

Projecto de uma Antena para Comunicação *Wireless* do ROVIM

Tiago Daniel Sanches de Almeida

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Professor Doutor Fernando Duarte Nunes

Orientador: Professora Doutora Maria Hermínia Caeiro Costa Marçal

Co - Orientador: Professora Doutora Maria João Marques Martins

Vogal: Professora Doutora Isabel Maria S. P. G. Ventim Neves

Outubro 2013

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de uma longa caminhada que agora chega ao fim, caminhada esta que não foi fácil, que teve os seus momentos altos e baixos. Esta dedicatória serve para homenagear todos aqueles que me apoiaram ao longo desta caminhada.

Quero agradecer à Professora Doutora Maria João Marques Martins e à Professora Doutora Maria Hermínia Caeiro Costa Marçal, minhas orientadoras, pela forma competente, como acompanharam, orientaram e corrigiram o meu trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor José Luís Gonçalves Correia Mata e ao Professor Doutor António Joaquim Serralheiro por toda a disponibilidade e ajuda prestada na construção e verificação de funcionamento da antena.

Agradeço também ao Sr. Carlos Brito pelo empenho e disponibilidade na construção da antena e ao Sr. António Almeida pela dedicação e pelo auxílio prestado na realização das várias medidas realizadas em laboratório.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos de longa data, por todo o apoio, ajuda e carinho demonstrado ao longo destes anos

Por último, queria também agradecer aos meus camaradas de curso, em especial aos dos cursos de Engenharias pela camaradagem prestada durante estes últimos seis anos.

Resumo

A evolução tecnológica leva ao aparecimento de novos meios e novas realidades, revolucionando por completo o mundo. O Exército Português também acompanha esta evolução e adquiriu recentemente vários robôs para serem utilizados na vigilância do teatro de operações.

Esta dissertação tem como objectivo dimensionar e construir um protótipo de uma antena que visa fazer a comunicação ,sem fios (*wireless*) entre o operador e o robô usado na vigilância. Este protótipo tem de permitir ao operador alternar entre várias larguras do lobo principal (-3 dB) e ao mesmo tempo vários ganhos.

Nesta dissertação foi projetctada, simulada, construída e testada uma antena usando a técnica dos algoritmos genéticos, que permite alterar a largura do lobo principal (-3 dB) e ao mesmo tempo operar com um determinado ganho para essa largura de feixe, sendo assim possível passar de um lobo “estreito” para um mais “largo”.

Inicialmente a antena foi dimensionada e simulada no programa de simulação CST MWS, para operar na banda dos 2,4 GHz. Após ter sido construída, a antena foi testada na câmara anecóica e foi verificado se os diagramas de radiação e o coeficiente de onda estacionária correspondiam aos que tinham sido simulados no CST MWS. Estes dados permitem concluir que os diagramas de radiação e o coeficiente de onda estacionária simulados e medidos são muito próximos, sendo que os valores medidos são sempre melhores que os simulados.

Palavras-chave: Antena Yagi-Uda com HPBW variável, Algoritmo Genéticos, *Balun*, Diagramas de Radiação

Abstract

Technological progress leads to the appearance of new means and new realities, changing the existing paradigm. . The Portuguese Army also accompanies this development and has recently acquired several robots to be used for surveillance in warfare operations..

This master's thesis aims at designing, build and test a prototype antenna for wireless communication between the operator and the robot used for surveillance. This prototype has to allow the operator to deal with different Half Power Beamwidths and various gains.n The antenna designed and built allows to change the width of the radiation beam, and power gain, thus allowing the operator to use a narrower or wider beam..

Initially the antenna was designed using Genetic Algorithms and simulated using the simulation program CST MWS, to operate in the 2.4 GHz band. The prototype constructed, was tested in an anechoic chamber. A comparison between simulated and experimental results show that the radiation diagrams and the standing wave ratio (SWR) show a good agreement with the results of simulation using the CST MWS software. These data allow us to conclude that the objectives of this thesis were fulfilled and a prototype antenna has a better performance than the simulated one.

Keywords: Yagi-Uda antenna with variable HPBW, Genetic Algorithms, Balun, Radiation Diagrams

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	vi
Índice.....	viii
Índice de Tabelas.....	xii
Índice de Figuras.....	xiv
Lista de Acrónimos e Siglas.....	xviii
Lista de Símbolos e Unidades	xx
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
1.1. Definição do problema.....	1
1.2. Motivação e objectivos	2
1.3. Estado de Arte	3
1.4. Estrutura da dissertação	5
Capítulo 2.....	7
2. Antena Yagi-Uda	7
2.1. Introdução	7
2.2. Métodos numéricos para o dimensionamento da antena.....	7
2.3. Algoritmos Genéticos.....	9
2.3.1. Algoritmos genéticos Aplicados as Antenas Yagi-Udas	11
2.4. Simulação da antena Yagi-Uda	12
2.4.1. Antena Convencional	12
2.4.2. Antena com todos os directores em aberto	14
2.4.3. Antena com o 3º e 4º director em aberto	15
2.4.4. Antena com 3º director em aberto	16
2.4.5. Antena com 1º director em curto-circuito	17
2.5. Comparação de resultados e conclusões	18
Capítulo 3.....	21
3. Antena Yagi-Uda Impressa	21
3.1. Introdução	21

3.2.	Projecto da Antena	21
3.2.1.	Escolha do substrato.....	21
3.2.2.	Dimensionamento da Antena.....	22
3.3.	Simulação da antena	24
3.4.	Substrato usado na construção	27
3.5.	Simulação da antena para o RO3003™	27
3.5.1.	Antena com todos os directores em curto-circuito para 2,45 GHz	28
3.5.2.	Antena com todos os directores em curto-circuito para 2,3 GHz	29
3.5.3.	Antena com todos os directores em aberto para 2,3 GHz.....	30
3.5.4.	Antena com o 3º e 4º director em aberto para 2,3 GHz	31
3.5.5.	Antena com 3º director em aberto para 2,3 GHz.....	32
3.5.6.	Antena com 1º director em curto-circuito para 2,3 GHz	33
3.6.	Construção da Antena	34
3.7.	Conclusões e comparação de resultados	37
Capítulo 4	.....	39
4.	Antena com regulação do ganho e da largura do lobo principal a -3 dB	39
4.1.	Introdução	39
4.2.	Simulação da antena com díodos	39
4.2.1.	Antena com todos os directores em curto-circuito.....	41
4.2.2.	Antena com todos os directores em aberto	42
4.2.3.	Antena com o 3º e 4º director em aberto	43
4.2.4.	Antena com 3º director em aberto	44
4.2.5.	Antena com 1º director em curto-circuito	45
4.3.	Sistema de alimentação e comutação dos díodos	46
4.4.	Resultados experimentais	48
4.4.1.	Módulo do coeficiente de onda estacionária ($|S_{11}|_{dB}$)	51
4.4.2.	Diagramas de Radiação.....	53
4.5.	Comparação de resultados.....	56
4.5.1.	Comparação das simulações com e sem díodos	57
4.5.2.	Comparação das simulações com os resultados experimentais.....	57
Capítulo 5	.....	65

5.	Dimensionamento da antena a construir no futuro	65
5.1.	Dimensionamento	65
5.2.	Simulação da antena	66
5.3.	Comparação desta antena com a antena apresentada no capítulo 3.....	67
Capítulo 6	.....	69
6.	Conclusões	69
6.1.	Introdução	69
6.2.	Considerações Finais	69
6.3.	Contribuições Originais.....	71
6.4.	Perspectivas de trabalho futuro	72
Bibliografia	.....	73
Anexo A	.....	75
Anexo B	.....	77
Anexo C	.....	81

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Dimensionamento de uma antena Yagi-Uda de seis elementos com recurso a diferentes métodos numéricos para a obtenção de ganho máximo [12].....	9
Tabela 2.2 Dimensionamento da antena Yagi-Uda convencional (medidas em mm)	12
Tabela 2.3 Resultados obtidos nas simulações	18
Tabela 3.1 Propriedades físicas do Gil GML 1000	22
Tabela 3.2 Dimensões finais da Antena Yagi-Uda Impressa (medidas em mm)	23
Tabela 3.3 Medidas do <i>Balun</i> (medidas em mm)	23
Tabela 3.4 Medidas do Balun Utilizado (medidas em mm)	24
Tabela 3.5 Banda de funcionamento de simulação, em espaço livre, da antena projectada	27
Tabela 3.6 Substrato utilizado	27
Tabela 4.1 Valores usados na simulação	41
Tabela 4.2 Resumo das medidas efectuadas no plano E	55
Tabela 4.3 Resumo das medidas efectuadas no plano H	56
Tabela 4.4 Comparação de todas as combinações estudadas no plano E	62
Tabela 4.5 Comparação de todas as combinações estudadas no plano H	63
Tabela 5.1 Dimensões finais da Antena Yagi-Uda Impressa no substrato RO3003™ (medidas em mm)	65
Tabela 5.2 Medidas do <i>Balun</i> Utilizado para o substrato RO3003™ (medidas em mm)	65
Tabela 5.3 Comparação das duas antenas	67

Índice de Figuras

Figura 1.1 a) Primeiro robô adquirido para o ROVIM b) Jaguar 4x4	2
Figura 1.2 a) Antena Yagi-Uda linear b) Antena Yagi-Uda convencional	3
Figura 1.3 Antena planar (<i>patch</i> rectangular)	4
Figura 1.4 Esquema da antena Yagi-Uda Impressa.....	5
Figura 2.1 Diagrama do Algoritmo Genético.....	10
Figura 2.2 Diagrama do Algoritmo Genético aplicado a antenas	11
Figura 2.3 Ganho tridimensional da antena Yagi –Uda convencional.....	12
Figura 2.4 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda convencional inicialmente dimensionada.....	13
Figura 2.5 Módulo do coeficiente de onda estacionária	13
Figura 2.6 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com todos os directores em aberto.....	14
Figura 2.7 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com todos os directores em abertos	15
Figura 2.8 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º e 4º director em aberto	15
Figura 2.9 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º e 4º director em aberto	16
Figura 2.10 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º director em aberto.....	16
Figura 2.11 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º e 4º director em aberto	17
Figura 2.12 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 1º director em curto-circuito	17
Figura 2.13 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com o 1º director em curto-circuito.....	18
Figura 3.1 Estrutura do <i>Balun</i>	23
Figura 3.2 Protótipo da antena simulada a) parte da frente da antena b) costas da antena	25
Figura 3.3 Diagrama de radiação 3D da antena.....	26
Figura 3.4 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena dimensionada	26
Figura 3.5 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa no substrato RO3003™ para 2,45 GHz.....	28
Figura 3.6 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato RO3003™	28
Figura 3.7) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa no substrato RO3003™ para 2,3 GHz.....	29

Figura 3.8 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato RO3003 TM para 2,3GHz	30
Figura 3.9 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com todos os directores em aberto para 2,3 GHz	30
Figura 3.10 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com todos os directores abertos para 2,3 GHz.....	31
Figura 3.11 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º e 4º director em aberto para 2,3 GHz.....	31
Figura 3.12 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º e 4º director em aberto para 2,3 GHz.....	32
Figura 3.13 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º director em aberto para 2,3 GHz	32
Figura 3.14 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º director em aberto para 2,3 GHz.....	33
Figura 3.15 Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 1º director em curto-circuito para 2,3 GHz.....	33
Figura 3.16 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com o 1º director em curto-circuito para 2,3 GHz	34
Figura 3.17 Layout da Antena.....	35
Figura 3.18 Antena a ser retirada do suporte	36
Figura 3.19 Antena no seu estado final	36
Figura 4.1 Circuito equivalente do Díodo PIN directamente polarizado	40
Figura 4.2 Circuito equivalente do Díodo PIN inversamente polarizado	40
Figura 4.3 Colocação do circuito RLC	41
Figura 4.4 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa com díodos	42
Figura 4.5 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato com díodos.....	42
Figura 4.6 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e os directores todos em aberto.....	43
Figura 4.7 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com díodos e com todos os directores em abertos.....	43
Figura 4.8 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e o 3º e 4º director em aberto	44
Figura 4.9 Módulo do ccoeficiente de onda estacionária da antena com díodos e os 3º e 4º director em aberto	44
Figura 4.10 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e o 3º director em aberto	45
Figura 4.11 Módulo coeficiente de onda estacionária da antena com díodos e o 3º director em aberto	45

Figura 4.12 Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e o 1º director em curto-circuito	46
Figura 4.13 Modelo coeficiente de onda estacionária da antena com díodos e o 1º director em curto-circuito.....	46
Figura 4.14 a) antena com díodos e resistencias inseridos b) promenor do diodo e das duas resistencias	47
Figura 4.15 Plano do sistema de comutação dos díodos.....	47
Figura 4.16 a) esquema da montagem b) analisador vectorial E8361A	48
Figura 4.17 Calibração do VNA com o cabo de medição.....	48
Figura 4.18 a) Torre e posicionador da antena de emissão b) torre e posicionador da antena de recessão.....	50
Figura 4.19 a) suporte com a antena já colocada em perspectiva frontal b) perspectiva posterior da antena	51
Figura 4.20 Grande plano da antena a quando a medição	51
Figura 4.21 Valores medidos do $|S_{11}|_{db}$ para antena sem diodos.....	52
Figura 4.22 Valores medidos do $|S_{11}|_{db}$ para antena com diodos.....	53
Figura 4.23 Diagramas de radiação no plano E medidos para todas a combinações	54
Figura 4.24 Diagramas de radiação no plano E entre 40 e 160º.....	55
Figura 4.25 Diagramas de radiação no plano H medidos para todas a combinações	56
Figura 4.26 Comparação dos valores de $|S_{11}|_{db}$ obtidos experimentalmente no NA e.....	58
Figura 4.27 Comparação dos diagramas de radiação no plano E para antena em curto-circuito sem diodos	59
Figura 4.28 Comparação dos diagramas de radiação no plano H para antena em curto-circuito sem diodos	59
Figura 4.29 Comparação dos valores de $|S_{11}|_{db}$ para a antena com todos os directores em curto-circuito com díodos.....	60
Figura 4.30 Comparação dos diagramas de radiação no plano E para antena em curto-circuito com diodos	61
Figura 4.31 Comparação do diagrama de radiação polar no plano E para a antena em curto-circuito com diodos	61
Figura 4.32 Comparação dos diagramas de radiação no plano H para antena em curto-circuito com diodos	62
Figura 5.1 Diagrama de radiação em 3D da antena para 2,45 GHz	66
Figura 5.2 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa no substrato RO3003™ para 2,45 GHz	66
Figura 5.3 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato RO3003™ para 2,45 GHz	67
Figura 6.1 Rádio P/PRC – 525	72
Figura A. 1 Curva de calibração no plano E	75

Figura A. 2 Curva de calibração no plano H	75
Figura B. 1 Primeira configuração	77
Figura B. 2 Segunda configuração	77
Figura B. 3 Terceira configuração.....	78
Figura B. 4 Comparação das três configurações para a antena com os directores em aberto no plano E	78
Figura B. 5 Comparação das três configurações para a antena com os directores em curto-circuito no plano E.....	79
Figura B. 6 Comparação das três configurações para a antena com os directores em aberto no plano H.....	79
Figura B. 7 Comparação das três configurações para a antena com os directores em curto-circuito no plano H	80
Figura C. 1 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 0000	81
Figura C. 2 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 0000.....	81
Figura C. 3 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 0000.....	82
Figura C. 4 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 1000	82
Figura C. 5 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 1000.....	82
Figura C. 6 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 1000.....	82
Figura C. 7 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 1100	82
Figura C. 8 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 1100.....	82
Figura C. 9 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 1100.....	82
Figura C. 10 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 1101	82
Figura C. 11 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 1101.....	82
Figura C. 12 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 1101.....	82

