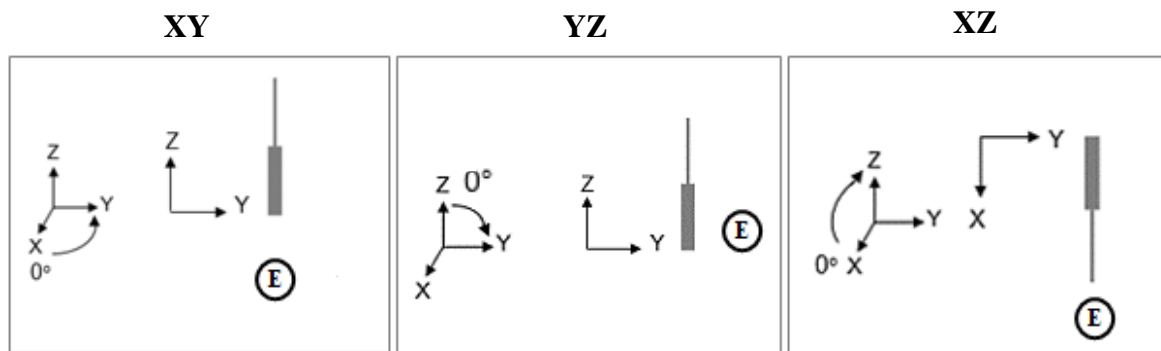


-Diagramas experimentais:



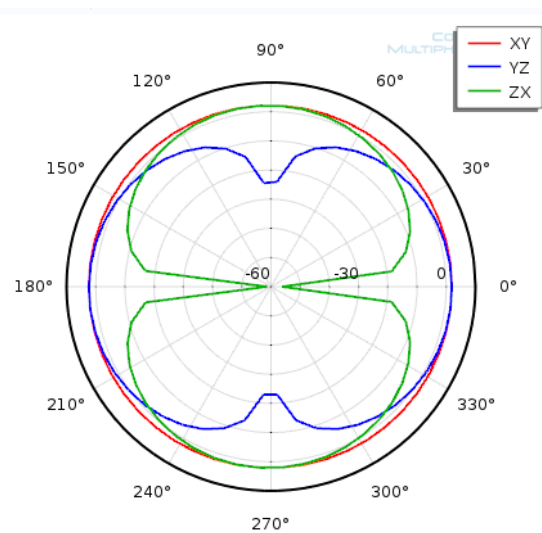
B.1.3 Antena monopolo com manga 2

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

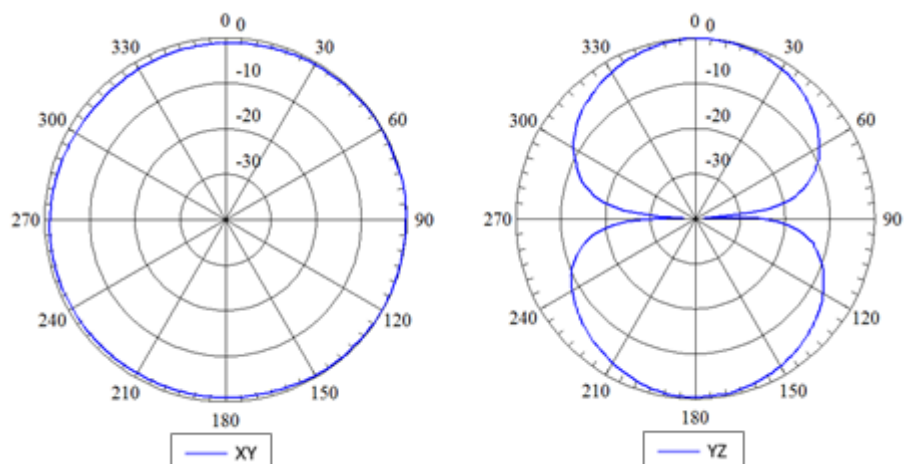


E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

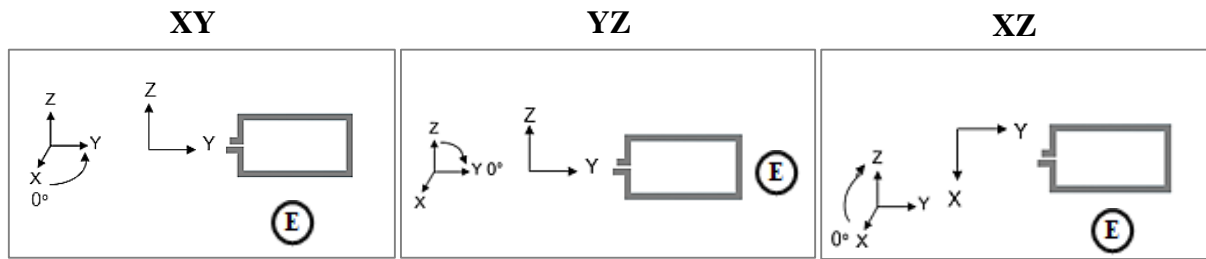


-Diagramas experimentais:



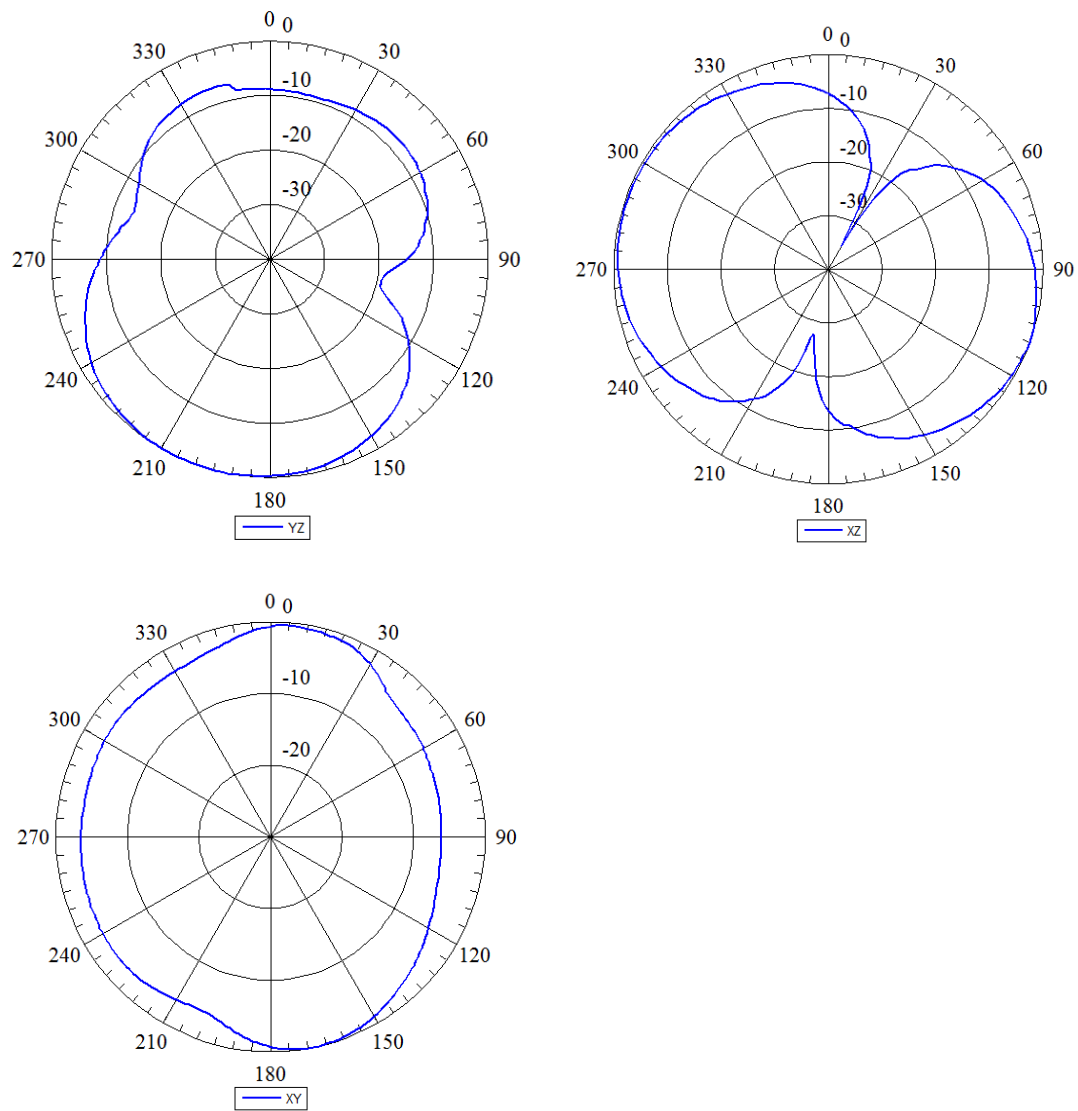
B.1.4 Antena em anel retangular 1 – com cabo

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:



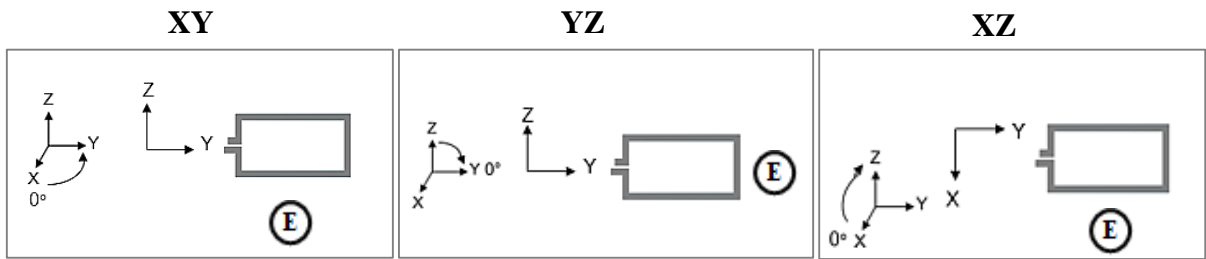
E – Direção da antena emissora.

