

Estudo comparativo de duas antenas para transmissão sem fios em 2,4 GHz

Edgar Manuel Branco Ruano

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Carlos de Campos Simões Baptista

Co - Orientadora: Professora Doutora Maria João Marques Martins

Júri

Presidente: Professor Doutor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Professora Doutora Maria João Marques Martins

Vogal: Professora Doutora Maria Emília Morais da Fonseca e Silva da Costa Manso

Outubro 2016

Agradecimentos

Ao longo da elaboração desta dissertação tive ao dispor várias ajudas, todas elas importantes, na elaboração do presente trabalho, às quais gostaria de demonstrar a minha gratidão pelo tempo dispensado.

Quero prestar o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor António Carlos de Campos Simões Baptista, e à minha co-orientadora, Professora Doutora Maria João Marques Martins pelo apoio e disponibilidade prestados.

Um muito obrigado ao Professor Doutor J. L. G. C. Mata, por todo o tempo dispensado no debate de vários assuntos relativos ao trabalho. Ao Professor Marques Dias e ao Engenheiro I. Dionísio agradeço a ajuda na construção da estrutura básica da antena, e ao Senhor Agostinho a introdução dos componentes eletrónicos.

Agradeço ao Engenheiro António Almeida pelo acompanhamento nas medições realizadas e pela dedicação na realização das mesmas.

Um agradecimento ao Instituto de Telecomunicações na pessoa do Professor Carlos Fernandes, e ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, pelas facilidades de teste que foram prestadas.

Um carinhoso agradecimento aos meus pais e padrinhos, pelo apoio e por serem os principais responsáveis pela minha estabilidade e impulsionadores, para permitir chegar com sucesso a esta fase da minha vida.

Resumo

A necessidade de antenas para comunicação com sistemas não tripulados, utilizados pelas Forças Armadas, para realizar tarefas de vigilância e reconhecimento levou ao desenvolvimento deste trabalho.

A presente dissertação tem como objetivo dimensionar e contruir um protótipo de uma antena, que possibilita realizar a comunicação, sem fios entre o operador e os sistemas não tripulados.

Este trabalho teve como foco a otimização e realização prática de uma antena ESPAR (*Electronically Steerable Passive Arrays Radiators*), utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. Esta antena permite um diagrama de radiação direcional e a sua comutação em azimute.

Numa fase inicial a antena foi dimensionada e simulada no programa de simulação 4NEC2X, para operar na banda dos 2,4 GHz. A realização do protótipo envolveu uma fase de construção da estrutura básica e outra de inclusão dos componentes eletrónicos. Após construção, a antena foi testada na câmara anecóica e efetuaram-se as medições dos diagramas de radiação e do módulo do parâmetro de dispersão S_{11} .

Os resultados das medições permitem verificar as características diretivas do diagrama de radiação e a comutação do mesmo em azimute, de acordo com as simulações efetuadas e com os objetivos propostos para esta dissertação.

No final realiza-se a comparação da antena ESPAR construída no âmbito deste projeto, com uma Yagi-Uda impressa, cujo protótipo foi realizado numa dissertação de mestrado antecedente.

Palavras-chave: Antena ESPAR, antena Yagi-Uda, agregados de elementos parasitas, algoritmos genéticos, antenas inteligentes.

Abstract

The need for antennas for communication with unmanned systems used by the military to perform surveillance tasks and recognition tasks led to the development of this work.

This dissertation has the objective to design and build a prototype of an antenna, which is able to perform wireless communication between the operator and unmanned systems.

The work was focused on the optimization and practical use of an ESPAR (Electronically Steerable Passive Arrays Radiators) antenna, using the technique of genetic algorithms. This antenna allows a directional radiation pattern which can be switched in azimuth.

Initially the antenna has been designed and simulated in 4NEC2X simulation program, to operate in the band of 2,4 GHz. The construction of a prototype involved also the construction of a basic structure and the inclusion of electronic components. After construction, the antenna was tested in an anechoic chamber and performed measurements of radiation patterns and the S_{11} parameter were performed.

The measurement results confirmed the characteristics of directive radiation and the switch of the radiation pattern in azimuth, which is in accordance with the performed simulations.

At the end realizes the comparison of ESPAR antenna built as part of this work, with a printed Yagi-Uda, whose prototype was carried out in a previous master's thesis.

Keywords: ESPAR antenna, Yagi-Uda antenna, Switched Parasitic Arrays (SPA), Genetic Algorithm, smart antennas.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas.....	ix
Lista de Acrónimos e Siglas	x
Lista de Símbolos.....	xi
Capítulo 1	13
1 Introdução	13
1.1 Definição do Problema.....	13
1.2 Motivação e Objetivos.....	14
1.3 Estrutura da Dissertação	15
Capítulo 2	16
2 Estado de Arte	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Configuração das antenas.....	16
2.3 Origem das Antenas.....	17
2.4 Evolução Histórica	18
2.5 Princípio Funcionamento	20
2.6 Aplicações Recentes.....	20
2.7 Conclusões	21
Capítulo 3	22
3 Princípio de funcionamento das antenas inteligentes	22
3.1 Introdução	22
3.2 Agregado de Três Elementos	22
3.3 Conclusões	28
Capítulo 4	30
4 Dimensionamento e Otimização da Antena ESPAR	30
4.1 Introdução	30
4.2 Algoritmo Genético	30
4.3 Otimização da Estrutura da Antena	33
4.3.1 Número de Elementos (N_e)	33
4.3.2 Diâmetro dos Monopolos (dm).....	34
4.3.3 Distribuição dos Elementos da Antena	35
4.3.4 Altura dos Monopolos (hm)	38
4.4 Otimização das Reatâncias	38
4.5 Plano de Terra	41
4.6 Conclusões	45
Capítulo 5	48
5 Antena ESPAR	48
5.1 Introdução.....	48
5.2 Projeto da Antena.....	48

5.3	Estrutura Básica	49
5.4	Inclusão dos componentes eletrônicos	50
5.5	Preparação da antena para teste	51
5.6	Conclusões	52
Capítulo 6		54
6	Resultados experimentais	54
6.1	Introdução	54
6.2	Impedância da antena	54
6.3	Módulo do parâmetro de dispersão S11.....	55
6.4	Diagramas de radiação	58
6.4.1	Polarização e polarização cruzada	60
6.4.2	Variação azimutal do lobo principal	61
6.4.3	Máximo na direção da bissetriz dos monopolos	63
6.4.4	Verificação de simetria	65
6.5	Comparação das simulações com os resultados experimentais.....	67
6.6	Conclusão	68
Capítulo 7		70
7	Comparação com a antena Yagi-Uda impressa e conclusões finais	70
7.1	Introdução	70
7.2	Comparação com Yagi-Uda impressa	70
7.3	Considerações finais	72
7.4	Contribuições originais	74
7.5	Perspetivas de trabalho futuro.....	75
Referências Bibliográficas.....		76
Anexos		79
Anexo A.....		80
Anexo B.....		81
Anexo C.....		82
Anexo D.....		83
Anexo E.....		84

Índice de Figuras

Figura 1 – Jaguar 4x4.....	13
Figura 2 – UAV Asa-Voadora	13
Figura 3 - Esquema da antena Yagi-Uda.....	16
Figura 4 - Esquema da antena ESPAR.....	17
Figura 5 - Esboço do modelo de Harrington	18
Figura 6 - Exemplos de comutação em azimute do diagrama de radiação de um agregado com elementos parasitas	19
Figura 7 – Esquema do projeto ESPAR.....	19
Figura 8 - Esquema de uma ESPAR de três elementos (esquerda) e de cinco elementos (direita)....	22
Figura 9 - Esquema elétrico do agregado de três elementos	23
Figura 10 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 0^\circ$)	27
Figura 11 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)	27
Figura 12 - Diagrama de radiação 3D do agregado de três elementos.....	28
Figura 13 - Esquema da direção do máximo de radiação no agregado de três elementos	28
Figura 14 - Fluxograma da aplicação do AG à antena ESPAR	32
Figura 15 - Esquema da antena ESPAR de 6 elementos.....	35
Figura 16 - Distribuição dos monopolos.....	35
Figura 17 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 0^\circ$)	36
Figura 18 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)	36
Figura 19 - Diagrama de radiação em 3D.....	36
Figura 20 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 180^\circ$).....	37
Figura 21 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)	37
Figura 22 - Diagrama de radiação em 3D.....	37
Figura 23 - Esquema elétrico aplicado a cada monopolo parasita	38
Figura 24 - Diagrama de radiação no plano E ($\varphi = 0^\circ$).....	39
Figura 25 - Diagrama de radiação no plano H ($\theta = 90^\circ$)	39
Figura 26 - Diagrama de radiação em 3D.....	40
Figura 27 - Diagrama de radiação em 3D.....	41
Figura 28 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 355^\circ$).....	42
Figura 29 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 55^\circ$)	42
Figura 30 - Diagrama de radiação em 3D.....	43
Figura 31 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 0^\circ$)	43
Figura 32 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)	43
Figura 33 - Diagrama de radiação em 3D.....	44
Figura 34 - Planta da antena ESPAR.....	48
Figura 35 - Vista tridimensional superior da antena a construir.....	49
Figura 36 - Alçado lateral da Antena.....	49

Figura 37 – Fotografias parte inferior (esquerda) e superior (direita) da estrutura básica da antena ESPAR construída.....	50
Figura 38 - Componentes eletrônicos associados aos monopolos	50
Figura 39 - Placa de circuito impresso fixa a placa de esferovite	51
Figura 40 - Diagrama de blocos do sistema de controlo dos elementos parasitas	51
Figura 41 - Circuito do dispositivo de controlo dos monopolos parasitas.....	52
Figura 42 - Sistema de controlo dos monopolos parasitas.....	52
Figura 43 - Curva da impedância da antena na Carta de Smith obtida no analisador de redes	55
Figura 44 - Imagem da realização de medidas no laboratório de radiofrequência IST	56
Figura 45 - Módulo do S_{11} para o varrimento de frequências executado.....	57
Figura 46 - Variação do módulo do S_{11} para as combinações da tabela 8.....	58
Figura 47 - Gerador de sinal e recetor de sinal (exterior da câmara anecóica).....	59
Figura 48 - Antena no posicionador da câmara anecóica.....	59
Figura 49 - Diagrama de radiação plano E	60
Figura 50 - Diagrama de radiação plano H	61
Figura 51 - Diagrama de radiação plano E	62
Figura 52 - Diagrama de radiação plano H	62
Figura 53 - Esquema ilustrativo das direções dos máximos prevista em simulação.....	63
Figura 54 - Diagrama de radiação plano E	64
Figura 55 - Diagrama de radiação plano H	64
Figura 56 - Esquema ilustrativo das direções do máximo previstas em simulação.....	66
Figura 57 - Diagrama de radiação plano E	66
Figura 58 - Diagrama de radiação plano H	67
Figura 59 – Protótipo da antena Yagi-Uda impressa	70
Figura 60 - Protótipo da antena ESPAR sobre o suporte de madeira que serviu para fixação.....	70
Figura 61 - Efeitos na comunicação: A (maior largura de feixe) e B (menor largura de feixe).....	72

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Dimensões do agregado de três elementos	23
Tabela 2 - Características de radiação das antenas de 6 e 7 elementos	34
Tabela 3 - Reatâncias ótimas obtidas em simulação.....	40
Tabela 4 – Inversão das reatâncias ótimas obtidas em simulação.....	41
Tabela 5 - Variáveis otimizadas da ESPAR de 6 elementos	46
Tabela 6 - Características de radiação da ESPAR de 6 elementos	46
Tabela 7 - Valor de tensão aplicada para obter as reatâncias máximas e mínimas	56
Tabela 8 - Combinações de tensão aplicadas aos monopolos parasitas	57
Tabela 9 - Combinações de tensão aplicadas aos díodos nas medições	60
Tabela 10 - Comparação de resultados obtidos em simulação com resultados experimentais	68
Tabela 11 - Síntese das características de radiação da antena ESPAR de 6 elementos	69
Tabela 12 - Síntese das características de radiação da antena Yagi-Uda impressa	71

Lista de Acrónimos e Siglas

ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AG	Algoritmo genético
ATR	Advanced Telecommunications Research
CW	Clockwise
dB	Decibel
DEEC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores
DoA	Direção de chegada (Direction of Arrival)
DR	Diagrama de radiação
DVB-T	Terrestrial Digital Video Broadcasting
ESPAR	Electronically Steerable Parasitic Array Radiator
FA	Forças Armadas
FRR	Front Rear Relation
IST	Instituto Superior Técnico
IT	Instituto de Telecomunicações
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MISO	Multiple Input, Single Output
PC	Personal Computer
PITVANT	Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não-Tripulados
Plano E	Plano do Campo Elétrico
Plano H	Plano do Campo Magnético
RF	Radio frequência
RFT	Relação Frente-Trás
ROVIM	Robô de Vigilância de Instalações Militares
SIC-T	Sistema de Informação e Comunicações Tático
SIMO	<i>Single Input, Multiple Output</i>
SINR	<i>Signal to Interference Noise Ratio</i>
SMA	SubMiniature Version A
SPA	Switched Parasitic Arrays
SWR	Coeficiente de onda estacionária (Standing Wave Ratio)
TO	Teatro de Operações
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UGV	Unmanned Ground Vehicles
US	Sistemas não tripulados (Unmanned Systems)
USV	Unmanned Surface Vehicles
WLAN	Wireless Local Area Network
WPBW	Largura de feixe a meia potência (Half-power Beamwidth)
3D	3 dimensões

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
c	Velocidade da luz	[m/s]
C	Capacidade	[F]
d	Distância entre dipolos	[m]
d_m	Diâmetro dos monopolos	[m]
d_0	Diâmetro dos furos no plano de terra	[m]
E	Campo elétrico	[V/m]
f	Frequência	[Hz]
f_D	Fator direcional	-
\bar{F}	Fator espacial do agregado	-
G	Ganho	[dB]
h_e	Altura efetiva	[m]
h_m	Altura dos monopolos	[m]
h_s	Altura da aba do plano terra	[m]
H	Campo magnético	[A/m]
I	Corrente elétrica	[A]
k	Constante de propagação	[rad/m]
\bar{K}_s	Fator de reflexão na carga de uma linha	-
L	Comprimento do monopolo	[m]
N_e	Número de elementos	-
p	Coeficiente de onda estacionária	-
r_a	Raio dos dipolos	[m]
r_g	Raio do plano terra	[m]
r_p	Distância entre o monopolo ativo e os monopolos parasitas	[m]
R	Parte real de uma impedância – Resistência	[Ω]
R_a	Resistência da antena	[Ω]
S_{11}	Parâmetro de dispersão	-
V	Tensão	[V]
V_m	Tensão aplicada aos monopolos parasitas	[V]
X	Parte imaginária de uma impedância – reatância	[Ω]
X_a	Reatância da antena	[Ω]
X_m	Reactâncias dos monopolos parasitas	[Ω]
Z_{dd}	Impedância própria do dipolo	[Ω]
Z_L	Impedância da antena	[Ω]
Z_M	Impedância mutua	[Ω]
Z_s	Impedância característica do cabo de alimentação	[Ω]

Símbolo	Significado	Unidade
Z_{in}	Impedância de entrada	[Ω]
Z_0	Impedância característica	[Ω]
α	Fase das correntes de excitação	[rad]
β	Diferença de excitação de fase das correntes	[rad]
δ	Profundidade de penetração	[m]
ϵ_0	Permitividade dielétrica do vácuo	[F/m]
ϵ_r	Permitividade dielétrica relativa	-
θ	Ângulo	[$^\circ$] ou [rad]
λ	Comprimento de onda em espaço livre	[m]
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	[H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	-
ρ	Coefficiente de onda estacionária	-
σ_M	Condutividade elétrica de um metal	-
φ	Ângulo	[$^\circ$] ou [rad]
Ψ	Ângulo	[$^\circ$] ou [rad]
ω	Frequência angular	[rad/s]

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Definição do Problema

Ao longo dos últimos anos houve uma grande evolução do conceito de Defesa das várias forças militares e nos diversos TO (Teatros de operações). Nos dias de hoje as FA (Forças Armadas) dos países mais desenvolvidos têm ao seu dispor as tecnologias mais inovadoras. O desenvolvimento destas permite, por parte de quem as possui, o domínio do teatro de operações em caso de conflito.

As telecomunicações desempenham um papel fundamental na Defesa do próprio país. Os meios tecnológicos estão em evolução e as tecnologias mais recentes permitem obter informações de forma rápida e com elevada credibilidade [1], com o objetivo principal de detetar, eliminar ou causar baixas ao inimigo de forma eficaz.

No âmbito militar, para vigilância e reconhecimento do TO para a obter informações, são utilizados cada vez mais sistemas não tripulados, denominados de US (*Unmanned Systems*). Os US são divididos em UGV (*Unmanned Ground Vehicle*) para as situações terrestres, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) em ambiente aéreo e USV (*Unmanned Surface Vehicle*) em ambiente marítimo. Estes sistemas permitem a recolha de um vasto número de informações pois estão apetrechados com câmaras, sensores, microfones e localizadores, entre outros equipamentos, que permitem reconhecer e visualizar o TO em tempo real para a obtenção de informações de forma segura [2].

O Exército Português tem desenvolvido robots para vigilância terrestre, que estão integrados num projeto denominado ROVIM (Robot de Vigilância de Instalações Militares) e recentemente estão a ser realizados estudos para a aplicação de drones no âmbito do SIC-T (Sistema de Informação e Comunicações Tático) [3]. A Força Aérea Portuguesa também tem construído aeronaves não tripuladas, para aplicação a nível militar, sendo estas aeronaves integradas num projeto denominado PITVANT (Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não-Tripulados) [4].

As figuras 1 e 2 apresentam o robot Jaguar 4x4 e o UAV Asa-Voadora, que são utilizados pelo Exército e a Força Aérea respetivamente.



Figura 1 – Jaguar 4x4



Figura 2 – UAV Asa-Voadora [4]

Atualmente estão a ser realizadas várias atualizações a estes sistemas não-tripulados de forma a melhorar as suas características, para os tornar mais adequados ao meio em que vão atuar. A nível de comunicação estes robots comunicam sem fios (*wireless*), na banda dos 2,4 GHz com um operador que os está a controlar a uma certa distância. O robot possui uma antena direcionável do tipo monopolo, enquanto que o operador tem de possuir uma antena que comunique na mesma banda de frequências e que possua algumas características que são essenciais para a utilização a nível militar. Essas características são a robustez, dimensão reduzida e um diagrama de radiação diretivo e com a possibilidade de variar o feixe de radiação em azimute [2].

1.2 Motivação e Objetivos

Esta dissertação surge no contexto do tópico anterior. Para a comunicação com os sistemas não tripulados, é necessário construir antenas, as quais têm de cumprir os requisitos anteriormente mencionados. Nesta dissertação pretende-se realizar o estudo comparativo entre duas antenas para transmissão sem fios em 2,4 GHz, nomeadamente a antena Yagi-Uda impressa com eletrónica incluída (protótipo já existente) e a antena ESPAR (*Electronically Steerable Passive Arrays Radiators*), contruída no âmbito desta dissertação de mestrado. A antena Yagi-Uda permite a regulação da largura do lobo principal (-3 dB), ou seja, a HPBW (Largura de feixe a meia potência) [5] [6]. A antena ESPAR possibilita obter uma diretividade variável. A antena Yagi-Uda foi construída numa dissertação de mestrado antecedente e esta vai ser abordada no último capítulo para comparação com a antena ESPAR contruída. Estas pertencem à categoria das antenas inteligentes, devido à inclusão de componentes eletrónicos.

A componente prática desta dissertação é elevada, visto que a antena ESPAR é constituída por uma estrutura básica em cobre e também inclui componentes eletrónicos o que implicou a consulta de vários componentes e a inclusão dos mesmos na antena. O dimensionamento e otimização desta antena, e construção do protótipo, revelam importância para aplicação no meio militar, daí o interesse no seu estudo, otimização e construção. As etapas realizadas para a conclusão desta dissertação são a simulação da antena através da utilização do programa de simulação 4NEC2X, a construção e teste das características de radiação da antena ESPAR.

O contributo desta dissertação é útil para o Exército Português, pois a aplicação desta antena a nível militar é uma mais-valia. Para além da utilidade que representa para ambos os ramos das Forças Armadas, também é um complemento essencial para a minha formação visto que sou Oficial da Arma de Transmissões do Exército. Ao longo deste trabalho adquiri competências no projeto e realização prática de antenas, na simulação e medição das características de radiação.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação de mestrado encontra-se organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1, Introdução. Neste capítulo encontra-se o enquadramento da importância das tecnologias mais recentes, na perspetiva das Forças Armadas. Também são apresentados os objetivos e a motivação do autor na realização da presente dissertação e a estrutura da mesma.
- Capítulo 2, Estado da Arte. Contém a informação relativa à evolução das antenas inteligentes, a sua constituição, o princípio de funcionamento e as aplicações recentes a que estas se destinam.
- Capítulo 3, Princípio de funcionamento das antenas inteligentes. Este capítulo inclui o modelo teórico de um agregado de três elementos. Este é a base das antenas Yagi-Uda e ESPAR. Assim sendo esta primeira abordagem revela importância para perceber o seu princípio de funcionamento.
- Capítulo 4, Dimensionamento e otimização da antena ESPAR. Contém os vários passos com vista à otimização da antena ESPAR. Estão apresentadas as simulações executadas no programa 4NEC2X.
- Capítulo 5, Antena ESPAR de 6 elementos. Construção da antena ESPAR. Contém a informação e imagens ilustrativas da construção do protótipo.
- Capítulo 6, Resultados Experimentais. Neste capítulo apresentam-se as medições efetuadas no laboratório de radiofrequência 2 e na câmara anecóica do DEEC (Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores) IST (Instituto Superior Técnico) e do IT (Instituto de Telecomunicações).
- Capítulo 7, Análise dos resultados e conclusões finais. Este capítulo contém a comparação dos resultados simulados com os resultados obtidos experimentalmente. Comparação da antena construída com a antena Yagi-Uda impressa que inclui componentes eletrónicos. No final são apresentadas as conclusões, as contribuições e propostas futuras do presente trabalho.

Capítulo 2

2 Estado de Arte

2.1 Introdução

O desenvolvimento das comunicações sem fios, na banda das micro-ondas (2,4 GHz), levou ao aparecimento de vários tipos de antenas para operar nessa banda de frequência [7].

Os sistemas sem fios podem ser causadores de erros de sinal, devido à propagação multipercurso e à interferência dos sinais existentes no meio. Com a utilização de antenas orientáveis, que permitem direcionar o feixe de radiação para uma determinada zona específica, é possível melhorar a relação sinal-ruído, SINR (*Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*) [8].

Quando se pretendem obter diretividades elevadas e formas específicas do diagrama de radiação, não se podem utilizar antenas lineares, pois este tipo de antenas radia de forma isotrópica em azimute, tendo um ganho reduzido. A necessidade de antenas diretivas e com diagramas de radiação com formas específicas, levou ao desenvolvimento dos agregados de antenas. Estes estão dispostos ao longo de um eixo ou plano, de acordo com uma determinada topologia. O efeito conseguido pelos agregados resulta dos campos originados pelas antenas individuais que vão interferir entre si, criando máximos e nulos de radiação em direções previamente definidas [9].

As antenas Yagi-Uda e ESPAR são agregados de antenas em que apenas um elemento está ativo sendo os restantes elementos passivos. Estas antenas podem exibir um máximo de radiação para uma determinada direção, e nulos de radiação para outras, permitindo a utilização com vantagem em diversas aplicações.

2.2 Configuração das antenas

As antenas Yagi-Uda são constituídas por um único elemento ativo (dipolo) x_2 e por vários elementos parasitas, x_1, x_3, x_4, x_5 , que normalmente se encontram em curto-circuito. A figura 3 demonstra a disposição dos elementos na Yagi-Uda [10].

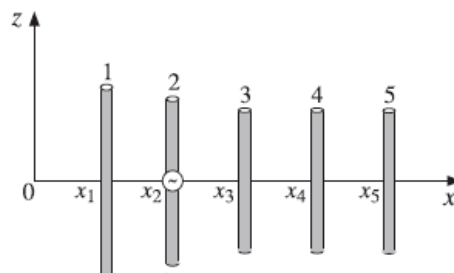


Figura 3 - Esquema da antena Yagi-Uda [10]

O dipolo de dimensões superiores é o elemento x_1 , que atua como elemento refletor, enquanto os elementos x_3, x_4, x_5 têm dimensões mais reduzidas e vão atuar como elementos diretores.

A antena Yagi-Uda convencional apresenta um ganho elevado e uma estrutura simples, o que permite uma construção rápida e pouco complexa. A otimização desta antena depende da variação do comprimento dos elementos [11], do espaçamento dos elementos [12] e variação de comprimento e espaçamento em simultâneo [13].

A antena ESPAR é constituída por um elemento central (ativo) x_2 e os restantes elementos que o rodeiam denominam-se de elementos passivos, $x_1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$. Na figura 4 observa-se o esquema da antena ESPAR e a disposição dos elementos.

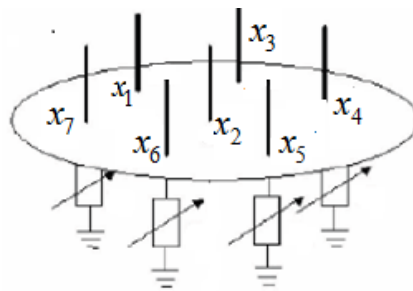


Figura 4 - Esquema da antena ESPAR

Os elementos que constituem a antena têm dimensões idênticas e estão dispostos sobre um plano de terra, sob o qual se encontram as cargas reativas necessárias para variar o comprimento elétrico. O comportamento de um elemento como diretor ou refletor depende da inclusão das reatâncias nos elementos parasitas. Caso o elemento seja carregado com uma reatância capacitiva, adquire caráter diretor, se for carregado com uma reatância indutiva adquire um caráter refletor. Para que o elemento seja carregado com uma reatância capacitiva ou indutiva é necessário um circuito de controlo. Na configuração da antena ESPAR, apenas existe um elemento ativo, pelo que não há necessidade de utilizar um repartidor de potência. A denominação de elemento ativo advém do facto de ser o único elemento ligado a um circuito RF (Radio frequência). Esta configuração permite diminuir a complexidade e o consumo de energia [14].