Lista de Acrónimos e Siglas

CPS	Coplanar Stripline
CPW	Coplanar Waveguide
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio
DNA	Ácido desoxirribonucleico
GA	Algoritmos Genéticos
HPBW	Largura do lobo principal (-3 dB) (Half Power Beamwidth)
IST	Instituto Superior Técnico
NLS	Nível de lobos secundarios
Plano E	Plano do campo eléctrico
Plano H	Plano do campo magnético
PSO	Particle Swarm Optimisation
SA	Simulated Annealing
SMD	Surface Mounting Devices
TO	Teatro de Operações
VSWR	Relação de onda estacionária (Voltage Standing Wave Ratio)

Lista de Símbolos e Unidades

d	Diâmetro dos elementos da antena Yagi-Uda convencional
f_{max}	Frequência máxima
f_{mim}	Frequência mínima
GHz	Gigahertz
LB%	Largura de banda em percentagem
mm	Milímetro
P_i	Potência incidente
P_r	Potência reflectida
tan δ	Tangente do ângulo de perdas
w	Largura dos elementos da antena impressa
ε_{eff}	Constante dielétrica efectiva
ε_r	Permeabilidade dielétrica relativa
λ	Comprimento de onda em espaço livre
λ_g	Comprimento de onda no guia

Capítulo 1

1. Introdução

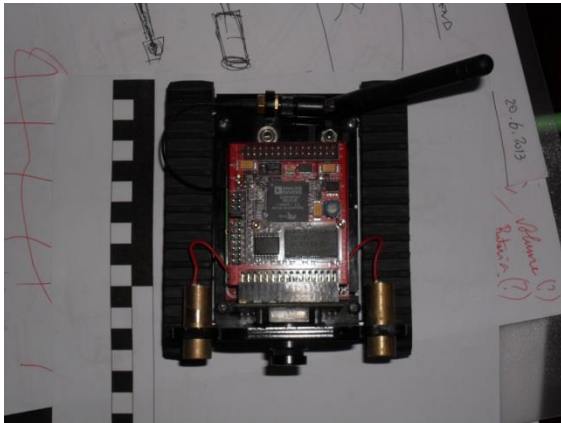
1.1. Definição do problema

O conceito de Guerra e Teatro de Operações (TO) tem evoluído ao longo dos anos, assistindo-se recentemente àquilo que se designa por Revolution of Militar Affairs (RMA) [1] [2], que consiste numa transformação da Defesa devido às novas tecnologias e à sua aplicação para fins militares. O desenvolvimento de novas tecnologias tornou-se fundamental para qualquer força presente num Teatro de Operações (TO).

Num TO, as informações recolhidas são fundamentais para o desempenho das forças presentes, sendo necessário que informações sejam recolhidas com a máxima eficácia e rapidez. O ser humano nem sempre consegue obter informações de uma forma eficaz e rápida, uma vez que está sujeito a várias distrações, muito *stress*, cansaço e mesmo por vezes incapacidade de recolher informações em determinados ambientes. Usam-se assim tecnologias emergentes para maximizar as informações recolhidas., estas vão substituir o ser humano na recolha de informação, minimizando assim as baixas humanas e aumentando a eficiência e rapidez na recolha de informações.

O reconhecimento do TO é feito por aquilo que se designa por *Unmanned Ground Vehicle* (UGV), no caso de situações terrestres, por *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), em situações aéreas, e por *Unmanned Surface Vehicle* (USV) para situações marítimas. Estes veículos permitem a recolha de informação de uma forma mais rápida e eficaz, uma vez que possuem câmaras e microfones que permitem visualizar o TO em tempo real e em todo o tipo de condições climáticas, e uma vez que estes não são tripulados, reduzem o número de baixas humanas.

O Exército português adquiriu recentemente alguns robôs para vigilância terrestre, integrados no projecto ROVIM (robot de vigilância de instalações militares). Estes robôs vão ter de operar em vários ambientes, nem sempre com as melhores condições climatéricas e de terreno, o que torna necessário aperfeiçoar as características dos mesmos. Actualmente estão a ser desenvolvidos vários estudos, com vista a melhorar as condições e características destes robôs. Na Figura 1.1 a) pode ser visto o primeiro robô adquirido para o projecto e na Figura 1.1 b) o robô adquirido recentemente.



a)



b)

Figura 1.1 a) Primeiro robô adquirido para o ROVIM b) Jaguar 4x4

Estes robôs mantêm uma comunicação sem fios (*wireless*), na banda dos 2,45 GHz, com um operador que se encontra numa zona distante. Para esta comunicação ser possível, o robô possui uma antena direccionável do tipo monopolo, e o operador por sua vez, terá uma antena que devido ao meio onde irá estar inserida tem de apresentar algumas características relevantes, tais como, ser robusta, ser de dimensões reduzidas e permitir a regulação da largura do lobo principal (-3 dB), doravante designado no texto por HPBW acrónimo de *Half Power Beamwidth*.

1.2. Motivação e objectivos

O âmbito desta dissertação surge no seguimento do que foi apresentado no tópico anterior. É necessário dimensionar e construir uma antena para o operador, que cumpra os requisitos anteriormente mencionados.

Para cumprir estes requisitos, foi escolhida uma antena Yagi-Uda impressa. Embora esta não apresente uma eficiência muito elevada, apresenta outras vantagens, entre as quais se salientam: ter dimensões reduzidas, ser robusta quando montada em superfícies rígidas e ser de fabrico simples e económico. No entanto para regular a largura do lobo principal terão de ser realizadas algumas modificações na sua estrutura.

Estas modificações irão ser realizadas ao nível dos directores da antena, deixando alguns directores em circuito aberto e outros em curto-circuito, o que vai permitir alterar a HPBW, tendo de se introduzir um sistema que permita comutar entre os directores em circuito aberto, e em curto-circuito.

Esta dissertação apresenta características inovadoras, visto que o estudo das antenas Yagi-Udas impressas é um assunto actual, e que a regulação da HPBW não é um assunto muito estudado, o que torna o presente projecto muito interessante e com grande interesse para as aplicações militares..

Esta dissertação tem como objectivo a construção de um protótipo da antena Yagi-Uda impressa modificada, com as características mencionadas anteriormente. Numa primeira fase, foi

feito o projecto de uma antena Yagi-Uda convencional usando no dimensionamento teórico a técnica dos Algoritmos Genéticos, e na simulação o *software Computer Simulation Technology Microwave Studio* (CST MWS). Numa segunda fase, com o mesmo programa, foi feita a simulação de uma antena com as mesmas características mas impressa, e simulou-se o protótipo da antena com regulação da HPBW. Numa fase posterior procedeu-se à construção propriamente dita da antena simulada, e efectuou-se o seu teste, recorrendo à câmara anecóica que se encontra na Área Científica de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores do Instituto Superior Técnico, na qual foram realizados os testes e medições, tendo-se comparados os resultados práticos com os simulados.

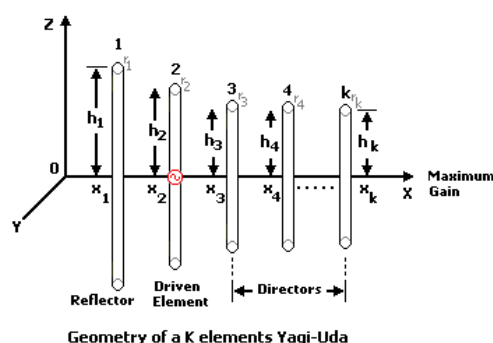
Esta dissertação, para além dos objectivos já mencionados, tem também como foco adquirir conhecimentos e experiência em diversas áreas, tais como o processo de construção de uma antena, processo de simulação com o programa CST MWS e o processo de medição na câmara anecóica.

1.3. Estado de Arte

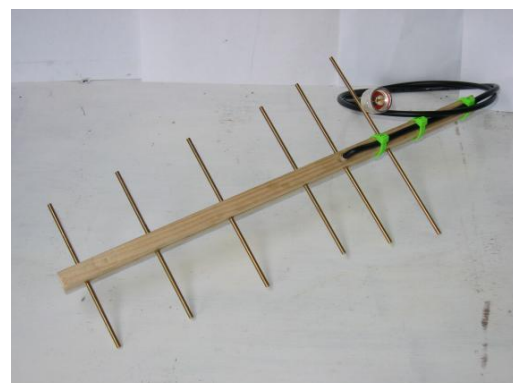
As antenas são um elemento essencial a qualquer comunicação sem fios, tornando-se assim essencial o seu estudo.

As antenas Yagi-Uda são antenas muito usadas uma vez que apresentam um ganho elevado e uma estrutura simples, o que permite uma construção rápida e pouco complexa. Como é uma antena muito utilizada, já existem diversos estudos realizados de forma a otimizar o seu funcionamento, entre os quais se salientam: variação do comprimento dos elementos [3], influência do espaçamento dos elementos [4] e comprimento e espaçamento em simultâneo [5].

Estas antenas são constituídas por um elemento activo, normalmente um dipolo, e por vários elementos parasitas, que habitualmente se encontram em curto-circuito. Um desses elementos parasitas é o reflector que por norma é 5% maior do que o elemento activo [6], os restantes são directores. Na Figura 1.2 a) pode visualizar-se uma antena Yagi-Uda Convencional com k elementos e na Figura 1.2 b) está representada uma antena real.



a)



b)

Figura 1.2 a) Antena Yagi-Uda linear b) Antena Yagi-Uda convencional

Outro tipo de antenas com grande utilização actualmente são as antenas impressas, que passaram a ser muito usadas porque apresentam um conjunto de vantagens em relação às convencionais, nomeadamente:

- Facilidade de integração em circuitos;
- Fabrico simples e económico utilizando tecnologia de produção de circuitos impressos;
- Susceptíveis de produção em massa;
- Robustez mecânica quando montadas em superfícies rígidas;
- Perfil de espessura reduzida;
- Adequadas para utilizar em agregados lineares e planares;

No entanto, também apresentam algumas desvantagens, tais como eficiência reduzida, potência limitada e largura de banda percentual geralmente muito reduzida.

Estas antenas na sua forma mais simples são constituídas por uma fina camada metálica, que atua como elemento radiador. Este elemento é separado do plano terra por um substrato dielétrico.

A alimentação da antena pode ser realizada por linha de *microfita*, por *microfita coplanar* (*Coplanar Stripline* -CPS) ou guia de onda coplanar (*Coplanar waveguide* - CPW). Na Figura 1.3 está representada uma antena impressa planar com um *patch* rectangular.

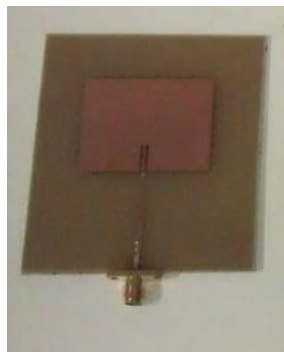


Figura 1.3 Antena planar
(*patch* rectangular)

A antena Yagi-Uda impressa é uma antena planar que contém a estrutura básica de uma antena Yagi-Uda convencional, ou seja, um elemento activo, vários directores e um reflector. Esta antena é alimentada por um *balun* impresso que tem a função de fazer a adaptação. Este é ligado ao elemento activo por CPS [7]. Na Figura 1.4 está representada uma antena Yagi-Uda impressa.

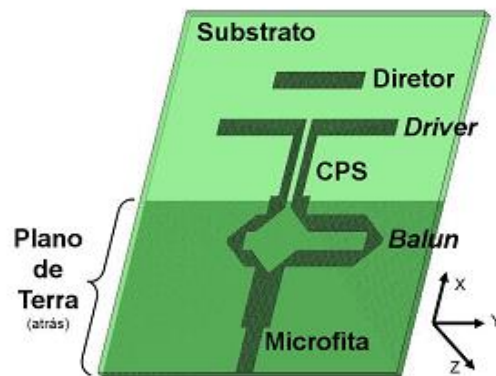


Figura 1.4 Esquema da antena Yagi-Uda Impressa

Esta antena é uma antena moderna, podendo ser utilizada em diversas aplicações, que normalmente funcionam em frequências acima de 1 GHz. Têm sido sugeridas algumas modificações para melhorar o seu desempenho [8] [9] [7].

A antena a ser construída, para além de ter as características habituais de uma antena impressa ainda terá de cumprir algumas especificações, tais como, permitir regular a HPBW ($>40^\circ$ a $<90^\circ$), minimizar o nível de lobos secundários (NLS), possuir a máxima eficiência e estar adaptada, ser leve e de dimensões reduzidas e possuir estabilidade de funcionamento. As características que referi anteriormente farão desta antena, uma antena inovadora e ainda pouco estudada.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, sendo cada capítulo dividido em vários subcapítulos, em são aprofundados os temas abordados em cada um dos capítulos.

No primeiro capítulo será definido o problema, são apresentados os motivos que levaram à elaboração desta dissertação e os objectivos a atingir. No final é apresentada a organização da dissertação.

No segundo capítulo será apresentado todo o processo de simulação da Antena Yagi-Uda convencional, desde a escolha do melhor método de dimensionamento até a simulação propriamente dita. São apresentados os resultados obtidos no programa de simulação CST MWS para que depois possa ser feita uma comparação nos capítulos seguintes com a antena impressa.

O terceiro capítulo vai incidir na simulação e construção da antena Yagi-Uda impressa. Neste capítulo será explicado todo o processo de transformação da antena simulada, no segundo capítulo, numa antena impressa.

No quarto capítulo será apresentada a antena com regulação da HPBW, será explicado como a introdução dos díodos nos directores permite a regulação, e quais as combinações de díodos em curto-circuito ou em circuito aberto que permitem obter melhores resultados.

No final deste capítulo serão apresentados os resultados simulados e medidos na câmara anecóica e é feita a comparação dos mesmos.

No quinto capítulo será apresentado o dimensionamento e as simulações da antena, a construir num futuro, para o substrato RO3003™.

No sexto e último capítulo serão feitas as considerações finais e serão apresentadas as perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Antena Yagi-Uda

2.1. Introdução

As antenas Yagi-Uda são as mais comuns e conhecidas, são utilizadas em grande escala e em diversas aplicações, sendo a aplicação mais conhecida em antenas de recepção de sinal de televisão. O uso desta antena em larga escala deve-se ao facto de esta ser relativamente simples de construir e ter uma grande versatilidade [4] [10].

Neste capítulo será apresentado o projecto de dimensionamento e simulação de uma antena Yagi-Uda convencional. Este projecto foi executado com o auxílio do programa CST MWS, que permitiu simular as características de radiação da antena e estudar que modificações que poderiam ser introduzidas para influenciar essas mesmas características.

Para este projecto destacam-se três características de radiação que devem ser tidas em conta para que a antena cumpra os requisitos pretendidos, são elas:

- I. Ganho;
- II. Relação frente-trás;
- III. Largura do lobo principal (-3 dB),(HPBW);

O ganho deve ser o mais elevado possível, a relação frente-trás deve ser a mais pequena possível de modo a evitar interferências dos lobos secundários no lobo principal e a HPBW deve permitir ir desde ($\pm 45^\circ$) até ($\pm 80^\circ$).

2.2. Métodos numéricos para o dimensionamento da antena

O avanço tecnológico permitiu o aparecimento de novas maneiras de dimensionar e otimizar as antenas. Estas novas técnicas de dimensionamento são baseadas em algoritmos criados para melhorar determinadas características de radiação, tais como: ganho, impedância e largura de banda [10] [11] [12].

Os algoritmos numéricos mais conhecidos para este efeito são: algoritmos genéticos (GA), *simulated annealing* (SA) e *particle swarm optimisation* (PSO), todos estes algoritmos foram criados para otimizar as características de radiação. Estes algoritmos são aplicados no dimensionamento da antena [10].