-Diagramas experimentais:



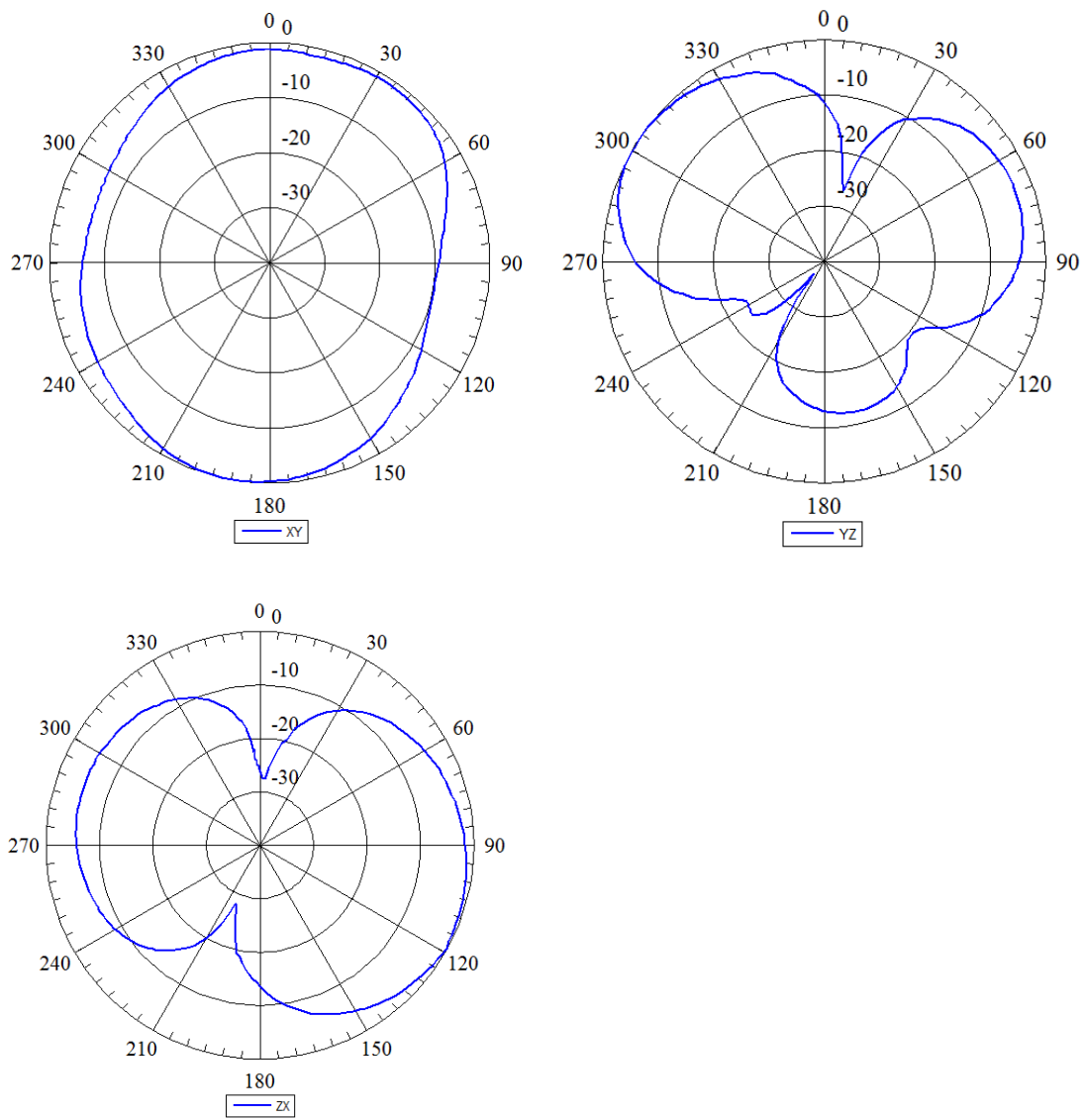
B.1.5 Antena em anel retangular 2 – com cabo

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:



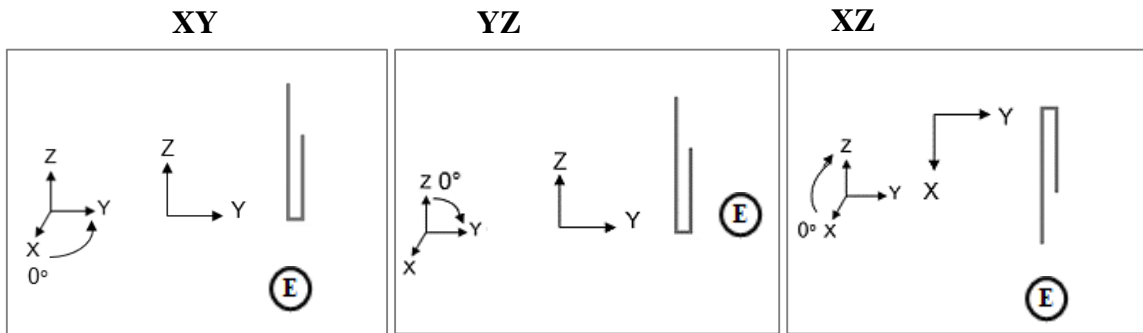
E – Direção da antena emissora.

-Diagramas experimentais:



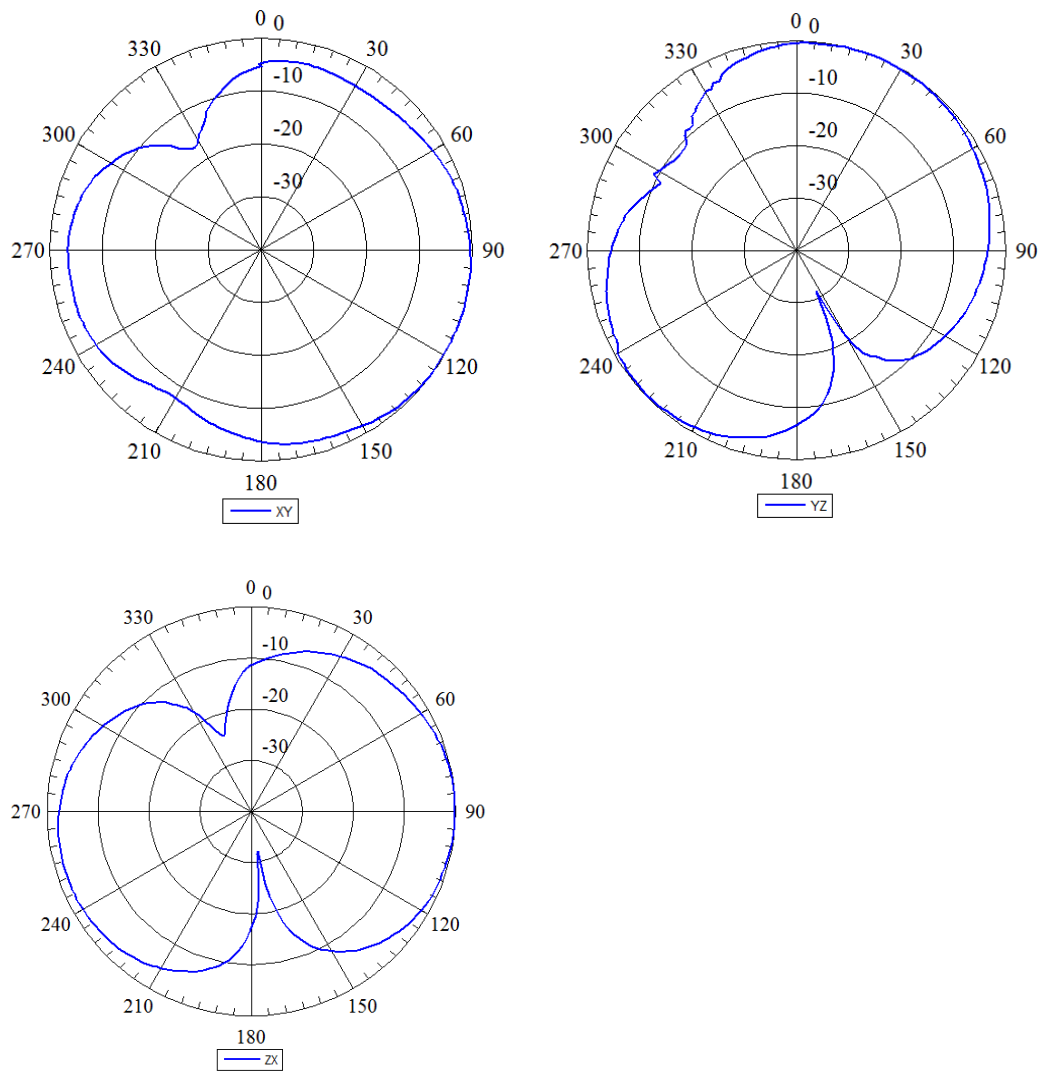
B.1.6 Antena fio de cobre em “U”

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:



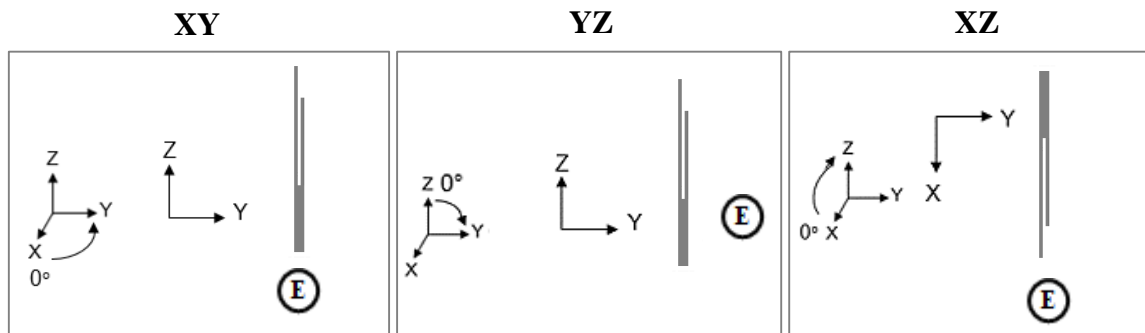
E – Direção da antena emissora.