2.3 Origem das Antenas

A antena Yagi-Uda foi desenvolvida a partir do estudo dos agregados, em meados de 1920. Inicialmente foi aplicada na receção de televisão analógica. Neste período, os agregados eram caracterizados por terem um diagrama de radiação fixo, ausência de processamento digital e a variação do diagrama de radiação era conseguida através da alteração da posição da antena. Estes agregados eram constituídos por um único elemento ativo (normalmente um dipolo dobrado) e por vários elementos parasitas. Assim sendo, não é necessário adicionar um repartidor de potência à antena, que provocaria um aumento da complexidade e custo. O funcionamento deste tipo de agregados tem por base o acoplamento mútuo entre os vários elementos que constituem a antena.

Na década de 1970, houve um avanço importante nos agregados de antenas, com o aparecimento dos agregados com processamento digital incorporado, conhecidos por antenas inteligentes [9]. A inclusão de componentes eletrônicos nos agregados e a utilização de uma unidade de processamento, possibilitou o controlo dos diagramas de radiação de modo a orientar os máximos e os nulos de radiação para determinadas zonas específicas [9].

Esta dissertação de mestrado aborda duas antenas que podem ser incluídas na categoria de antenas inteligentes, pois contêm componentes eletrônicos que permitem alterar as características de radiação da configuração básica das mesmas.

2.4 Evolução Histórica

No modelo original da antena Yagi-Uda, o diagrama de radiação era fixo e dependia da topologia do agregado, do comprimento dos dipolos e da frequência. Em 1978, Roger F. Harrington criou o conceito de agregado com características diretoras, em que os elementos do agregado eram controlados por reatâncias. Este era constituído por um dipolo central, rodeado por um anel de seis dipolos parasitas. A figura 5 ilustra o modelo de Harrington, em que cada dipolo parasita é carregado com uma carga reativa com um valor fixo, assinalada pela letra x [14].

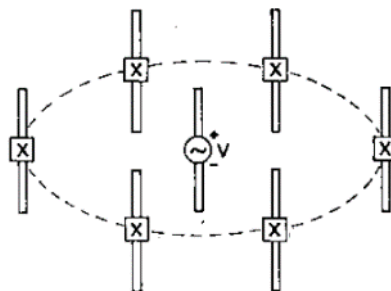


Figura 5 - Esboço do modelo de Harrington [14]

Anos mais tarde, investigadores propuseram um projeto para criar um agregado com elementos eletrônicos incorporados. Normalmente, estes incluem comutação de circuitos que permitem ligar e desligar certos elementos do circuito (diodos PIN), ou variar o comprimento elétrico dos monopolos parasitas (diodos *varicap*¹), com o intuito de modificar os diagramas de radiação.

A figura 6 mostra o comportamento do diagrama de radiação alterando a disposição dos vários elementos parasitas, que podem estar em curto-circuito ou em circuito aberto. É possível verificar que o diagrama de radiação apresenta maior ganho na direção do elemento parasita em curto-circuito. Tomando em consideração os exemplos representados é possível verificar a comutação em azimute.

¹ Díodo de capacidade variável

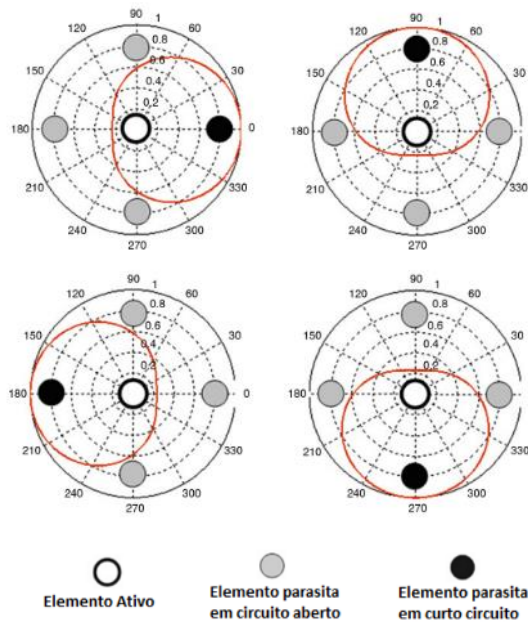


Figura 6 - Exemplos de comutação em azimute do diagrama de radiação de um agregado com elementos parasitas [9]

O avanço seguinte neste campo surgiu com o aparecimento das antenas ESPAR, num projeto desenvolvido por Gyoda e Ohira nos Laboratórios ATR (*Advanced Telecommunications Research*) no Japão no ano 2000 [9]. Estas antenas são uma versão modificada do modelo original de Harrington, na medida em que são utilizados monopolos em vez de dipolos, e as cargas reativas são integradas sob o plano de terra.

Gyoda e Ohira propuseram uma estrutura de agregado circular, com um número de elementos parasitas na periferia do círculo e um único elemento ativo colocado no centro, tal como mostra a figura 7. Nesta figura verifica-se que as cargas reativas variáveis $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ estão sob os elementos parasitas.

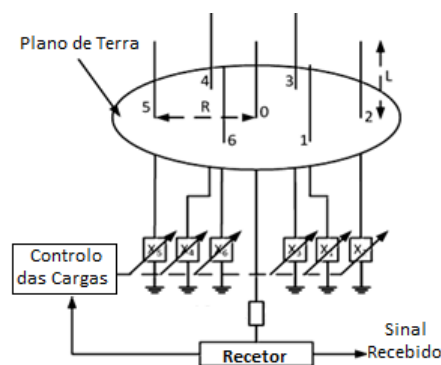


Figura 7 - Esquema do projeto ESPAR [9]

O projeto ESPAR utiliza cargas reativas associadas aos terminais de entrada dos elementos parasitas. Através do ajuste dos valores destes componentes eletrónicos o acoplamento entre todos os

elementos é alterado, e cria um diagrama de radiação de acordo com um determinado critério de desempenho.

2.5 Princípio Funcionamento

O princípio básico de funcionamento das antenas Yagi-Uda e ESPAR é muito semelhante, baseado no acoplamento mútuo dos elementos que constituem a antena. Os elementos parasitas destas antenas encontram-se a uma distância de aproximadamente $3,1 \text{ cm}$, correspondente a $\lambda/4$, do elemento ativo [15]. O elemento ativo provoca a indução de correntes nos elementos passivos. A amplitude e fase das correntes nos elementos parasitas depende do espaçamento entre os elementos, do comprimento dos dipolos parasitas e pode ser variada através da alteração do comprimento elétrico dos mesmos [7].

O acoplamento mútuo entre a antena ativa e as antenas parasitas, juntamente com a utilização de componentes eletrônicos, têm sido usado para criar antenas inteligentes denominadas de SPA (*Switched Parasitic Arrays*). Os SPA não permitem controlar o diagrama de radiação, apenas permitem criar um número finito de diagramas de radiação pré-definidos. Para que seja possível alterar os diagramas de radiação é necessário a existência de reatâncias variáveis.

Segundo a abordagem mais simples para os SPA percebeu-se o princípio de funcionamento da antena ESPAR e Yagi-Uda. Os elementos parasitas da antena ESPAR são ligados a díodos *varicap*, que controlam a variação das reatâncias [16]. Estes podem variar a sua capacidade de acordo com os valores de tensão aplicada. Com a variação das reatâncias, o comprimento elétrico dos elementos parasitas vai aumentar ou diminuir, e a forma do diagrama de radiação da antena vai variar. Através desta propriedade é possível orientar o lobo principal do diagrama de radiação para o recetor pretendido, bem como orientar os nulos de radiação para os sinais interferentes. O exemplo mais comum desta abordagem é a antena ESPAR [17].

2.6 Aplicações Recentes

Nas antenas Yagi-Uda e ESPAR têm sido elaborados estudos e alterações, com vista à sua aplicação, principalmente em redes e sistemas de comunicações sem fios.

As antenas inteligentes têm varias aplicações em sistemas atuais que podem ser divididos em três categorias: SIMO (*Single Input, Multiple Output*), os MISO (*Multiple Input, Single Output*) e os MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) [18]. Estas têm um papel importante nas redes e sistemas sem fios atuais [19]. As antenas com múltiplos elementos são utilizadas para aumentar a eficiência espectral, o ganho e diminuir a propagação por multipercurso [20].

A antena Yagi-Uda convencional é a antena mais conhecida para utilização na receção de televisão, devido à sua simples construção e o ganho elevado. Esta antena impressa permite ser utilizada noutras bandas de frequência, para aplicações móveis em serviços de satélite, vigilância

aérea. Estudos sobre ondas milimétricas e sistemas de comunicações sem fios, através da variação de frequência entre dezenas e centenas de giga-hertz, conduziram ao desenvolvimento de tecnologias em automóveis anti colisão e sistemas de navegação de radar autónomos [21] [22].

O uso da antena ESPAR em telemóveis, computadores pessoais e redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), tem um elevado potencial [18]. Estas têm sido utilizadas para rastreio de estações de base, controlo da direção por satélite e para utilização em veículos. As suas características possibilitam a utilização em recetores de televisão digital com diversidade, localizadores de DoA (direção de chegada) [23] e aplicações em que são necessárias formas de diagramas de radiação adaptáveis. Podem também ser utilizadas para a receção de DVB-T (televisão digital terrestre) [24].

As antenas inteligentes podem ser aplicadas em redes locais sem fios, para banda larga e alta velocidade de transmissão de dados [25]. Podem ser adaptadas a aplicações em redes de computadores [20], sendo a sua utilização nos terminais móveis. É de notar que estas antenas têm inúmeras aplicações em redes e sistemas de comunicação sem fios, em ambiente civil, militar e comercial [26].

2.7 Conclusões

Ao longo deste capítulo explanou-se a evolução dos agregados de antenas, que permitiram chegar às antenas inteligentes. As antenas inteligentes têm em comum o facto de possuírem um elemento ativo e os restantes serem passivos. Os vários elementos da antena interagem através do acoplamento mútuo.

Neste capítulo foi realizado o levantamento do estado da arte relativo às antenas inteligentes, que representa a base para a compreensão dos capítulos procedentes. Inicialmente apresentou-se a configuração da antena Yagi-Uda convencional e da antena ESPAR. A existência de um único elemento ligado a um circuito RF, diminui a complexidade e o custo associado a estas antenas. Esta diminuição ocorre devido à ausência de um repartidor de potência. A origem destas antenas e a sua evolução, desde os agregados de antenas mais simples até ao aparecimento de antenas com processamento digital. Realizou-se uma primeira abordagem ao princípio de funcionamento das antenas inteligentes, que é estudado e detalhado no capítulo seguinte. Apresentaram-se várias aplicações destas antenas, de acordo a bibliografia consultada.

O tamanho reduzido das antenas Yagi-Uda impressa e ESPAR, associado à capacidade de direcionar o seu feixe de radiação para o recetor pretendido, fazem destas antenas a escolha adequada à sua utilização na comunicação no projeto ROVIM. No entanto, a antena ESPAR possibilita a variação do diagrama de radiação em todo o azimute, o que constitui uma vantagem.

Capítulo 3

3 Princípio de funcionamento das antenas inteligentes

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta o modelo teórico do agregado com três elementos. Este agregado representa um caso simples de estudo, constituído por antenas lineares do tipo dipolo, mas revela importância. A sua análise é fundamental para compreensão do princípio de funcionamento da antena Yagi-Uda e da antena ESPAR.

Verificou-se no capítulo anterior que as antenas inteligentes possuem elementos parasitas, e a presença destes irá possibilitar influenciar os diagramas de radiação. Foi necessário analisar em detalhe este funcionamento antes de avançar para o estudo e simulação da antena a construir.

Neste capítulo estão representados os cálculos do diagrama de radiação do agregado de três elementos e a reprodução do agregado no programa de simulação, planos E, H e em 3D (três dimensões). Fez-se uma primeira abordagem ao programa de simulação 4NEC2X, no qual as suas valências permitiram utilizá-lo no dimensionamento e otimização da antena ESPAR.

3.2 Agregado de Três Elementos

As antenas inteligentes são constituídas por elementos parasitas. O comportamento destes quando associado a um elemento ativo, permite influenciar o diagrama de radiação.

Verificou-se que tanto a antena Yagi-Uda como a antena ESPAR têm em comum o facto de os elementos estarem alinhados segundo um plano. Na figura 8 verifica-se a disposição dos monopolos na antena ESPAR de três e cinco elementos, assim como o alinhamento dos mesmos segundo o plano. Este alinhamento também se observa na antena Yagi-Uda, como verificado no esquema desta antena no capítulo anterior (Figura 3).

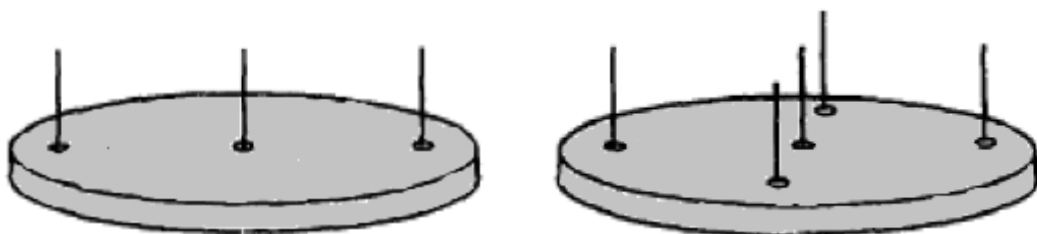


Figura 8 - Esquema de uma antena ESPAR de três elementos (esquerda) e de cinco elementos (direita)

A configuração da antena ESPAR pode ser realizada com dipolos sem plano de terra, ou com monopolos dispostos sobre um plano de terra (Figura 8). Optou-se para fazer o estudo do princípio de funcionamento das antenas inteligentes, utilizando a configuração com dipolos.

Para este foram dispostos três elementos (dipolos) alinhados ao longo do eixo xx, e orientados paralelamente ao eixo dos zz. A figura 9, representa o esquema deste agregado. Nesta situação os elementos parasitas estão posicionados atrás e à frente do elemento ativo, comportando-se o elemento de maiores dimensões como refletor e o de menores dimensões como diretor.

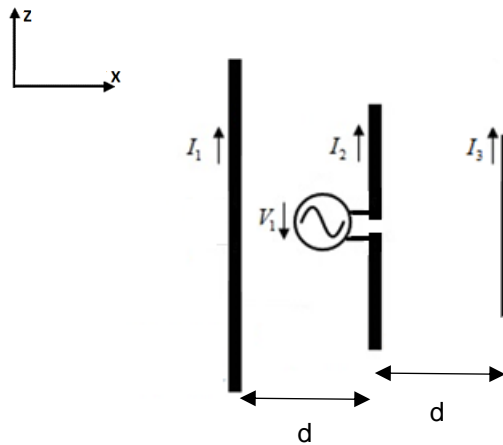


Figura 9 - Esquema elétrico do agregado de três elementos

Para o agregado acima representado, as dimensões dos três dipolos são apresentadas na tabela 1. Os valores de $2L_1$ e $2L_3$ correspondem ao comprimento dos elementos passivos e $2L_2$ ao comprimento do elemento ativo [16].

Tabela 1 - Dimensões do agregado de três elementos

Variáveis	r_a	d	$2L_1$	$2L_2$	$2L_3$
$\lambda = 125\text{mm}, f = 2,4\text{ GHz}$	$0,003\lambda$	$0,125\lambda$	$0,5\lambda$	$0,48\lambda$	$0,46\lambda$
mm	0,375	15,6	62,5	60,0	57,5

Em seguida representam-se as impedâncias próprias Z_{11} e Z_{33} dos dipolos de caráter refletor e diretor respectivamente e a impedância própria do elemento ativo Z_{22} [10].

$$\begin{aligned}
 Z_{11} &= 73,07 + j41,37\Omega \\
 Z_{22} &= 64,93 + j11,75\Omega \\
 Z_{33} &= 57,65 - j17,01\Omega
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

A matriz de impedâncias do agregado de três elementos:

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} 73,07 + 41,37j & 60,47 - 0,97j & 36,25 - 25,53j \\ 60,47 - 0,97j & 64,93 + 11,75j & 53,72 - 2,71j \\ 36,25 - 25,53j & 53,72 - 2,71j & 57,65 - 17,01j \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Assim, obtém-se uma matriz de três incógnitas (3.3). As incógnitas I_1, I_2, I_3 , são as correntes de entrada em cada um dos dipolos. Utilizou-se a regra de Cramer, para obter a solução do sistema de equações.

$$\begin{cases} V_1 = (73,07 + 41,37j)\bar{I}_1 & (60,47 - 0,97j)\bar{I}_2 & (36,25 - 25,53j)\bar{I}_3 \\ V_2 = (60,47 - 0,97j)\bar{I}_1 & (64,93 + 11,75j)\bar{I}_2 & (53,72 - 2,71j)\bar{I}_3 \\ V_3 = (36,25 - 25,53j)\bar{I}_1 & (53,72 - 2,71j)\bar{I}_2 & (57,65 - 17,01j)\bar{I}_3 \end{cases} \quad (3.3)$$

Sabendo que $\bar{V}_1 = 0, \bar{V}_2 = 1, \bar{V}_3 = 0$, obtém-se as seguintes correntes para cada um dos dipolos:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= -0,0290 + 0,0176j = 0,0339229e^{j2,59612rad} \\ \bar{I}_2 &= 0,1062 - 0,0182j = 0,107748e^{-j0,169726rad} \\ \bar{I}_3 &= -0,0801 - 0,0256j = 0,0840914e^{-j2,83225rad} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Obtidas as correntes em cada dipolo, relacionam-se as mesmas da seguinte forma \bar{I}_1/\bar{I}_2 e \bar{I}_1/\bar{I}_3 . O cálculo do fator espacial do agregado depende da relação das correntes anteriores.

$$\bar{I}_1 = |\bar{I}_1| e^{j\alpha_1} \quad (3.5)$$

$$\bar{I}_2 = |\bar{I}_2| e^{j\alpha_2} \quad (3.6)$$

$$\bar{I}_3 = |\bar{I}_3| e^{j\alpha_3} \quad (3.7)$$

Os símbolos $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, correspondem à fase das correntes de excitação dos dipolos. Seguidamente, na equação (3.8) calcula-se as diferenças de fase das correntes de excitação.

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \alpha_1 - \alpha_2 = 2,59612 - (-0,169726) = 2,76585rad \\ \beta_3 &= \alpha_3 - \alpha_2 = -2,83225 - (-0,169726) = 2,66252rad \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{|\bar{I}_1|}{|\bar{I}_2|} e^{j(\alpha_1 - \alpha_2)} = \frac{|\bar{I}_1|}{|\bar{I}_2|} e^{j\beta_1} \quad (3.9)$$

$$\frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} = \frac{|\bar{I}_3|}{|\bar{I}_2|} e^{j(\alpha_3 - \alpha_2)} = \frac{|\bar{I}_3|}{|\bar{I}_2|} e^{j\beta_3} \quad (3.10)$$

As amplitudes complexas dos campos elétricos para os três dipolos são:

$$\bar{E}_{\theta_1} = j \frac{Z_0}{2\lambda r_1} I_1 h_{e_1} f_{D_1}(\theta) e^{-jkr_1} \quad (3.11)$$

$$\bar{E}_{\theta_2} = j \frac{Z_0}{2\lambda r_2} I_2 h_{e_2} f_{D_2}(\theta) e^{-jkr_2} \quad (3.12)$$

$$\bar{E}_{\theta_3} = j \frac{Z_0}{2\lambda r_3} I_3 h_{e_3} f_{D_3}(\theta) e^{-jkr_3} \quad (3.13)$$

em que:

- Z_0 é a impedância característica em espaço livre;
- r_1, r_2, r_3 são as distâncias entre antena e o ponto de referência;
- $h_{e_1}, h_{e_2}, h_{e_3}$ são as alturas efetivas das antenas;
- $f_{D_1}, f_{D_2}, f_{D_3}$ são os fatores direcionais das antenas;
- θ é o ângulo;
- k é a constante de propagação.

As expressões de Z_0 e k são dadas por:

$$Z_0 = 120\pi \quad (3.14)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.15)$$

Para as antenas lineares o comprimento efetivo e o fator direcional são dados pelas equações (3.16) e (3.17).

$$h_e = h_e \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\lambda}{\pi} (1 - \cos(kL)) [m] \quad (3.16) \quad f_D(\theta) = \frac{\cos(kL \cos \theta) - \cos(kL)}{(1 - \cos(kL)) \sin \theta} \quad (3.17)$$

O campo elétrico total é obtido através do somatório dos campos elétricos de todos os elementos do agregado [27]:

$$\bar{E}_{\theta_T} = \bar{E}_{\theta_1} + \bar{E}_{\theta_2} + \bar{E}_{\theta_3} \quad (3.18) \quad \bar{E}_{total} = [\bar{E}_{referência}] \times [\bar{F}] \quad (3.19)$$

Através das equações (3.18) e (3.19) obtém-se a expressão (3.20) [7]. O campo elétrico total radiado é igual à soma vetorial dos campos de cada elemento que constituem o agregado. Em seguida está representado o campo elétrico total em função do campo elétrico do elemento ativo \bar{E}_{θ_2} e multiplicado pelo fator espacial do agregado, \bar{F} . A representação do campo elétrico nesta forma deve-se ao facto de o campo total do agregado poder ser igualado ao campo de um elemento que está posicionado num ponto, multiplicado pelo fator espacial do agregado.

$$\bar{E}_{\theta_r} = \bar{E}_{\theta_1} + \bar{E}_{\theta_2} + \bar{E}_{\theta_3} = \bar{E}_{\theta_2} \left(\frac{\bar{E}_{\theta_1}}{\bar{E}_{\theta_2}} + 1 + \frac{\bar{E}_{\theta_3}}{\bar{E}_{\theta_2}} \right) = \bar{E}_{\theta_2} \underbrace{\left(\frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} e^{jkd \cos \psi} + 1 + \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} e^{jkd \cos \psi} \right)}_{\text{Fator espacial do agregado, } \bar{F}} \quad (3.18)$$

A equação (3.18) pode ser simplificada:

$$\bar{E}_{\theta_r} = \bar{E}_{\theta_2} \bar{F}(\theta, \varphi) \Leftrightarrow |\bar{E}_{\theta_r}| = |\bar{E}_{\theta_2}| |\bar{F}(\theta, \varphi)| \quad (3.19)$$

O fator espacial do agregado, é dado por [16]:

$$\bar{F} = \left[\frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} e^{jkd \cos \psi} + 1 + \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} e^{jkd \cos \psi} \right] \quad (3.20)$$

$$\bar{F} = 1 + \frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| e^{j\beta_1 - jkd \cos \psi} + \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} \right| e^{j\beta_3} e^{jkd \cos \psi} \quad (3.21)$$

A partir do fator espacial do agregado obtém-se o módulo do fator espacial da antena $|\bar{F}|$. Para tal calcula-se o produto FF^* [16]:

$$|\bar{F}| = \sqrt{FF^*} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} FF^* = & 1 + \frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| e^{j(\beta_1 - kd \cos \psi)} + \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} \right| e^{j(\beta_3 + kd \cos \psi)} + \frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| e^{(-\beta_1 + kd \cos \psi)} + \left(\frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \right)^2 \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right|^2 + \\ & + \frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| \left| \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} \right| e^{j(\beta_1 - \beta_3)} e^{-j2kd \cos \psi} + \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} \right| e^{-j(\beta_3 + kd \cos \psi)} + \frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} \frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \left| \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \right| \left| \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} \right| e^{j(\beta_3 - \beta_1)} e^{j2kd \cos \psi} + \left(\frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} \right)^2 \left| \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2} \right|^2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Na equação (3.23), substituindo os valores da relação das correntes dos dipolos (3.9) e (3.10). Substituindo também a relação das alturas efetivas calculadas em (3.24), (3.25), kd e ψ obtém-se a equação final do fator espacial do agregado (3.26) [16]:

$$\frac{h_{e_1}}{h_{e_2}} = 1,0670 \quad (3.24)$$

$$\frac{h_{e_3}}{h_{e_2}} = 0,9330 \quad (3.25)$$

Sabendo que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ e $d = 0,125\lambda$ obtém-se $kd = 0,25\pi$.

$$|\bar{F}| = \sqrt{\begin{aligned} &1 + 0,0991*1,1385 + 0,6091*0,8705 + 2*0,3148*1,0670*\cos(2,7658 - 0,25\pi\cos(\psi)) + \\ &+ 2*0,7804*0,9330*\cos(-2,6626 + 0,25\pi\cos(\psi)) + \\ &+ 2*0,3148*0,7804*0,9955*\cos(2,7658 - (-2,6626) - 0,5\pi\cos(\psi)) \end{aligned}} \quad (3.26)$$

O campo total do agregado é obtido pelo produto entre o módulo do campo da antena de referência com o módulo do fator espacial do agregado:

$$|\bar{E}_{\theta_r}| = |\bar{E}_{\theta_2}| |\bar{F}| \quad (3.27)$$

Sendo o campo da antena de referência dado pela seguinte equação:

$$|\bar{E}_{\theta_2}| = \frac{Z_0}{2\lambda r_2} |\bar{I}_0| |h_{e_2}| |f_{D_2}(\theta)| \quad (3.28)$$

$$f_{D_2}(\theta) = \left| \frac{\cos(0,48\pi * \cos(\theta) - \cos(0,48\pi))}{(1 - \cos(0,48\pi)) \sin(\theta)} \right| \quad (3.29)$$

$$|E_{\theta_r}| = \frac{Z_0}{2\lambda r_2} |\bar{I}_0| |h_{e_2}| |f_{D_2}(\theta)| * |\bar{F}| \quad (3.30)$$

O diagrama de radiação do agregado é influenciado através do produto do fator direcional da antena ativa pelo módulo do fator espacial do agregado.

$$DR = |f_{D_2}(\theta)| * |\bar{F}| \quad (3.31)$$

As figuras 10 e 11 representam o diagrama de radiação do agregado, no plano E e no plano H. Este foi reproduzido de acordo com as características do agregado apresentado na tabela 1.