O PSO foi sugerido pela primeira vez em 1995 por Kennedy e Eberhart [10]. Trata-se de um método computacional evolucionário e robusto, que obtém a optimização pretendida explorando problemas de espaço entre os elementos constituintes da antena [13]. A gama de soluções possíveis é designada por *swarm* (enxame) e os elementos desse conjunto de soluções são conhecidos por

partículas, cada partícula representa uma possível solução para otimizar o problema. A cada partícula esta associada uma posição e cada partícula possui uma velocidade. Estudos paramétricos revelaram que o tamanho ideal das populações para resolver a maior parte dos problemas é de 30 partículas.

Durante uma iteração do algoritmo cada partícula é acelerada na direcção da melhor solução encontrada por si, esta também pode ser acelerada na direcção da melhor solução global encontrada por outra partícula. Se uma partícula encontra uma solução melhor, todas as outras deslocar-se-ão para perto dessa mesma solução. As partículas iniciam com uma distribuição aleatória. Com o decorrer das várias interacções, todas as partículas vão tender para a solução global [13] [10]. O PSO tem como vantagens não conter muitas operações complicadas, ser preciso definir poucos parâmetros, ter poucas linhas de código e o seu algoritmo ser de fácil compreensão [10]. Actualmente já existem modificações implementadas a este método, em que são usadas técnicas híbridas [14].

Tal como já foi dito anteriormente, o SA é um método probabilístico que serve para resolver problemas de optimização global, este método foi desenvolvido em 1983 por Kirkpatrick [12] [15]. Este procedimento tem sido usado com sucesso numa variedade de problemas de engenharia electrotécnica [16].

Este método é fundamentado na termodinâmica, fazendo uso da semelhança de um problema de balanço térmico de um sólido com o problema de procura aleatória de optimização, para achar a solução global óptima ou a que se aproxima da melhor solução [17]. O problema de balanço térmico é constituído em duas etapas: na primeira a temperatura do sólido é aumentada até que este atinja uma temperatura considerável, na segunda o sólido é arrefecido de uma forma lenta e controlada. Este processo faz com que os átomos, numa primeira fase, ganhem energia e se movam, na segunda fase como o arrefecimento é feito de uma forma lenta, permite que eles se organizem de uma melhor forma, reduzindo assim os defeitos do material.

Da mesma forma, no problema de optimização o SA substitui a solução inicial por uma solução melhorada, que é escolhida de acordo com uma função e com uma variável. Com a evolução do algoritmo o valor dessa variável é decrementado tendendo para zero, fazendo com que o algoritmo convirja para a solução óptima [17].

Este método apresenta algumas vantagens em relação ao anterior uma vez que permite otimizar vários parâmetros ao mesmo tempo. As variáveis inseridas podem ser contínuas ou discretas e este método pode ser facilmente implementado, devido ao pequeno número de parâmetros que necessita [12].

O método GA será apresentado de uma forma mais pormenorizada, uma vez que este foi o método escolhido para dimensionar a antena Yagi-Uda convencional.

Pode-se concluir que o tamanho e o espaçamento dos elementos não apresentam uma grande variação quando dimensionados pelos diferentes algoritmos, como pode ser visualizado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Dimensionamento de uma antena Yagi-Uda de seis elementos com recurso a diferentes métodos numéricos para a obtenção de ganho máximo [12]

Elemento	PSO		SA		GA	
	Comp	Esp	Comp	Esp	Comp	Esp
Reflector (I)	0,242	0,183	0,244	0,155	0,252	0,101
Activo (I)	0,234	-----	0,254	-----	0,301	-----
Director 1 (I)	0,221	0,228	0,22	0,261	0,221	0,321
Director 2 (I)	0,212	0,4151	0,213	0,383	0,219	0,274
Director 3 (I)	0,2101	0,405	0,21	0,425	0,21	0,428
Director 4 (I)	0,214	0,384	0,214	0,384	0,211	0,435
Ganho (dBi)	13,84		13,85		13,55	

Nem todos os elementos influenciam as características de radiação da mesma maneira por exemplo, segundo Balanis, se o objectivo for obter o máximo de ganho possível, então os elementos que mais influenciam este parâmetro são os directores [18].

2.3. Algoritmos Genéticos

Os AG surgiram nos meados da década de 70, sugeridos por John H. Holland. Este método é um método de busca e optimização inspirado nas teorias de selecção natural (Charles Darwin) e na genética [15].

Os métodos evolutivos são constituídos por dois operadores fundamentais que são o cruzamento (*crossover*) e a mutação, em que o primeiro caso consiste em escolher dois cromossomas, e cruzá-los, por sua vez a mutação consiste na alteração da sequência original de uma molécula de DNA. Para aumentar a convergência e qualidade do algoritmo foi ainda acrescentado a selecção natural e o elitismo. Este último é muito importante uma vez que permite comparar os filhos com os pais e escolher entre os melhores [11].

A Teoria da Selecção Natural, também conhecida por teoria de Darwin, diz-nos que indivíduos da mesma espécie apresentam características diferentes. Os indivíduos que apresentam as características mais favoráveis para se adaptarem ao meio ambiente onde se encontram, têm maior probabilidade de sobreviver quando comparados com indivíduos com características menos favoráveis. Os indivíduos mais adaptados, têm maior hipótese de deixar descendência, esta vai ficar com os genes dos pais, uma vez que estes são passados de pais para filhos. Com o passar das gerações vai existir uma selecção natural, onde só os indivíduos com as características mais favoráveis sobreviverão.

Como pode ser visualizado na Figura 2.1, este método pode ser dividido em várias etapas, em que cada etapa tem como função melhorar a geração anterior. Mas antes de este algoritmo ser iniciado, existem certos aspectos que devem ser tidos em consideração tais como: quais os cromossomas que vão ser cruzados, qual a probabilidade de ocorrer mutação e quantos indivíduos

vão ser repostos no elitismo e selecção natural. Para uma melhor percepção do algoritmo vai ser descrita resumidamente cada uma das etapas:

1. Vai ser criada de uma forma aleatória a população inicial, esta população deve ser vista como um conjunto de cromossomas. Nesta fase também será feita uma avaliação dessa mesma população;
2. Serão seleccionados os cromossomas, para cruzamento. Nesta etapa serão escolhidos os cromossomas que apresentam melhores características;
3. Será feito o cruzamento desses cromossomas;
4. Consoante a probabilidade de ocorrer mutação ou não, os cromossomas filhos poderão ser alterados. Nesta etapa esses descendentes serão avaliados;
5. Será realizado o processo de elitismo, em que os pais e filhos são comparados e no caso de os pais serem melhores que os filhos existe uma reposição dos filhos pelos pais;

Este ciclo é repetido até que os filhos já não apresentem melhorias ou que essas melhorias já não sejam significativas.

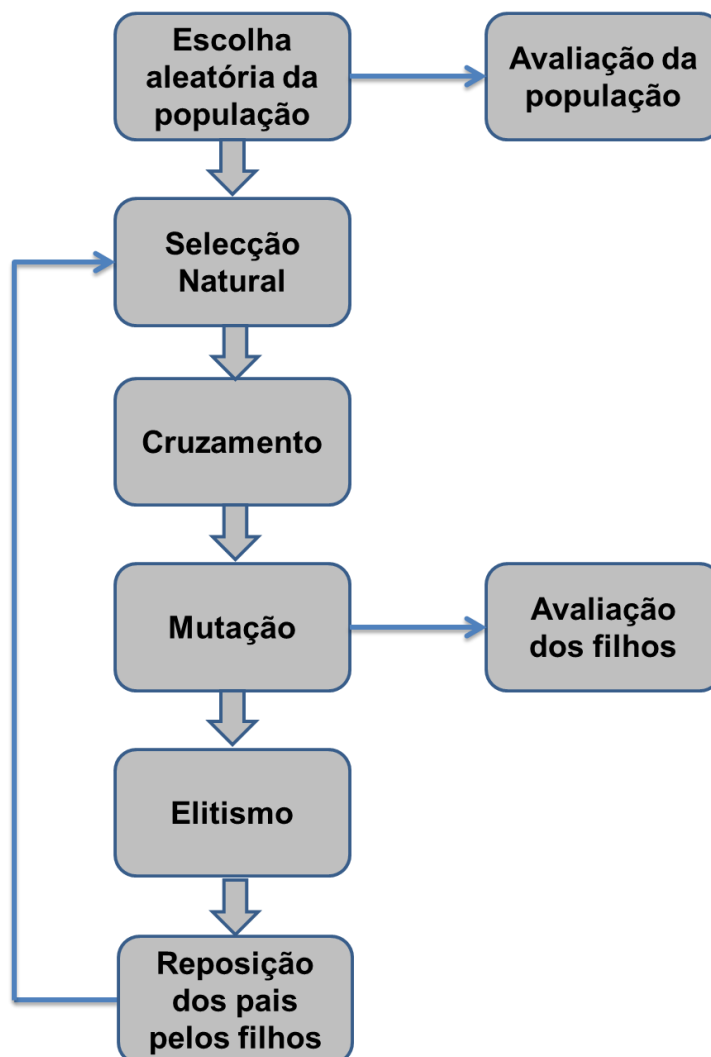


Figura 2.1 Diagrama do Algoritmo Genético

2.3.1. Algoritmos genéticos Aplicados as Antenas Yagi-Udas

Estes algoritmos funcionam muito bem com antenas porque permitem trabalhar com vários parâmetros e variáveis ao mesmo tempo [11]. Este foi um dos motivos que foi tido em consideração na escolha deste algoritmo, para dimensionar a antena pretendida.

Para se usar o GA tem de se associar as antenas aos indivíduos, ou seja uma antena corresponde a um cromossoma, cada antena vai ser avaliada por uma função matemática, método dos momentos. Depois desta avaliação os indivíduos passam a ter maior ou menor probabilidade de serem seleccionados para participarem nas operações genéticas, ou seja, os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de procriar, o resultado desta avaliação é chamado de *fitness*.

Na Figura 2.2 está representado o diagrama do algoritmo genético aplicado às antenas, como pode ser visto este algoritmo é muito parecido com o algoritmo comum. A principal diferença é que cada ciclo inicia-se sempre com a avaliação das antenas através de uma função matemática [19] [20]. Este ciclo é interrompido quando várias gerações convergem para a mesma solução ou quando não se achar rentável continuar o processo.

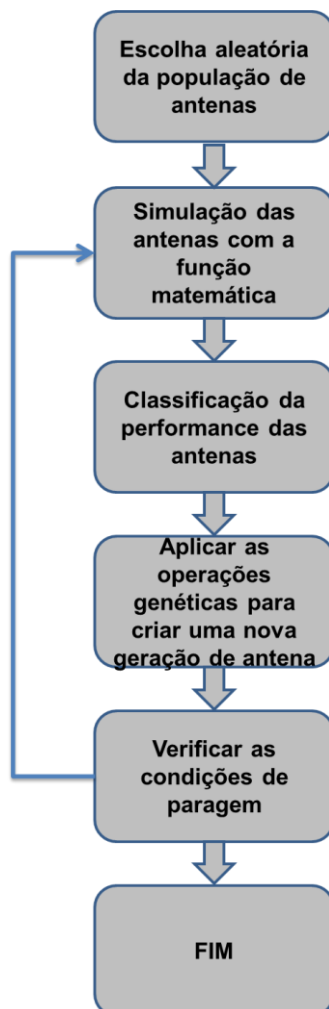


Figura 2.2 Diagrama do Algoritmo Genético aplicado a antenas

2.4. Simulação da antena Yagi-Uda

Usando o algoritmo GA efectuou-se o dimensionamento da antena, obtendo-se os resultados presentes na Tabela 2.2 [11]. O espaçamento é sempre referido ao elemento activo.

Tabela 2.2 Dimensionamento da antena Yagi-Uda convencional (medidas em mm)

Elemento	Comprimento	Espaçamento
Reflector	0.5λ	0.22λ
Activo	0.46λ	-----
Director 1	0.40λ	0.16λ
Director 2	0.40λ	0.29λ
Director 3	0.39λ	0.31λ
Director 4	0.33λ	0.29λ

Com estas dimensões pretende-se obter um ganho elevado, cerca de 11,46 dB. Neste subcapítulo numa primeira fase será simulado o funcionamento da antena no seu estado convencional e depois vai avaliar-se quais as alterações provocadas pela modificação dos directores.

2.4.1. Antena Convencional

Com o auxílio do programa CST MWS simulou-se uma antena com as características físicas acima apresentadas, e obtiveram-se as características de radiação da mesma. Na Figura 2.3 está representado o diagrama de radiação em 3D (três dimensões) para a frequência de 2,45 GHz, visualizando-se que esta antena possui um ganho de 11,4 dB, o que vai de encontro ao que era esperado pela análise dos resultados teóricos.

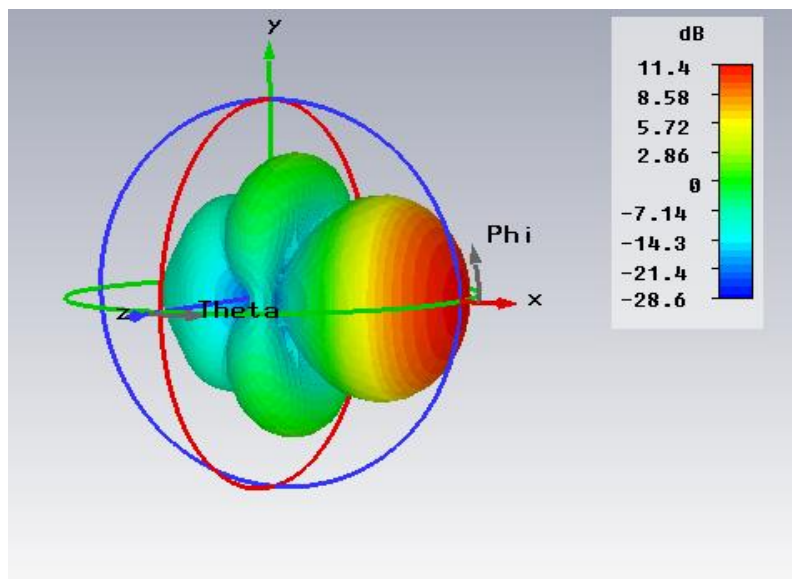


Figura 2.3 Ganho tridimensional da antena Yagi –Uda convencional

Na Figura 2.4 pode visualizar-se o diagrama de radiação polar no plano E (plano do campo Eléctrico) e o diagrama, de radiação no plano H (plano do campo magnético). Verifica-se ainda que esta antena apresenta uma HPBW de $47,4^\circ$ no plano E e de $56,7^\circ$ no plano H. Esta antena apresenta um nível de lobos secundários (NLS) relativamente baixo em ambos os planos, $-16,5$ dB no primeiro caso e $-10,1$ dB no segundo, não afectando assim o lobo principal.