-Diagramas experimentais:



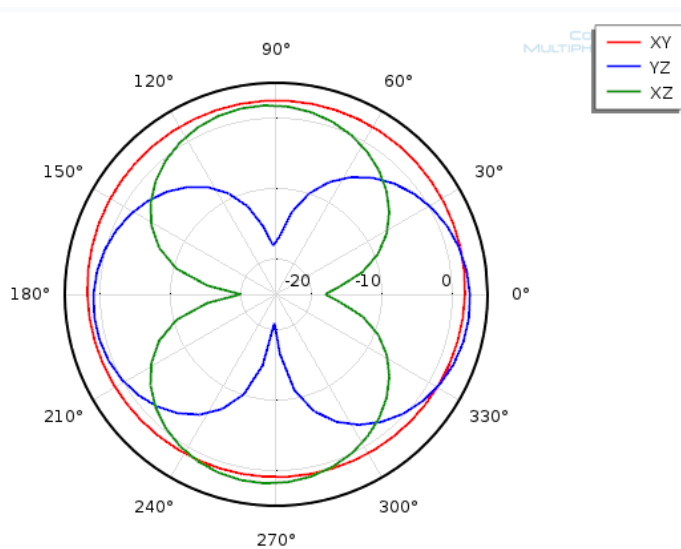
B.1.7 Antena com ranhura

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:



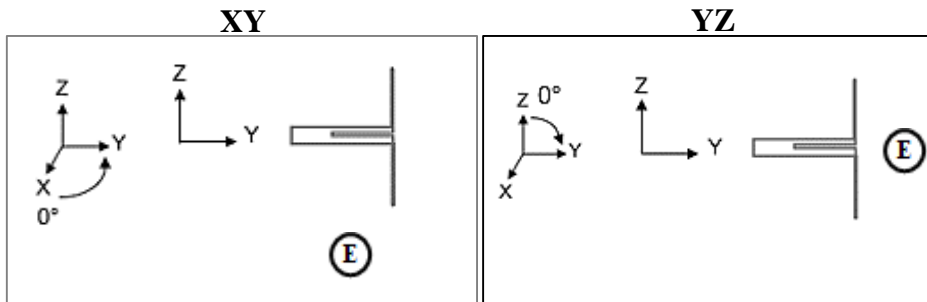
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:



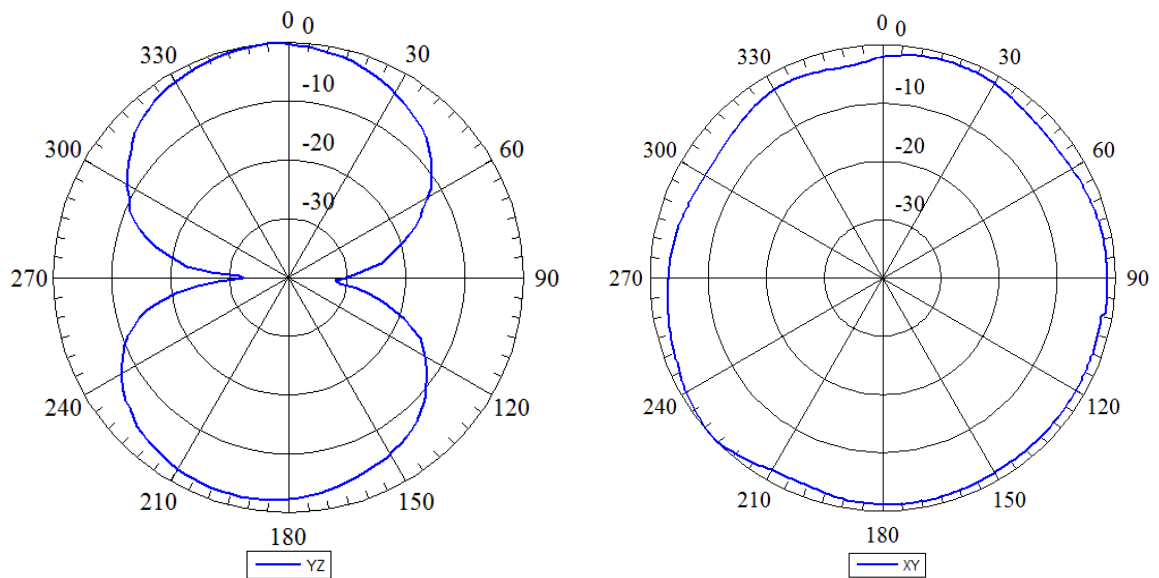
B.1.8 Antena dipolo de referência

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ:



E – Direção da antena emissora.

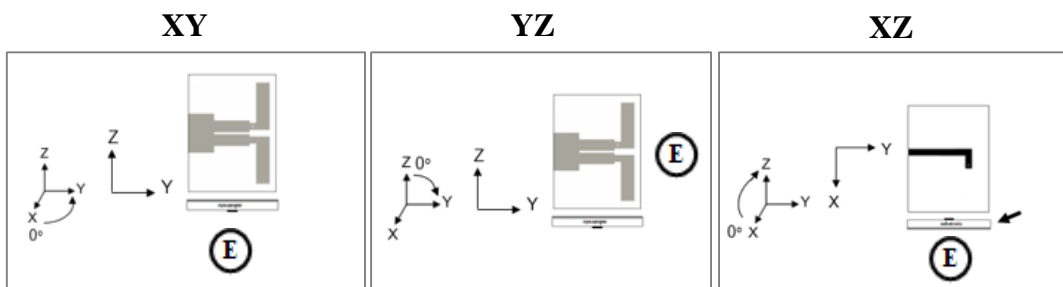
-Diagramas experimentais:



B.2 Antenas Impressas

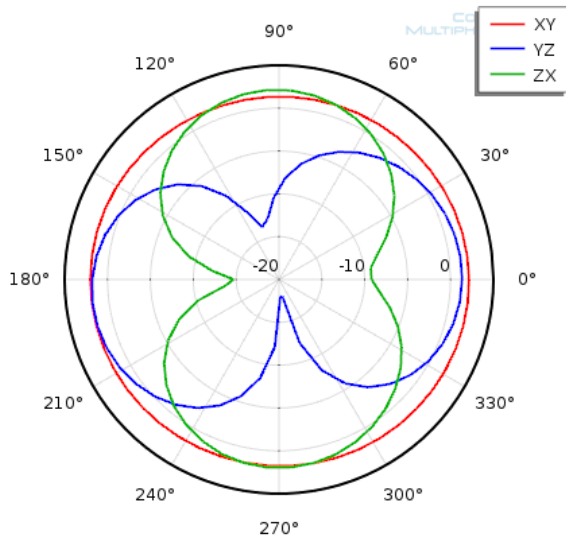
B.2.1 Dipolo FR4

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

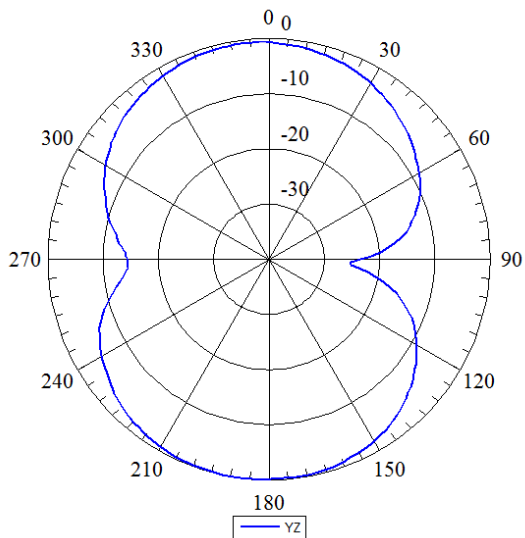
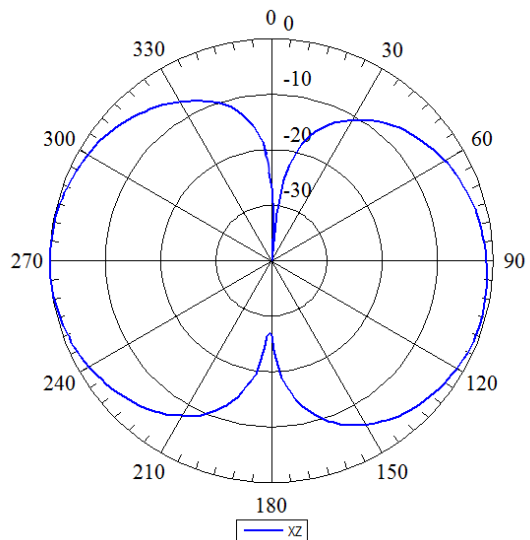
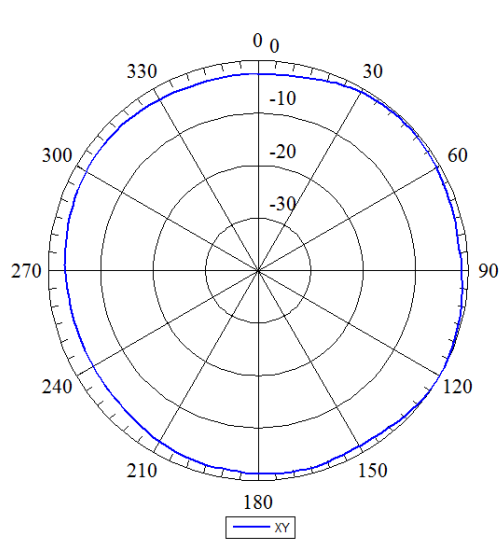