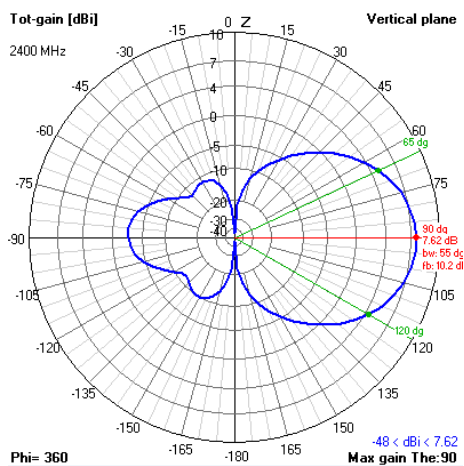


Figura 10 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 0^\circ$)

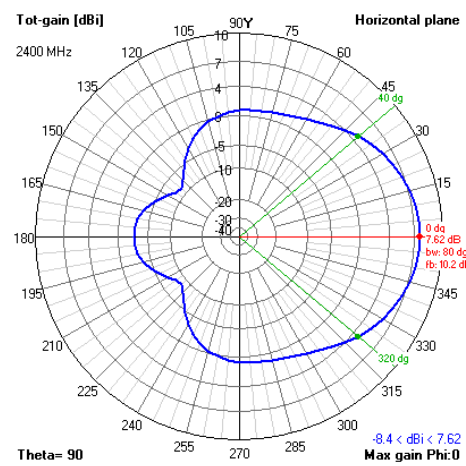


Figura 11 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)

Os diagramas de radiação das imagens anteriores apresentam um ganho de 7,62 dBi e uma RFT (Relação Frente-Trás) de 10,2 dB. A figura 12 apresenta o diagrama de radiação, em 3D (três dimensões), do agregado de três dipolos. Na figura observa-se que o diagrama de radiação possui um máximo de radiação na direção positiva do eixo dos xx.

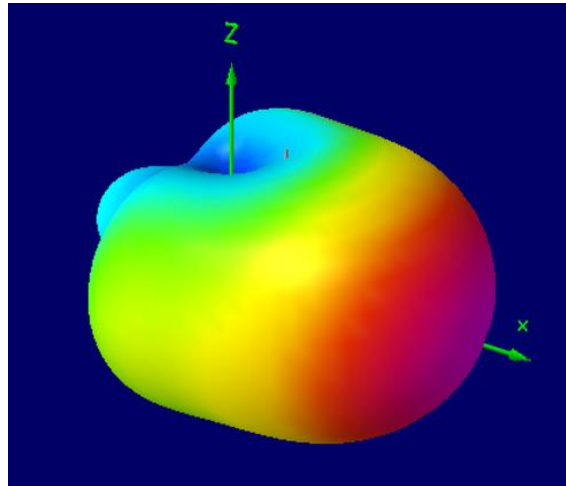


Figura 12 - Diagrama de radiação 3D do agregado de três elementos

Este resultado deve-se ao facto do dipolo passivo de maiores dimensões apresentar um carácter refletor, e o de menores dimensões um carácter diretor. O diagrama de radiação obtido depende da amplitude e fase das correntes nos dipolos. Estes fatores são influenciados pelo comprimento dos elementos e pelo espaçamento em relação ao elemento ativo. A utilização de um elemento refletor e de um elemento diretor em simultâneo possibilita aumentar o ganho e a diretividade da antena. A figura 13 representa o esquema da influência dos elementos parasitas na direção máxima de radiação.

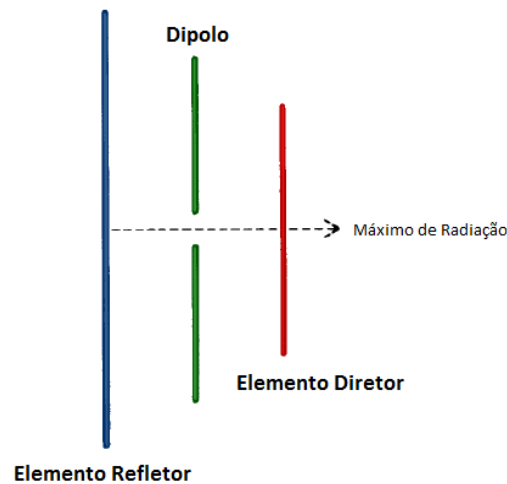


Figura 13 - Esquema da direção do máximo de radiação no agregado de três elementos

3.3 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se sob a forma do agregado de três elementos o princípio de funcionamento das antenas Yagi-Uda e ESPAR. Deste estudo concluiu-se que o cálculo do diagrama de radiação é influenciado pelo número de elementos, pela distância e disposição dos mesmos. A

relação das amplitudes e fases das correntes de excitação dos elementos e a frequência também têm influência nas propriedades de radiação do agregado. A presença dos elementos parasitas garante a característica diretiva do agregado, como se observa na imagem da figura 13. O dipolo de maior dimensão apresenta um caráter refletor e o dipolo de menor dimensão apresenta um caráter diretor. Os campos eletromagnéticos das diferentes antenas adicionam-se em fase na direção pretendida e oposição nas restantes direções.

Através do programa de simulação determinou-se o diagrama de radiação do agregado de três elementos e para este obteve-se um ganho de 7,62 dBi e uma RFT de 10,2 dB. O estudo deste comprova a influência dos elementos parasitas na orientação do máximo do diagrama de radiação. Observou-se os efeitos do acoplamento mútuo entre o elemento ativo e passivos. Este efeito é utilizado nas antenas Yagi-Uda e ESPAR para obter diagramas de radiação específicos.

Capítulo 4

4 Dimensionamento e Otimização da Antena ESPAR

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta o algoritmo aplicado na otimização da antena e as várias simulações executadas para obter a ESPAR com as dimensões ótimas. Foi aplicado o algoritmo genético, baseado nos princípios da genética e da seleção natural.

O processo de otimização divide-se em quatro partes, otimização da estrutura, otimização das reatâncias e dimensionamento do plano de terra. Este capítulo inclui os diagramas de radiação das diversas simulações executadas.

A secção 4.2 explica o algoritmo genético.

A secção 4.3 descreve a otimização da estrutura da antena. Esta está dividida em várias subsecções, onde se explica a escolha do número de elementos, diâmetro e altura dos mesmos, bem como a sua distribuição.

A secção 4.4 contém a otimização das reatâncias da antena, o esquema elétrico que será aplicado a cada um dos elementos parasitas, por forma a garantir o intervalo de reatâncias pretendido.

Na secção 4.5 inclui o dimensionado do plano de terra. Inicialmente utilizou-se apenas um plano de terra circular sem aba, e posteriormente um plano de terra circular com aba, necessário para a proteção dos componentes eletrónicos.

4.2 Algoritmo Genético

Para otimizar as características de radiação das antenas são utilizados algoritmos. Um dos algoritmos mais estudados para otimização de antenas são os AGs (Algoritmos Genéticos). Estes pertencem a uma classe robusta dos algoritmos [28]. Consistem numa técnica de otimização, baseada nos princípios da genética e da seleção natural de Charles Darwin, relativa à evolução das espécies. Segundo a teoria, os vários indivíduos de uma população têm características que lhe são únicas, podendo ser benéficas ou prejudiciais. Os indivíduos com características mais favoráveis para se adaptarem ao meio ambiente onde estão inseridos têm mais probabilidade de sobreviver [29].

Para compreender o fenómeno da seleção natural é necessário considerar três definições, reprodução, cruzamento e mutação. A reprodução é fundamental para o processo de sobrevivência de uma espécie, é necessária para que seja possível obter o indivíduo mais apto. O cruzamento introduz diversidade na população, porque produz novos indivíduos, que são constituídos por partes retiradas dos progenitores. A mutação é referente à alteração da estrutura original de um indivíduo [30]. Os

conceitos de seleção natural e elitismo também são necessários para a compreender este algoritmo. A seleção natural é responsável por permitir a sobrevivência dos indivíduos que possuem características que os tornam mais aptos num determinado ambiente, e por consequência a extinção dos que não possuem essas características. O elitismo permite comparar as descendências obtidas, com os progenitores e escolher entre eles os mais aptos. Este é responsável pela fixação de características semelhantes num meio ambiente.

Este algoritmo é constituído por etapas, em que o objetivo é ter uma geração mais evoluída do que a anterior. Considerou-se inicialmente os cromossomas que vão ser cruzados, qual a probabilidade de ocorrer mutação e quantos indivíduos sobrevivem de acordo a seleção natural e o elitismo. As etapas que descrevem o algoritmo são as seguintes [6]:

- É escolhida uma população de forma aleatória, que é posteriormente avaliada. Esta avaliação dá-se ao nível dos cromossomas, sendo considerado um conjunto de cromossomas.
- São selecionados os cromossomas da população para cruzamento, sendo o critério de escolha os que apresentam características mais vantajosas.
- Após o cruzamento e consoante a probabilidade de ocorrer mutação, os cromossomas filhos podem ser alterados.
- Obteve-se uma nova geração e os descendentes são avaliados.
- Por fim, é realizado o processo de elitismo, em que os filhos e pais são comparados. Se os filhos forem melhores que os pais, é a geração mais recente que permanece. No caso de os pais serem melhores que os filhos, existe uma reposição dos filhos pelos pais.
- O ciclo é repetido até que não se verifique melhorias dos filhos em relação aos pais, ou que as melhorias sejam muito reduzidas.

Os AG funcionam bem com as antenas e permitem lidar com várias variáveis em simultâneo. No caso de uma antena ESPAR, existem várias variáveis que têm de ser otimizadas. O número destas aumenta com o aumento do número de elementos parasitas que a antena possui. As vantagens que o AG apresenta revelam-se adequadas para o uso na ESPAR.

Para aplicar o algoritmo genético à antena ESPAR é preciso associar a antena a um indivíduo. Cada antena é avaliada e após avaliação é atribuído um valor de *fitness*. Este valor é responsável por selecionar as antenas para participar nas operações genéticas, ou seja, estas passam a ter maior ou menor probabilidade de serem selecionadas. A cada iteração realizada é apresentada uma nova geração de antenas que substituirá a geração anterior, no caso de apresentar melhores características. Caso contrário a geração anterior permanece. O ciclo de otimização da antena termina quando várias gerações convergirem para a mesma solução, ou quando não se verifica uma melhoria considerável. A figura 14 apresenta o fluxograma relativo ao AG aplicado à antena ESPAR [13].

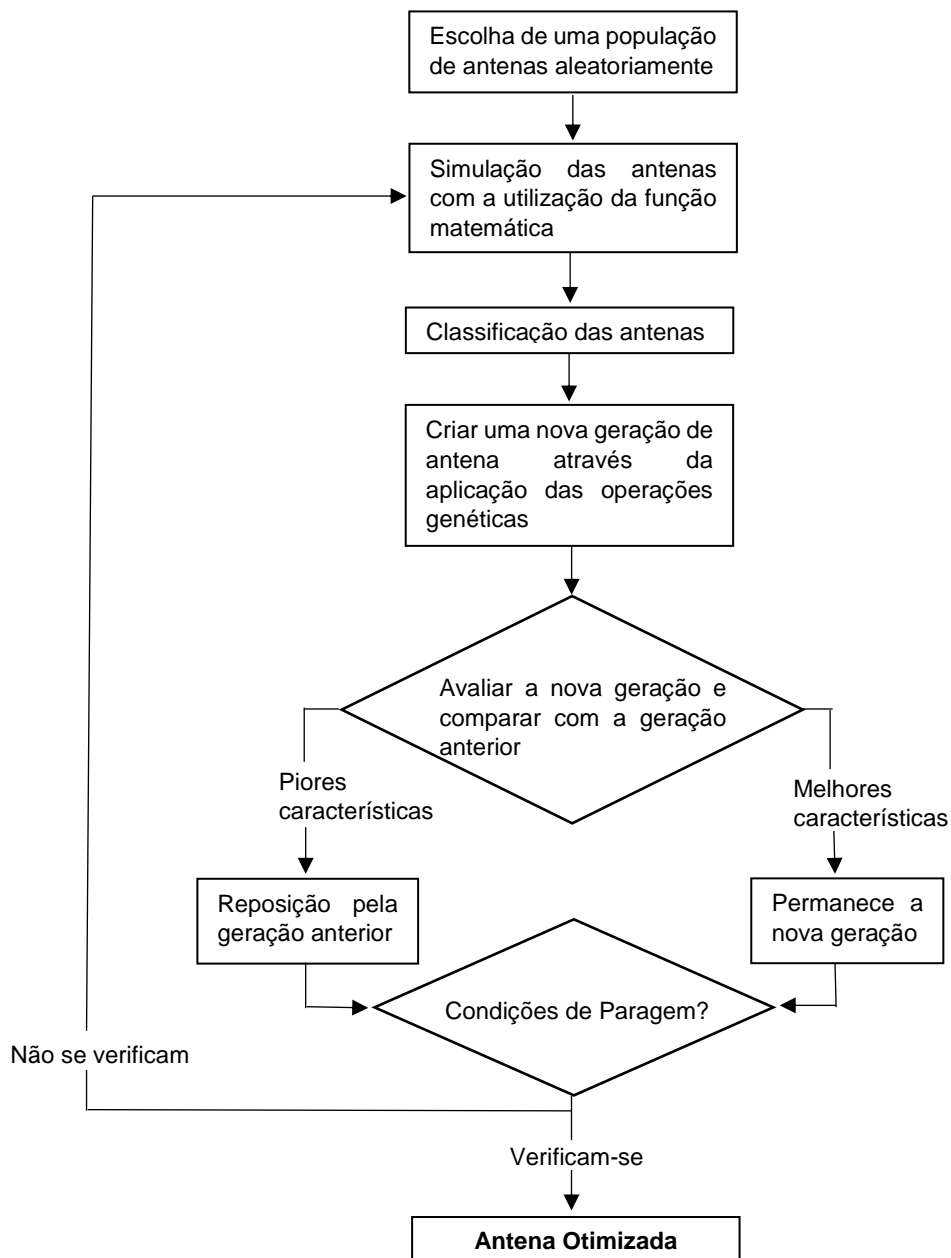


Figura 14 - Fluxograma da aplicação do AG à antena ESPAR

De referir que este algoritmo não garante a melhor solução, no entanto, ao fim de algumas iterações, é possível obter uma solução muito próxima da ideal. Outras simulações com os mesmos parâmetros podem originar resultados distintos, mas dentro da mesma gama de valores ótimos.

4.3 Otimização da Estrutura da Antena

4.3.1 Número de Elementos (N_e)

A escolha do número de elementos da antena que possibilita obter as melhores características de radiação é parte essencial da otimização. É necessário considerar que por um lado, se o número de elementos parasitas for reduzido poderá não ser possível obter o diagrama de radiação pretendido, por outro lado se este for elevado a complexidade da antena aumenta. É essencial encontrar um número de elementos adequados, para garantir o equilíbrio entre a complexidade e as características de radiação desejadas [23].

Para efetuar a escolha do número de elementos realizou-se uma experiência, em que se analisaram antenas com o número de elementos de 5 a 9 (5 antenas ESPAR). As antenas foram introduzidas no programa de simulação, para verificar as suas características de radiação. Após a realização das primeiras simulações foram excluídas as antenas de 5, 8 e 9 elementos por não possuírem características pretendidas. A antena de 5 elementos tem uma complexidade reduzida, conseqüente menor tempo de simulação e os diagramas de radiação não possuíam as características desejadas. A antena de 8 e de 9 elementos têm elevada complexidade na sua construção, e o tempo de otimização das mesmas é moroso. Posteriormente para decidir qual a escolha da antena a construir, foram testadas apenas duas antenas (6 e de 7 elementos). Estas foram reproduzidas e testadas individualmente no programa de simulação [26].

A altura de cada um dos elementos parasitas e distância dos mesmos ao elemento ativo (centro da antena) constituíram variáveis de otimização. A altura dos elementos parasitas partiu do valor de ressonância 2,8 cm, correspondente a $0,22\lambda$, e delimitou-se entre 1,4 cm e 5,6 cm, valores limite do programa. A variável raio da antena, distância entre os elementos parasitas ao elemento ativo central, partiu de 3,1 cm, correspondente a $\lambda/4$, e para as presentes simulações encontra-se compreendida entre 1,6 cm e 4,7 cm, correspondente a $\lambda/4 \pm \lambda/8$. A limitação entre estes valores é necessária para o processo de otimização não se torne demasiado longo. A altura do monopolo ativo que se encontra em ressonância não se alterou. Em ambas as antenas a distância entre elementos parasitas foi mantida constante, de forma a obter-se uma figura geométrica regular. Na antena de 6 elementos um pentágono regular e no caso de 7 elementos um hexágono regular. O plano de terra introduzido no programa é um plano sem perdas e condutor perfeito (*perfect ground*). Considerou-se o raio dos monopolos a 1 mm, para as simulações realizadas nesta secção.

O Anexo A apresenta os diagramas de radiação nos planos E e H. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos para as duas antenas simuladas.

Tabela 2 - Características de radiação das antenas de 6 e 7 elementos

Parâmetros	6 Elementos	7 Elementos
Ganho (dBi)	13,15	13,31
Relação Frente-Trás (dB)	8,12	7,84

De notar que o ganho foi o parâmetro a otimizar, e atribuiu-se um peso de 100%. Para as antenas de 6 e 7 elementos o ganho ficou pelos 13,15 dBi e 13,31 dBi respetivamente. A diferença dos ganhos obtidos é reduzida, mas a relação frente trás é ligeiramente superior no caso de 6 elementos. Uma vantagem da utilização da antena de 6 elementos reside na otimização desta ser menos morosa, menor complexidade na construção e características de radiação obtidas em simulação muito idênticas. O tempo de simulação é um fator a ter em conta, porque ao longo deste capítulo são realizadas simulações com um maior número de parâmetros, para além do ganho. Como o objetivo da presente dissertação de mestrado tem em vista a construção de uma ESPAR, é importante ter em consideração estes aspetos. A ESPAR de 6 elementos garante uma solução adequada para realização de um primeiro protótipo. De acordo com a literatura estudada a ESPAR de 6 elementos é menos usual, o garante maior inovação e desenvolvimento nesta dissertação. Decidiu-se avançar para a simulação mais detalhada da ESPAR de 6 elementos, com vista ao dimensionamento da estrutura.

4.3.2 Diâmetro dos Monopolos (d_m)

Nas simulações antecedentes utilizou-se o diâmetro de monopolos de 2 mm. Após a escolha do número de elementos e antes de iniciar a otimização da ESPAR de 6 elementos é necessário verificar se este diâmetro dos monopolos é adequado para implementar. Analisou-se os diâmetros de fio de cobre existentes no mercado. Os fios de cobre com diâmetros reduzidos, inferiores a 1 mm, não são vantajosos, porque iria tornar a antena pouco resistente. É necessária uma solução que possa ser implementada e o diâmetro 1,5 mm existente no mercado garante robustez pretendida à antena.

Os monopolos encontram-se isolados do plano de terra, assim sendo, o diâmetro de 1,5 mm permite a realização de furos no plano de terra de menores dimensões do que quando se utilizam diâmetros superiores. Teve-se em consideração a fórmula (4.1), que apresenta a impedância de entrada do monopolo [31].

$$Z_{in} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln\left(\frac{d_0}{d_m}\right) \Omega \quad (4.1)$$

em que:

- d_m é o diâmetro do fio de cobre em milímetros;
- d_0 é o diâmetro do furo em milímetros.

Para se obter o valor de $Z_{in} \approx 50 \Omega$ e para um diâmetro de fio de cobre (d_m) de 1,5 mm é necessário um diâmetro de furo (d_0) de aproximadamente 5mm, considerando como isolante o teflon. Optou-se pela implementação de monopolos de diâmetro 1,5 mm. Introduziu-se no programa de simulação o diâmetro de 1,5 mm e manteve-se constante ao longo da fase de simulação.

4.3.3 Distribuição dos Elementos da Antena

A ESPAR de 6 elementos é constituída por 1 elemento central ativo e 5 elementos parasitas em torno do elemento central, como apresentam as figuras 15 e 16. Os 5 elementos parasitas distribuem-se de forma equidistante entre si, sob a forma de um pentágono regular. A distância dos vários elementos parasitas ao centro é um dos parâmetros a otimizar. A distância dos elementos ao centro tem de garantir o acoplamento mútuo entre elementos, mas tem de ser suficiente, de forma a maximizar o ganho da antena [26].

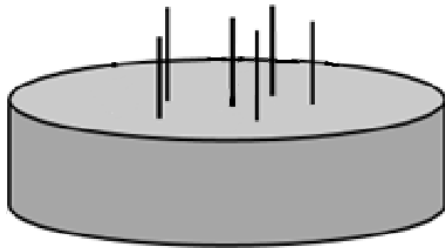


Figura 15 - Esquema da antena ESPAR de 6 elementos

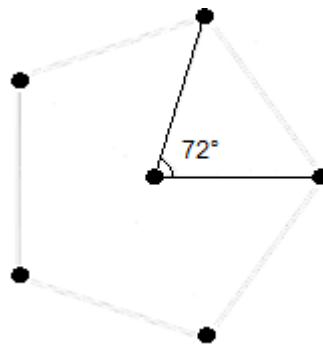


Figura 16 - Distribuição dos monopolos

De modo a otimizar a distância dos elementos ao centro, partiu-se do valor 3,1 cm, correspondente a $\lambda/4$, sendo este o valor teórico para a antena ESPAR [32]. Em seguida otimizou-se com base na gama de valores para a distância, limitada entre 2,3 cm e 3,9 cm, correspondente a $\lambda/4 \pm \lambda/16$.

Na otimização da distância dos elementos parasitas ao centro, foram considerados como parâmetros de otimização o ganho da antena e SWR (*Standing Wave Ratio*). Os parâmetros foram utilizados com um peso de 90% e 80% respetivamente. Nesta simulação também se considerou o plano de terra condutor perfeito. No final da otimização, a distância obtida para os elementos parasitas relativamente ao centro (r_p) manteve-se constante, com o valor de 2,9 cm. A antena obtida apresentou um ganho de 11,4 dBi para a direção $\theta = 90^\circ$ e $\varphi = 0^\circ$, e uma RFT de 22,3 dB.

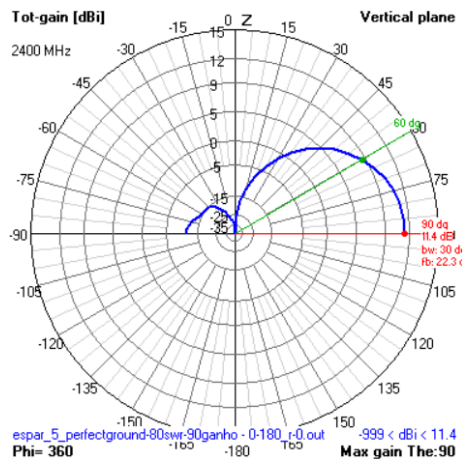


Figura 17 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 0^\circ$)

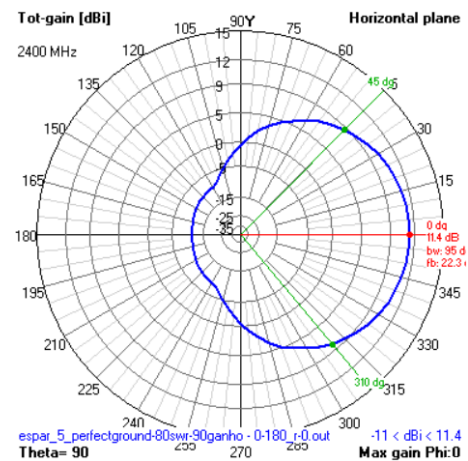


Figura 18 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)

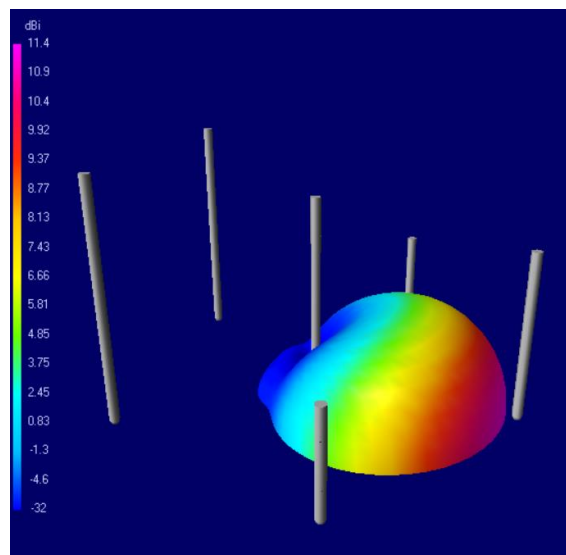


Figura 19 - Diagrama de radiação em 3D

As simulações anteriores realizaram-se por forma a otimizar o ganho das antenas para a direção $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. Esta direção corresponde a direcionar o máximo de radiação na direção de um monopolo. Através da análise do diagrama de radiação em 3D, verifica-se que a direção do máximo de radiação se encontra de acordo com o pretendido.

Em seguida verificou-se a configuração em que se direciona o máximo de radiação na direção simétrica, direcionando o máximo de radiação para a bissetriz dos monopolos. Para simular a situação apresentada é necessário alterar a direção para $\varphi = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. O resultado é o apresentado nas figuras 20 e 21. Obteve-se um ganho de 11,1 dBi e uma RFT de 26,3 dB. De referir que no programa de simulação não é possível direcionar o diagrama de radiação no plano E, para a posição $\theta = -90^\circ$. Esta limitação impossibilita obter este diagrama de radiação na direção simétrica em relação ao eixo central. O diagrama de radiação em 3D apresenta as características desejadas apesar da limitação anterior.