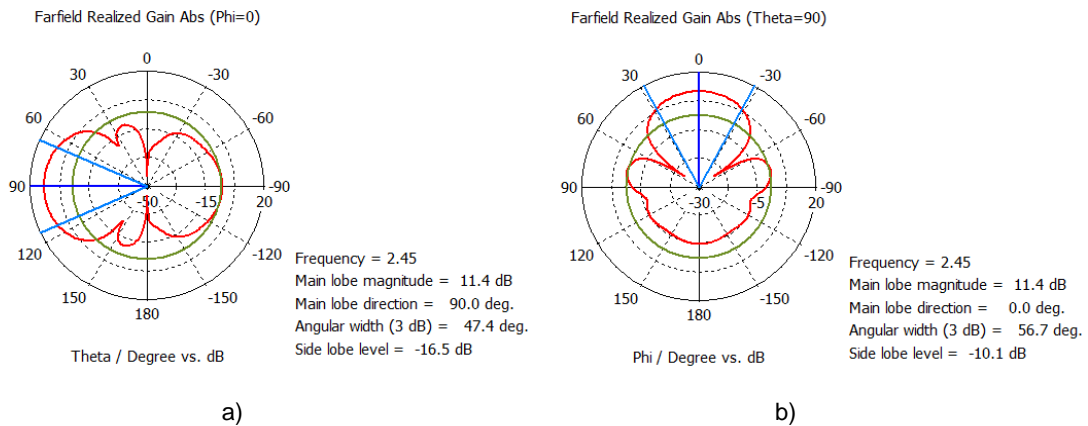


Figura 2.4 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda convencional inicialmente dimensionada

Para verificar o nível de adaptação recorre-se ao parâmetro $|S_{11}|_{dB}$, valor que pode ser obtido através do programa CST MWS. Quanto mais baixo for este valor, maior é o nível de adaptação da antena. Na Figura 2.5 está representado o $|S_{11}|_{dB}$ da antena simulada. Como pode ser observado, para a frequência pretendida o $|S_{11}|_{dB}$ vale $-11,0$ dB, pode ainda reparar-se que o pico com melhor definição encontra-se desviado, o que não é conveniente. Este problema poderá ser facilmente resolvido com a introdução de um sistema de adaptação na antena, que iria desviar o pico para a frequência pretendida. Estes sistemas de adaptação podem ser *stubs*, transformadores de $\lambda/4$, *T match* ou *balun*, existindo um variadíssimo leque de opções.

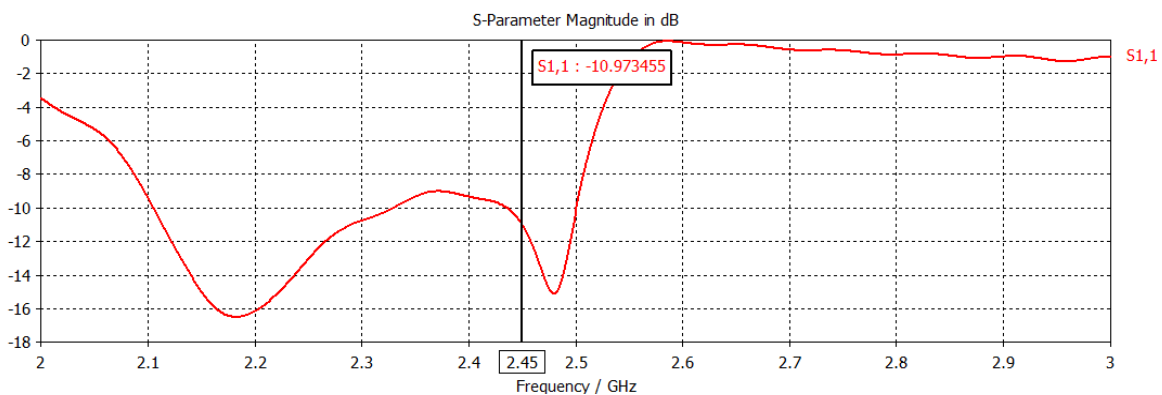


Figura 2.5 Módulo do coeficiente de onda estacionária

Esta antena apresenta uma eficiência de radiação (rendimento) na ordem de 99.36%

Pela análise destes dados, verifica-se que as características de radiação vão de encontro ao que era pretendido para a antena a ser construída. Tal como era pedido, esta antena apresenta um ganho elevado e um nível de NLS baixo. Sendo único parâmetro que não vai de encontro ao que era pretendido é o facto de a antena não se encontrar adaptada, no entanto, como já foi referido este não é um problema muito relevante.

Para permitir obter várias larguras do lobo principal de radiação vão-se alterar os elementos que afectam essa característica de radiação, ou seja, vai-se alterar os directores da antena. Estas alterações serão produzidas fazendo combinações de directores em curto-circuito com outros em vazio, usando díodos ao corte ou em condução. Os directores que se encontram em vazio foram afastados 4 mm, para que os díodos coubessem entre os braços dos directores.

Nesta fase serão apresentadas apenas as combinações que produzem melhorias significativas nas características de radiação apresentadas anteriormente, as outras combinações foram realizadas, no entanto, não serão apresentadas uma vez que não apresentam interesse para este estudo.

2.4.2. Antena com todos os directores em aberto

Nesta secção é apresentada a antena Yagi- Uda convencional com todos os directores em aberto. Na Figura 2.6 podem visualizar-se os resultados obtidos.

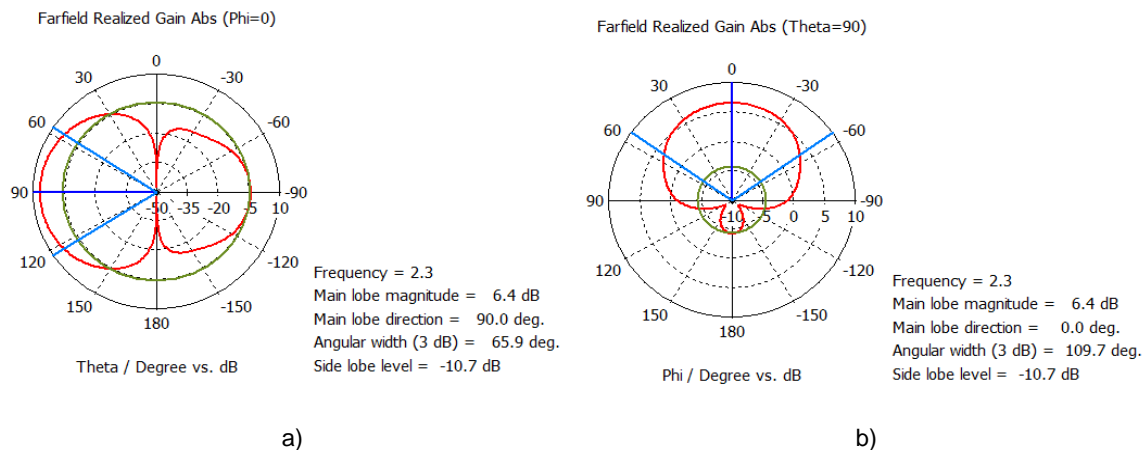


Figura 2.6 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com todos os directores em aberto

Esta montagem apresenta um ganho muito inferior (6,4 dB) quando comparada com a antena convencional. Por outro lado, a HPBW aumentou 18,5°. O NLS também sofreu uma degradação, ainda assim apresenta um valor baixo.

Esta antena apresenta um valor de $|S_{11}|_{dB}$ de -5,3 dB. Este valor é um valor muito elevado, mas observando a Figura 2.7, pode visualizar-se que a curva do $|S_{11}|_{dB}$ só apresenta um pico, embora esse pico se encontre afastado da frequência pretendida. Mais uma vez será necessário um sistema de adaptação de modo a conduzir esse pico para a frequência pretendida.

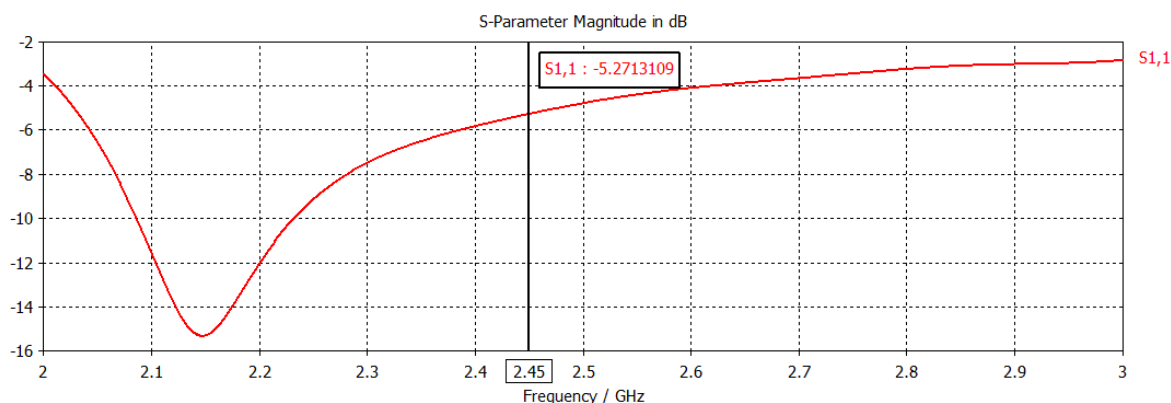


Figura 2.7 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com todos os directores em abertos

Esta montagem não apresenta grandes melhorias quando comparada com a antena convencional, muito pelo contrário, mas está descrita nesta dissertação por ser a montagem que permite obter a maior HPBW.

2.4.3. Antena com o 3º e 4º director em aberto

Outra montagem que apresenta melhorias significativas é a montagem com o 3º e 4º director em aberto. Na Figura 2.8 estão representados os resultados da simulação para esta antena.

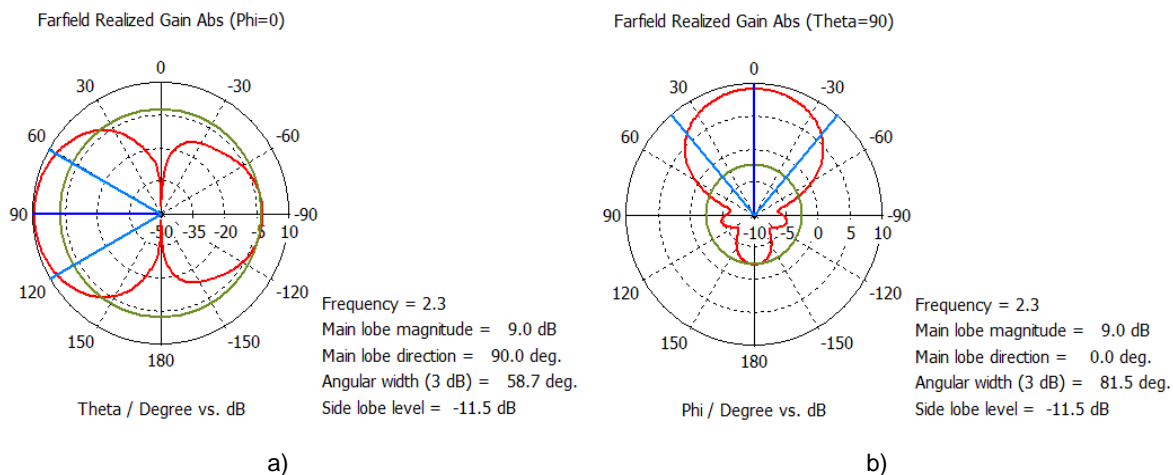


Figura 2.8 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º e 4º director em aberto

O valor de ganho é elevado, neste caso é de 9 dB, o NLS apresenta um valor semelhante. A HPBW aumenta, passa-se de 47,4º para 58,7º este parâmetro é importante uma vez que permite obter valores diferentes para a largura do lobo principal.

O valor de $|S_{11}|_{dB}$ está representado na Figura 2.9. E vale -12,9 dB, na frequência central de operação. Como se pode reparar este valor é mais baixo que o da antena convencional, encontrando-se o pico quase centrado na frequência pretendida.

Considera-se que uma antena está adaptada numa determinada banda de frequência quando o $|S_{11}|_{dB}$ for inferior ou igual a um determinado valor. É usual considerarem-se valores $\leq -6dB$, ou ≤ -10 dB, dependendo da aplicação [18]. Neste estudo considerar-se-á que a antena se encontra adaptada quando o $|S_{11}|_{dB}$ for ≤ -10 , ou seja, a potência reflectida, P_r , for menor ou igual a 10% da potência incidente, P_i , logo pode considerar-se que esta antena se encontra adaptada para a frequência pretendida.

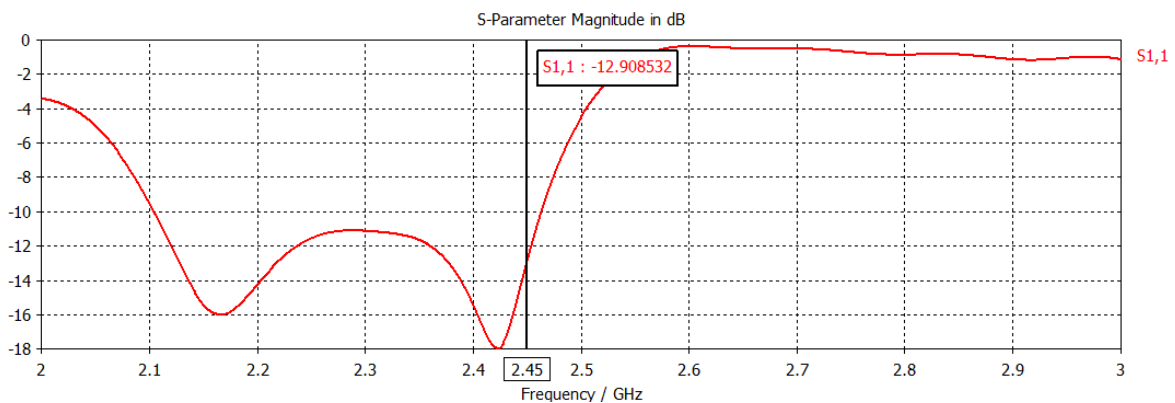


Figura 2.9 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º e 4º director em aberto

2.4.4. Antena com 3º director em aberto

O diagrama de radiação desta antena é apresentado na Figura 2.10. O ganho vale 9,9 dB, o NLS apresenta um valor parecido com as antenas apresentadas anteriormente. Esta antena apresenta uma HPBW próxima da largura da montagem anterior no plano E.

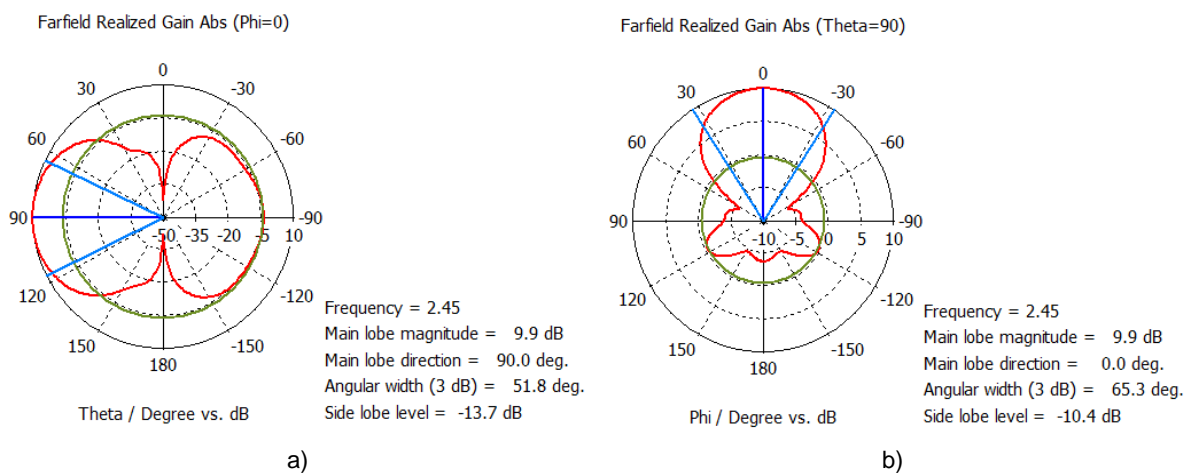


Figura 2.10 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º director em aberto

Na Figura 2.11 pode ser analisada a curva do $|S_{11}|_{dB}$, onde se verifica que este vale -11,5 dB, pelo que se pode concluir que esta antena se encontra adaptada. Tal como no caso anterior o pico do $|S_{11}|_{dB}$ com melhor definição encontra-se muito perto da frequência pretendida.