E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

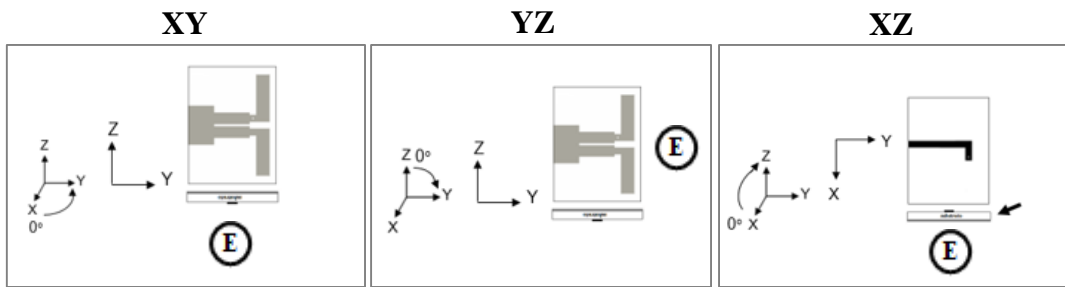


- Diagramas experimentais:



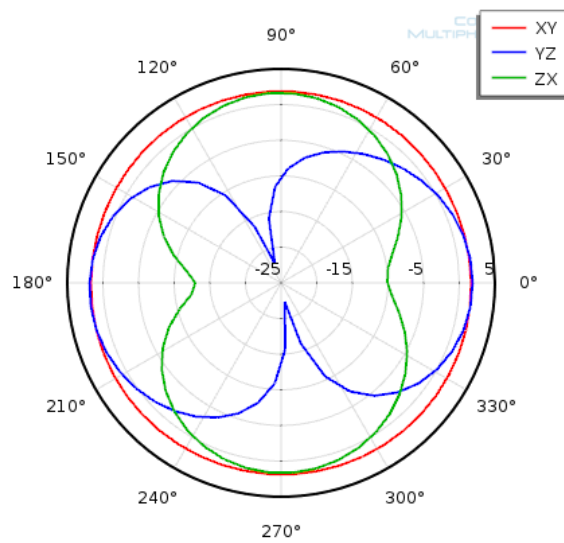
B.2.2 Dipolo Duroid RT/5880

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

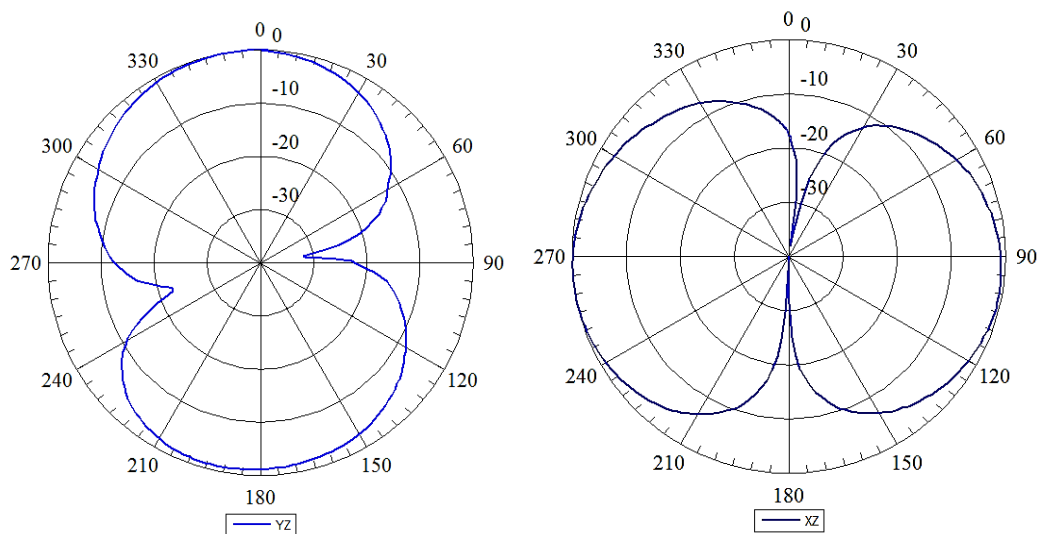


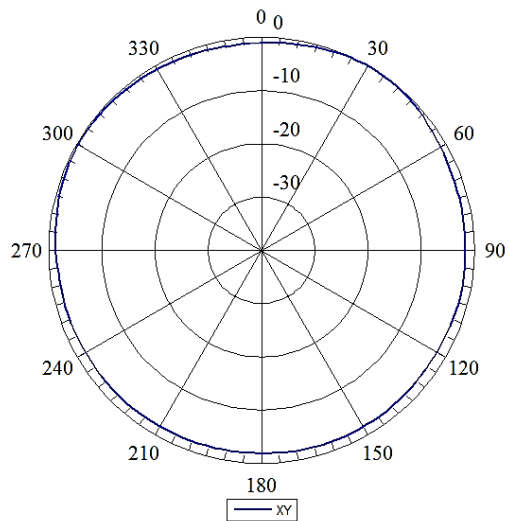
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:



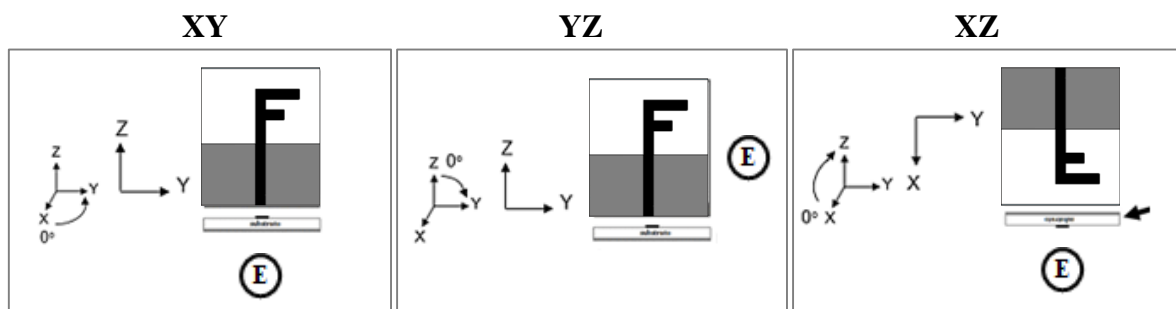
-Diagramas experimentais:





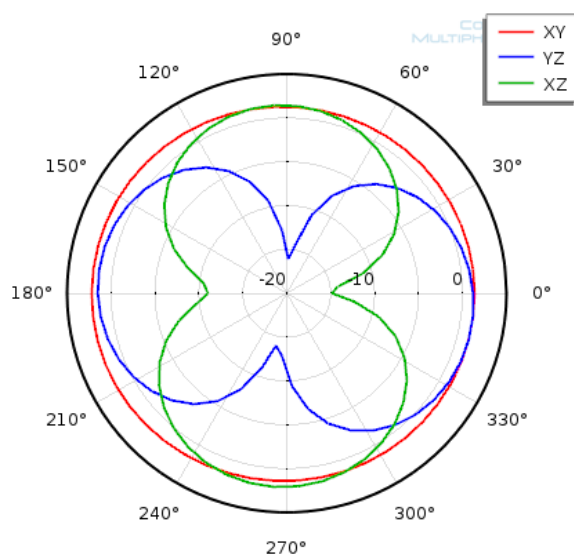
B.2.3 Antena F

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:



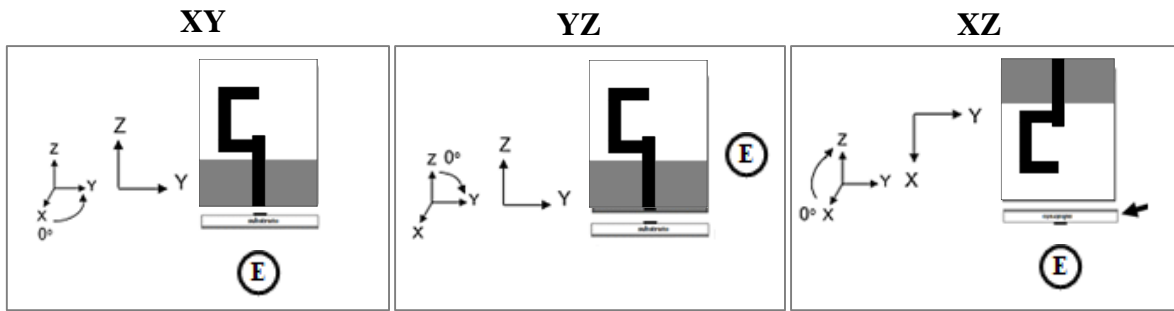
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:



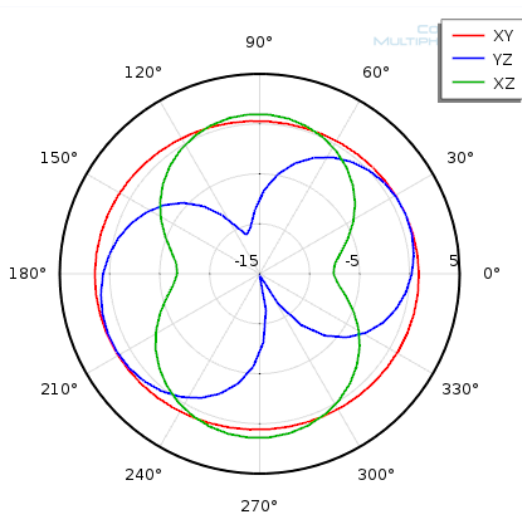
B.2.4 Antena G

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:



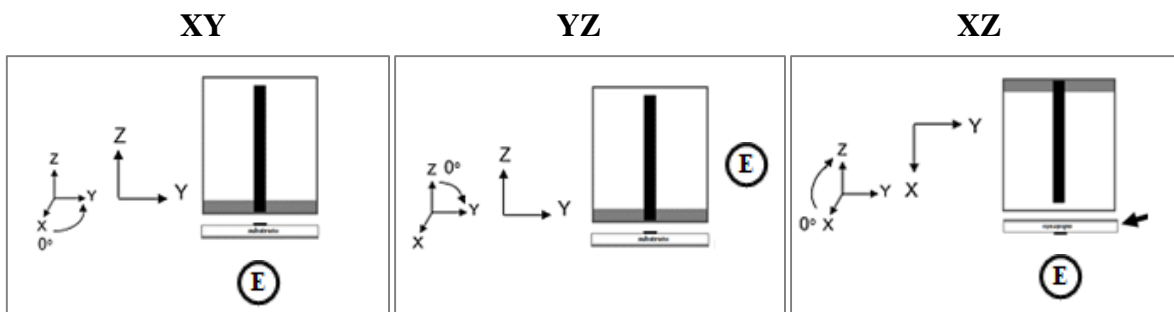
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:



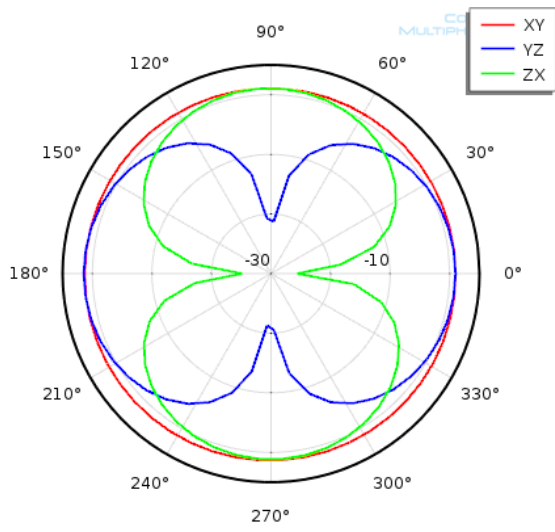
B.2.5 Antena monopolo com plano de massa curto

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

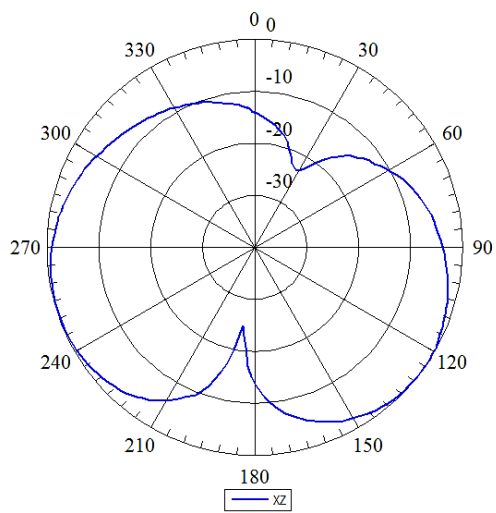
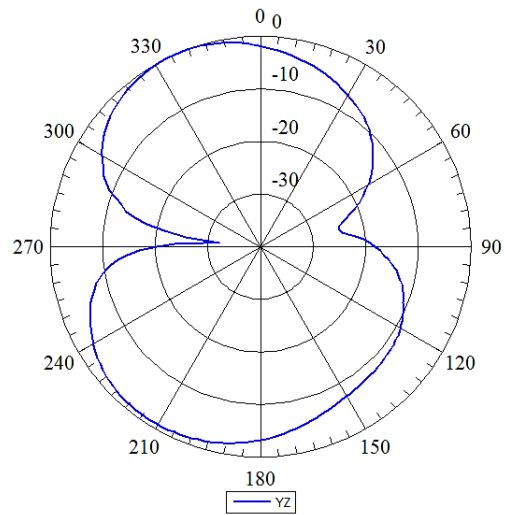
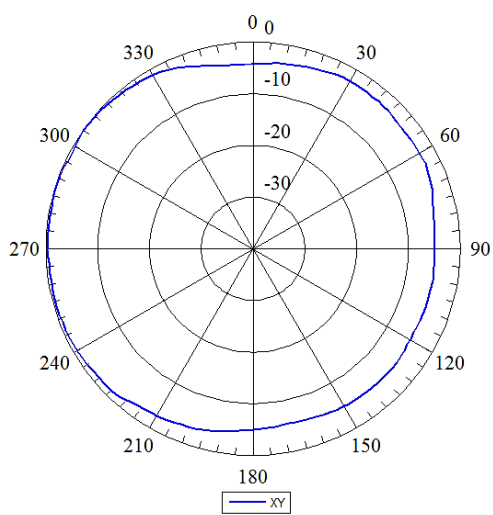


E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

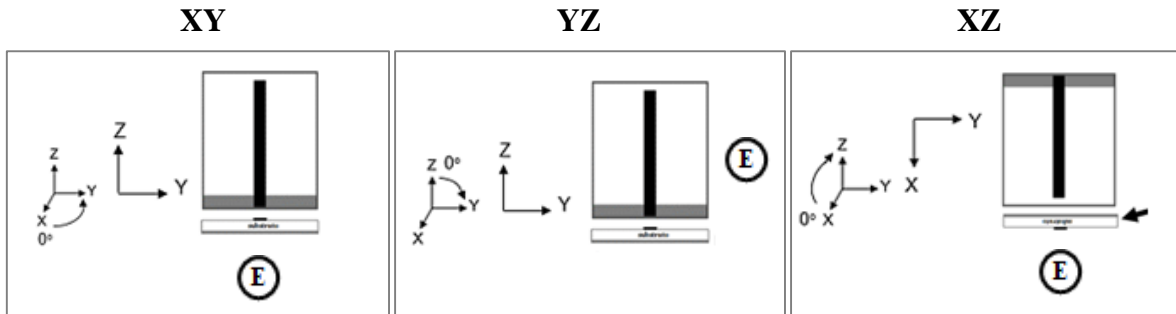


- Diagramas experimentais:



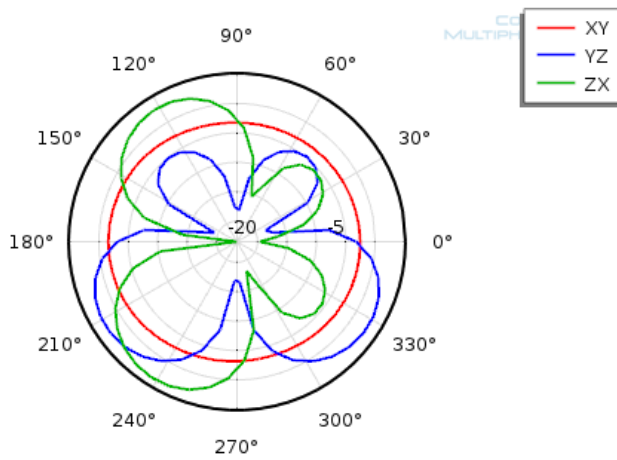
B.2.6 Antena monopolo linear com plano de massa longo

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

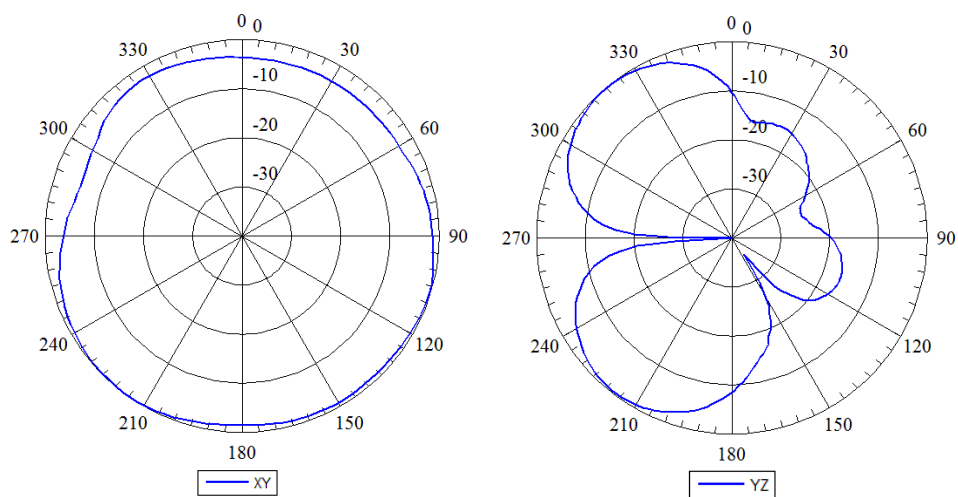


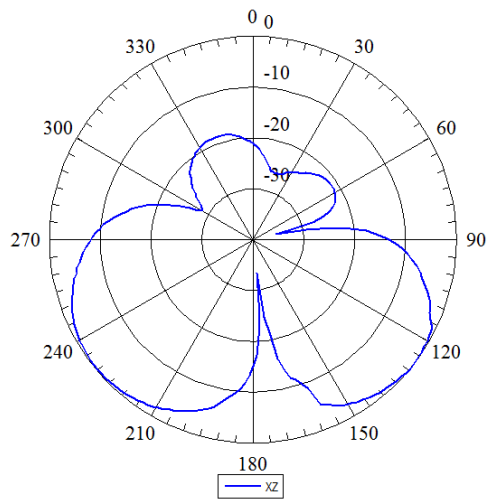
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:



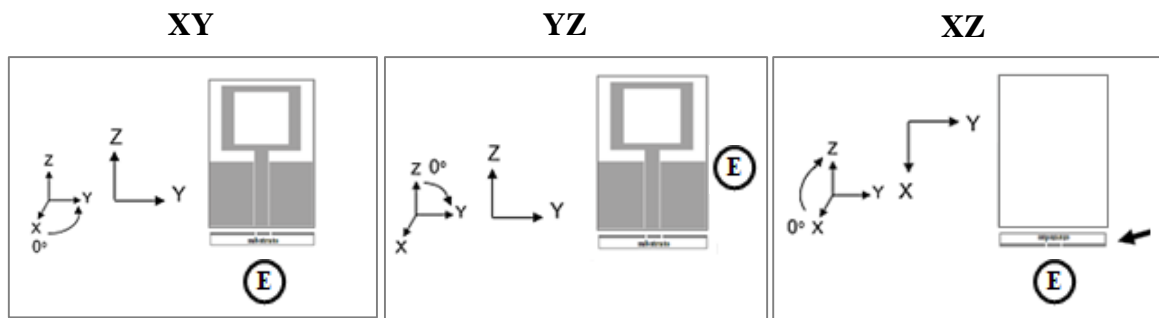
- Diagramas experimentais:





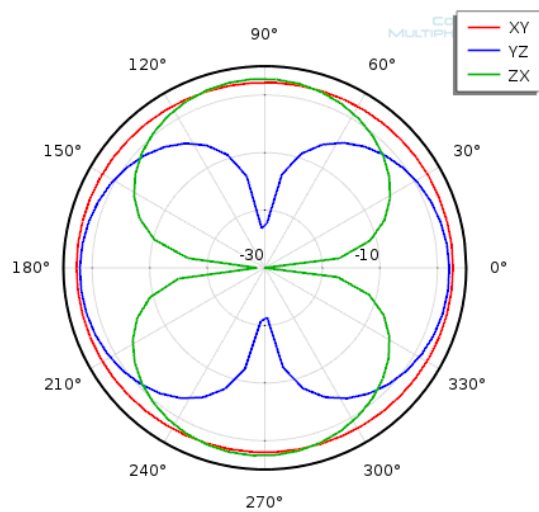
B.2.7 Antena anel retangular

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

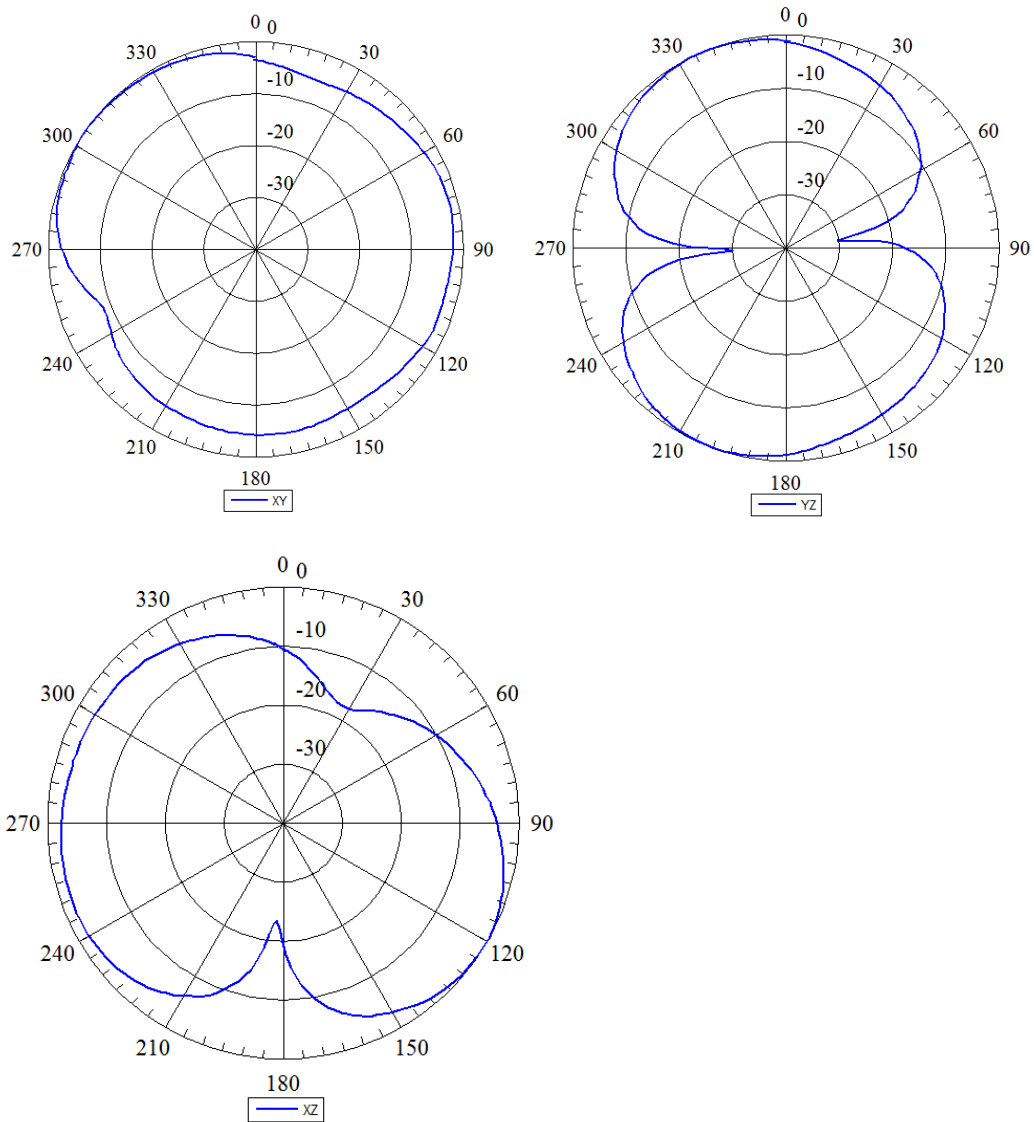


E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

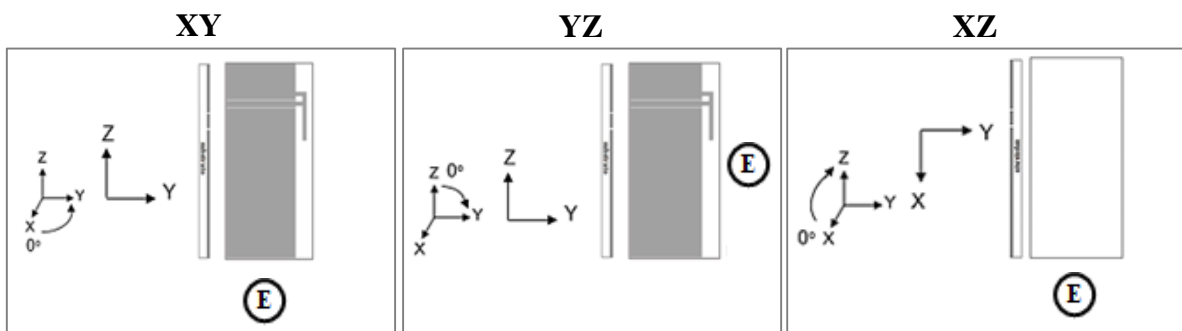


- Diagramas experimentais:



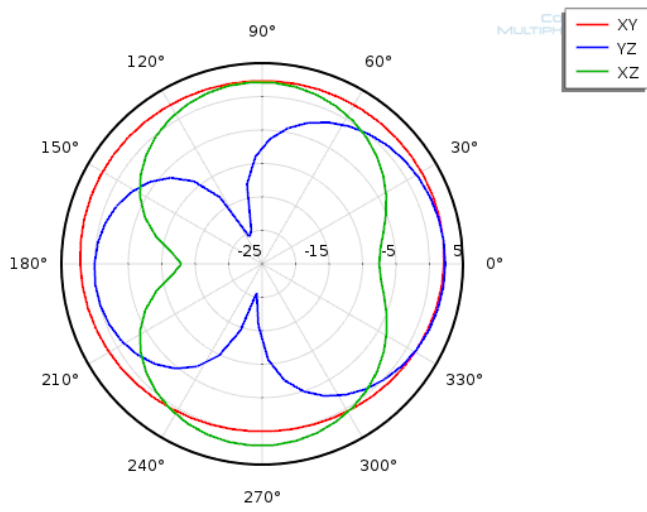
B.2.8 Antena IFA CPW 1

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

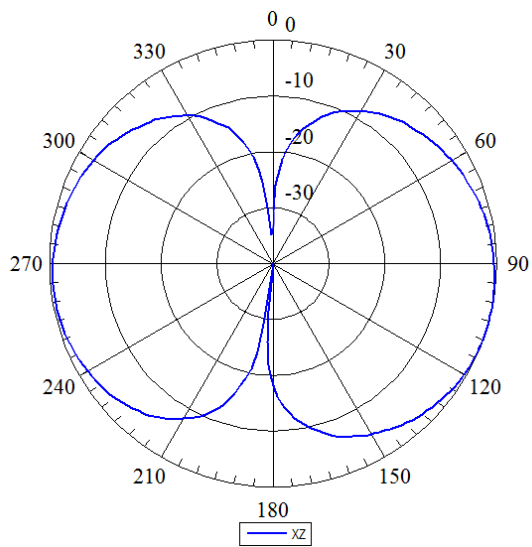
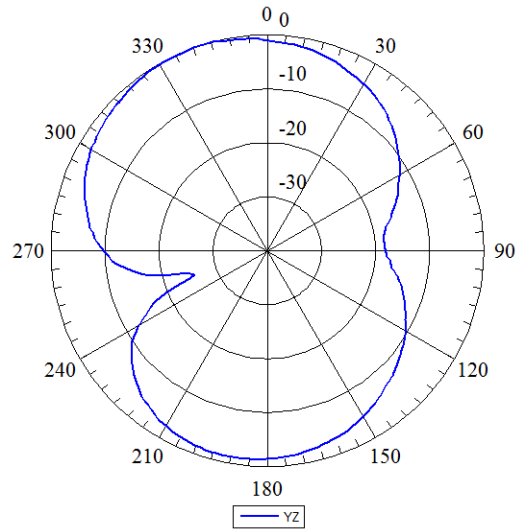
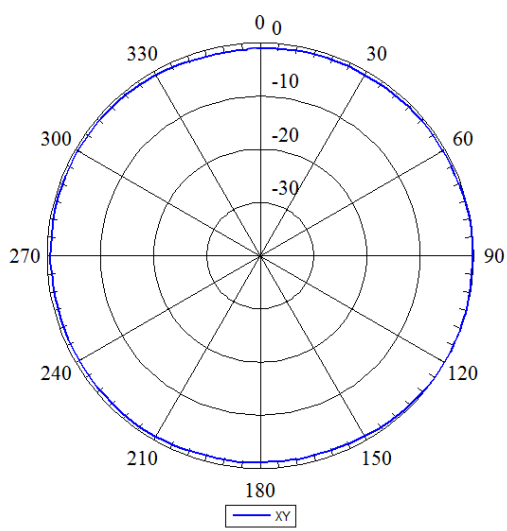