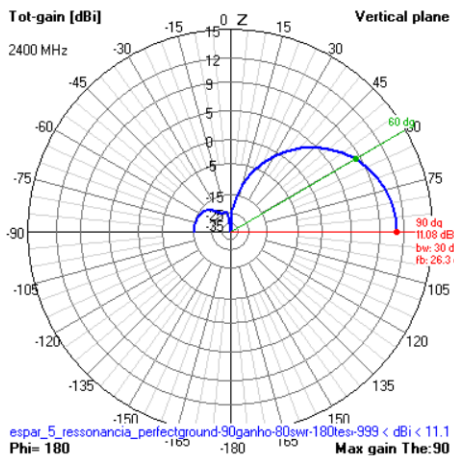


Figura 20 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 180^\circ$)

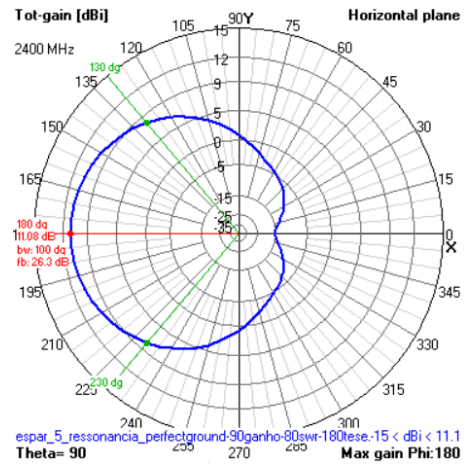


Figura 21 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)

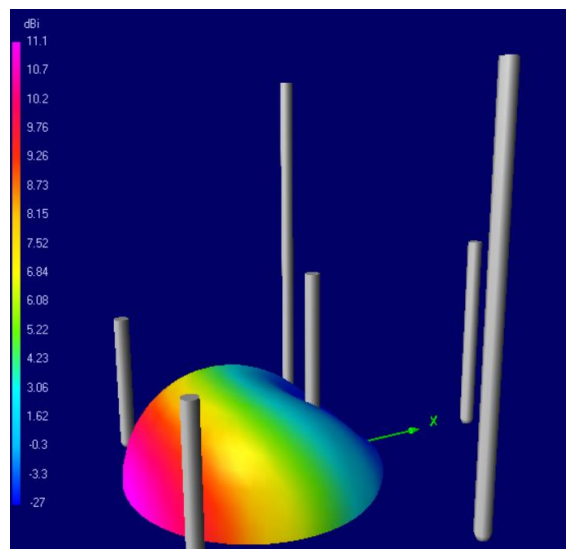


Figura 22 - Diagrama de radiação em 3D

Nas configurações apresentadas anteriormente obtém-se diagramas de radiação diferentes. Os máximos de radiação ocorrem em direções simétricas em relação ao eixo central, de acordo com o objetivo pretendido. Estas configurações apresentam características de radiação semelhantes. O ganho da antena para a direção $\varphi = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ é de 11,1 dBi, enquanto que na direção $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ o ganho obtido é de 11,4 dBi. A RFT é 26,3 dB para a direção $\varphi = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ e 22,3 dB para $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. Verifica-se que as características de radiação são semelhantes.

4.3.4 Altura dos Monopolos (h_m)

A altura dos monopolos variou-se em torno do valor correspondente à ressonância, 2,8 cm. Colocaram-se todos os elementos com a mesma altura. De notar que se os elementos parasitas tiverem uma altura elevada, irá aumentar o tamanho da antena, não desejável para o projeto. Todos os elementos parasitas estão ligados a díodos *varicap*. A altura elétrica dos elementos parasitas depende da gama de valores de reatâncias, proporcionada pela associação dos díodos.

Os díodos *varicap* permitem uma variação de valores capacitivos. Como é necessária uma gama de valores positivos e negativos, o tamanho dos monopolos parasitas tem de aumentar. Um intervalo de valores de reatâncias igualmente distribuída, confere aos monopolos parasitas a possibilidade de apresentarem um caráter refletor ou diretor [16].

4.4 Otimização das Reatâncias

Para a otimização das reatâncias, colocou-se na base de cada elemento parasita uma reatância variável. A alteração do valor das reatâncias permite obter um diagrama de radiação variável, sendo esta alteração controlada através das cinco tensões aplicadas V_m , ($m = 1,2,3,4,5$).

A figura 23 apresenta o esquema elétrico que garante a variação da reatância em cada monopolo parasita. São utilizados um par de díodos *varicap* BB833 (Anexo B) posicionados em paralelo na terminação do elemento parasita. De modo a assegurar o desacoplamento entre o sinal da fonte de tensão contínua e do sinal de RF no monopolo, é inserida uma resistência R_1 em série e um condensador C_1 em paralelo com a fonte de tensão [32].

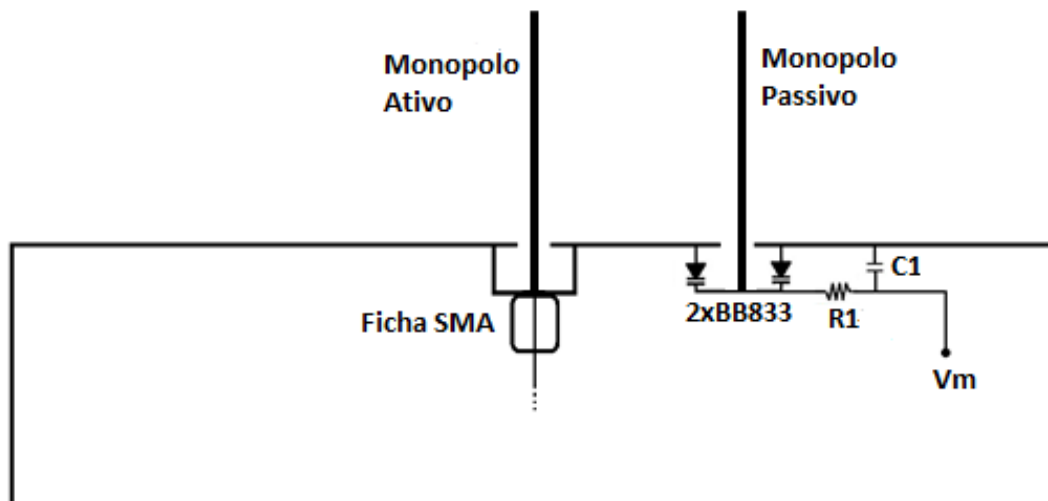


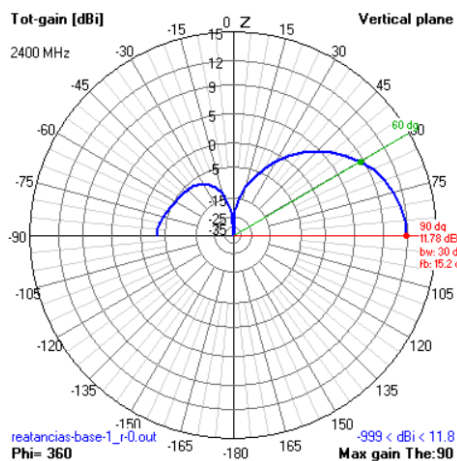
Figura 23 - Esquema elétrico aplicado a cada monopolo parasita

De acordo com as especificações do díodo BB833, o valor da sua capacidade pode variar desde 0,9 pF até 9,3 pF, para uma tensão V_m até 30V. Os valores máximos não serão utilizados, porque na prática podem não ser possíveis de atingir. A configuração apresentada proporciona uma variação das reatâncias entre $-36,8j \Omega$ e $-3,5j \Omega$ para a frequência de 2,4 GHz.

O caráter de um monopolo controlou-se através da variação da reatância associada, tendo um caráter diretor ou refletor consoante a sua reatância for negativa ou positiva respetivamente. Na simulação para o dimensionamento da antena ESPAR de 6 elementos, foi considerado o comprimento físico de cada elemento que garante a ressonância, com um raio de 0,75 mm.

Os díodos *varicap* BB833 permitem apenas ter uma variação de reatâncias negativa, e não uma variação de reatâncias positiva e negativa de acordo com o desejável. Para possibilitar uma variação positiva e negativa é necessário fazer um deslocamento de $20,2j \Omega$ ao intervalo de reatâncias apresentado. O deslocamento realizado permite obter um intervalo de reatâncias de $-16,6j \Omega$ a $16,6j \Omega$. Para atingir esta gama de valores pode-se associar uma carga indutiva a cada elemento ou, aumentar o tamanho dos elementos parasitas. Como os díodos na prática encontram-se sob o plano de terra, existe uma linha de transmissão a separar os mesmos até se atingir o plano de terra. Realizou-se o cálculo desse efeito de forma a obter à superfície do plano de terra a reatância necessária. A existência da linha de transmissão, comprimento 1 cm, proporciona a reatância positiva necessária para se obter o intervalo pretendido [32].

Após definir o intervalo de reatâncias otimizaram-se as reatâncias associadas através de simulação. Consideraram-se três parâmetros a otimizar, ganho, SWR e *front-rear relation* (FRR). Em simulações prévias apenas otimizando o ganho e o SWR, os diagramas de radiação obtidos possuíam lóbulos secundários acentuados. Houve a necessidade de otimizar o parâmetro FRR, que representa a relação entre o máximo do lobo principal e o máximo dos lóbulos secundários. Este parâmetro otimizou-se, de modo a obter lóbulos secundários pouco acentuados. Atribuiu-se para os parâmetros descritos anteriormente um peso de 90%, 80% e de 100% respetivamente. A atribuição de um fator de 100% ao FRR tem o objetivo de reduzir ao máximo os lóbulos secundários. A altura dos monopolos manteve-se constante, mas a distância dos elementos ao centro variou-se, para reajuste. As figuras 24, 25 e 26 apresentam os diagramas de radiação obtidos



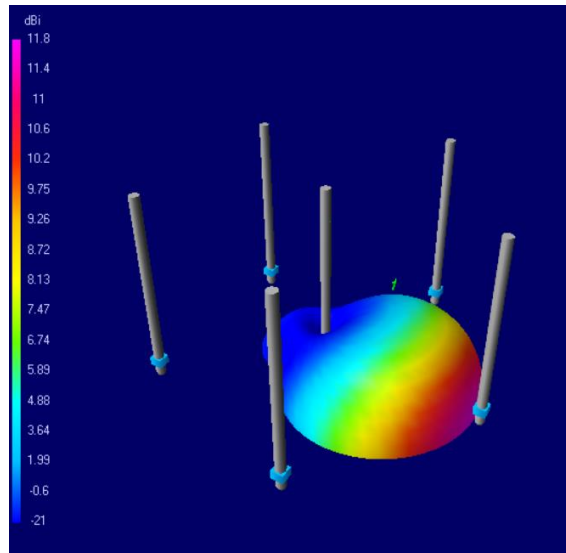


Figura 26 - Diagrama de radiação em 3D

O diagrama de radiação da imagem anterior apresenta um ganho de 11,8 dBi, uma RFT de 15,2 dB para a direção $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. Nas simulações realizadas obtiveram-se as reatâncias ótimas, que são apresentadas na tabela 3. As reatâncias estão colocadas sob a forma de X_m , onde a letra, m , corresponde ao monopolo onde é aplicada.

Tabela 3 - Reatâncias ótimas obtidas em simulação

Reatância	Valor (jX_m) Ω
X_1	-16
X_2	-16
X_3	16
X_4	16
X_5	-16

Através da tabela anterior é possível criar várias configurações. Com a alteração da disposição das reatâncias o máximo do diagrama de radiação descola-se para outra direção, garantindo uma forma semelhante do diagrama de radiação.

A figura 27 apresenta a simulação realizada, após inversão das reatâncias obtidas no caso anterior. O intuito desta nova simulação é verificar as alterações provocadas no diagrama de radiação após inversão das reatâncias. A tabela 4 apresenta as novas reatâncias aplicadas a cada um dos monopolos e o respetivo diagrama de radiação em 3D.

Tabela 4 – Inversão das reatâncias ótimas obtidas em simulação

Reatância	Valor (jX_m) Ω
X_1	16
X_2	16
X_3	-16
X_4	-16
X_5	16

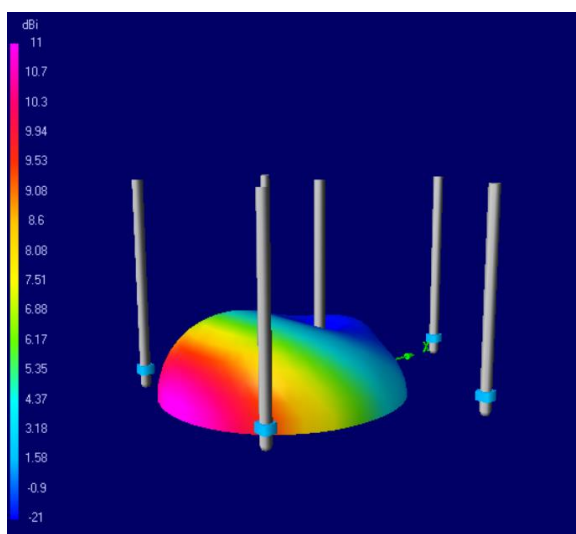


Figura 27 - Diagrama de radiação em 3D

O diagrama de radiação em 3D apresentado na figura 27, resulta da inversão das reatâncias, de acordo com o apresentado na tabela 4. O ganho apesar de ser mais reduzido, não apresenta uma variação significativa. Obteve-se características de radiação muito semelhantes, apesar da direção do máximo de radiação ser simétrica à direção do máximo anterior (bissetriz dos monopolos).

4.5 Plano de Terra

O plano terra tem fundamental importância na realização da antena ESPAR. A utilização do plano de terra com aba garante uma solução mecanicamente adequada para proteção do mecanismo de controlo e dos elementos eletrónicos da antena.

Nas simulações anteriores utilizou-se um plano de terra perfeito introduzido por uma opção do programa de simulação. A antena ESPAR possui um plano de terra específico, com uma respetiva aba. Nesta secção são efetuadas as simulações para verificar a influência que este provoca no diagrama de radiação. A partir da antena otimizada previamente, inseriu-se a mesma, num plano terra circular de raio (r_g) 6,25 cm correspondente a $0,5\lambda$.

O programa de simulação não permite o desenho específico de um plano terra e não existe um modelo de uma antena ESPAR pré-definido. Para contornar esta limitação, utilizou-se uma malha radial. Para garantir que esta se comporta como um plano de terra é necessário garantir que o espaço mínimo entre elementos é inferior a uma ordem de grandeza do comprimento de onda ($\lambda/10$). Os monopolos são colocados sobre as junções da malha radial, de acordo as distâncias obtidas na simulação anterior. Estes são ligados à malha, de modo a permitir o movimento da corrente sobre o plano [33]

Em seguida realizaram-se duas simulações distintas. Uma primeira simulação com a utilização de plano de terra com diâmetro de 12,5 cm, sem aba e uma segunda simulação posterior com a utilização do mesmo plano de terra, com uma aba (h_s) de 3,1 cm, correspondente a $\lambda/4$ [16].

Na primeira simulação realizada variaram-se as alturas dos monopolos que foram colocados sobre o plano de terra. A variação dos elementos permite obter um diagrama de radiação com características desejadas, para tal, consideraram-se como parâmetros a otimizar o ganho, SWR, RFT. As figuras 28, 29 e 30 apresentam o resultado da simulação realizada A antena apresenta um ganho de 5,9 dBi e uma RFT de 11,4 dB.

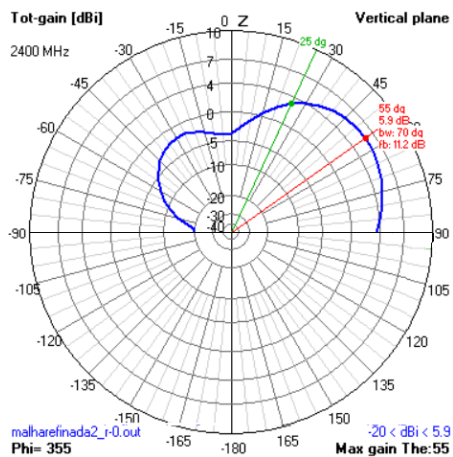


Figura 28 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 355^\circ$)

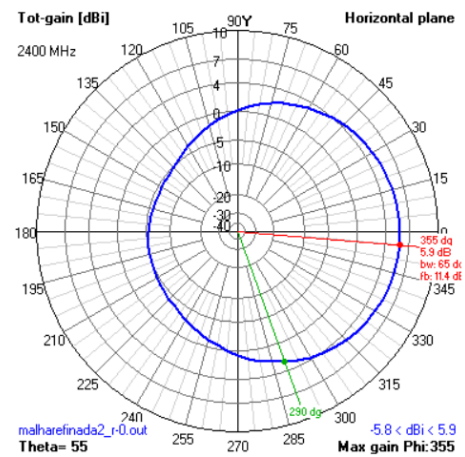


Figura 29 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 55^\circ$)

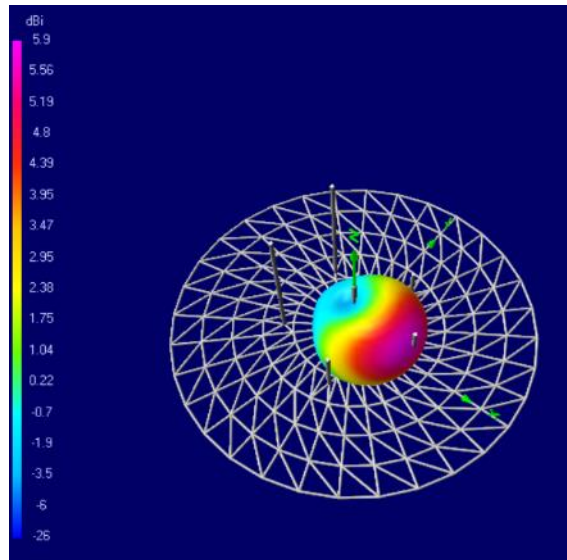


Figura 30 - Diagrama de radiação em 3D

Os resultados obtidos são inferiores aos das secções anteriores, como era de expectável, porque nesta simulação não se utilizou o plano de terra perfeito. Esta simulação permite verificar a influência no diagrama de radiação, provocada pelo plano de terra utilizado.

Como analisado na secção 4.4, há necessidade de incluir componentes eletrónicos na antena ESPAR. O circuito em questão tem de ser protegido, por forma a não comprometer o funcionamento da antena. Ao plano de terra antecedente acrescentou-se uma aba de 3,1 cm de altura, correspondente a $0,5\lambda$. Foram introduzidas as alterações no programa de simulação e realizou-se a otimização do diagrama de radiação para a presente situação. A figura 33 apresenta a estrutura e o diagrama de radiação da antena ESPAR e respetivo plano terra. O ganho da antena obtido foi 6.7 dBi e a sua RFT é de 15 dB, estes valores são apresentados nas figuras 31 e 32.

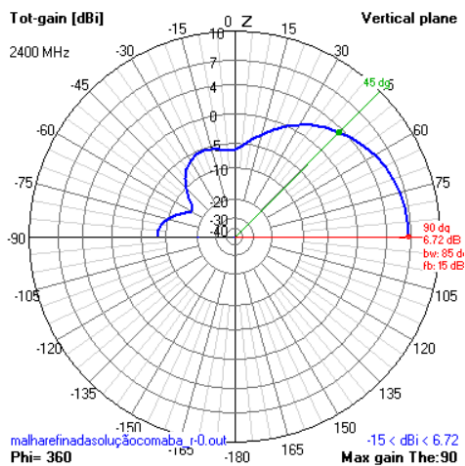


Figura 31 - Diagrama de radiação plano E ($\varphi = 0^\circ$)

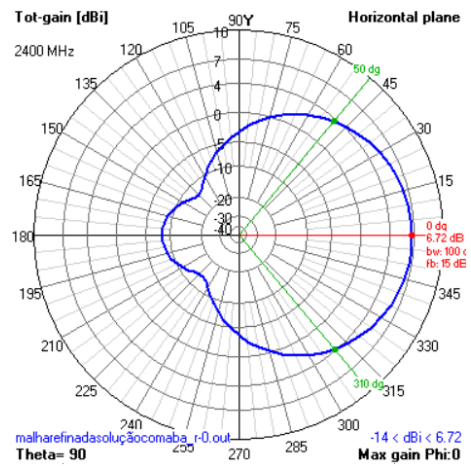


Figura 32 - Diagrama de radiação plano H ($\theta = 90^\circ$)

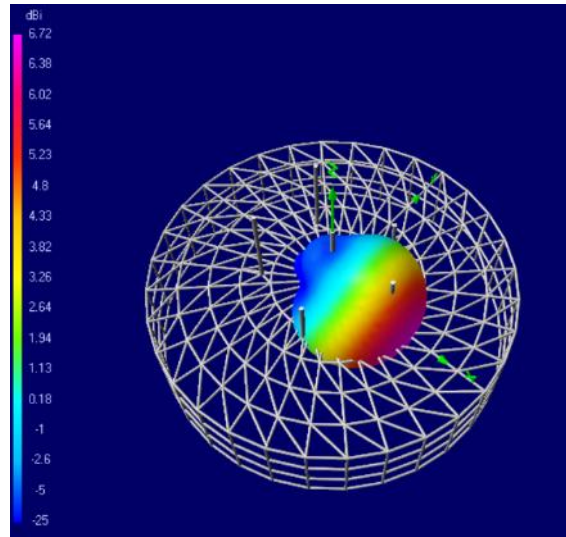


Figura 33 - Diagrama de radiação em 3D

A aba tem a principal vantagem de garantir a proteção mecânica aos componentes eletrônicos. De acordo com as simulações realizadas neste capítulo, as dimensões utilizadas permitem atingir as características de radiação pretendidas e uma solução que pode ser implementada. O plano de terra tem de ser realizado na prática com um metal. Em seguida são apresentados os cálculos relativos à profundidade de penetração num metal. Estes cálculos foram efetuados para se concluir sobre a espessura de plano de terra necessário. Optou-se pela utilização do cobre, para construir o plano de terra, pois apresenta uma boa condutividade elétrica, a nível da construção apresenta uma solução possível de implementar. A fórmula (4.13) apresenta a capacidade de penetração do metal [7].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma_M}} \quad [\text{m}] \quad (4.13)$$

em que:

- ω é a frequência angular;
- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo;
- σ_M é a condutividade do metal.

$$\omega = 2 * \pi * f = 2 * \pi * 2.4 * 10^9 = 15.0796 * 10^9 \quad (4.14)$$

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$$

$$\sigma_{\text{Cobre}} = 5.61 * 10^7 \text{ S/m}$$

De acordo a expressão (4.13), e substituindo os valores de cada uma das variáveis, é determinada a profundidade de penetração no metal. O valor $\delta = 1,37 \times 10^{-6} \text{ m}$ é reduzido, garantindo que a espessura do plano de terra não influencia o comportamento da antena.

4.6 Conclusões

O presente capítulo teve início com a apresentação de um algoritmo genético. Este foi apresentado como o método numérico para o dimensionamento e otimização da antena ESPAR. O algoritmo genético aplicado à antena ESPAR possibilita otimizar várias variáveis em simultâneo.

Os algoritmos genéticos são baseados no princípio da genética e seleção natural de Charles Darwin. Estes permitem obter uma solução próxima do ideal. Elaborou-se um fluxograma que representa a forma como o algoritmo é aplicado à antena ESPAR. De acordo o fluxograma, a cada iteração é desenvolvida uma nova geração de antenas, e estas são sujeitas a avaliação das suas características. No caso da nova geração apresentar melhores características substitui a geração anterior, caso contrário a geração anterior é mantida.

Posteriormente realizou-se a otimização da estrutura da antena e do número de elementos parasitas. Foram analisadas antenas com o número de elementos de 5 a 9 (5 antenas ESPAR). Das antenas mencionadas excluiu-se a antena de 5 elementos, porque o diagrama de radiação obtido não possui as características pretendidas. As antenas de 8 e 9 elementos também foram excluídas, devido à complexidade de realização que apresentam ser elevada e ao tempo de simulação ser demorado. Para a criar o primeiro protótipo é necessário obter uma solução fácil de realizar, e que permita obter o diagrama de radiação. Optou-se pela simulação de uma antena de 6 elementos, porque o ganho é muito semelhante à antena de 7 elementos, a RFT é superior na de 6 elementos e é uma solução menos complexa o que traz vantagens na sua construção.

A antena ESPAR de 6 elementos tem 1 elemento ativo e 5 elementos parasitas. O diâmetro dos monopolos implementado é de 1,5 mm, e estes estão dispostos na forma de um pentágono regular. Estas variáveis permaneceram inalteradas ao longo das simulações posteriores. A variável distância dos elementos parasitas ao centro foi otimizada, e para esta obteve-se o valor de 2,9 cm. Nas simulações anteriores o máximo de radiação está direcionado para $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ (direção dos monopolos). Em seguida realizou-se a simulação para a direção $\varphi = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ (bissetriz dos monopolos), e obteve-se resultados semelhantes. Para a direção $\varphi = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ obteve-se um ganho de 0,4 dB inferior ao caso anterior e na RFT o valor obtido é superior. Esta simulação permite verificar as características de radiação nas várias direções, permitindo a rotação do diagrama de radiação da antena em todo o azimute.

A otimização das reatâncias associadas a cada um dos elementos parasitas revelou ser parte importante no processo de otimização. Na base de cada um dos elementos parasitas, existe um circuito associado constituído por um par de díodos *varicap* polarizados inversamente, uma resistência de 10

k Ω e um condensador de 3 pF. A resistência e o condensador permitem realizar o desacoplamento entre o sinal da fonte de tensão contínua e do sinal de RF no monopolo.

O circuito constituído pelos dois díodos *varicap*, que possibilitam uma variação de reatâncias negativas de -36,8j Ω e -3,5j Ω . É necessário ter uma variação de reatâncias negativas e positivas, para tal deslocou-se o valor das reatâncias de 20,2j Ω e obteve-se um intervalo de -16,6j Ω a 16,6j Ω . Para atingir esta gama de valores pretendida pode-se associar uma carga indutiva a cada elemento ou, aumentar o tamanho dos elementos parasitas. Após definir o intervalo de reatâncias otimizaram-se as reatâncias associadas através de simulação. Para além dos parâmetros ganho e SWR, houve a necessidade de otimizar o FRR. O FRR otimizou-se, de modo a obter lóbulos secundários pouco acentuados. As reatâncias X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 , foram variáveis a otimizar, bem com a distância ao centro. Após a otimização das reatâncias a distância dos elementos parasitas ao centro da antena foi reajustada para 2,44cm. E obtiveram-se para a direção de $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ as reatâncias $X_1 = -16j \Omega$, $X_2 = -16j \Omega$, $X_3 = 16j \Omega$, $X_4 = 16j \Omega$, $X_5 = -16j \Omega$. Em seguida inverteram-se as reatâncias anteriores e a direção do máximo de radiação alterou para a direção $\varphi = 180^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

A etapa seguinte consistiu em dimensionar o plano de terra da antena ESPAR. Realizou-se numa fase inicial as simulações para verificar a influência que o plano de terra provoca no diagrama de radiação. O programa de simulação não permite o desenho específico de um plano terra. Para contornar esta limitação, utilizou-se uma malha. Para garantir que esta se comporta como um plano de terra é necessário que o espaço mínimo entre elementos seja inferior em uma ordem de grandeza ao comprimento de onda ($\lambda/10$). Em seguida realizaram-se duas simulações distintas. A partir da antena otimizada previamente, inseriu-se a mesma antena, num dos seguintes planos terra. Uma primeira simulação com a utilização de plano de terra com diâmetro de 12,5 cm e sem aba e uma segunda simulação posterior com a utilização do mesmo plano de terra com uma aba de 3,1 cm.