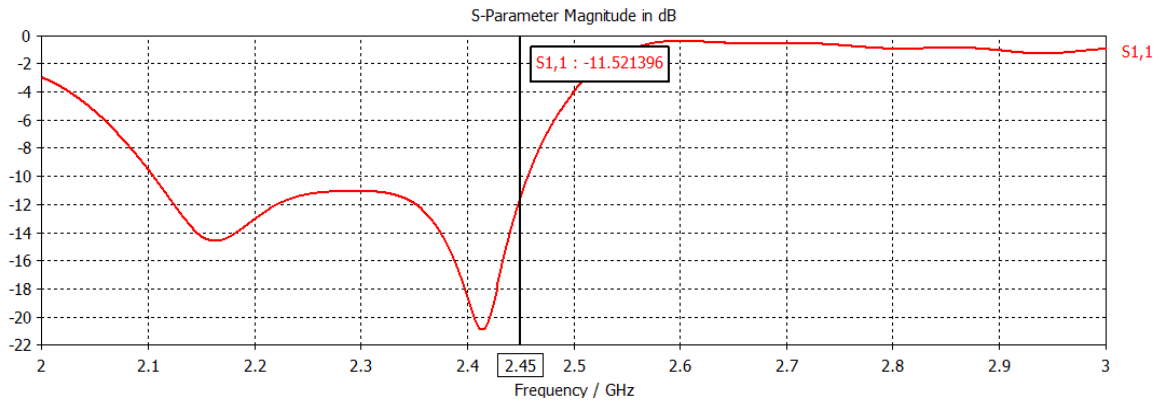


Figura 2.11 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º e 4º director em aberto

2.4.5. Antena com 1º director em curto-circuito

Esta antena apresenta uma redução do ganho quando comparada com as montagens anteriores, mas apresenta um nível de lobos secundários muito inferior, como pode ser visto na Figura 2.12. Esta montagem tem uma HPBW relativamente elevada, na ordem dos 62º no plano E e 89,6º no plano H.

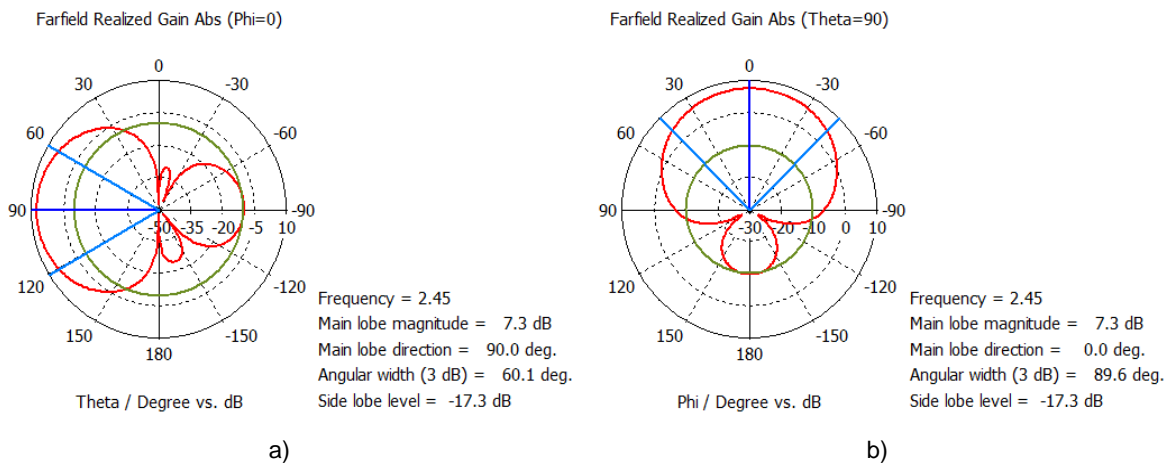


Figura 2.12 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 1º director em curto-circuito

O módulo do coeficiente de onda estacionária tem um valor de -5,4 dB, como pode ser visto na Figura 2.13, o pico com melhor definição encontra-se centrado na frequência de 2,2 GHz, será necessário introduzir um sistema de adaptação para o desviar para a frequência pretendida.

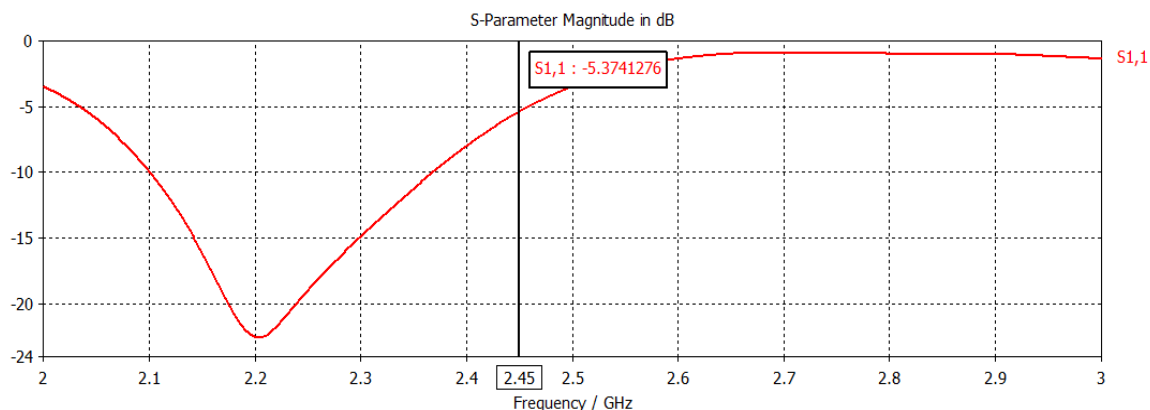


Figura 2.13 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com o 1º director em curto-circuito

2.5. Comparação de resultados e conclusões

Neste capítulo descrevem-se alguns dos métodos de dimensionamento de uma antena, optando-se por dimensionar a antena Yagi-Uda com o método dos algoritmos genéticos (GA). Depois de efectuado o dimensionamento por via teórica foi efectuada uma simulação da antena Yagi-Uda Convencional, com recurso ao programa de simulação CST MWS. Obtiveram-se os diagramas de radiação e o gráfico do parâmetro $|S_{11}|_{dB}$ da mesma. Na parte final deste capítulo encontram-se apresentadas as melhores combinações de directores em curto-circuito ou em circuito aberto que permitem aumentar ou diminuir a HPBW. Estas combinações permitem obter um intervalo da HPBW compreendido entre os 47,4º e os 65º, no plano E.

Tabela 2.3 Resultados obtidos nas simulações

Combinação	Ganho (dB)	HPBW (º)	NLS (dB)	$|S_{11}|_{dB}$
Convencional	11,4	47,4	-16,5	-11,0
Todos em aberto	6,4	65,9	-11,5	-5,3
3º e 4º em aberto	9,0	58,7	-11,5	-12,9
3º em aberto	9,9	51,8	-13,7	-11,5
1 em curto-circuito	7,3	60,1	-17,38	-5,4

Como pode ser visualizado na Tabela 2.3 dependendo da combinação escolhida obtém-se diferentes larguras da HPBW e de directividade da antena. Isto vai permitir que se tenha varias

larguras do lobo principal na mesma antena, para isso será necessário comutar entre as várias combinações da antena. Este tópico será abordado mais pormenorizadamente no capítulo 4.

Capítulo 3

3. Antena Yagi-Uda Impressa

3.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada a antena Yagi-Uda impressa. Esta antena será dimensionada para cumprir os requisitos mencionados nos capítulos anteriores.

Na secção 3.2 serão feitas considerações referentes à escolha da estrutura, dimensionamento e materiais a utilizar, para projectar a antena Yagi-Uda impressa de forma a cumprir os objectivos.

Na secção 3.3 serão apresentadas as simulações realizadas com auxílio do programa de simulação CST MWS. Estas simulações são realizadas com o objectivo de verificar se a antena cumpre os requisitos pretendidos. No final desta secção serão ainda apresentadas as simulações das combinações de directores em aberto e em curto-circuito, de modo a verificar se estas produzem o efeito desejado, tal como no capítulo anterior.

Depois de apresentado o dimensionamento e simulação da antena, apresentar-se-ão os passos para a construção do protótipo final a ser testado. Nesta secção será explicado todo o processo de construção da antena, desde a criação do *layout*, bem como todos os materiais e instrumentos utilizados na construção da mesma.

No final deste capítulo serão apresentadas algumas conclusões referentes a este capítulo, onde serão discutidos os resultados simulados.

3.2. Projecto da Antena

A antena Yagi-Uda Impressa terá uma estrutura parecida com a antena apresentada no capítulo anterior, apresentando diferenças no reflector que, neste caso, em vez de ser só um elemento, será um plano reflector com o objectivo de se diminuir ainda mais o NLS. Para esta antena será dimensionado um sistema de adaptação, que permitirá adaptar a antena à frequência pretendida.

Esta nova antena será de dimensões reduzidas e mais compacta, fazendo com que seja mais resistente, sendo que, isto vai permitir ao operador uma melhor operação.

3.2.1. Escolha do substrato

Depois de efectuada uma pesquisa aos vários tipos de substratos e às suas características, optou-se por usar o Gil GML 1000 para construir a antena. Este substrato foi desenvolvido para antenas impressas de alta frequência, apresentando uma constante dieléctrica baixa e estável,

podendo operar num intervalo grande de temperatura e em ambientes húmidos [21]. Estas características são importantes uma vez que se pretende que a antena opere em todas as condições ambientais.

Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas características do Gil GML 1000, nomeadamente algumas características físicas (permitividade dieléctrica relativa, ϵ_r , e a tangente do ângulo de perdas, $\tan \delta$).

Tabela 3.1 Propriedades físicas do Gil GML 1000

Material	Gil GML 1000	
Aplicação	Substrato da antena	
Propriedades Físicas	ϵ_r (@ 2.45 GHz) = 3.2114±0.05	$\tan \delta$ (@ 2.45 GHz) = 0.0018
Banda de temperatura em que o ϵ_r é estável	-55 °C até 125 °C	
Altura	1.52 mm	

Algumas das propriedades físicas presentes na Tabela 3.1, nomeadamente o ϵ_r e a $\tan \delta$ são usadas na simulação no programa CST MWS. Os valores apresentados na tabela foram obtidos aplicando o modelo Debye de 1ª ordem do programa aos valores presentes no *data sheet* [21].

3.2.2. Dimensionamento da Antena

O dimensionamento das antenas impressas pode ser feito recorrendo a vários métodos e algoritmos, tal como acontece nas antenas lineares. Os algoritmos anteriormente mencionados também podem ser aplicados para dimensionar este tipo de antenas. Para esta antena vai ser usado o método dos algoritmos genéticos, já referido anteriormente na antena Yagi-Uda convencional.

A antena Yagi-Uda convencional já dimensionada vai de encontro aos objectivos propostos, logo será usada como base da antena impressa, no entanto, é necessário redimensionar as suas medidas para que esta funcione como antena planar.

Este redimensionamento terá de ser feito em todas as dimensões físicas da antena, tais como o diâmetro, comprimento dos elementos e a distância entre eles. O diâmetro apresentado na antena Yagi-Uda convencional tem agora de passar a ser uma tira estreita com altura muito perto de zero e uma determinada largura, ou seja, a largura equivalente de cada elemento é obtida da seguinte forma $w=2d$, em que d corresponde ao diâmetro de cada dipolo cilíndrico. Na antena convencional os elementos apresentam $d=1$ mm. O redimensionamento do comprimento dos elementos e da distância entre eles é feito recorrendo ao comprimento de onda no guia, λ_g , este valor é obtido pela Equação 3.1, em que F representa a frequência em GHz e ϵ_{eff} representa a constante dieléctrica efectiva. O resultado desta equação encontra-se já em milímetros (mm) [22].

$$\lambda_g = \frac{300}{F * \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.1)$$

Os novos valores, são obtidos dividindo as dimensões da antena convencional pelo comprimento de onda, em espaço livre, λ , e depois multiplicando esse valor pelo comprimento de onda no guia, λ_g , que neste caso vale 92,4 mm. Estes novos valores são mais pequenos, tal como seria de esperar. As dimensões finais estão presentes na Tabela 3.2, o espaçamento entre elementos está indicado relativamente ao elemento activo.

Tabela 3.2 Dimensões finais da Antena Yagi-Uda Impressa (medidas em mm)

Elemento	Comprimento	Espaçamento
Plano Reflector	82x45.58	9.5
Activo	43.38	-----
Director 1	37.73	20
Director 2	37.73	27.35
Director 3	36.79	29.24
Director 4	31.13	27.35

As antenas impressas são compostas por três partes essenciais, a primeira parte é a antena Yagi-Uda em si, já dimensionada, a segunda parte é um *balun* que serve para fazer a adaptação e a terceira parte é a linha de alimentação que faz a passagem do *balun* até ao elemento activo.

O *balun* em forma de *T-junction* com braços de diferentes comprimentos serve para dividir a potência de entrada e provocar uma diferença de fase de 180° , adaptando a linha de alimentação à frequência de trabalho [6]. O *balun* é constituído por um transformador de $\lambda/4$ com três portos. Na Figura 3.1 está representado o *balun* e a linha de alimentação.

Para fazer o dimensionamento desta estrutura recorreu-se ao estudo dos vários artigos que abordam o assunto [7] [6] [8] e obtiveram-se as medidas presentes na Tabela 3.3.

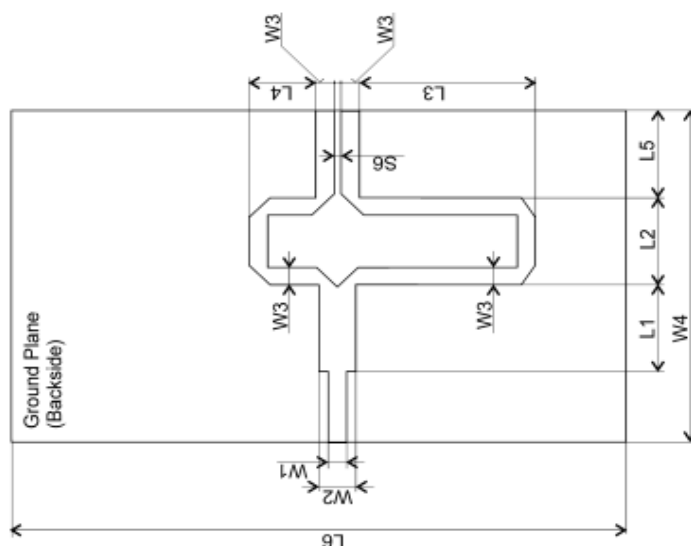


Figura 3.1 Estrutura do Balun

Tabela 3.3 Medidas do Balun (medidas em mm)

Balun		
L1=9.27	L2=9.72	L3=13.1
L4=4.77	L5=10.39	L6=82
W1=1.86	W2=3.36	W3=3.36
W4=45.58	S6=0.5	

Com a ajuda da ferramenta Parameter Sweep do CST MWS e numa fase posterior da ferramenta Optimazer, do Transient Solver Parameter, do mesmo programa, foram feitos vários varrimentos nas medidas apresentadas na Tabela 3.3, com o objectivo de otimizar a adaptação ou seja, as medidas que possibilitam obter um módulo do coeficiente de onda estacionária menor ou igual a -10 dB para a frequência de 2,45 GHz. Na Tabela 3.4 estão apresentadas as medidas utilizadas na construção da antena.

Tabela 3.4 Medidas do Balun Utilizado (medidas em mm)

Balun		
L1=9.5	L2=9.6	L3=12.6
L4=4.7	L5=9.6	L6=82
W1=1.7	W2=2.9	W3=1.6
W4=46	S6=0.5	

3.3. Simulação da antena

Mais uma vez para realizar a simulação recorreu-se ao programa de simulação CST MWS. Este programa é uma ferramenta muito importante, uma vez que nos permite visualizar as características de radiação da antena antes de se realizar a construção da mesma.