E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

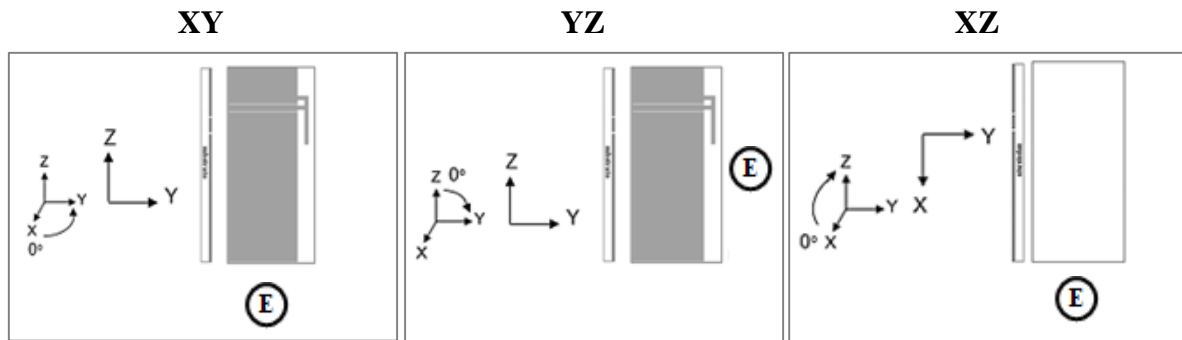


- Diagramas experimentais:



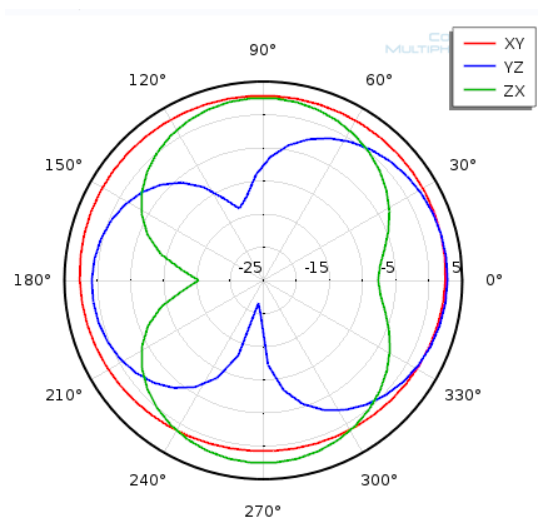
B.2.9 Antena IFA CPW 2

- Posição inicial da antena e sentido de rotação nos diferentes planos XY, YZ, XZ:

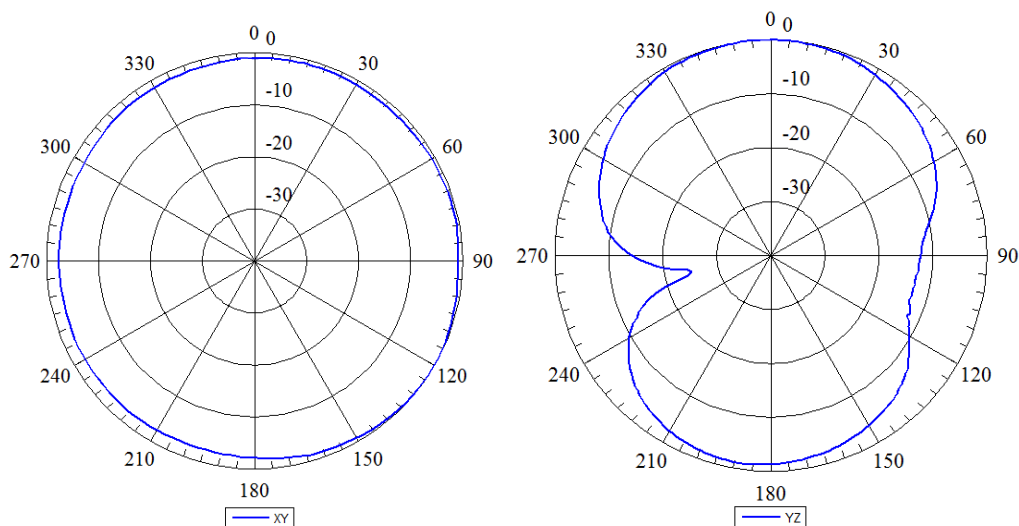


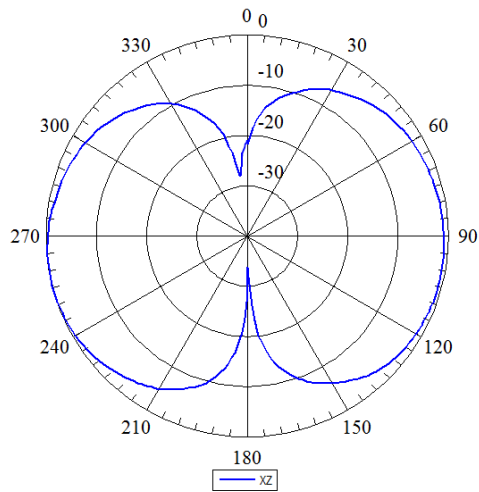
E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

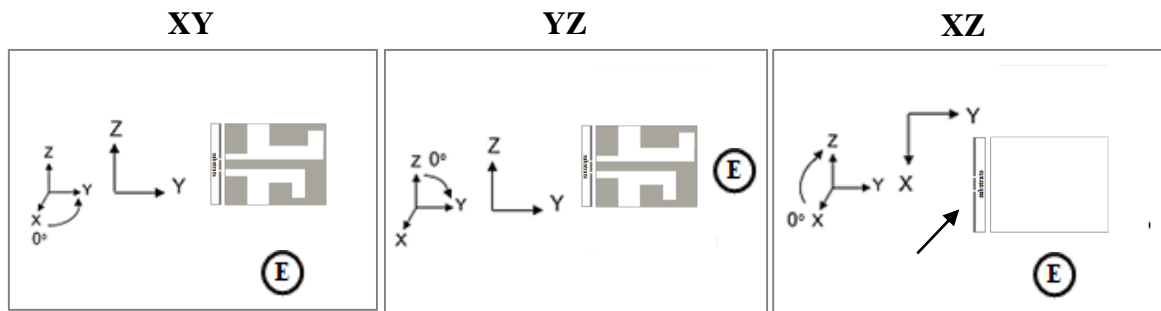


- Diagramas experimentais:



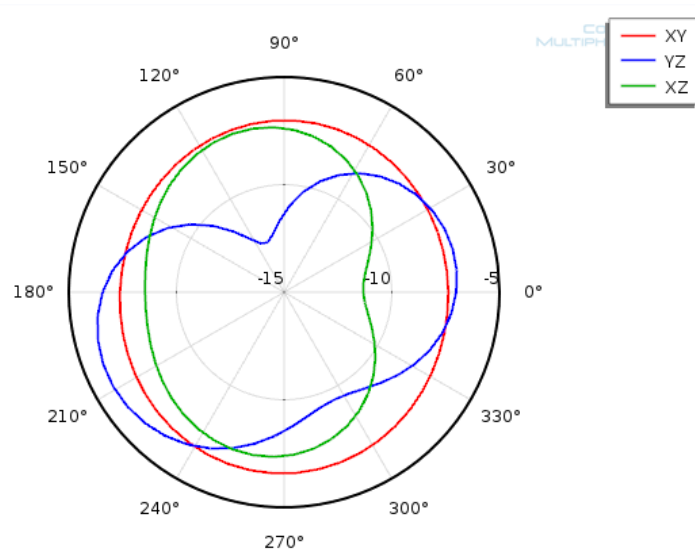


B.2.10 Antena *patch* com *slots*



E – Direção da antena emissora.

- Diagramas da simulação:

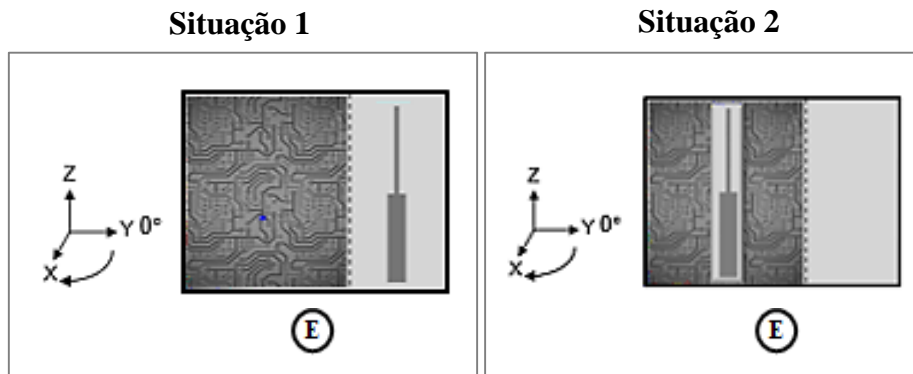


Anexo C

C.1 Antenas metálicas

C.1.1 Antena monopolo com manga 1

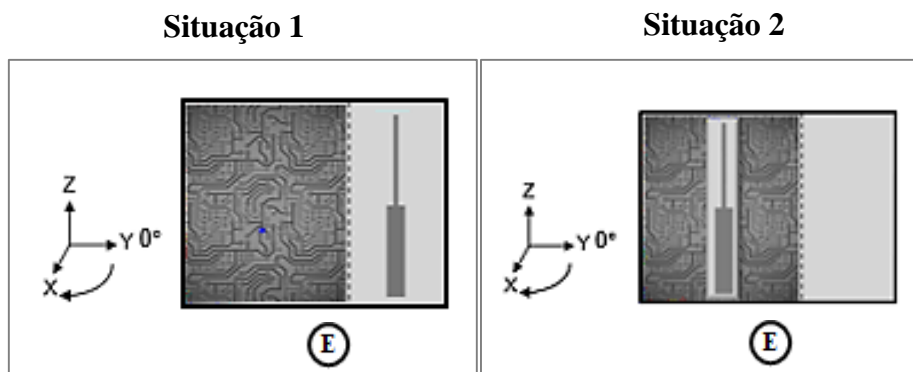
- Posição inicial da antena nas duas situações:



E – Direção da antena emissora.