A aba tem a principal vantagem de garantir a proteção mecânica aos componentes eletrónicos. De acordo com as simulações realizadas neste capítulo, as dimensões utilizadas permitem atingir as características de radiação pretendidas e uma solução possível de implementar. A tabela 5 apresenta a síntese das dimensões obtidas para a antena ESPAR de 6 elementos ao longo deste capítulo.

Tabela 5 - Variáveis otimizadas da ESPAR de 6 elementos

Variáveis	N_e	d_m	h_m	r_p	r_g	h_s
Valores	6	1,5 mm	2,8 cm	2,4 cm	6,5 cm	3,1 cm

A tabela 6 apresenta a síntese das características de radiação da ESPAR obtidas neste capítulo.

Tabela 6 - Características de radiação da ESPAR de 6 elementos

Características de radiação	Ganho (dBi)	RFT (dB)
Valores	6,7	15

As conclusões retiradas neste capítulo através das simulações efetuadas serviram de base para a realização dos capítulos posteriores. A construção do protótipo efetuou-se com base nas dimensões obtidas no presente capítulo. Os resultados obtidos neste capítulo serviram de comparação com os resultados experimentais.

Após realização da fase de dimensionamento e otimização dos vários parâmetros da antena ESPAR, avançou-se para o projeto e construção da mesma.

Capítulo 5

5 Antena ESPAR

5.1 Introdução

Neste capítulo é explicado todo o processo de construção da antena ESPAR de 6 elementos, desde a criação do desenho técnico, a partir dos valores otimizados, até à construção do protótipo final. A elaboração da estrutura da antena foi realizada no Complexo Interdisciplinar do IST.

Na secção 5.2 é apresentado o esboço à escala e com informação das dimensões reais.

A secção 5.3 contém informação relativa à fase de construção da estrutura básica e imagens ilustrativas do final desta fase.

A secção 5.4 aborda a inclusão dos componentes eletrónicos na estrutura. São referidos os componentes utilizados e a forma como eles foram colocados.

A secção 5.5 apresenta a preparação da antena para o teste na câmara anecóica.

5.2 Projeto da Antena

Concluída a fase de dimensionamento e otimização da antena foi efetuado um desenho à escala da mesma, figuras 34, 35 e 36, baseado na tabela 5 do capítulo anterior. Este foi criado a partir do programa de desenho AutoCAD 2016, ferramenta que permite o desenho da antena em três dimensões. A figura 34 apresenta a planta da antena ESPAR de 6 elementos.

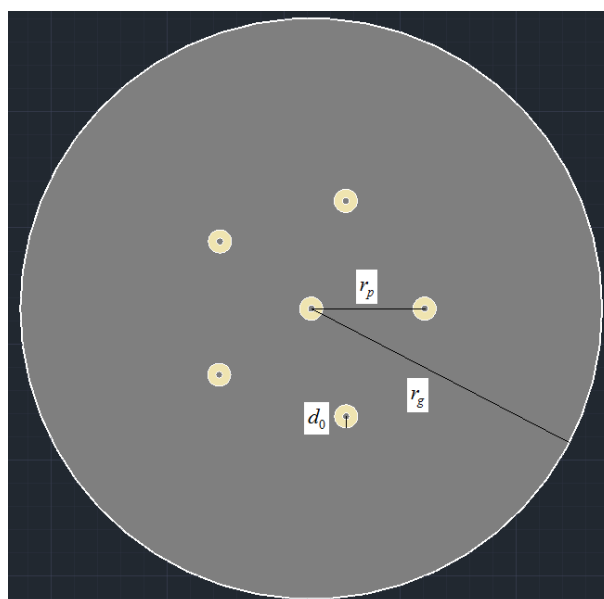


Figura 34 - Planta da antena ESPAR

A planta permite verificar a distribuição dos elementos sobre o plano de terra. Nesta os círculos de cor bege representam o isolante (teflon), que impede o contacto eléctrico entre os monopolos e o plano de terra. A figura 35 apresenta a vista tridimensional da parte superior da antena.

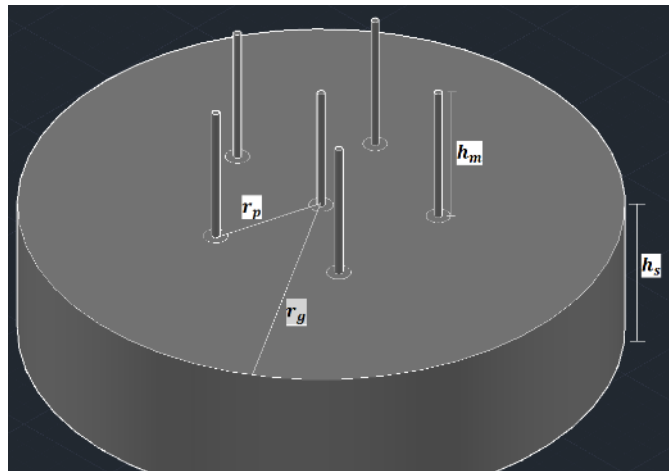


Figura 35 - Vista tridimensional superior da antena a construir

A figura 36 apresenta o alçado lateral da antena, onde se verifica a altura dos monopolos e a altura da aba do plano de terra.



Figura 36 - Alçado lateral da Antena

5.3 Estrutura Básica

A construção da estrutura básica realizou-se com uma placa de cobre com espessura 0,5mm. A partir desta foram cortados o plano de terra e a aba, e feita a solda dos mesmos. Posteriormente efetuaram-se os furos no plano de terra para introduzir os monopolos. Com o objetivo de os fixar e garantir a sua imobilidade, foram soldados tubos de latão sob o plano de terra com as dimensões dos respetivos furos. Estes tubos garantem maior superfície de contacto entre o monopolo e o isolador, e por consequência maior estabilidade. A figura 37 apresenta a fotografia superior e inferior da antena após a conclusão dos processos anteriores. Como demonstra a fotografia superior da antena os monopolos encontram-se isolados do plano condutor, através de um isolante de cor amarela (teflon), garantindo assim a ausência de contacto eléctrico entre eles [8].

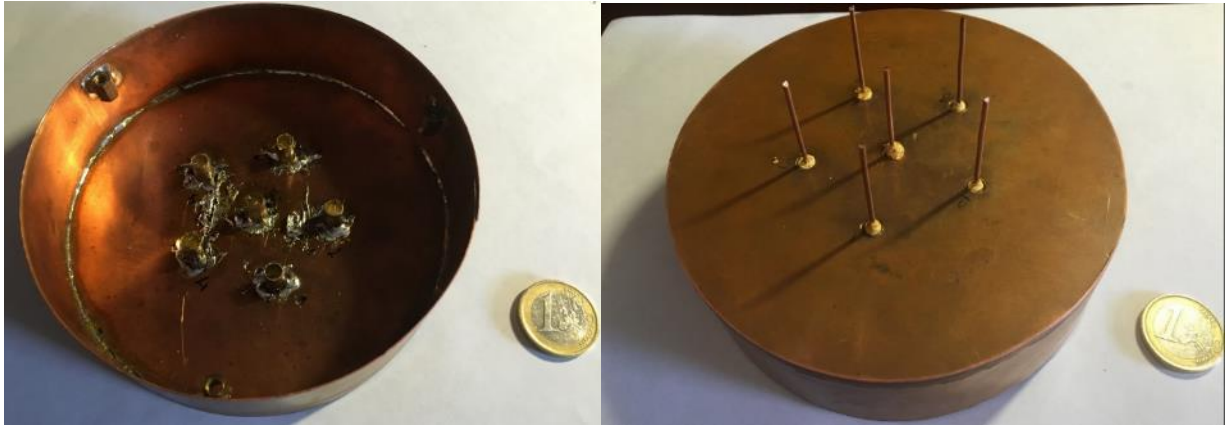


Figura 37 – Fotografias parte inferior (esquerda) e superior (direita) da estrutura básica da antena ESPAR construída

5.4 Inclusão dos componentes eletrônicos

A inclusão da eletrônica foi baseada no circuito da figura 23. A ficha SMA (SubMiniature Version A) de painel foi soldada diretamente ao monopolo ativo. Os restantes monopolos estão ligados aos díodos, resistência e condensador. De referir que os díodos foram polarizados inversamente e colocados radialmente por forma a garantir a simetria. Estes apresentam dimensões reduzidas, o que dificultou o trabalho, mas foi possível construir o circuito pretendido. Os fios elétricos que soldam aos terminais dos díodos têm as menores dimensões possíveis.

O circuito associado a cada um dos monopolos parasitas ligou-se a uma placa de circuito impresso com 6 entradas situada na parte inferior da antena. As 6 entradas possibilitam associar diferentes tensões aos monopolos parasitas. A variação da tensão permite que as capacidades dos díodos variem. Sob a parte inferior do plano de terra colocou-se uma tampa de esferovite que fixa a placa de circuito impressa. A figura 38 mostra a montagem realizada na parte inferior da antena, em que é possível verificar que os díodos utilizados têm dimensões reduzidas, quando comparados com a resistência e o condensador.



Figura 38 - Componentes eletrônicos associados aos monopolos

A figura 39 mostra a placa de esferovite colocada na parte inferior da antena, onde é possível verificar a placa de circuito impresso com uma ficha de ligação de 6 entradas.



Figura 39 - Placa de circuito impresso fixa a placa de esferovite

5.5 Preparação da antena para teste

Após a inclusão dos componentes eletrônicos a antena encontra-se preparada para a realização das medições. Os elementos parasitas da antena têm de ser ligados a uma fonte de tensão através da ficha de ligação que se verifica na figura 39. Para tal, e de modo a evitar a necessidade de várias fontes de tensão introduziu-se um dispositivo de controlo das tensões, figura 40, entre uma só fonte de tensão e a antena.

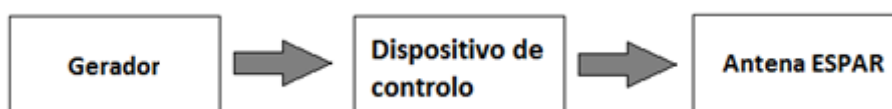


Figura 40 - Diagrama de blocos do sistema de controlo dos elementos parasitas

O dispositivo de controlo para os cinco elementos parasitas da antena ESPAR está representado na figura 41

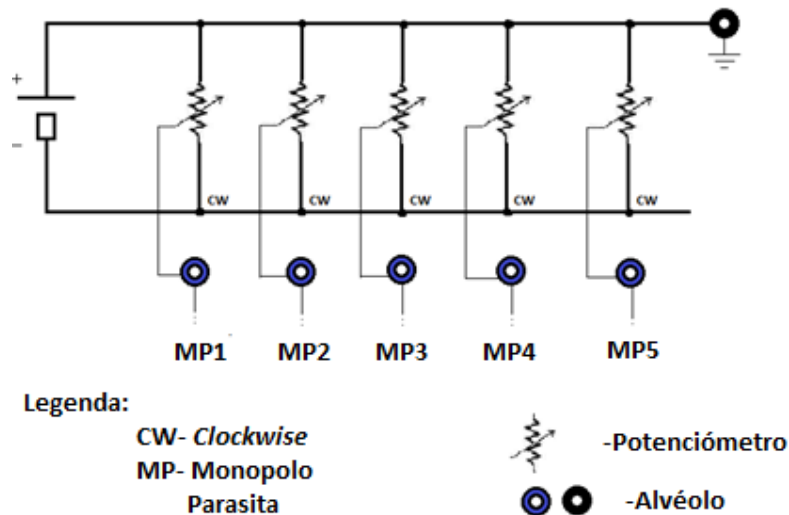


Figura 41 - Circuito do dispositivo de controlo dos monopolos parasitas

O dispositivo de controlo é constituído por cinco potenciômetros. Este dispositivo permite aplicar de forma controlada a tensão pretendida em cada monopolo. O controlo da tensão é possível através da existência da ligação dos alvéolos com a cor azul aos vários elementos parasitas, e do alvéolo de cor preta ao comum eletrónico. Com a utilização de um voltímetro verifica-se a tensão nos alvéolos. Os potenciômetros estão orientados de forma a aumentar a tensão através da rotação no sentido dos ponteiros do relógio, CW (*Clockwise*).

Posteriormente realizou-se a verificação de funcionamento do sistema de controlo. Para tal, ligou-se um gerador de 20V ao sistema de controlo. Os potenciômetros encontravam-se no valor mínimo, correspondente à tensão 0V. Em seguida, através da rotação de um dos potenciômetros e com o auxílio de um voltímetro verificou-se o aumento da tensão. O valor máximo coincide com os 20 V fornecidos pelo gerador. O sistema de controlo tem a principal vantagem de permitir alterar a tensão aplicada a cada monopolo e conseqüente alteração do diagrama de radiação em azimute. A figura 42, exibe a imagem do sistema de controlo após a sua construção e verificação do seu funcionamento.

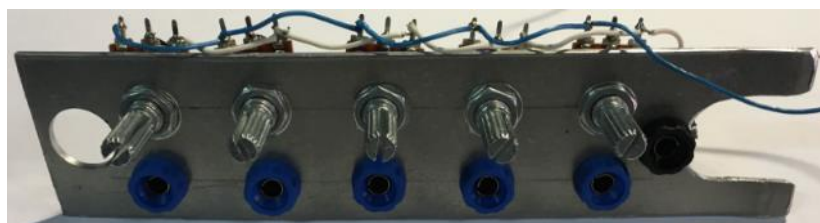


Figura 42 - Sistema de controlo dos monopolos parasitas

5.6 Conclusões

Ao longo do presente capítulo foram mencionados os passos para a construção da antena ESPAR de 6 elementos. A construção da antena foi realizada nos laboratórios do Instituto Superior

Técnico (Complexo Interdisciplinar), com o auxílio do Professor J.L.C. Mata e do Engenheiro I. Dionísio. Este apoio revelou-se essencial para obter o protótipo com as melhores condições. A antena ESPAR é uma antena complexa, devido à sua geometria e aos componentes eletrónicos que lhe estão associados.

A fase de construção iniciou-se com a realização de um desenho técnico à escala, da antena a construir. A construção da estrutura básica da antena realizou-se através da soldadura de placas de cobre. Para fixar os monopolos ao plano de terra inseriram-se tubos de latão, por forma a aumentar a superfície onde estes são fixados e assim garantir a estabilidade mecânica dos monopolos. O espaço entre os estes é preenchido por isolante teflon.

A ficha SMA de painel foi soldada ao monopolo ativo. Concluída a construção da estrutura básica, procedeu-se à inclusão dos vários componentes eletrónicos. A introdução destes foi delicada, devido às reduzidas dimensões dos díodos, o que tornou a soldadura destes complicada.

Os vários componentes eletrónicos ligaram-se aos elementos parasitas, que por sua vez estão ligados a uma placa de circuito impresso com uma ficha de ligação de 6 entradas. A placa de circuito impresso permitiu ligar a antena ao dispositivo de controlo. Para proteção dos componentes eletrónicos, e posterior fixação da antena no teste na câmara anecóica, colocou-se uma tampa de esferovite na parte inferior do plano de terra.

O dispositivo de controlo possibilita aplicar tensões aos monopolos parasitas de acordo com o pretendido. Este é constituído por cinco potenciómetros em série, que permitem variar a tensão, e seis alvéolos para verificar a tensão aplicada. O dispositivo está ligado a um gerador e à antena ESPAR. A solução implementada para controlo das tensões revelou-se prática para a utilização na câmara anecóica.

Capítulo 6

6 Resultados experimentais

6.1 Introdução

Ao longo deste capítulo são apresentadas as medições efetuadas para caracterização da antena. A validade dos valores obtidos em simulação só pode ser comprovada recorrendo aos resultados experimentais. A aproximação dos valores simulados com os valores obtidos, revela uma particular importância, não apenas para confirmar os valores simulados, mas também para perceber os fatores que podem interferir durante a realização da experiência. Com vista à obtenção de resultados experimentais fidedignos é necessário utilizar instrumentos de medida, com o objetivo de validar a teoria. Realizaram-se as medições da impedância da antena, do módulo do parâmetro de dispersão S_{11} e dos diagramas de radiação.

Na secção 6.1 apresentam-se os valores das medições da impedância da antena.

Na secção 6.2 inicialmente apresenta-se fundamento teórico relativo ao parâmetro de dispersão S_{11} e os valores obtidos por medição para este parâmetro.

Na secção 6.3 apresentam-se os diagramas de radiação obtidos. É realizada uma descrição da câmara anecóica e dos equipamentos de medida utilizados.

No final do capítulo são apresentadas as conclusões retiradas da análise dos resultados obtidos.

6.2 Impedância da antena

Para efetuar a medida da impedância da ESPAR utilizou-se um analisador de redes, da *Agilent Technologies*, que se encontra no laboratório de radiofrequência 2 do IST. Antes de realizar as medições calibrou-se o equipamento, para diminuir o erro associado às medidas efetuados com o protótipo. Depois da calibração do analisador de redes com o cabo de medida, ligou-se este à antena efetuou-se o varrimento de frequência entre 2 e 3 GHz.

A impedância da antena é dada por $Z_L = R_a + jX_a$. A figura 42 representa a curva obtida para a impedância da antena na Carta de Smith. Obteve-se para a frequência de 2,4 GHz uma impedância real de $R_a = 55,8 \Omega$ e uma reatância capacitiva de $X_a = -32,4j \Omega$.

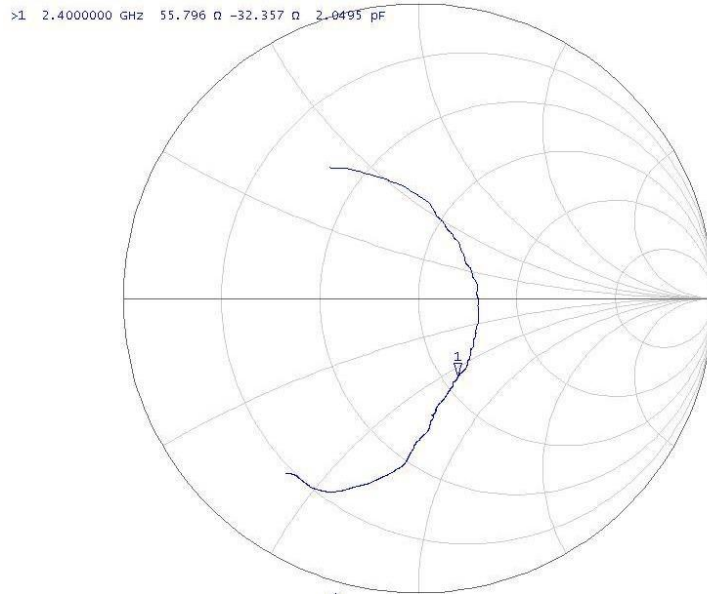


Figura 43 - Curva da impedância da antena na Carta de Smith obtida no analisador de redes

6.3 Módulo do parâmetro de dispersão S_{11}

Na presente secção é realizada uma abordagem teórica sobre o módulo do parâmetro de dispersão S_{11} e o coeficiente de onda estacionária. Posteriormente são apresentados os resultados experimentais obtidos nas medidas do módulo do coeficiente da matriz de dispersão ($|S_{11}|_{dB}$).

O fator de reflexão (\overline{K}_s) consiste na relação entre a impedância característica da linha de alimentação e a impedância de entrada da antena. Este descreve a adaptação da antena através da relação das amplitudes complexas das ondas incidentes e refletidas de tensão na carga. A expressão do fator de reflexão é dada por [7]:

$$\overline{K}_s = \frac{\overline{Z}_s - \overline{Z}_L}{\overline{Z}_s + \overline{Z}_L} \quad (6.1)$$

Para a antena se encontrar adaptada o valor do fator de reflexão tem de ser 1. Através da análise da expressão (6.1) verifica-se que quando $\overline{Z}_s = \overline{Z}_L$, esta encontra-se adaptada. A impedância característica da linha de alimentação é representada por \overline{Z}_s , e a impedância da antena é representada por \overline{Z}_L . O coeficiente de onda estacionária designa-se na literatura anglo-saxónica por SWR. Este é obtido através da equação (6.2) [7].

$$SWR = p = \frac{1 + |\overline{K}_s|}{1 - |\overline{K}_s|} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (6.2)$$

O módulo do S_{11} é calculado pela equação (6.3).

$$|S_{11}|_{dB} = 10 \log_{10} |\overline{K_s}| \quad (6.3)$$

A realização das medições do $|S_{11}|_{dB}$ são posteriores às medições da impedância da antena. Para realizar as medições utilizou-se novamente o analisador de redes. Efetuou-se o varrimento na frequência de 2 a 3 GHz, como na situação anterior.

A figura 43 apresenta a montagem executada no laboratório. Nesta figura observa-se a antena ligada ao analisador de redes, e este ligado a um monitor, de forma a visualizar os resultados em tempo real.

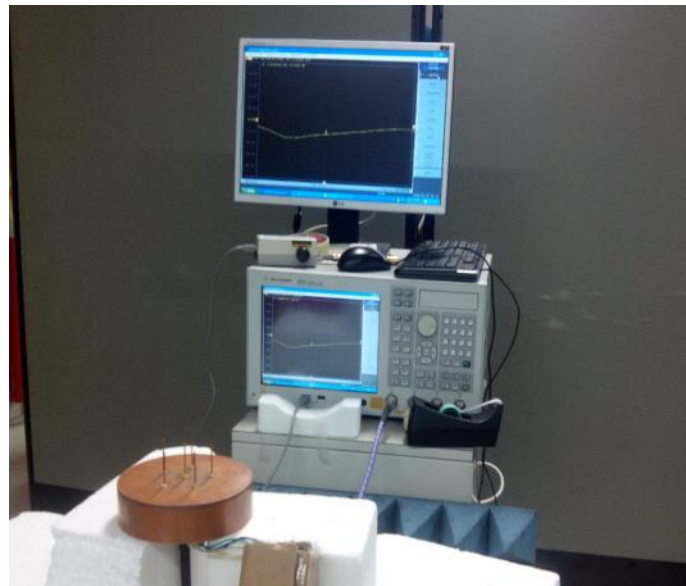


Figura 44 - Imagem da realização de medidas no laboratório de radiofrequência IST

Para obter os valores das reatâncias ótimas obtidas nas simulações efetuadas, aplicaram-se as tensões apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Valor de tensão aplicada para obter as reatâncias máximas e mínimas

Reatâncias jX_m [Ω]	Tensão [V]
$X_m = 16$ (Máximo valor da gama)	1
$X_m = -16$ (Mínimo valor da gama)	20

A tabela 8 apresenta as várias combinações das tensões utilizadas na realização das medições do módulo do coeficiente da matriz de dispersão ($|S_{11}|_{dB}$).

Tabela 8 - Combinações de tensão aplicadas aos monopolos parasitas

Combinação	V_1 [V]	V_2 [V]	V_3 [V]	V_4 [V]	V_5 [V]
1	0	0	0	0	0
2	20	20	20	1	1
3	1	20	20	20	1
4	1	1	20	20	20
5	20	1	1	20	20
6	20	20	1	1	20

A figura 45 apresenta a curva referente à medida do $|S_{11}|_{dB}$, sem a aplicação de tensões de polarização aos díodos (combinação 1). A reta assinalada a preto representa o valor limite do módulo do S_{11} , $|S_{11}|_{dB} \leq -10$, para o qual esta cumpre os requisitos de adaptação [8].

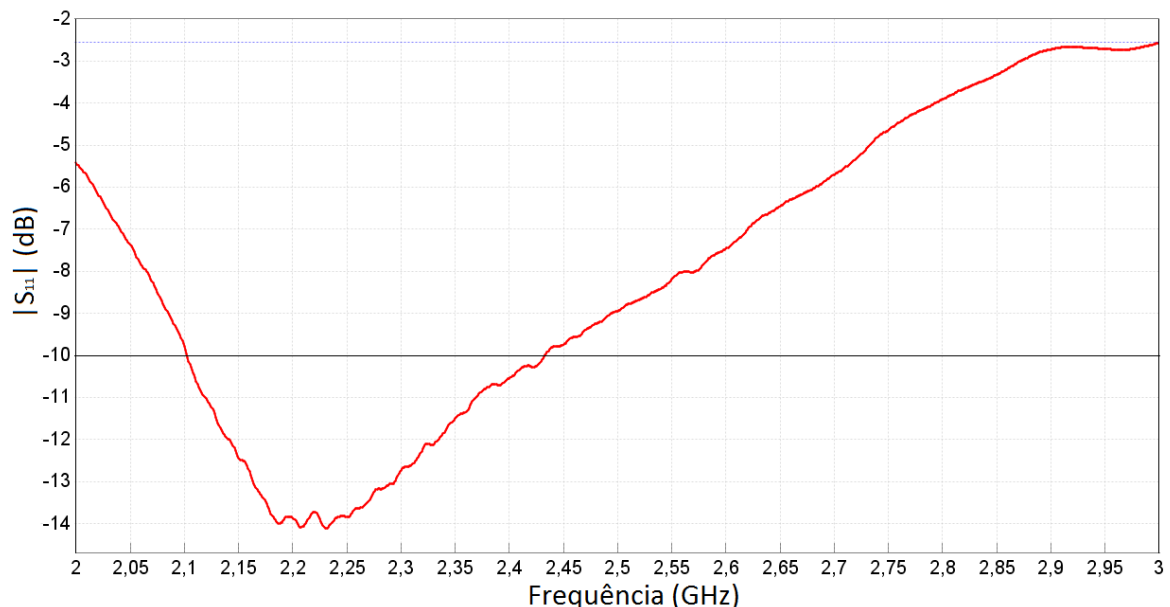


Figura 45 - Módulo do S_{11} para o varrimento de frequências executado

Na frequência de 2,4 GHz obteve-se um valor de $|S_{11}|_{dB} = -10,54$. Este valor cumpre os requisitos de adaptação. Em seguida através da rotação dos potenciômetros alteraram-se as tensões aplicadas aos díodos. A alteração realizou-se de acordo as combinações apresentadas na tabela 8. A figura 46 apresenta o gráfico da variação do $|S_{11}|$ em função da frequência, com a aplicação de tensões aos monopolos parasitas. Na legenda indicaram-se os valores de tensão aplicada para cada curva.