Antes de se simular a antena é necessário construir um protótipo no programa de simulação, esse protótipo pode ser visto na Figura 3.2, como pode ser observado na figura as simulações já foram realizadas com um conector SMA [23], o que permite que o modelo fique mais realista.

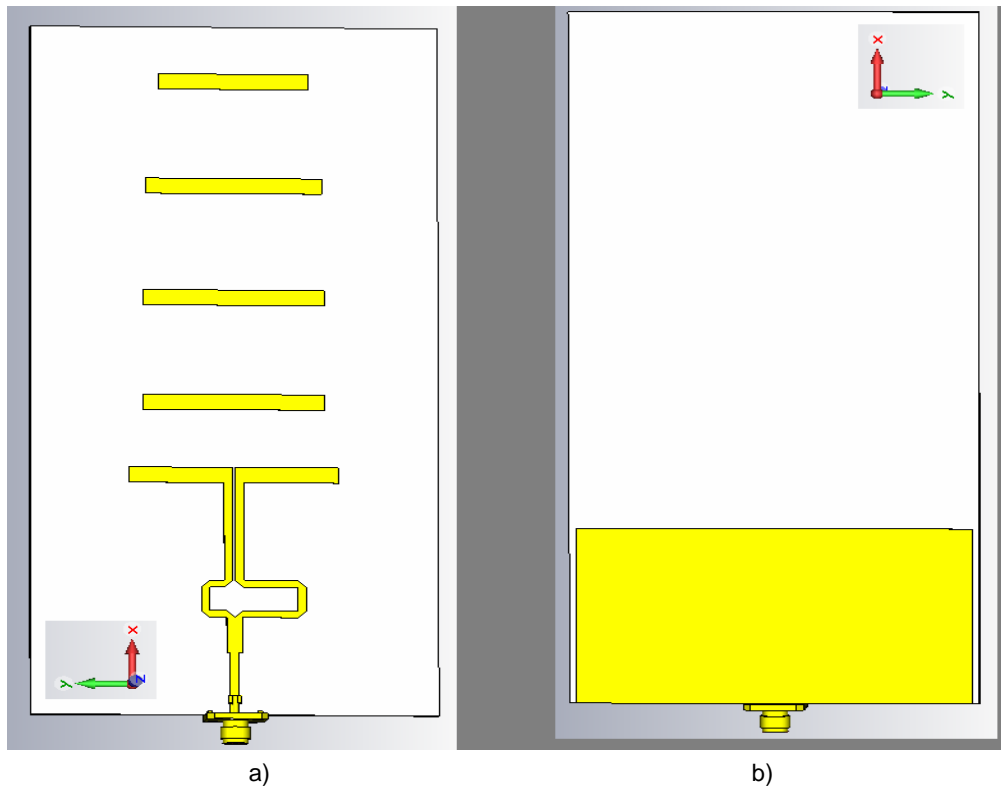


Figura 3.2 Protótipo da antena simulada a) parte da frente da antena b) costas da antena

Depois de construído o protótipo da antena a simular no CST MWS, tem de ser definida a frequência de trabalho, que neste caso vai ser 2,45 GHz e definir pontos de teste virtuais (field Monitors), sendo estes o farfield, o e-field e o h-field, permitindo obter mais informações sobre a distribuição do campo electromagnético. Outro aspecto que deve ter-se em conta antes de realizar a simulação é a malha da rede que está a ser utilizada. Quanto menor for a dimensão da malha, maior será o tempo de simulação e mais rigorosa será a mesma.

Depois de definidos todos estes parâmetros pode simular-se a antena.

Na Figura 3.3 encontra-se o diagrama de radiação em 3D para a frequência pretendida, com o valor de 8,68 dB, este valor é inferior ao ganho da antena Yagi-Uda convencional, o que já seria espectacular, sendo no entanto um ganho aceitável para a funcionalidade da antena. Esta antena apresenta umas características de radiação muito parecidas com a antena dimensionada no capítulo anterior, indo assim ao encontro aos objectivos propostos.

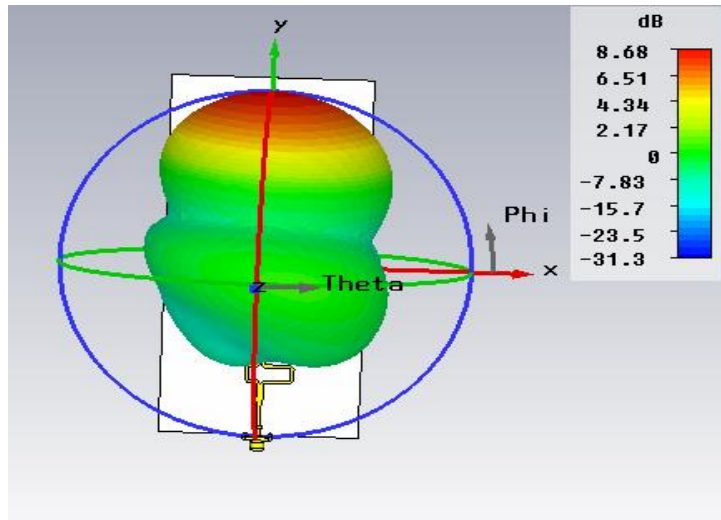


Figura 3.3 Diagrama de radiação 3D da antena

A antena encontra-se totalmente adaptada para a banda de frequência pretendida, podendo ser funcional em qualquer canal *Wireless*. Tal como já foi referido anteriormente, o nível de adaptação é representado pelo módulo do coeficiente de onda estacionário, $|S_{11}|$, da antena. Para antenas impressas mantemos o mesmo critério, ou seja, o $|S_{11}|$ tem de ser ≤ -10 dB. Neste caso estamos com $|S_{11}| = -15,7$ dB, como pode ser visto na Figura 3.4.

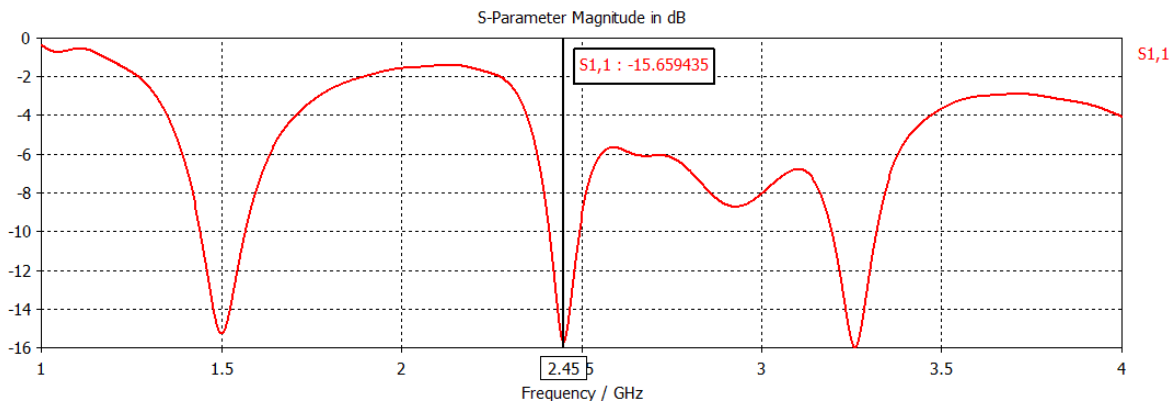


Figura 3.4 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena dimensionada

A largura de banda pode ser obtida usando a Equação 3.2, esta expressão é dada em função da frequência mínima e máxima da banda de funcionamento, f_{min} e f_{max} respectivamente [18].

$$LB\% = 200 * \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \quad (3.2)$$

Tal como já foi referido anteriormente o critério é $|S_{11}|_{dB} \leq -10$ dB [18]. Na Tabela 3.5 é indicada a banda de funcionamento e a respectiva largura de banda, $LB\%$ para a antena simulada em espaço livre.

Tabela 3.5 Banda de funcionamento de simulação, em espaço livre, da antena projectada

f_{\min} (GHz)	f_{\max} (GHz)	LB _%
2,404	2,491	3,55

A banda de funcionamento em espaço livre vai desde a 2,404 até 2,491 GHz, correspondendo largura de banda de 3,55%, estando assim todos os canais *wireless* cobertos.

3.4. Substrato usado na construção

Devido ao facto de não ser possível contactar o fornecedor europeu, ou mesmo a fábrica do substrato Gil GML 1000, nos Estados Unidos da América, uma vez que todos os meios de comunicação fornecidos no *site* do produto estavam desactivados, optou-se por trocar de substrato. Esta alteração constituiu uma reviravolta no planeamento da dissertação, uma vez que já se ia num ponto avançado da mesma, com simulações feitas, faltando apenas a construção da antena.

Por motivos económicos e de tempo, optou-se por usar um substrato existente no laboratório do Instituto Superior Técnico, IST. O substrato utilizado foi o Rogers RO3003™ que apresenta um bom desempenho em radiofrequência [24] [25]. Na Tabela 3.6 estão apresentadas algumas características deste substrato.

Tabela 3.6 Substrato utilizado

Material	RO3003™	
Aplicação	Substrato da antena	
Propriedades Físicas	ϵ_r (@ 2.45 GHz) = 3.0035±0.04	$\tan \delta$ (@ 2.45 GHz) = 0.0006
Altura	1.52 mm	

Estes valores foram obtidos usando as mesmas ferramentas do CST MWS que foram utilizadas para encontrar os valores para o primeiro substrato.

Por ter de se construir uma antena, para serem realizadas as medidas na câmara anecóica e por o tempo estar a escassear, optou-se por utilizar neste substrato o dimensionamento feito para o substrato anterior. Como os substratos não apresentam as mesmas características é de esperar que as características de radiação e de adaptação sofram alterações significativas. Mesmo tendo em conta estes aspectos, decidiu-se avançar para a construção da mesma.

3.5. Simulação da antena para o RO3003™

Para se visualizar as modificações produzidas pela alteração do substrato, recorreu-se ao programa de simulação CST MWS, neste programa foram utilizadas as mesmas características referidas anteriormente, ou seja, utilizou-se o mesmo número de células da malha de simulação, os mesmos field Monitor, alterando-se somente o substrato.

3.5.1. Antena com todos os directores em curto-circuito para 2,45 GHz

Na Figura 3.5 podemos ver as características de radiação no plano E e H. A antena apresenta um ganho de 5,5 dB, uma HPBW elevada na ordem dos 60,1°, no plano E, e no plano H 74,8°. Quanto ao nível de lobos secundários desta antena apresenta um nível elevado, -7,3 dB e -6,3 dB no plano E e H respectivamente. Quando comparados estes resultados com os obtidos com o substrato Gil GML 1000 pode-se verificar que o valor de ganho fica muito inferior, a HPBW e o nível de lobos secundários também sofrem alterações, mas tal como foi referido, estas alterações já eram espectáveis, uma vez que a antena não foi dimensionada para o substrato RO3003™.

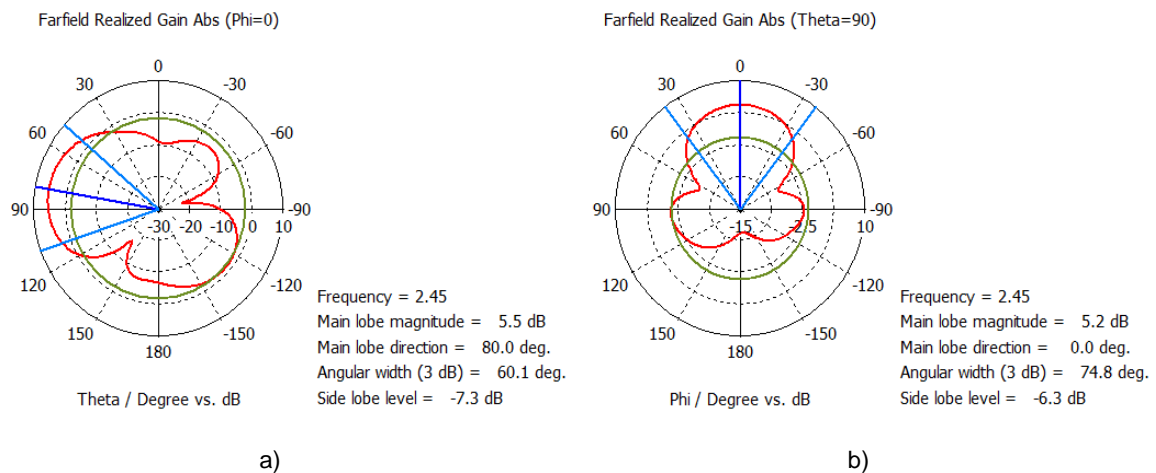


Figura 3.5 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa no substrato RO3003™ para 2,45 GHz

Na Figura 3.6 pode visualizar-se que o pico mais pronunciado se desviou em relação à frequência pretendida, e encontra-se na frequência de 2,32 GHz, apresentando neste caso um valor de -16,0 dB, ligeiramente superior ao caso anterior.

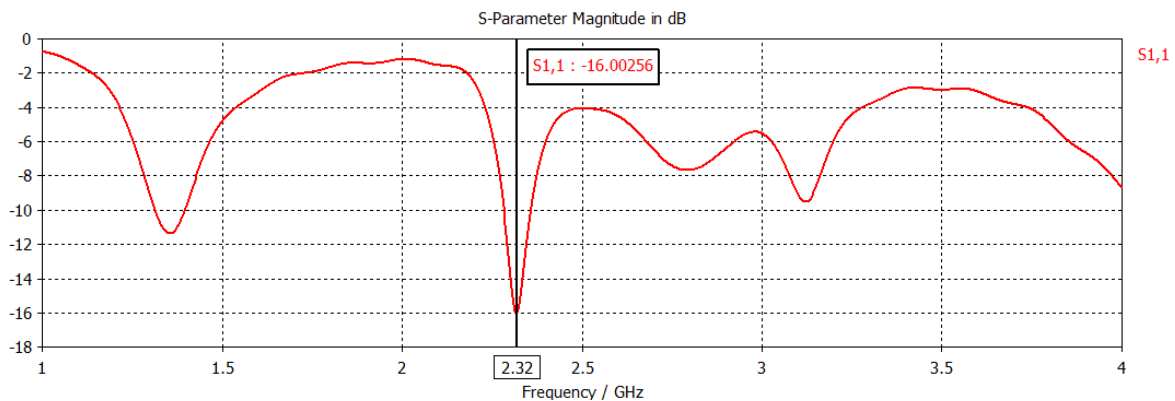


Figura 3.6 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato RO3003™

Depois de analisados estes resultados decidiu-se simular todas as combinações para a frequência de 2,3 GHz em vez de os 2,45 GHz inicialmente previstos, uma vez que o pico se encontra nessa frequência. Os resultados obtidos nesta frequência serão equivalentes aos que seriam obtidos para a frequência pretendida.

3.5.2. Antena com todos os directores em curto-circuito para 2,3 GHz

Neste tópico simulou-se a antena com todos os directores em curto-circuito para a frequência de 2,3 GHz. São esperados melhores resultados que os apresentados no tópico anterior, uma vez que a antena se encontra completamente adaptada. Como pode ser visualizado na Figura 3.7 o ganho aumentou nos dois planos, passando a valer 7,4 dB, a HPBW no plano E não sofre grande variação, mas no plano H existe um grande aumento, passando a ser 84,9°. O nível de lobos secundários também sofre melhorias nos dois planos, sendo esta mais pronunciada no plano E.