C.1.2 Antena monopolo com manga 2

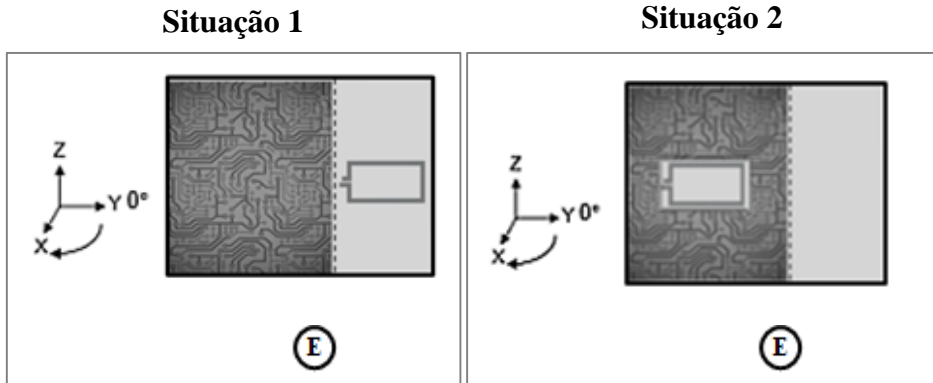
- Posição inicial da antena nas duas situações:



E – Direção da antena emissora.

C.1.3 Antena anel 1

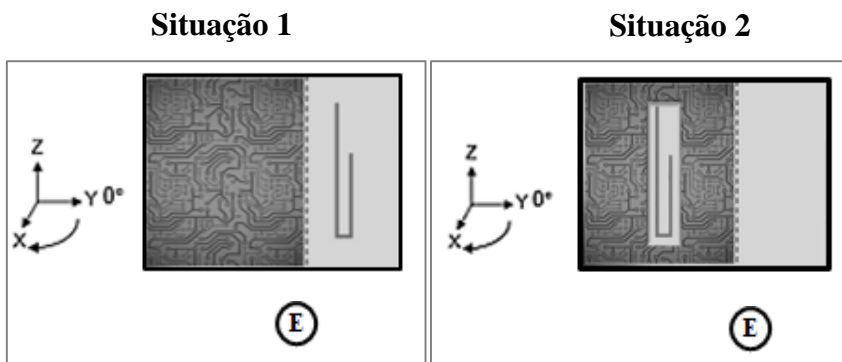
- Posição inicial da antena nas duas situações:



E – Direção da antena emissora.

C.1.4 Antena fio de cobre em “U”

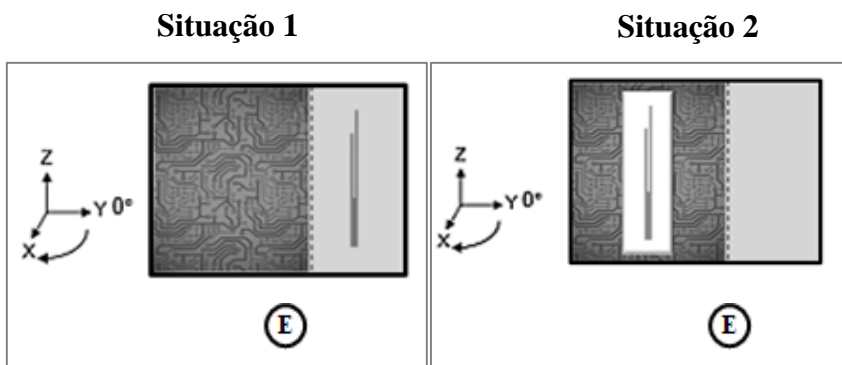
- Posição inicial da antena nas duas situações:



E – Direção da antena emissora.

C.1.5 Antena com ranhura

- Posição inicial da antena nas duas situações:

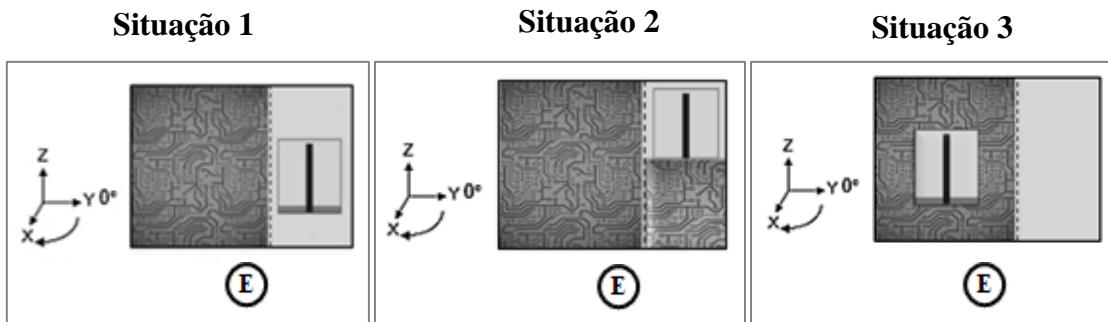


E – Direção da antena emissora.

C.2 Antenas impressas

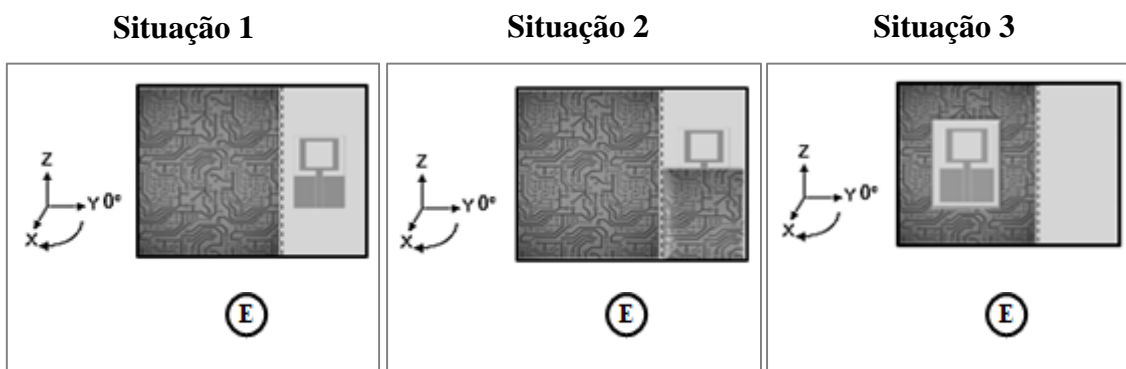
C.2.1 Monopolo com plano de curto e monopolo com plano de massa longo

- Posição inicial da antena nas três situações:



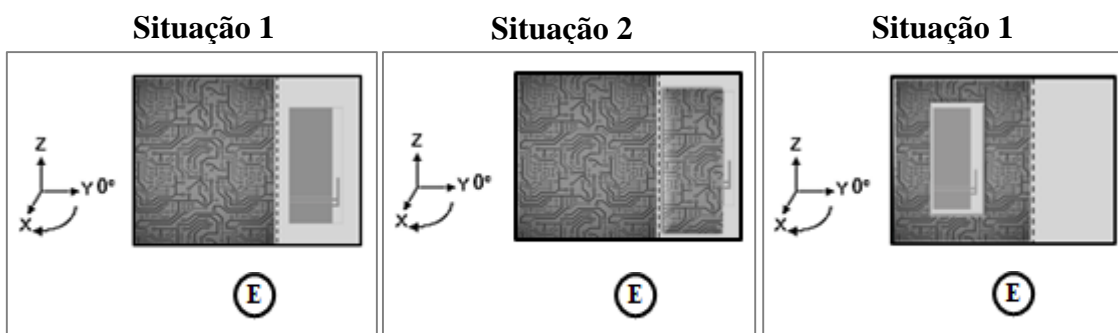
E – Direção da antena emissora.

C.2.2 Antena anel retangular



E – Direção da antena emissora.

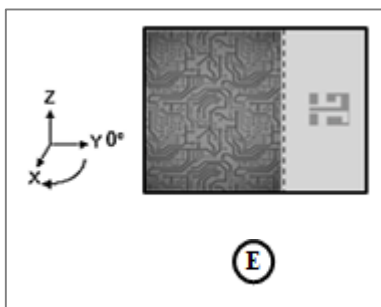
C.2.3 Antena IFA CPW 1 e antena IFA CPW 2



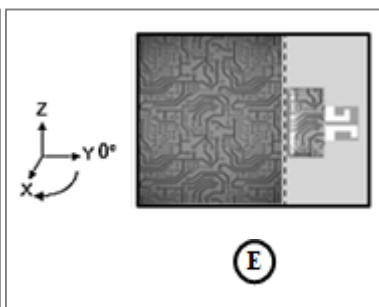
E – Direção da antena emissora.

C.2.4 Antena *patch* com *slots*

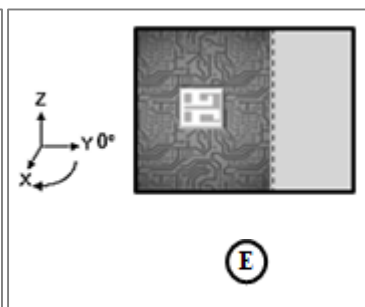
Situação 1



Situação 2



Situação 3



E – Direção da antena emissora.