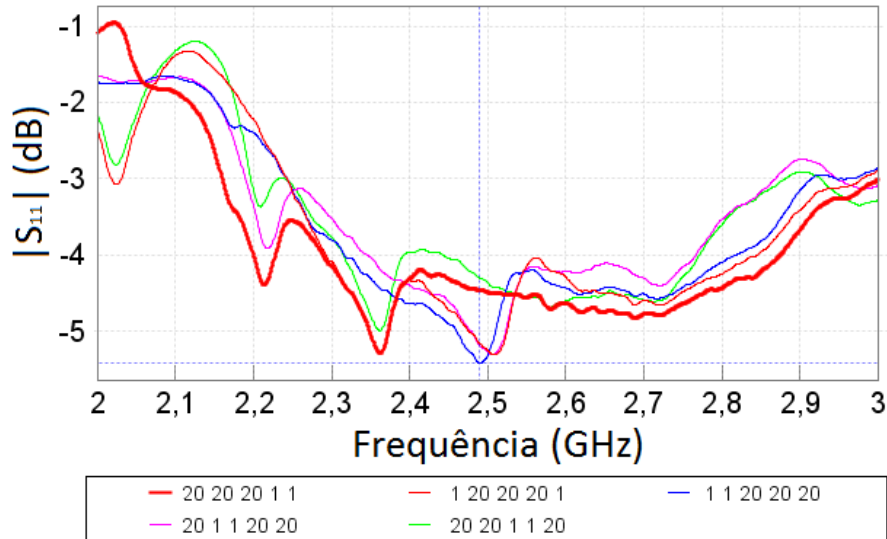


Figura 46 - Variação do módulo do S_{11} para as combinações da tabela 8

Após a análise dos resultados obtidos nas medições anteriores considerou-se a antena ESPAR concluída. Em seguida realizaram-se as medições dos diagramas de radiação no plano E e H.

6.4 Diagramas de radiação

As medições dos diagramas de radiação no plano magnético (H) e elétrico (E) realizaram-se na câmara anecóica da Área Científica de Telecomunicações do DEEC do IST.

Esta câmara anecóica tem um comprimento de 8,5 m, largura de 4,6 m e altura de 3,6 m. Permite efetuar medidas num intervalo de frequências entre 1 GHz e 20 GHz. As paredes da câmara são revestidas por elementos de espuma revestidos com grafite, garantindo uma boa absorção dos sinais que atingem as paredes da câmara. No interior desta encontram-se dois posicionadores, a uma distância de sensivelmente 5 m. Um dos posicionadores contém a antena de receção, corneta de abertura retangular, e no outro é colocada a antena a testar. O posicionador que contém a antena realiza movimentos de rotação, que permitem efetuar as medições no plano horizontal e vertical [34].

O comando dos posicionadores é feito através de:

- Power Control Unit, AL-4146-2, Orbit Advanced Technologies.
- Position Controller, AL-4906-3A, Orbit Advanced Technologies.

O gerador de sinal e o recetor de sinal encontram-se no exterior da câmara. Os equipamentos utilizados são:

- MXG Analog Signal Generator, 100kHz-20GHz, N5183A, Agilent Technologies.
- PNA-X Measurement Receiver, N5264A, Agilent Technologies.

Os posicionadores são controlados no exterior da câmara através de um programa. Este também faz a aquisição e tratamento dos dados. A figura 47 mostra os equipamentos de gerador de sinal e recetor de sinal (à esquerda do monitor) e os controladores dos posicionadores (à esquerda do gerador e recetor). O esquema de blocos da câmara anecóica é apresentado no Anexo D.



Figura 47 - Gerador de sinal e recetor de sinal (exterior da câmara anecóica)

A figura 48 mostra a imagem dos posicionadores, em que um deles contém a antena ESPAR (posicionador da esquerda). Esta fixou-se ao suporte do posicionador através de uma bolacha de transição em madeira. O posicionador onde está colocada a antena executa movimentos de rotação, mas garante que a antena permanece imobilizada e alinhada, quando se realizam as medições.

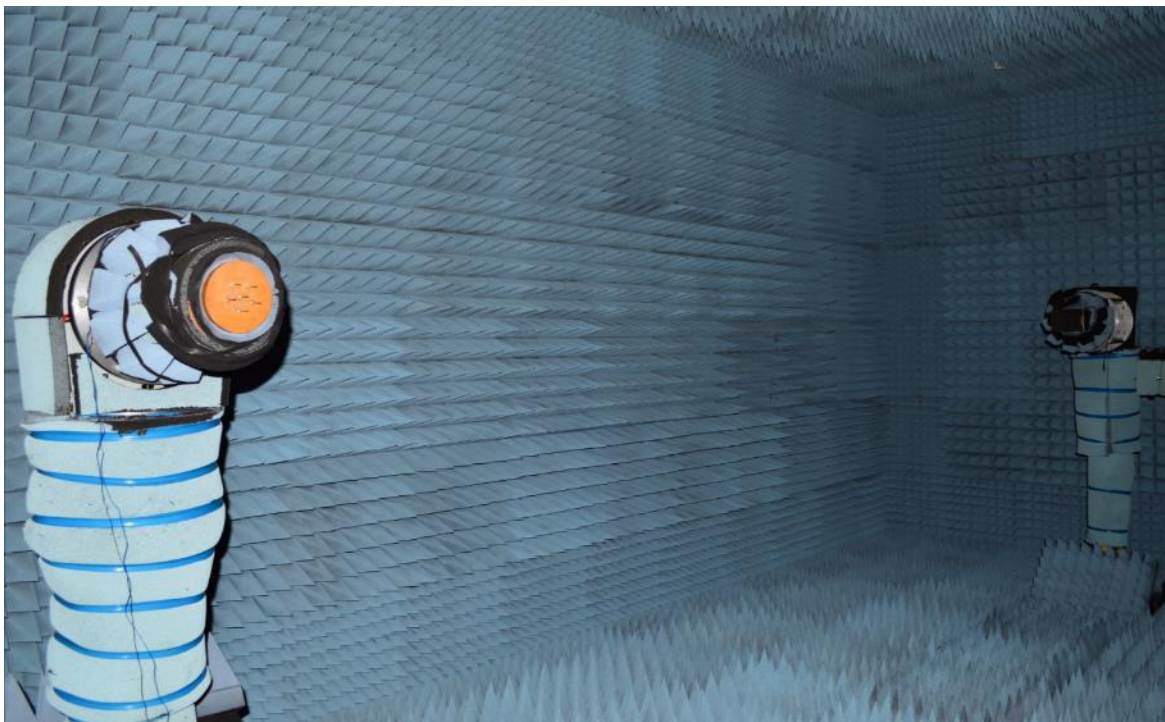


Figura 48 - Antena no posicionador da câmara anecóica

Ao longo das medições dos diagramas de radiação aplicaram-se as tensões nos díodos segundo o critério das simulações efetuadas. Consideraram-se quatro combinações diferentes de tensão aplicada em cada díodo. Na tabela 9 estão representadas as várias combinações utilizadas.

Tabela 9 - Combinações de tensão aplicadas aos díodos nas medições

Combinação	V_1 [V]	V_2 [V]	V_3 [V]	V_4 [V]	V_5 [V]
1	0	0	0	0	0
2	20	20	20	1	1
3	1	1	1	20	20
4	1	1	20	20	1

Os diagramas de radiação obtidos, com as medições realizadas, são apresentados seguidamente. Após cada diagrama, o mesmo é analisado e é realizada a comparação com as simulações efetuadas.

6.4.1 Polarização e polarização cruzada

Após a fixação da antena no posicionador, efetuou-se a ligação da mesma ao sistema de controlo. Na realização das primeiras medições, os potenciômetros colocaram-se no valor mínimo de tensão (0 V). Nesta situação não há tensão aplicada aos monopolos, e por consequência não existe variação do comprimento elétrico dos mesmos.

Efetuuou-se a medição do diagrama de radiação para a presente situação. Nesta, e de acordo com as simulações efetuadas é expectável a existência de um diagrama de radiação sem direção preferencial (Anexo C).

A figura 49 apresenta o diagrama de radiação no plano E. Nesta figura demonstra-se a comparação, da polarização normal com a polarização cruzada. A cor azul representa a polarização normal e a cor vermelha a polarização cruzada.

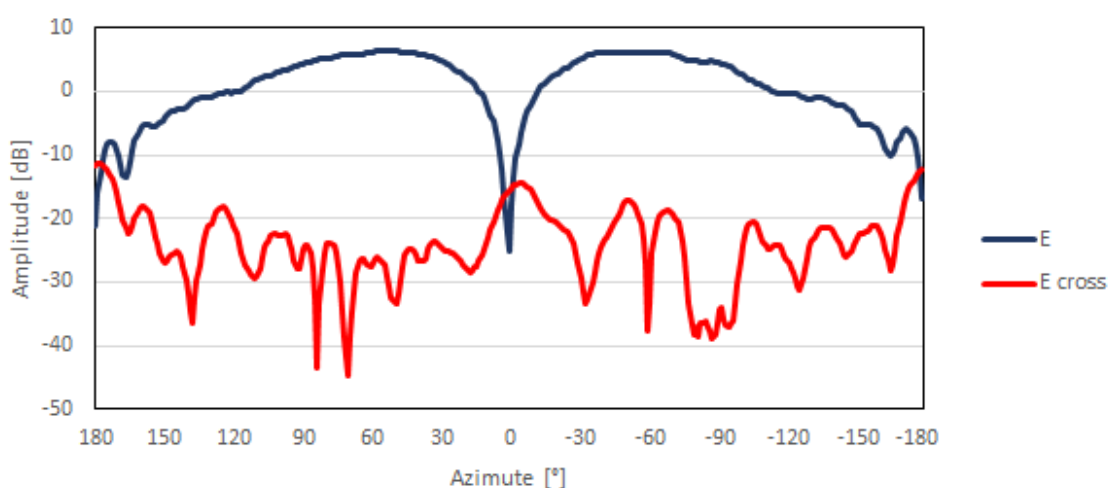


Figura 49 - Diagrama de radiação plano E

Da análise do diagrama de radiação no plano E verifica-se que a curva azul apresenta uma simetria em relação ao azimute 0° . Nesta existe um mínimo de radiação que coincide com o azimute 0° . Os máximos de radiação ocorrem a 53° e a -64° , como um ganho de 6,5 dBi e 6,1 dBi respetivamente. Segundo o máximo de radiação do plano E para polarização normal (53°), esta encontra-se 27 dB acima da polarização cruzada. A figura 50 apresenta o diagrama de radiação no plano H.

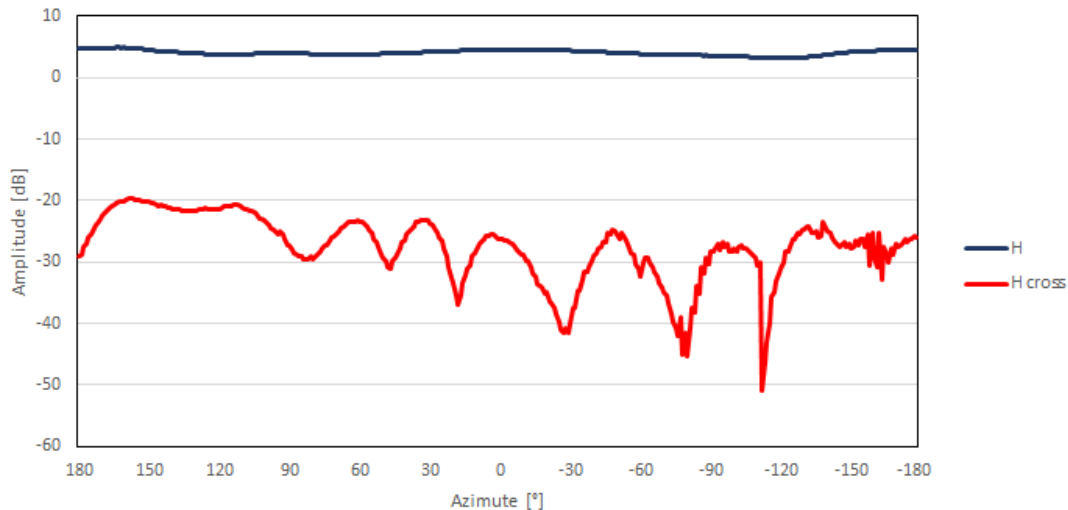


Figura 50 - Diagrama de radiação plano H

Através da análise do gráfico do plano H verifica-se que a curva azul apresenta um valor de amplitude muito semelhante em todo o azimute. Para o valor de azimute 0° obteve-se um valor de amplitude de 4,5 dBi para a polarização normal, esta encontra-se 30 dB acima da polarização cruzada.

Nas medições realizadas existe concordância entre as previsões teóricas e as medidas experimentais, evidenciando-se uma simetria no diagrama de radiação referente à polarização normal.

6.4.2 Variação azimutal do lobo principal

Nesta secção efetuou-se a medição do diagrama de radiação após alterar a configuração das tensões aplicadas anteriormente. Nesta medição aplicaram-se diferentes valores de tensão aos vários monopulos, de modo a variar o diagrama de radiação obtido na secção anterior. Com a aplicação da combinação de tensões 20V, 20V, 20V, 1V, 1V, e de acordo as simulações efetuadas, o diagrama de radiação deve adquirir uma característica diretiva, diferente em azimute.

Os diagramas de radiação seguintes demonstram a comparação das medições efetuadas na secção anterior (curva azul), em que não se aplicou tensão aos monopolos parasitas, e a configuração apresentada neste capítulo (curva vermelha). A figura 51 apresenta o diagrama de radiação no plano E para as duas configurações.

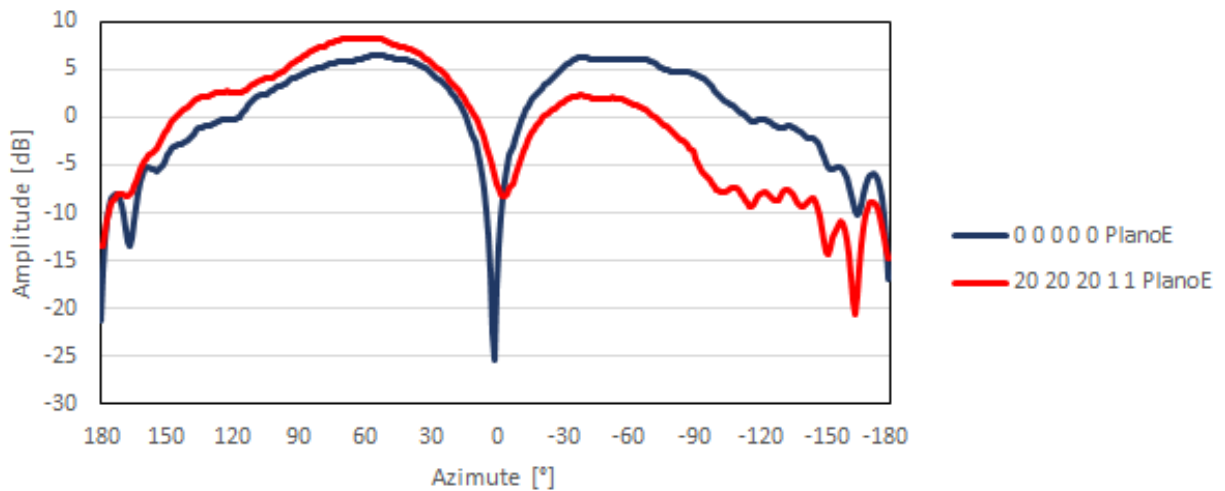


Figura 51 - Diagrama de radiação plano E

Da análise do diagrama de radiação no plano E, verifica-se que a curva a vermelho apresenta um máximo de radiação a 57°, com a amplitude de 8,3 dBi. O máximo referido representa a direção do lobo principal. A curva a vermelho apresenta uma maior amplitude que a curva azul na zona de azimute positivo, por outro lado, na zona de azimute negativo a amplitude da curva vermelha é inferior à azul. A figura 52 apresenta o diagrama de radiação no plano H para as duas configurações.

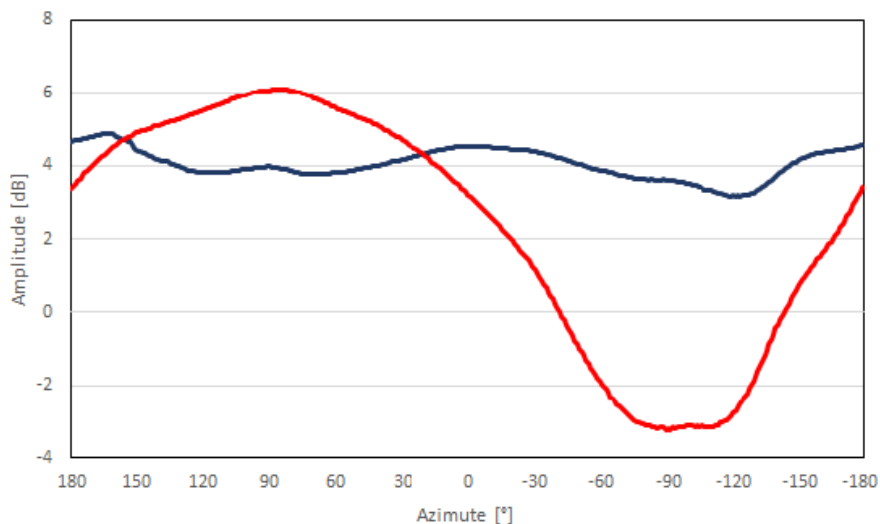


Figura 52 - Diagrama de radiação plano H

Da análise do diagrama de radiação no plano H, verifica-se que a curva a vermelho demonstra que a zona de azimute positivo apresenta maior amplitude de radiação do que na zona de azimute negativo. É visível a existência de um máximo na curva vermelha no azimute 86°, com o valor de 6,1 dBi. O mínimo ocorre no azimute -90° e com o valor de amplitude de -3,23 dBi. Ao longo de todo o

azimute com exceção de 155° até 20° a curva vermelha encontra-se com amplitude inferior à curva azul.

Da análise realizada após a apresentação de cada um dos diagramas de radiação conclui-se que na primeira configuração não se obtém um diagrama de radiação com características diretivas, ou seja, a radiação não é direcionada para um local preferencial, mas sim de forma muito semelhante em todas as direções. Na segunda configuração obtém-se um diagrama de radiação com características diretivas. A amplitude é superior na zona de azimute positivo e inferior na zona de azimute negativo.

A influência dos monopolos quando associados a uma carga reativa já verificada em simulação, é agora comprovada através das medições realizadas. Os diagramas de radiação obtidos são coerentes com o estudado anteriormente.

6.4.3 Máximo na direção da bissetriz dos monopolos

Nesta secção efetuou-se a medição do diagrama de radiação após alterar a configuração das tensões aplicadas anteriormente. Na medição realizada alteraram-se os valores de tensão aplicados aos vários monopolos, de modo a variar o diagrama de radiação obtido na secção anterior. Utilizou-se a combinação de tensões 1V, 1V, 1V, 20V, 20V. A configuração apresentada nesta secção apresenta as tensões invertidas em relação à secção anterior. O critério utilizado para alterar as tensões, teve o objetivo de obter um diagrama de radiação com o máximo de radiação para a direção simétrica à obtida na secção anterior. A figura 53 demonstra sob a forma de esquema as direções do máximo de radiação previstas em simulação.

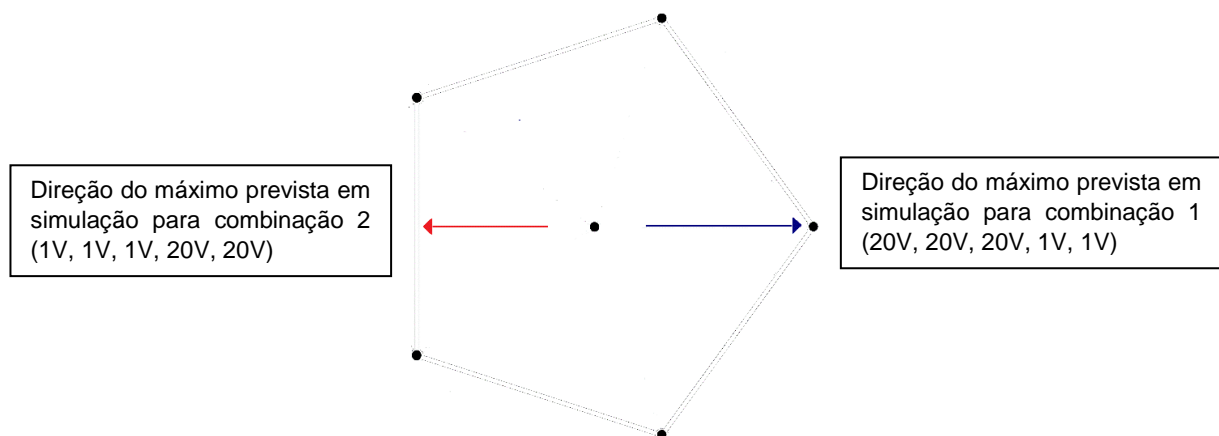


Figura 53 - Esquema ilustrativo das direções dos máximos prevista em simulação

Os diagramas de radiação seguintes demonstram a comparação das medidas efetuadas na secção anterior (curva azul), em que se aplicou a combinação 20V, 20V, 20V, 1V, 1V, e a secção apresentada neste capítulo (curva vermelha). A figura 54 apresenta o diagrama de radiação no plano E para as duas configurações.

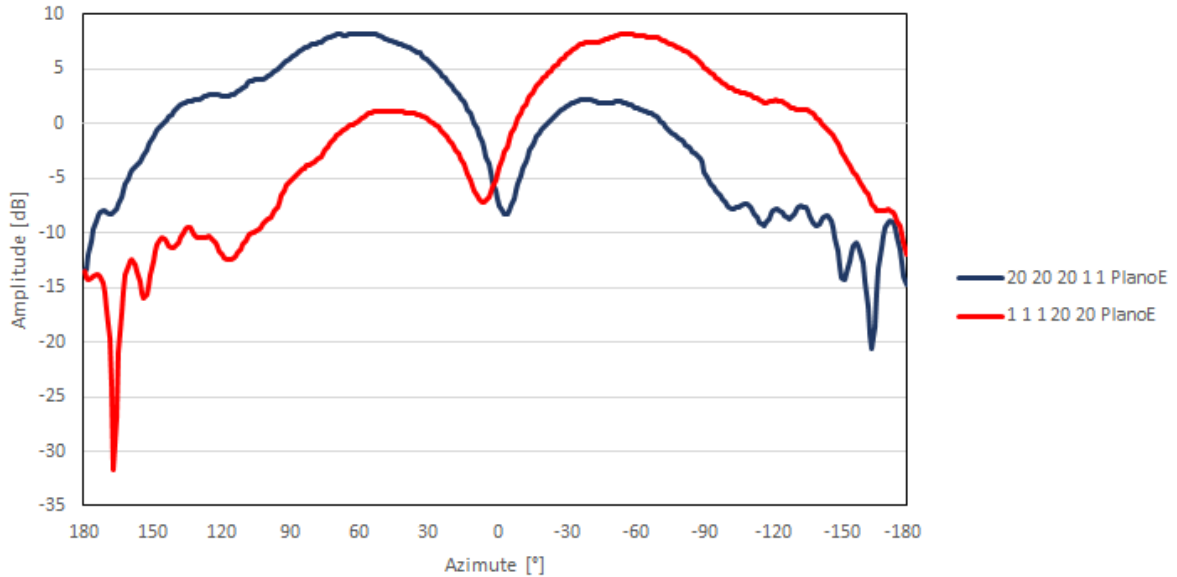


Figura 54 - Diagrama de radiação plano E

Da análise do diagrama de radiação no plano E, verifica-se que a curva a vermelho apresenta um máximo de radiação a -57° , com a amplitude 8,2 dBi. Esta curva e a curva azul são simétricas, em relação ao azimute 0° . De notar que na combinação utilizada na secção anterior o máximo ocorreu a 57° e a amplitude do mesmo é praticamente igual à da medição realizada nesta secção. A figura 55 apresenta o diagrama de radiação no plano H para as duas configurações.

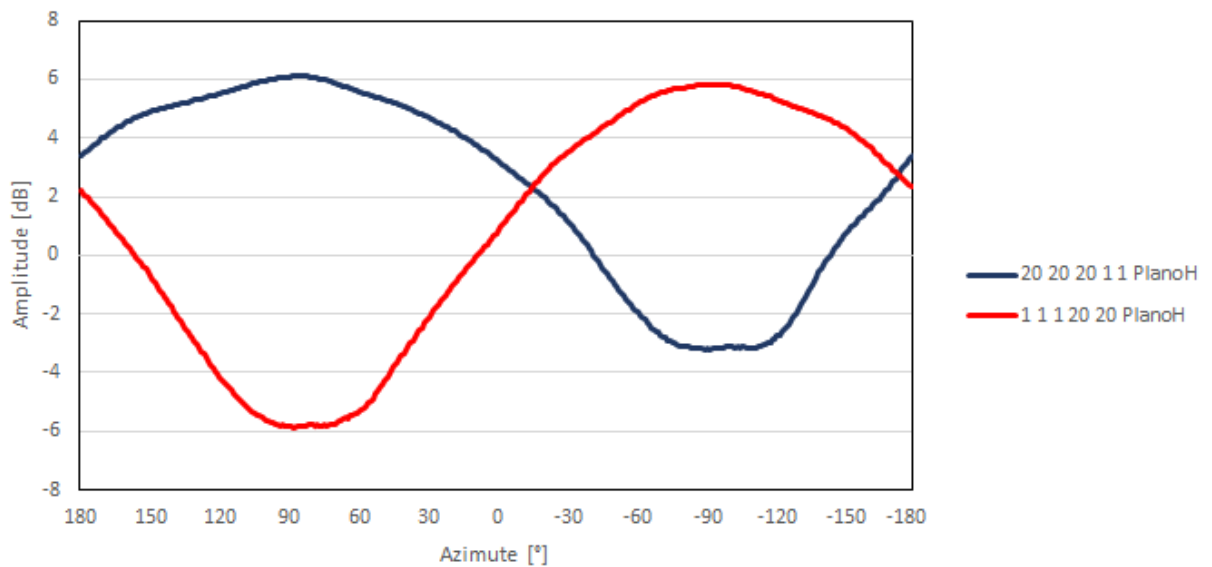


Figura 55 - Diagrama de radiação plano H

Da análise do diagrama de radiação no plano H, verifica-se que a curva a vermelho demonstra que a zona de azimute positivo apresenta menor amplitude de radiação, quando comparada com a zona de azimute negativo. É visível a existência de um máximo na curva vermelha no azimute -94° , com o valor de 5,8 dBi. O mínimo ocorre no azimute 87° e com o valor de amplitude de -5,86 dBi. A curva vermelha apresenta maior amplitude que a curva azul, no azimute compreendido entre -16° e -174° . No restante azimute esta encontra-se com amplitude inferior à curva azul. A existência de um máximo na curva vermelha coincide com o mínimo na curva azul. O mesmo se verifica quando ocorre um mínimo na curva vermelha, existe um máximo na curva azul.