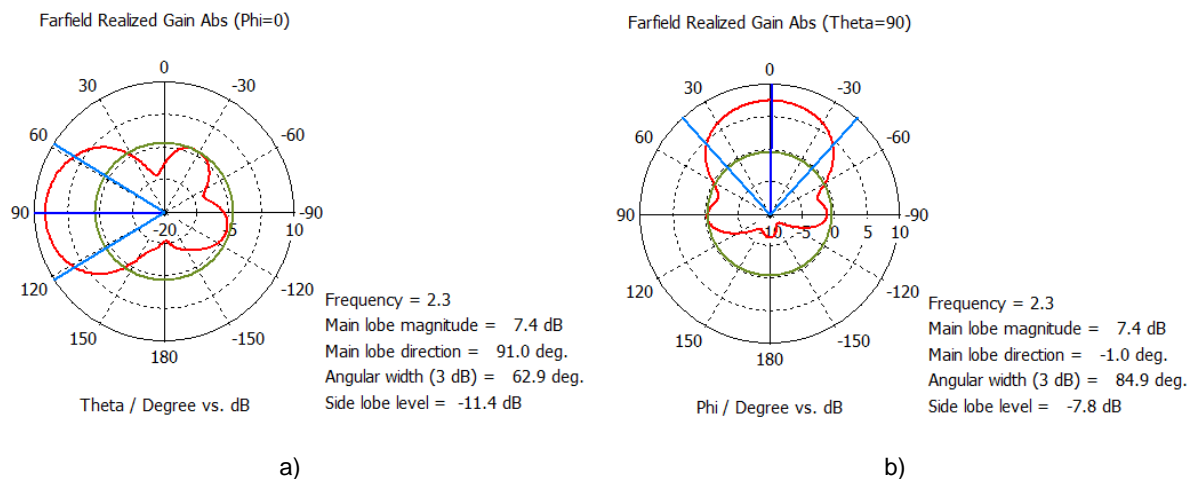


Figura 3.7) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa no substrato RO3003™ para 2,3 GHz

Como já foi dito anteriormente esta antena encontra-se adaptada para a frequência de 2,3 GHz, valendo o $|S_{11}|_{dB}$ -13,5 dB, o pico mais pronunciado encontra-se ligeiramente desviado da frequência, mas mesmo assim a antena encontra-se adaptada uma vez que o valor do $|S_{11}|_{dB} \leq -10$ dB. Na Figura 3.8 podem visualizar-se os aspectos referidos anteriormente.

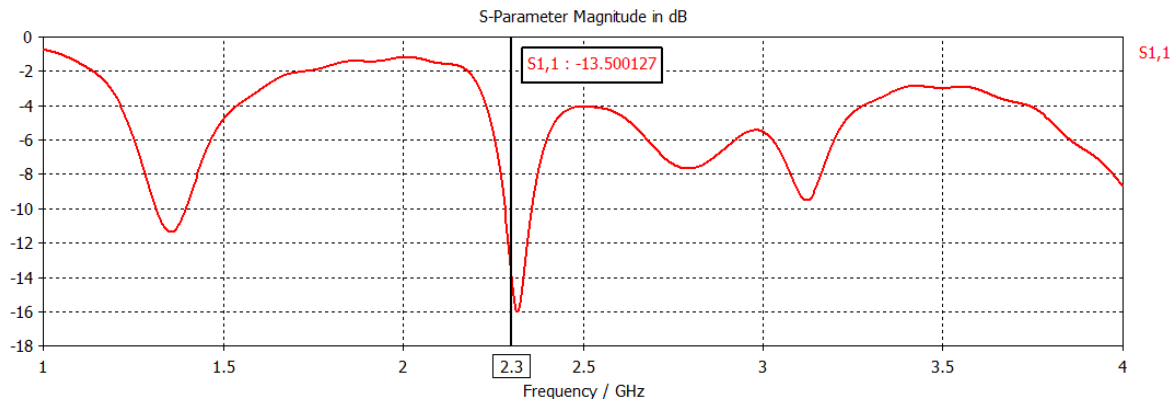


Figura 3.8 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato RO3003™ para 2,3GHz

3.5.3. Antena com todos os directores em aberto para 2,3 GHz

Esta combinação permite obter o máximo da HPBW, mas também é a combinação que apresenta o menor ganho e a pior adaptação, ainda assim é útil considerar-se esta combinação.

Na Figura 3.9 está representado o diagrama de radiação no plano E e H. Como se verifica, a antena apresenta um ganho da ordem dos 4,5 dB, o que é relativamente baixo quando comparado com o ganho da antena com todos os directores em curto-circuito. Esta antena, como já foi dito, apresenta uma HPBW elevada na ordem dos 77° no plano E, no entanto, apresenta um nível de lobos secundários elevado, -7,7 dB, como pode ser visto na Figura 3.9 a).

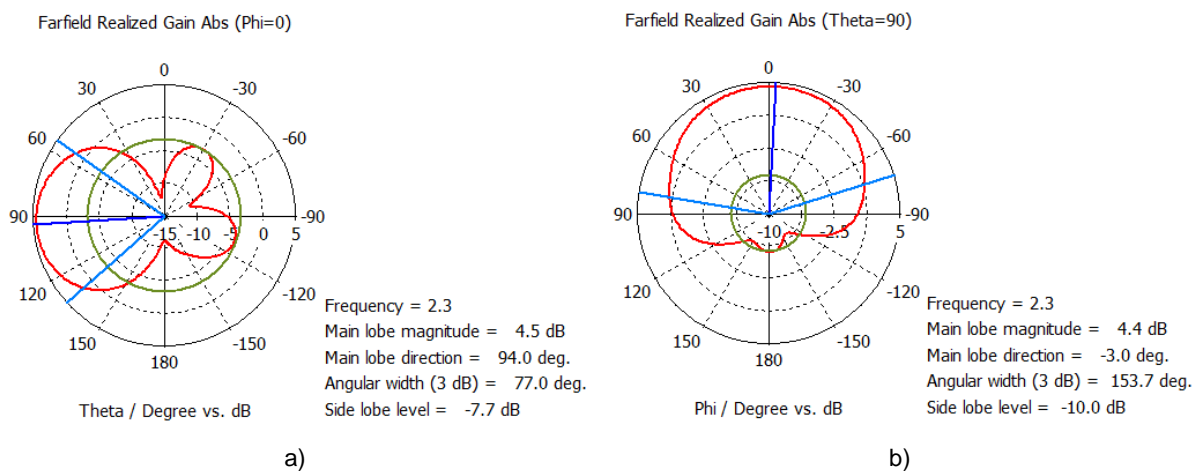


Figura 3.9 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com todos os directores em aberto para 2,3 GHz

Relativamente à adaptação, esta antena encontra-se com o valor do $|S_{11}|_{dB}$ muito próximo do limite que foi estabelecido para considerarmos a antena adaptada, ou seja o $|S_{11}|_{dB}$ neste caso vale -10,5 dB, podendo assim considerar-se que a antena se encontra adaptada.

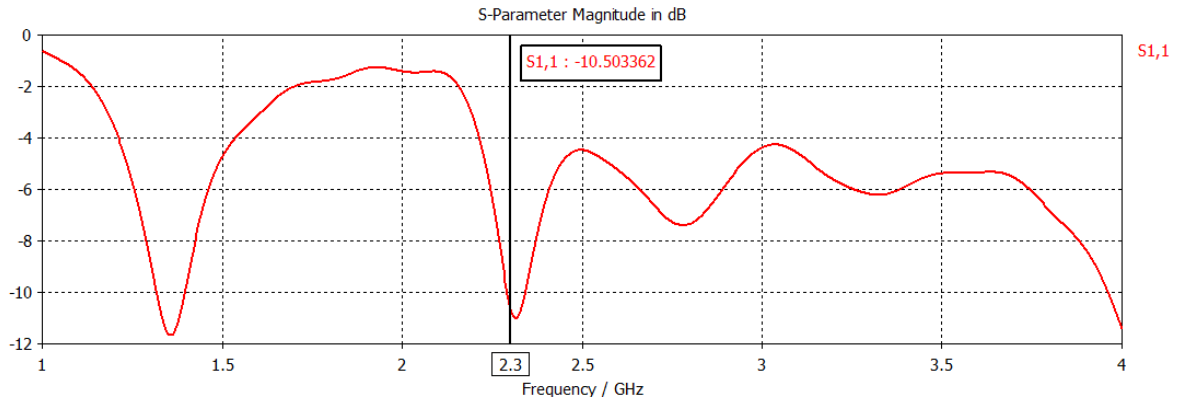


Figura 3.10 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com todos os directores abertos para 2,3 GHz

3.5.4. Antena com o 3º e 4º director em aberto para 2,3 GHz

Esta combinação permite obter um ganho de 6,7 dB, nos dois planos, com uma HPBW na ordem dos 67.2º, no plano E, como pode ser visto na Figura 3.11. O nível de lobos secundários é menor quando comparado com a situação anterior, diminui cerca de 3 dB, o que é uma melhoria aceitável.

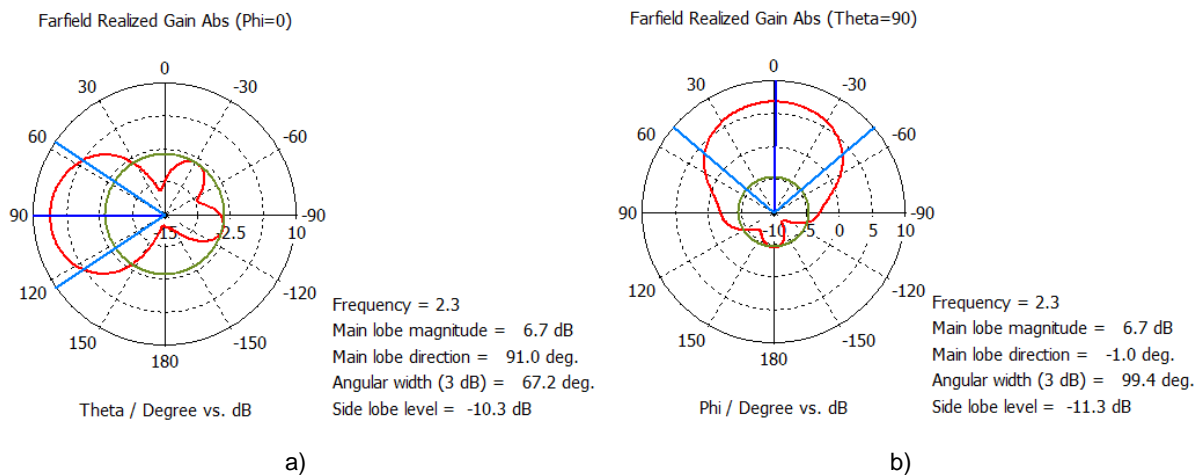


Figura 3.11 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º e 4º director em aberto para 2,3 GHz

Na Figura 3.12 encontra-se a curva do $|S_{11}|_{dB}$, como pode ser visto pela análise da mesma a antena encontra-se completamente adaptada para a frequência pretendida, encontrando-se o valor de $|S_{11}|_{dB}$ cerca de 4 dB abaixo do valor limite.

De acordo com o programa de simulação CST MWS esta antena apresenta uma eficiência de radiação de 91.4%.

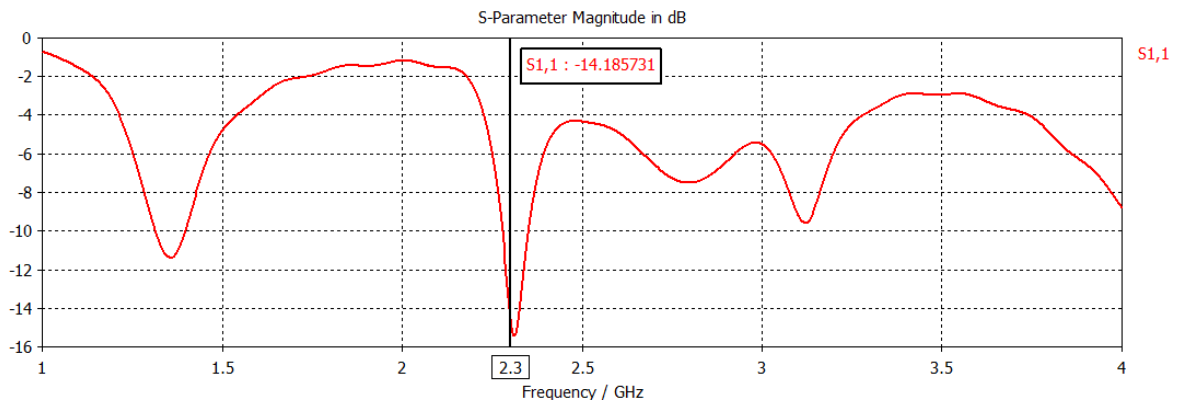


Figura 3.12 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º e 4º director em aberto para 2,3 GHz

3.5.5. Antena com 3º director em aberto para 2,3 GHz

A combinação com o 3º director em aberto permite obter um ganho de 7,1 dB com uma abertura de 64,9 °, e um nível de lobos secundários relativamente baixos no plano E, -11 dB, estes parâmetros podem ser vistos na Figura 3.13 a). Se for comparada a HPBW desta combinação com a anterior, reparamos que elas se encontram separadas apenas por 3º.

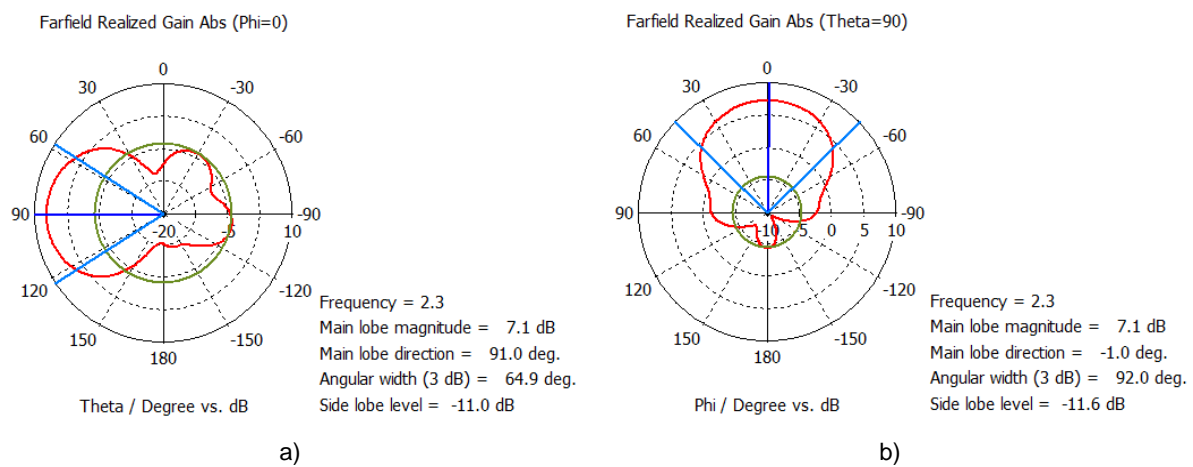


Figura 3.13 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 3º director em aberto para 2,3 GHz

Na Figura 3.14 pode ser visualizado o valor de $|S_{11}|_{dB}$ para a frequência pretendida, -15,1 dB. Com este valor concluímos que a antena se encontra adaptada para a frequência pretendida embora o pico com melhor definição se encontre ligeiramente ao lado da frequência pretendida. Esta combinação apresenta uma eficiência de radiação de 91,2%.