A análise realizada após a apresentação de cada um dos diagramas de radiação conclui-se que tanto na primeira configuração (curva azul), como na segunda (curva vermelha), se obtém um diagrama de radiação com características diretivas. Na segunda configuração obtém-se um diagrama de radiação com o máximo de radiação para a direção oposta à obtida na primeira configuração (bissetriz dos monopolos). De acordo com os resultados obtidos conclui-se que o diagrama de radiação pode variar em condições muito semelhantes de 36° em 36° , para isso, é necessário comutar as tensões aplicadas.

A influência dos monopolos quando as cargas reativas são invertidas, já verificada em simulação, foi comprovada através das medições realizadas. Os máximos de radiação obtidos nos diagramas de radiação anteriores têm direções simétricas em relação ao eixo central, o que garante a coerência com as simulações efetuadas.

6.4.4 Verificação de simetria

Na presente secção efetuou-se uma rotação de 72° da antena a partir da posição onde se realizaram as medições secção anterior. Posteriormente alterou-se a configuração das tensões aplicadas e realizou-se a medição do diagrama de radiação. Na medição realizada alteraram-se os valores de tensão para a combinação de tensões 1V, 1V, 20V, 20V, 1V. A configuração apresentada nesta secção apresenta uma mudança relativamente à combinação da secção anterior. O objetivo desta medição é alcançar um diagrama de radiação com características semelhantes às da secção anterior, mas com a variação do diagrama de radiação em azimute. Se os resultados obtidos se comprovarem idênticos, pode-se concluir sobre a simetria da antena. Se realizar rotações à antena e alterar a combinação de tensões utilizada é possível obter o máximo de radiação com um valor semelhante. Este fenómeno deve-se ao facto de os monopolos estarem dispostos sob a forma de um pentágono regular. A figura 56 demonstra sob a forma de esquema as direções dos máximos de radiação previstas em simulação.

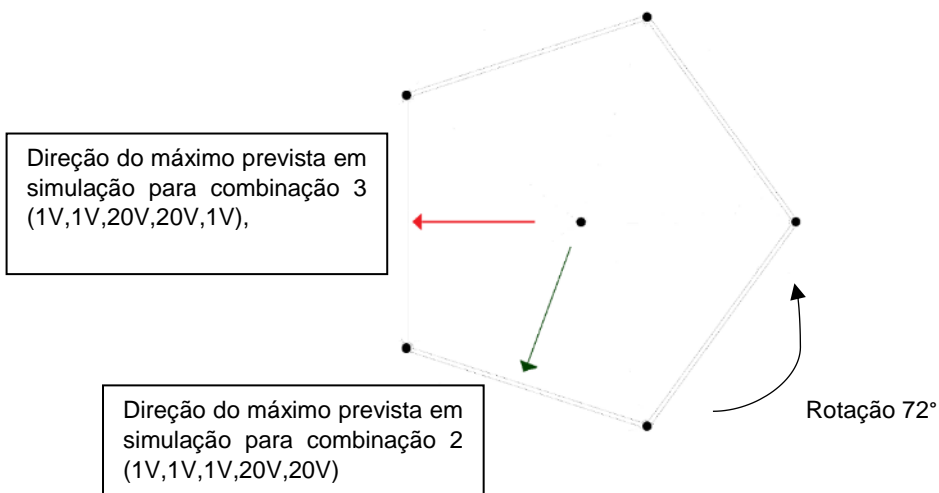


Figura 56 - Esquema ilustrativo das direções do máximo previstas em simulação

Os diagramas de radiação seguintes demonstram a comparação das medidas efetuadas na secção anterior (curva verde), em que se aplicou a combinação 1V, 1V, 1V, 20V, 20V, e a combinação apresentada nesta secção (curva vermelha). A curva de cor azul, representa a primeira medição realizada, sem tensão aplicada aos monopolos parasitas. A figura 57 apresenta o diagrama de radiação no plano E para as duas configurações.

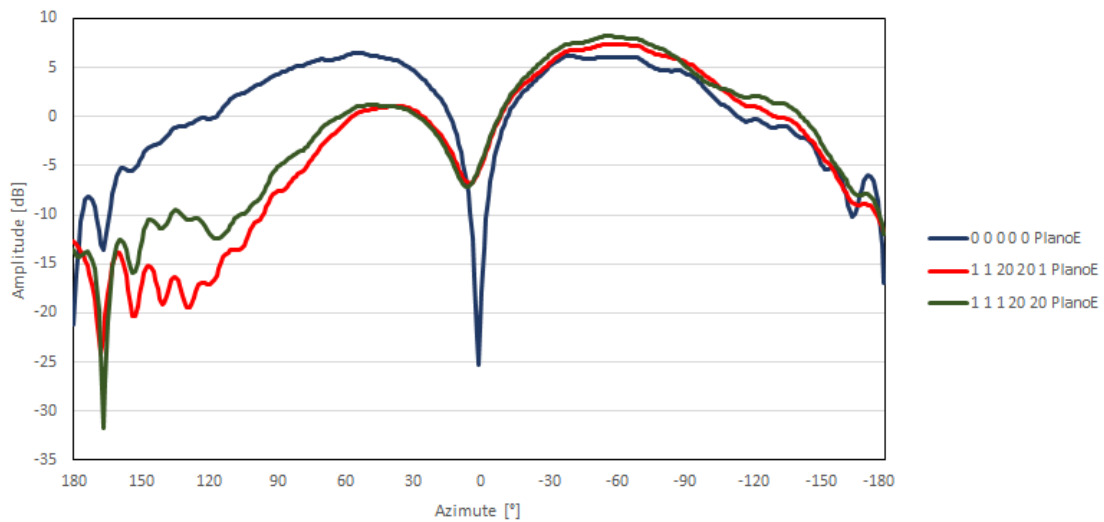


Figura 57 - Diagrama de radiação plano E

Da análise do diagrama de radiação no plano E, verifica-se que a curva a vermelho apresenta um máximo de radiação a -57° , com a amplitude 7,4 dBi. Na combinação utilizada na secção anterior o máximo ocorre a -57° e a amplitude encontra-se 0,8 dB acima. As curvas verde e vermelha são semelhantes no diagrama de radiação do plano E. A figura 58 apresenta o diagrama de radiação no plano H para as duas configurações.

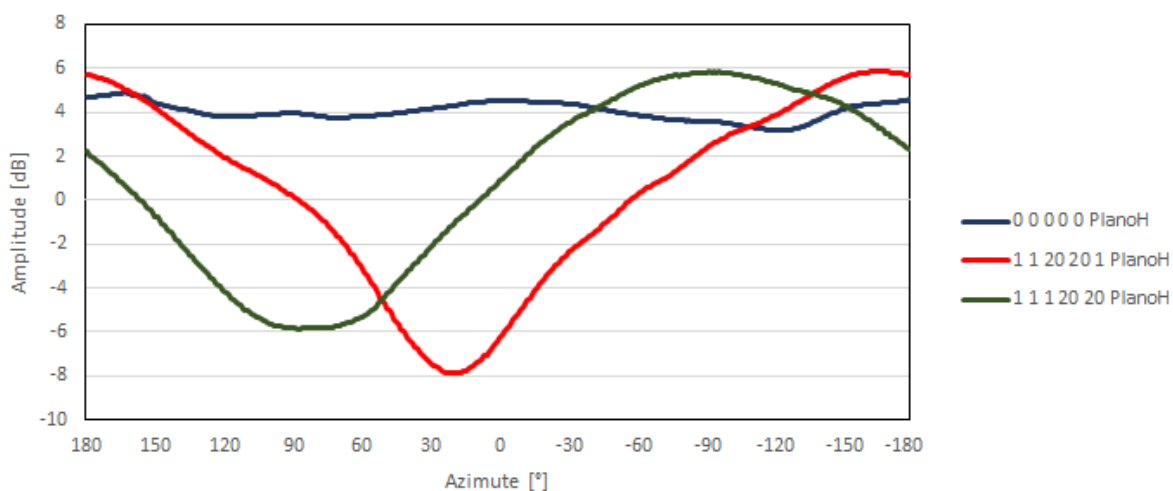


Figura 58 - Diagrama de radiação plano H

Da análise do diagrama de radiação no plano H, verifica-se que a curva a vermelho demonstra um mínimo a 19° , com amplitude de -7,9 dBi, e um máximo a -164° , com amplitude de 5,8 dBi. Através da observação do gráfico anterior é visível que a amplitude do mínimo da curva a vermelho se encontra 2 dB a baixo do mínimo da curva a verde. Os máximos das duas curvas mencionadas apresentam amplitudes semelhantes, de aproximadamente 6 dB. Há um desfasamento em azimute de 72° dos valores máximos e mínimos das duas curvas. Este era expectável devido à alteração das tensões que permite a comutação do feixe de radiação.

A análise realizada após a apresentação de cada um dos diagramas de radiação, permite concluir que as configurações, apresentadas pelas curvas de cor verde e vermelha, apresentam características diretivas.

A distribuição dos monopolos sobre o plano de terra, de modo a formar um pentágono regular, permite obter os resultados idênticos para a situação apresentada nesta secção. Os diagramas de radiação obtidos são semelhantes. Esta conclusão era expectável pelas simulações efetuadas, o que garante a coerência com resultados obtidos.

6.5 Comparação das simulações com os resultados experimentais

No capítulo 4 obtiveram-se os diagramas de radiação com recurso ao programa de simulação e que só podem ser comprovados após as medições realizadas neste capítulo. Os resultados obtidos em simulação serviram para antever o que iria acontecer nas medidas experimentais. As simulações efetuadas, seguiram uma metodologia, que se utilizou também na fase de medições. A metodologia

seguida consistiu numa fase inicial verificar o resultado obtido para a situação onde não se aplica tensão nos monopolos parasitas. Após esta medição alterou-se a combinação de tensões aplicadas e verificou-se a influência desta no diagrama de radiação. Os diagramas de radiação compararam-se com os resultados obtidos em simulação e estes foram coerentes.

Esta secção apresenta a comparação dos resultados obtidos em simulação, para a configuração onde se apresenta a antena ESPAR com o plano de terra e respetiva aba (secção 4.5) e os resultados obtidos para as medições correspondentes. Em simulação variou-se o comprimento dos monopolos, enquanto que nas medições foram associadas as reatâncias variáveis aos monopolos. A combinação que corresponde à medição realizada é 20V, 20V, 20V, 1V, 1V. A tabela 10 apresenta os valores obtidos nas simulações e nas medições experimentais. Os valores de φ e θ representam as direcções dos máximos e dos mínimos de radiação obtidos nos diagramas de radiação.

Tabela 10 - Comparação de resultados obtidos em simulação com resultados experimentais

Resultados experimentais				Resultados simulados			
Plano E		Plano H		Plano E		Plano H	
$\theta = 90^\circ$	$\theta = -90^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 180^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = -90^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 180^\circ$
8,3 dBi	-3,6 dBi	6,1 dBi	-3,2 dBi	6,7 dBi	-8,2 dBi	6,7 dBi	-8,2 dBi

Os diagramas de radiação obtidos permitem concluir que os máximos e mínimos são coincidentes em azimute. As simulações efetuadas e as conclusões que delas se retiraram são congruentes com os resultados obtidos ao longo do presente capítulo.

6.6 Conclusão

Ao longo deste capítulo apresentam-se as medições da impedância da antena através do analisador de redes. Com o mesmo equipamento efetuaram-se posteriormente as medições do módulo do parâmetro de dispersão S_{11} . Posteriormente, após a análise dos resultados obtidos nas medições anteriores, concluiu-se que a antena cumpre os requisitos de adaptação e como tal, considerou-se a mesma concluída. Seguidamente realizaram-se as medições dos diagramas de radiação, na câmara anecóica do DEEC IST e do IT.

As medições dos diagramas de radiação iniciaram-se sem aplicar tensão aos monopolos parasitas. Para a situação descrita obteve-se um diagrama de radiação sem direcção preferencial. Esta medição não apresenta características diretivas, de acordo com o que se obteve em simulação.

Seguidamente alteraram-se as tensões e realizaram-se as medições. Aplicou-se a combinação de tensões 20V, 20V, 20V, 1V, 1V e verificou-se que o diagrama de radiação apresenta características diretivas na direcção do monopolo. Comparou-se este diagrama com o obtido sem a aplicação de tensões nos monopolos e verifica-se a existência de um máximo de radiação para uma direcção e um mínimo na direcção oposta. Em seguida alterou-se a combinação para 1V, 1V, 1V, 20V, 20V e verificou-

se que o máximo de radiação era obtido para a direção simétrica em relação ao eixo central. Os resultados obtidos para estas medições comprovam as simulações efetuadas.

Posteriormente realizou-se a rotação da antena ESPAR em 72° e aplicou-se a combinação de tensões 1V, 1V, 20V, 20V, 1V. O objetivo desta medição é verificar a simetria da antena. Os resultados obtidos nesta medição têm características idênticas aos da combinação 20V, 20V, 20V, 1V, 1V. Há um desfasamento de 72° entre os máximos do diagrama de radiação que se deve à alteração das tensões aplicadas aos díodos.

Os resultados alcançados nas medições experimentais são coerentes e coincidem com as simulações efetuadas. A nível da comutação do diagrama de radiação em todo o azimute, verifica-se que, com a aplicação de tensão aos díodos, este objetivo é concretizado. A tabela 11 apresenta a síntese dos resultados obtidos nesta secção para as configurações utilizadas.

Tabela 11 - Síntese das características de radiação da antena ESPAR de 6 elementos

Combinações	Plano E		Plano H	
	Ganho (dBi)	Direção (Máx)	Ganho (dBi)	Direção (Máx)
1	6,5	Sdp ⁽¹⁾	4,5	Sdp ⁽¹⁾
2	8,3	$\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$	6,1	$\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$
3	8,2	$\varphi = 180^\circ$ e $\theta = -90^\circ$	5,8	$\varphi = 180^\circ$ e $\theta = -90^\circ$
4	7,4	$\varphi = 252^\circ$ e $\theta = -90^\circ$	5,8	$\varphi = 252^\circ$ e $\theta = -90^\circ$
(1) Sem direção preferencial				

Após uma análise cuidada dos resultados experimentais, com e sem tensões aplicadas aos monopolos parasitas, verificou-se que os resultados das medições estão coerentes com as simulações efetuadas. Em suma, pode concluir-se, que as medidas experimentais demonstram que o objetivo deste projeto foi concretizado. As medições realizadas posteriormente às simulações comprovam a teoria associada à antena ESPAR.

Capítulo 7

7 Comparação com a antena Yagi-Uda impressa e conclusões finais

7.1 Introdução

A presente dissertação de mestrado tem como intuito o estudo comparativo de duas antenas para comunicação em 2,4 GHz. Estas são uma Yagi-Uda impressa e uma antena ESPAR que foi construída no âmbito deste projeto. Este capítulo apresenta um resumo das conclusões retiradas em cada um dos capítulos, bem como os objetivos cumpridos. Antecedente à construção do protótipo foram realizadas simulações no programa 4NEC2X que utiliza o algoritmo genético para a otimização.

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e contribuições originais da presente dissertação.

7.2 Comparação com Yagi-Uda impressa

A antena Yagi-Uda impressa e antena ESPAR estão incluídas na categoria das antenas inteligentes. A figura 59 apresenta uma imagem da antena Yagi-Uda impressa e a figura 60 mostra uma imagem da antena ESPAR após a sua construção.

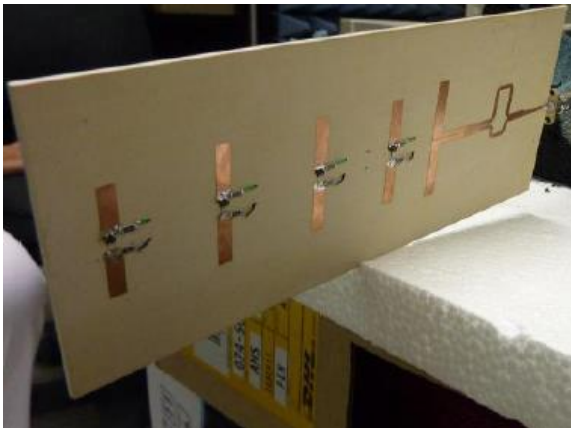


Figura 59 – Protótipo da antena Yagi-Uda impressa [6]



Figura 60 - Protótipo da antena ESPAR sobre o suporte de madeira que serviu para fixação

As duas antenas referidas são protótipos construídos para comunicação com os Robots desenvolvidos pelo Exército Português. As capacidades destas antenas são diferentes. A antena Yagi-Uda impressa, protótipo desenvolvido numa dissertação de mestrado antecedente, tem como principal característica de radiação a possibilidade de permitir um ganho elevado e controlo da HPBW (Largura

de feixe a meia potência) [6]. O protótipo da antena ESPAR construído ao longo desta dissertação teve como principal objetivo a possibilidade de modificar a direção do ganho máximo em azimute.

O protótipo da antena Yagi-Uda impressa, permite regular a HPBW e a amplitude do ganho através da combinação de elementos diretores em curto-circuito e em aberto. Para realizar a comutação foram utilizados díodos PIN, colocados entre dois “braços” dos elementos diretores, que quando polarizados diretamente permitem a passagem de corrente estabelecendo-se o curto-circuito e quando polarizados inversamente, não conduzem, simulando um circuito aberto [6].

As combinações são apresentadas sob a forma de 0 e 1. O 0 representa a posição OFF dos díodos, ou seja, o curto-circuito. O 1 representa a posição ON dos díodos, ou seja, o circuito aberto. A antena impressa é constituída por quatro diretores. Na primeira medição realizada, combinação 0000, todos os diretores estão em circuito aberto. Na última medição realizada, combinação 1111, todos os diretores estão em curto-circuito. A tabela 12 apresenta os resultados obtidos nas medições experimentais da antena Yagi-Uda impressa para o plano E e H [6].

Tabela 12 - Síntese das características de radiação da antena Yagi-Uda impressa [6]

Combinações	Plano E		Plano H	
	Ganho (dBi)	HPBW (°)	Ganho (dBi)	HPBW (°)
0000	5,8	76	5,9	96
1000	7,1	65	7,2	82
1100	7,2	60	7,5	75
1101	7,9	54	8,1	72
1111	7,7	58	7,8	71

Verifica-se através da análise da tabela anterior, à medida que os díodos estão em curto-circuito, o HPBW diminui e o ganho aumenta. A característica básica desta antena Yagi-Uda é a possibilidade de se obter um diagrama de radiação com um lobo principal mais estreito.

As características que as duas antenas possuem permitem que estas sejam utilizadas para melhorar e facilitar a navegação dos robots adquiridos pelo Exército e que ainda se encontram em desenvolvimento. As vantagens que cada uma possui podem ser utilizadas para este fim. A possibilidade da antena Yagi-Uda impressa regular a HPBW, passando de um lobo principal mais largo para um mais estreito pode ser utilizado na comunicação com um ou mais robots. Se o lobo principal for mais largo há a possibilidade de comunicar com mais do que um robot, caso contrário, se este for estreito possibilita comunicar apenas com um robot.

A figura 61.A mostra uma imagem ilustrativa de uma HPBW com um valor mais elevado (lobo principal mais largo), que possibilita a comunicação com dois robots simultaneamente. A figura 61.B é uma imagem ilustrativa de uma HPBW com o valor mais reduzido (lobo principal mais estreito), que possibilita a comunicação com apenas um dos robots.

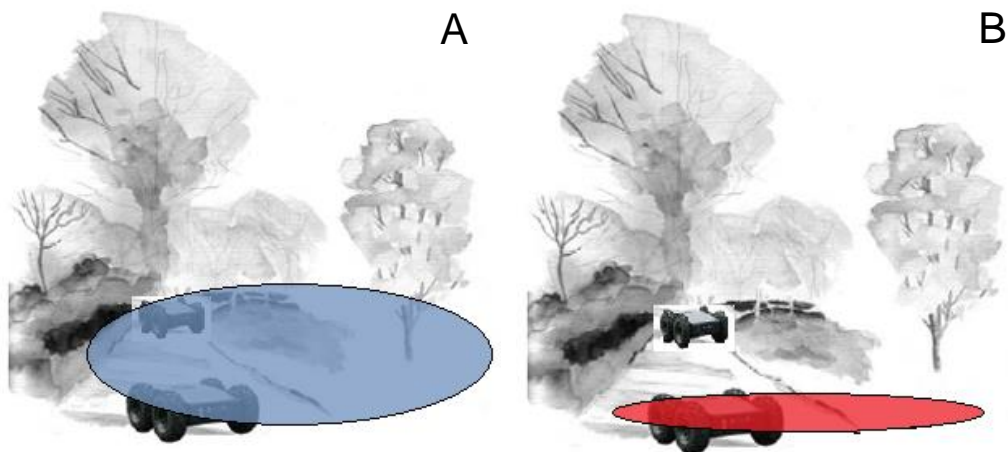


Figura 61 - Efeitos na comunicação: A (maior largura de feixe) e B (menor largura de feixe)

No caso da antena ESPAR a possibilidade de comutar o diagrama de radiação ao longo de 360° , permite comunicar com um robot em movimento. Se este se deslocar é possível através da alteração das tensões direcionar o máximo de radiação na sua direção, mantendo a antena imóvel.

7.3 Considerações finais

Durante a realização desta dissertação fui confrontado com várias decisões de projeto que tiveram de ser tidas em conta.

Numa fase inicial foi realizada uma extensa pesquisa sobre as antenas inteligentes. A revisão de literatura, permitiu perceber a constituição das mesmas e o efeito desta nas suas características de radiação. A evolução histórica permitiu perceber como estas antenas foram desenvolvidas e as vantagens que elas possibilitam (Capítulo 2).

Posteriormente à realização do levantamento do estado da arte, elaborou-se um estudo teórico de um caso base destas antenas, o agregado de três elementos. O estudo deste possibilitou perceber o efeito dos elementos parasitas no diagrama de radiação (Capítulo 3). Realizou-se a primeira abordagem ao programa de simulação, 4NEC2X. Este não necessita de uma licença de utilização e permite simular o agregado em questão.

Realizado o estudo teórico, avançou-se para a otimização da antena, através de um algoritmo genético. A escolha deste exigiu um estudo prévio do seu funcionamento e do modo de aplicação à antena ESPAR. A aplicação deste método às antenas inteligentes tem sido muito frequente, pois permite otimizar diversas variáveis em simultâneo (Capítulo 4). A otimização dos vários parâmetros desta antena seguiu uma metodologia já está aplicada numa dissertação de mestrado antecedente e revelou-se importante para esta fase do projeto.

Inicialmente dimensionou-se a estrutura da antena. A escolha do número de elementos teve de ser considerada, pois à medida que o número de elementos parasitas aumenta, o tempo de simulação e a complexidade de construção aumentam. Foi necessário tomar a decisão de construir uma ESPAR com um número de elementos que permitisse obter as características pretendidas e em

que a complexidade de construção fosse acessível. Partindo deste princípio, houve alteração da estrutura básica proposta e em seguida realizaram-se todos os passos para dimensionamento da estrutura. A escolha recaiu numa ESPAR de 6 elementos, 1 ativo e 5 passivos. Esta solução permitiu estabelecer um bom compromisso entre desempenho e complexidade. Após a definição da estrutura básica da antena realizou-se a otimização de parâmetros como o ganho e a RFT e o dimensionamento de variáveis como a altura, o diâmetro e a distribuição dos monopolos. A distância dos elementos parasitas ao centro também foi otimizada.

Para variar as reatâncias associadas aos elementos parasitas utilizaram-se díodos *varicap*. O programa de simulação permite colocar na base de cada um dos monopolos uma carga reativa variável. Deste modo calculou-se a gama de valores de reatâncias permitidos pelos díodos, em seguida, introduziram-se esses valores no programa, e efetuou-se a otimização das mesmas. O dimensionamento do plano de terra é necessário com a configuração em que se utilizam monopolos. Este plano é constituído por uma aba que protege os componentes eletrónicos, garantindo assim maior robustez à antena. Concluída a fase de dimensionamento e otimização avançou-se para a construção do protótipo.

Para dar início à fase de construção realizou-se um desenho da antena à escala, para auxílio na construção da estrutura básica (Capítulo 5). A componente prática nesta dissertação é elevada, a antena ESPAR, para além de possuir uma geometria complexa, inclui componentes eletrónicos. O projeto da antena envolve decisões que só podem ser tomadas em laboratório. A fixação e estabilidade dos monopolos só foi garantida através da introdução de tubos de latão na parte inferior do plano de terra. Para isolar os monopolos do plano de terra utilizou-se como isolante o teflon. A ficha SMA foi soldada ao elemento ativo. A inclusão dos componentes eletrónicos revelou-se complexa, os díodos têm dimensões reduzidas, o que torna o processo de soldadura difícil.

Antes de se realizarem as medições dos diagramas de radiação visitou-se a câmara anecóica, para verificar as condições em que seria realizado o teste da antena. A colocação da antena no posicionador e o sistema de controlo das tensões foram tidos em conta e desenvolvidos após esta visita. Para controlar as tensões aplicadas aos elementos parasitas optou-se por introduzir na base da antena uma placa de circuito impressa com uma ficha de ligação de 6 entradas e construir um dispositivo de controlo. A placa de circuito impresso encontra-se ligada a um dispositivo de controlo e este a um gerador. O dispositivo de controlo é constituído por seis potenciómetros em série e por alvéolos eletrónicos, que permitem verificar a variação de tensão proporcionada pela rotação dos potenciómetros. Após construir este sistema efetuou-se a verificação do seu funcionamento, em condições semelhantes às simulações efetuadas, para garantir um bom aproveitamento do tempo disponível para efetuar as medições na câmara anecóica.

Concluída a construção do protótipo e do mecanismo de controlo das tensões efetuaram-se as medições das características de radiação (Capítulo 6). No laboratório de radiofrequência 2 do IST realizaram-se as medições da impedância da antena e do módulo do parâmetro de dispersão S_{11} . Utilizou-se um analisador de redes para efetuar as medições, após calibração do equipamento. A calibração é necessária para diminuir o erro associado às medidas efetuadas com o protótipo.

Em seguida, realizaram-se as medições na câmara anecóica. Antes de iniciar as medições experimentais ligou-se a antena ao sistema de controlo e este ao gerador de tensão. A primeira medição efetuou-se sem a aplicar tensões aos monopolos parasitas. Para esta situação obteve-se um diagrama de radiação sem direção preferencial. Esta medição não apresenta características diretivas, de acordo com o que se obteve em simulação.

Nas medições seguintes alteraram-se as tensões aplicadas aos monopolos parasitas. Aplicou-se a combinação de tensões 20V, 20V, 20V, 1V, 1V e verificou-se que o diagrama de radiação apresenta características diretivas na direção do monopolo. Comparou-se este diagrama com o obtido sem a aplicação de tensões nos monopolos e é notável a existência de um máximo de radiação para uma direção em detrimento da direção oposta. Em seguida utilizou-se a combinação 1V, 1V, 1V, 20V, 20V e verificou-se que o máximo de radiação era obtido para direção contrária à situação anterior (bissetriz dos monopolos). O diagrama de radiação é simétrico em relação ao eixo central, quando comparado com o diagrama de radiação obtido para a combinação 20V, 20V, 20V, 1V, 1V, o que comprova as simulações efetuadas.

Os resultados obtidos nas medições experimentais são coerentes e coincidem com os simulados. Apesar das dificuldades e obstáculos surgidos durante a realização do protótipo, verifica-se que este apresenta um funcionamento consistente de acordo com os objetivos propostos. A presente dissertação confirma que a antena dimensionada e construída cumpre os requisitos propostos.

Em suma na realização desta dissertação adquiriram-se competências no projeto e realização de antena. Este projeto revelou-se multivalente, na medida em que além das simulações efetuadas com vista ao dimensionamento do protótipo, permitiu também adquirir competências práticas na realização do mesmo.

7.4 Contribuições originais

Esta dissertação apresenta um trabalho inovador, num âmbito em desenvolvimento. Como já foi mencionado, esta antena permite a comutação do diagrama de radiação em azimute, o que constitui uma vantagem, que pode ser utilizada para melhorar a comunicação com robots do Exército

A elevada componente prática deste projeto é uma mais-valia. Ao longo desta dissertação detalharam-se todos os passos para a realização do protótipo final, bem como decisões de projeto que foram tomadas. Para além da construção da antena ESPAR de 6 elementos, desenvolveu-se um dispositivo de controlo, que possibilita a variação de tensões aplicadas aos monopolos parasitas. Esta solução revelou-se adequada para possibilitar a comutação do máximo de radiação.

A antena ESPAR dimensionada e construída no âmbito desta dissertação possibilitou a existência de um protótipo que cumpre as características propostas. O estudo comparativo realizado sobre as capacidades das duas antenas inteligentes, Yagi-Uda impressa e ESPAR, permite compreender a vantagem da utilização de cada uma na comunicação com os Robots.

7.5 Perspetivas de trabalho futuro

Na antena ESPAR construída não existem alterações significativas a fazer na sua estrutura. No entanto, o seu sistema pode ser melhorado. A realização de um comando de ajuste do feixe de radiação, de forma a obter um HPBW mais reduzido, permitiria aumentar a diretividade da antena. Um eventual ajuste da malha de adaptação de modo a manter sempre as condições ótimas de funcionamento seria outra alteração a realizar.

Desenvolver um sistema de comando da antena que possibilite alterar as tensões aplicadas aos monopolos parasitas via rádio.

A construção de uma antena ESPAR impressa. Com este trabalho seria possível comparar as características de radiação obtidas nos dois protótipos. Analisar as vantagens e desvantagens, entre as duas configurações mencionadas.

Referências Bibliográficas

- [1] B. Nichiporuk, "www.rand.org," [Online]. Available: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/MR1314/MR1314.ch6.pdf. [Acedido em 8 Outubro 2016].
- [2] U.S. Department of Defence, "Unmanned Systems Integrated Roadmap," 2013.
- [3] A. Melo, Sistema de Informação e Comunicações - Tático (SIC-T), A Mensagem, 2016.
- [4] J. A. Morgado e J. T. Sousa, "www.emfa.pt," Julho 2009. [Online]. Available: <https://www.emfa.pt/www/po/afa/conteudos/investigacao/O%20PROGRAMA%20DE%20INVEST%20E%20TECNOLOGIA%20EM%20VA.pdf>. [Acedido em 1 Outubro 2016].
- [5] G. C. Soeiro, Tese de Mestrado - "Projeto de uma Antena para Controlo Wireless de um Robot", Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2012.
- [6] T. Daniel and S. De Almeida, "Projecto de uma Antena para Comunicação Wireless do ROVIM Tiago Daniel Sanches de Almeida Engenharia Electrotécnica e de Computadores Júri," 2013.
- [7] M. J. Martins e I. V. Neves, Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas, Lisboa: LIDEL. ISBN 2015,978-989-752-066-2. Cap. 7 e 8.
- [8] E. Palantei, "Switched Parasitic Smart Antenna: Design and Implementation for Wireless Communication Systems," no. May, 2008.
- [9] A. Kalis, A. Kanatas e C. Papadias, Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems, Springer, 2014. ISBN 978-1-4614-7998-7. Cap.1 e 2.
- [10] S. J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, New Jersey: Rutgers University, 2008.
- [11] C. A. Cheng e D. K. Cheng, "Optimum Element Lengths for Yagi-Uda Arrays", IEEE - Transactions on Antennas and Propagation, Vol. Ap-23, No. 1, January 1975.
- [12] C. A. Cheng e D. K. Cheng, "Optimum Element Spacing for Yagi-Uda Arrays", IEEE - Transactions on Antennas and Propagation, Vol. Ap-21, No. 5, 1973.
- [13] Y. Kuwahara, "Multiobjective Optimization Design of Yagi-Uda Antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 6, pp. 1984–1992, June 2005.
- [14] R. F. Harrington, "Reactively Controlled Directive Arrays, " IEEE - Transactions on Antennas and Propagation, vol 26 no.3, pp 390-395, Maio 1978.
- [15] H. Kawakami and T. Ohira, "Electrically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) Antennas," IEEE - Transactions on Antennas and Propagation, Vol 47 no. 2, pp. 43–49, 2005.
- [16] A. A. Silva, Tese de Mestrado - "Modificação das Características de Radiação de uma Antena usando Componentes Eletrónicos", Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2015.

- [17] R. W. Schlub, Tese de Mestrado - "Practical Realization of Switched and Adaptive Parasitic Monopole Radiating Structures", Austrália, Griffith University, 2004.
- [18] A. Kausar, M. A. Cheema, S. Kausar, H. Rehman e T. Hassan, "ESPAR Antenna System Designing & Simulation" em First International Conference on Systems Informatics, 2014.
- [19] A. S. Hussaini, I. T. Elfergani, M. M. Abusitta, A. D. Adebola, R. A. Abd-Alhameed, T. Sadeghpour, M. B. Child e J. Rogriguez, "Time Modulated Switching and Reactive Loading Techniques Applied To a Circular Array Antenna Using Genetic Algorithm Optimisation," em 7th European Conference on Antennas and Propagation, 2013.
- [20] R. Schlub, J. Lu, and T. Ohira, "Seven-Element Ground Skirt Monopole ESPAR Antenna Design from a Genetic Algorithm and the Finite Element Method," *IEEE - Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 11, pp. 3033–3039, 2003.
- [21] B. K. Tehrani, B. S. Cook e M. M. Tentzeris, "Inkjet Printing of Multilayer Millimeter-Wave Yagi-Uda Antennas on Flexible Substrates," *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, vol. x, no. x, May 2015.
- [22] P. Singh, A. Chakraborty e A. Yadav, "Design and Analysis of Conventional Antennas for the Applications in Millimeter-Waves," em Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology, 2016.
- [23] S. A. Mitilineos, K. S. Mougialkos, and S. C. A. Thomopoulos, "Design and Optimization of ESPAR Antennas via Impedance Measurements and a Genetic Algorithm," *Ieee Antennas Propag. Mag.*, vol. 51, no. 2, pp. 118–123, 2009.
- [24] V. G. Tsiafakis, A. I. Sotiriou, Y. I. Petropoulos, E. S. Psarropoulos, E. D. Nanou, and C. N. Capsalis, "DESIGN OF A WIDEBAND ESPAR ANTENNA FOR DVB-T RECEPTION," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 12, pp. 183–199, 2009.
- [25] W. T. Khan, S. Sitaraman, A. L. Vera, M. R. Pulugurtha, V. Sundaram, R. R. Tummala, e J. Papapolymerou, "A V-Band End-fire Yagi-Uda Antenna on an Ultra-Thin Glass Packaging Technology," em Proceedings of the 45th European Microwave Conference, Paris, France, 2015.
- [26] J. M. Berger, Tese de Mestrado - "Low Cost Direction Finding with the Electronically Steerable Parasitic Array Radiator (ESPAR) Antenna," University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2005.
- [27] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [28] A. R. Simpson, G. C. Dandy e L. J. Murphy "Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 120, no. 4, 1995.
- [29] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms- Second Edition*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

- [30] M. Mitchell, "An Introduction to Genetic Algorithms.", London, England: A Bradford Book The MIT Press, ISBN 0-262-13316-4 (HB), 0-262-63185-7 (PB), 1996.
- [31] P. Azevedo, "<http://opac.iefp.pt/>," [Online] Available: <http://opac.iefp.pt:8080/images/winlibimg.aspx?skey=&doc=73187&img=1182>. [Acedido em 30 9 2016].
- [32] C. Sun, S. Member, A. Hirata, T. Ohira, N. C. Karmakar, and S. Member, "Fast Beamforming of Electronically Steerable Parasitic Array Radiator Antennas: Theory and Experiment," IEEE - Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 7, pp. 1819-1832, 2004.
- [33] N. Hernández, Tese de Mestrado - "Design and Construction of an Smart Antenna GSM 900 MHz for Marine Applications", Austrália: Griffith University, 2007.
- [34] Documentação técnica dos laboratórios do Instituto de Telecomunicações, Lisboa: Instituto de Telecomunicações, 2016.
- [35] Infineon, "www.infineon.com," [Online]. Available: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BB833SERIES-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304313d846880113d969a38b0112. [Acedido em 13 Outubro 2016].

Anexos

Anexo A

ESPAR 6 elementos: 1 ativo e 5 passivos

Ganho:13,15 dBi

Relação frente-trás:8,12 dB

Raio da antena:29,5 mm

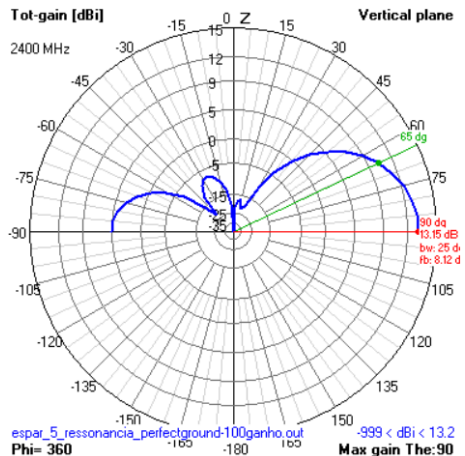


Figura A.1 – Diagrama de radiação plano E

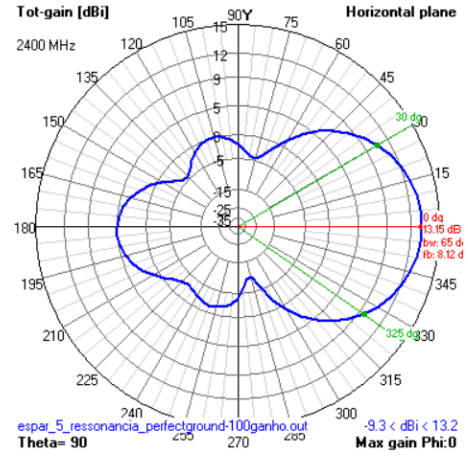


Figura A.2 – Diagrama de radiação plano H

ESPAR 7 elementos: 1 ativo e 6 passivos

Ganho:13,31 dBi

Relação frente-trás:7,84 dB

Raio da antena:35,6 mm

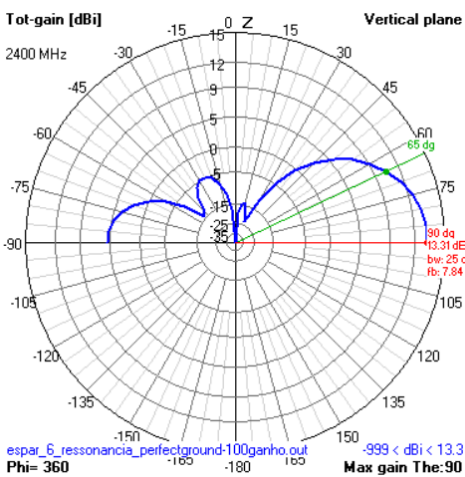


Figura A.3 – Diagrama de radiação plano E

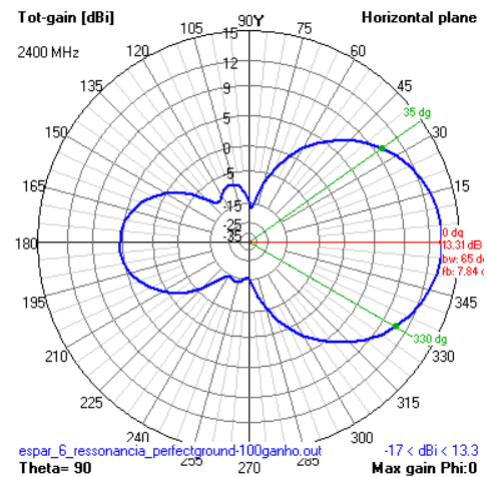


Figura A.4 – Diagrama de radiação plano H

Anexo B



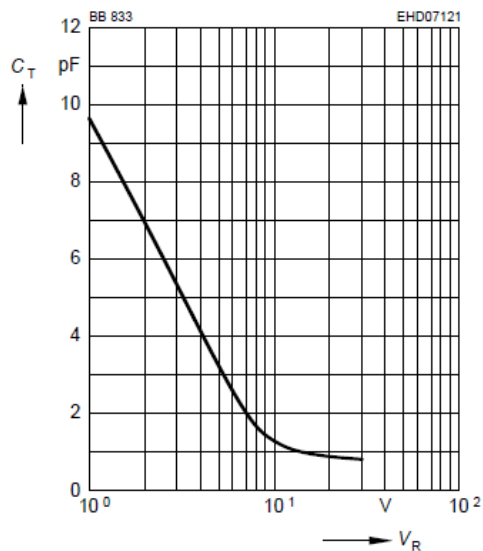
BB833...

Electrical Characteristics at $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
DC Characteristics					
Reverse current	I_R	-	-	20	nA
$V_R = 30\text{ V}$		-	-		
$V_R = 30\text{ V}, T_A = 85^\circ\text{C}$		-	-	500	
AC Characteristics					
Diode capacitance	C_T	8.5	9.3	10	pF
$V_R = 1\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		0.6	0.75	0.9	
$V_R = 28\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$					
Capacitance ratio	C_{T1}/C_{T28}	11	12.4	-	
$V_R = 1\text{ V}, V_R = 28\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$					
Capacitance matching ¹⁾	$\Delta C_T/C_T$	-	-	3	%
$V_R = 1\text{ V}, V_R = 28\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$					
Series resistance	r_S	-	1.8	-	Ω
$V_R = 1\text{ V}, f = 470\text{ MHz}$					

¹⁾For details please refer to Application Note 047.

Diode capacitance $C_T = f(V_R)$
 $f = 1\text{ MHz}$



Temperature coefficient of the diode capacitance $T_{Cc} = f(V_R)$

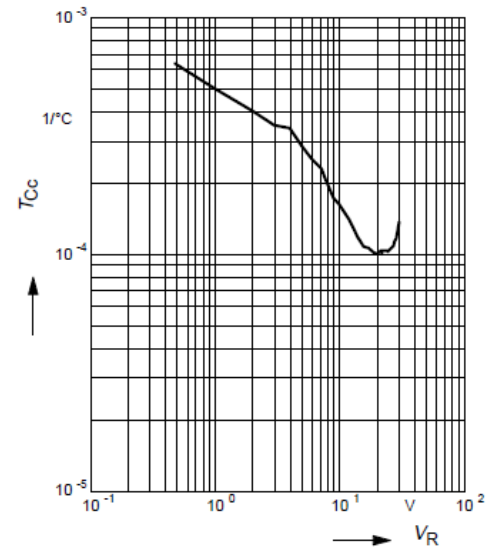


Figura B.1 – Excerto do *datasheet* do diodo BB833 [35]

Anexo C

As figuras seguintes apresentam os diagramas de radiação nos vários planos para as simulações efetuadas sem reatâncias capacitivas ou indutivas na base dos monopolos parasitas. Esta simulação na prática corresponde à não aplicação de tensão (0V) aos monopolos parasitas, e por consequência, não existe a variação do comprimento elétrico dos mesmos.

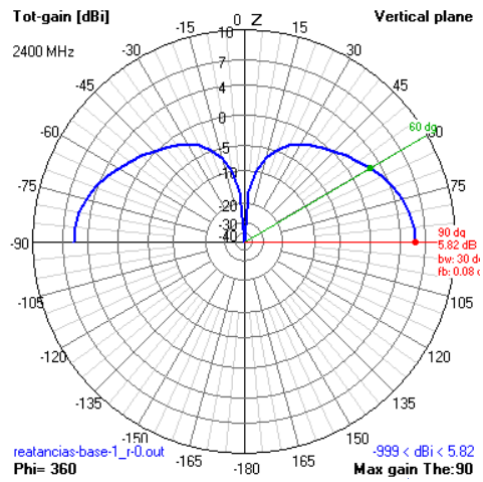


Figura C.1 – Diagrama de radiação plano E

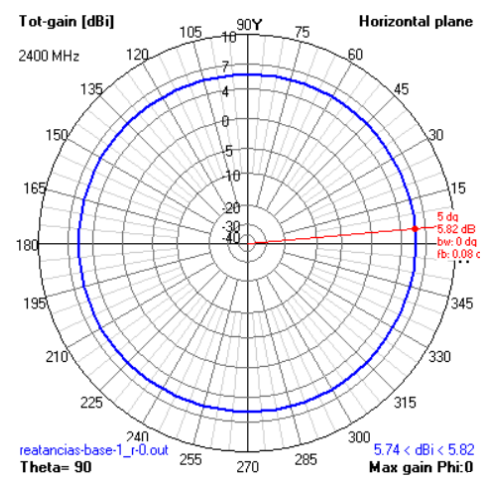


Figura C.2 – Diagrama de radiação plano H

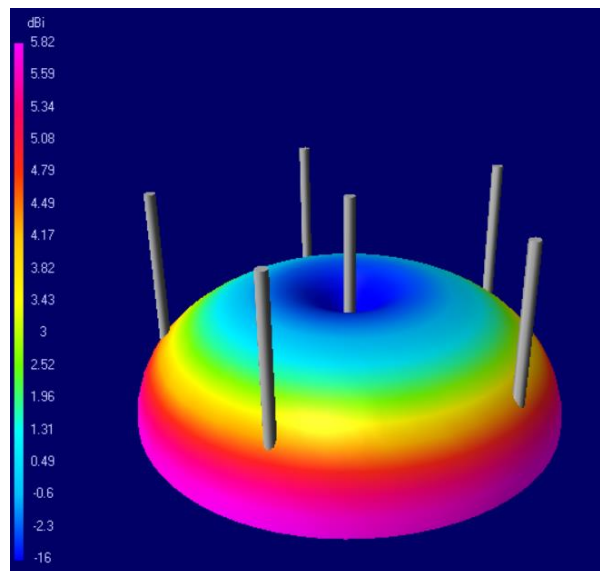


Figura C.3 – Diagrama de radiação em 3D

Anexo D

A figura D.1 apresenta o esquema de blocos da câmara anecóica. Este esquema mostra os equipamentos utilizados nas medições na câmara, a disposição dos mesmos e os circuitos associados. A linha vermelha representa o circuito RF e a cinzento o circuito de alimentação e controlo [34].

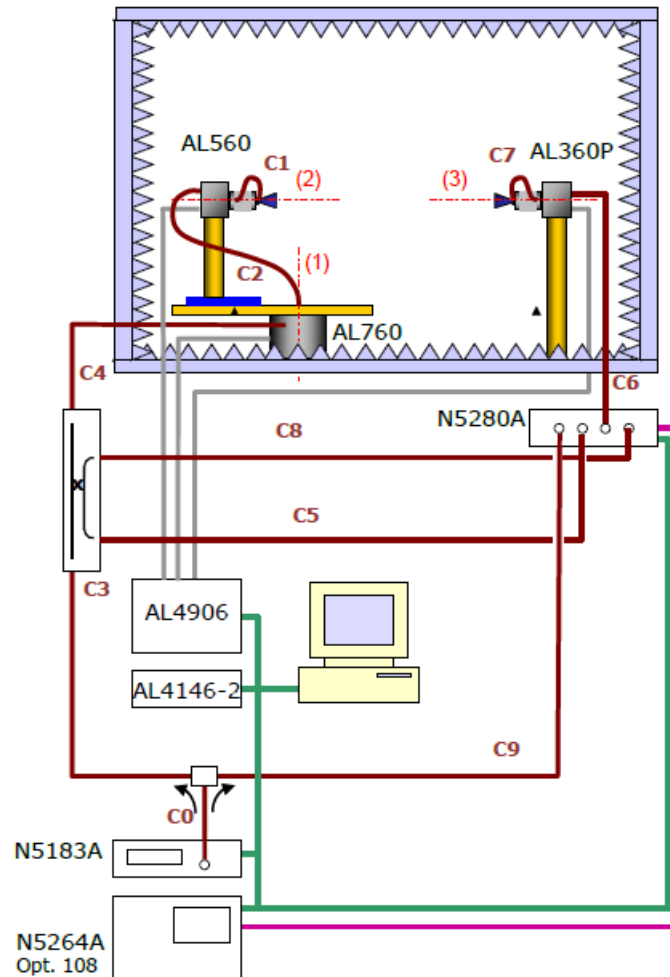


Figura D.1 – Esquema de blocos câmara anecóica [34]

Equipamento utilizado:

- N5183A: Agilent MXG Microwave Analog Signal Generator, 100 kHz to 20 GHz;
- N5264A: Agilent PNA-X Measurement Receiver for Antenna Test;
- N5280A, Agilent Frequency Down Converter;
- AL-4906: Orbit/FR Positioner Controller;
- AL-4146-2: Orbit/FR Local Control Unit;
- AL760: Orbit/FR Azimuth Positioner;
- AL560: Orbit/FR DUT Polarization Positioner;
- AL360: Orbit/FR Probe Positioner.

Anexo E

Influência da variação da frequência no diagrama de radiação

Realizaram-se medições para testar a estabilidade em frequência da antena. Para a situação descrita na secção 6.4.3, realizou-se a variação da frequência. Executaram-se medições para a frequência de 2,2 GHz, 2,3 GHz, 2,4 GHz e 2,5 GHz.

A combinação testada foi 1V, 1V, 1V, 20V, 20V. Para esta combinação e através da alteração da frequência obteve-se os diagramas de radiação no plano E apresentados na figura E.1.

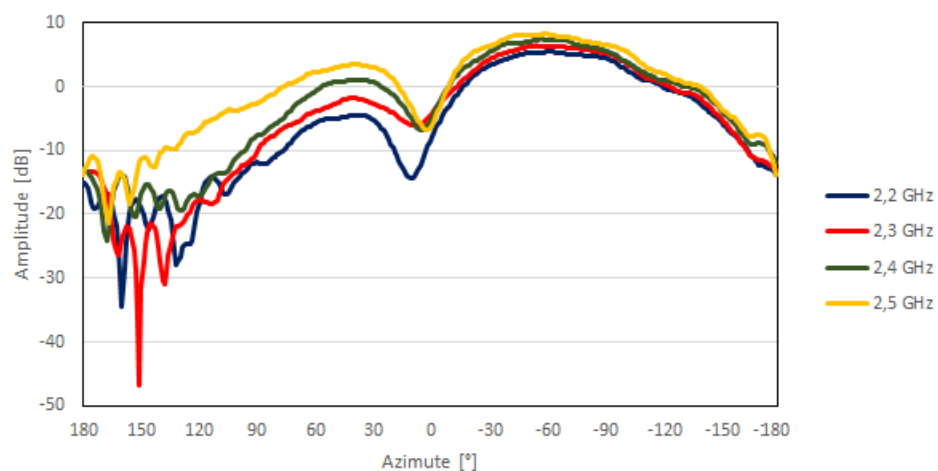


Figura E.1 – Diagrama de radiação plano E

Da análise do diagrama de radiação no plano E, verifica-se que as curvas têm um comportamento semelhante. As diferenças existentes nos diagramas de radiação advêm da variação da frequência. Verifica-se que as características diretivas se mantêm, com a presença de um máximo de radiação na zona de azimute negativo.