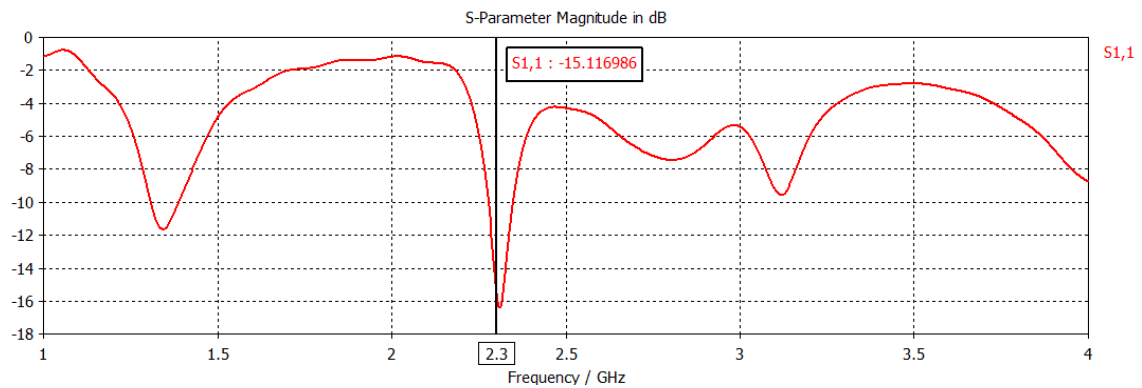


Figura 3.14 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com 3º director em aberto para 2,3 GHz

3.5.6. Antena com 1º director em curto-circuito para 2,3 GHz

Esta antena apresenta uma redução de ganho, quando comparada com a antena apresentada anteriormente, como pode ser visto na Figura 3.15, esta antena apresenta um ganho de 5,8 dB. A HPBW nesta situação é 71,2º sendo este o segundo maior valor da largura de banda sendo apenas superado pela combinação com todos os elementos em aberto. Apresenta um nível de lóbulos secundários na mesma ordem dos casos anteriores.

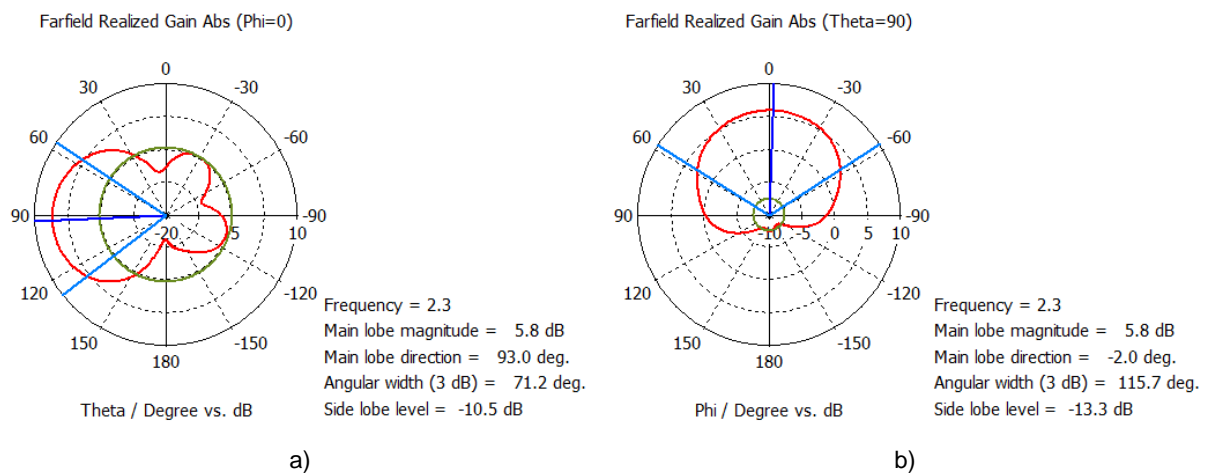


Figura 3.15 Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com 1º director em curto-circuito para 2,3 GHz

O coeficiente de onda estacionária apresenta um valor de -12,4 dB, como pode ser visto na Figura 3.16, tal como acontecia na situação anterior o pico mais pronunciado encontra-se ligeiramente deslocado da frequência pretendida, mas ainda assim a antena encontra-se adaptada.

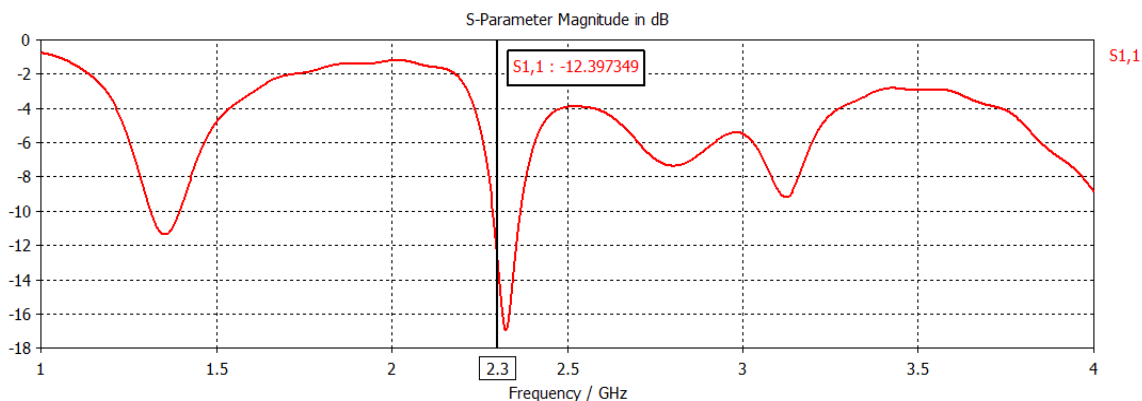


Figura 3.16 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com o 1º director em curto-circuito para 2,3 GHz

3.6. Construção da Antena

Concluída a fase de dimensionamento e simulação da antena, procedeu-se a construção física da mesma. Nesta secção aborda-se o método de construção da antena, sendo descritas as fases de construção e as dificuldades e obstáculos encontrados em cada uma das fases.

Para construir a antena foi preciso criar um *layout* da mesma, a partir do qual se começa a construção.

Existem vários programas que permitem criar o *layout*, de entre os quais se destacam o Eagle, SolidWorks, AutoCAD, etc. O *layout* desta antena foi feito no programa SolidWorks, para o qual foram importados os pontos que definiam a antena no programa CST MWS e depois foi então criado o *layout*.

Este *layout* tinha de ter um factor de escala associado, este podia ser $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$, ou seja, as medidas iam ser aumentadas 50 ou 25%, optou-se por usar um factor de escala de $\frac{1}{2}$, o que permite minimizar qualquer erro existente no desenho. Na Figura 3.17 é apresentado o *layout* usado na construção da antena, este *layout* foi impresso numa folha A3.

Como pode visualizar-se na Figura 3.17 foi preciso criar pontos de apoio para depois se conseguir sobrepor as duas imagens, apresentam-se as quatro circunferências e as linhas a negrito na extremidade da antena

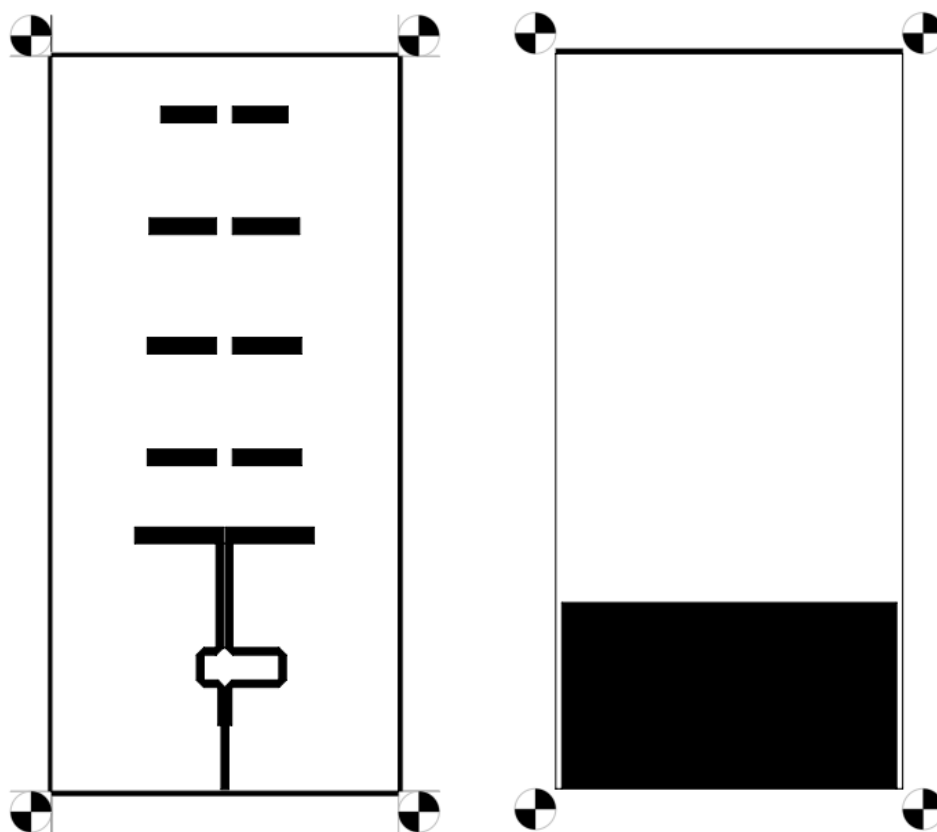


Figura 3.17 Layout da Antena

É através deste *layout* que se vai proceder à criação do negativo e posteriormente do positivo. Para a realização destes, é preciso ter alguns cuidados relativamente à intensidade de luz existente na sala onde é realizada esta operação. O *layout* é introduzido na ampliadora REPROMASTER 2200 II, da AGFA, onde é retirado todo o ar, ficando o desenho no vácuo, depois este é bombeado por uma luz intensa, dando origem ao negativo. Posteriormente este passa para a reveladora RAPLINE 43 da mesma marca onde é revelado, ficando o positivo, que será utilizado para a construção da antena. Uma vez que a antena apresenta parte superior e inferior é preciso repetir este processo duas vezes, uma para cada parte.

Depois de se ter o positivo das duas partes da antena é preciso acertar os mesmos, para que ambas as partes fiquem alinhadas. Para facilitar este procedimento foi utilizado o microscópio presente no laboratório. Depois de alinhados estes são imobilizados um no outro deixando-se só uma entrada para introduzir o substrato no meio dos dois positivos

A placa de substrato precisa de tratamento antes de ser introduzida entre os positivos. Esta precisa de ser limpa, neste caso este procedimento ainda foi mais importante uma vez que a placa já se encontrava no laboratório há algum tempo e o cobre apresentava um nível de oxidação elevado. Depois de limpa a placa foi envernizada e introduzida numa câmara para secar.

Depois de seca, a placa foi então introduzida entre os dois positivos, para ser bombeada com luz ultravioleta. Quando retirámos a placa do meio dos positivos verificámos que o desenho da antena já se encontrava na placa. É então necessário retirar o cobre que não faz parte da antena,

usando ácido. Este processo tem de ser repetido várias vezes para que o cobre que se encontra a mais seja retirado. Na Figura 3.18 pode ser vista a antena a ser retirada do suporte utilizado para mergulhar a placa no ácido. Depois de retirado todo o cobre que se encontrava a mais, a placa é lavada com acetona, estando concluído o processo de construção da antena. O produto final pode ser visto na Figura 3.19



Figura 3.18 Antena a ser retirada do suporte

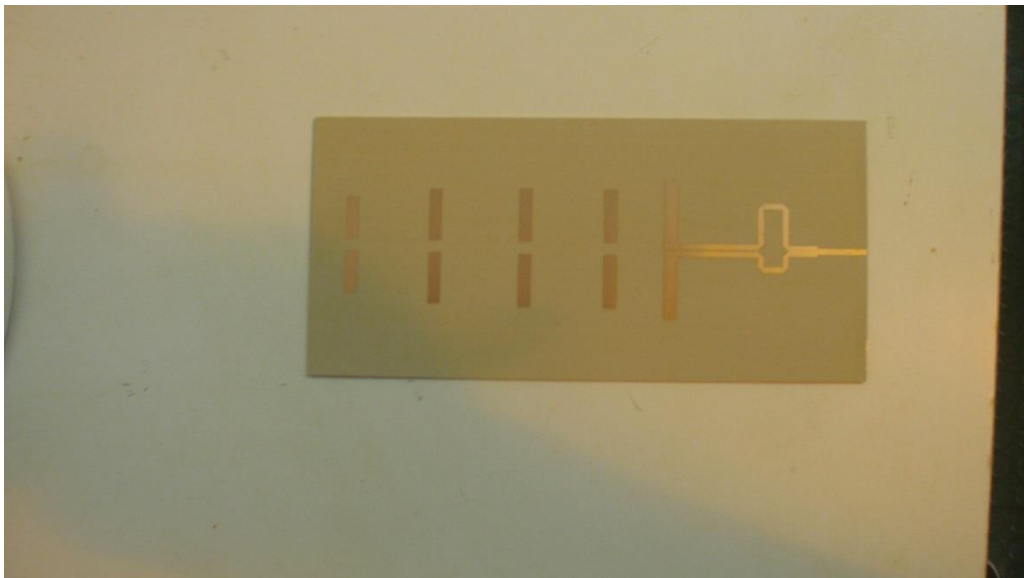


Figura 3.19 Antena no seu estado final

3.7. Conclusões e comparação de resultados

Nesta secção comparar-se-ão as simulações da antena Yagi-Uda impressa com as simulações da antena Yagi-Uda Convencional, e verificar quais as vantagens e desvantagens produzidas pela troca da antena convencional pela impressa.

A grande vantagem obtida quando comparadas as simulações, é um aumento na HPBW em todas as situações simuladas, isto é uma grande vantagem uma vez que é um dos objectivos, atingir-se uma HPBW elevada. O nível de lobos secundários também sofre alterações, mas estas alterações não são muito significativas, nem apresentam relevância. Outra grande vantagem é que as dimensões físicas da antena impressa são muito menores que as da antena convencional.

A grande desvantagem apresentada pelas simulações foi o ganho este é inferior em todas as situações simuladas na antena impressa, mas esta situação já seria de esperar, uma vez que estas antenas têm uma eficiência mais reduzida.

De uma forma geral a antena impressa dimensionada cumpre os requisitos propostos, as combinações de directores em circuito aberto ou em curto-circuito permitem alterar a largura do lobo principal da antena, o ganho mesmo sendo inferior ao da antena convencional ainda é relativamente elevado, o nível de lobos secundários é relativamente baixo, não interferindo com o lobo principal e a antena apresenta dimensões reduzidas e alguma robustez.

Capítulo 4

4. Antena com regulação do ganho e da largura do lobo principal a -3 dB

4.1. Introdução

Após se ter dimensionado e simulado a antena Yagi-Uda impressa, chega a altura de se efectuarem alterações à mesma de modo a construir uma nova antena que permita regular a HPBW e a amplitude do ganho.

Tal como já foi referido, o que permite regular a HPBW e a amplitude do ganho é a combinação de directores em curto-circuito e em circuito aberto, em que as combinações mais vantajosas já foram apresentadas no capítulo anterior.

É então necessário criar um sistema que permita colocar os directores em curto-circuito ou em circuito aberto. Para fazer esta comutação foram usados díodos PIN, colocados entre os dois “braços” dos directores, que quando polarizados directamente, permitem a passagem de corrente estabelecendo-se o curto-circuito e quando polarizados inversamente, não conduzem, simulando o circuito aberto.

Na secção 4.2 são apresentadas as simulações das combinações, mas já com os díodos inseridos entre os “braços” dos directores. Estas simulações são essenciais para se verificar se a introdução dos díodos afecta as características de radiação.

Na secção 4.3 são apresentadas as medidas experimentais da antena construída, em espaço livre. São apresentados também os coeficientes de reflexão de entrada, $|S_{11}|_{dB}$ e os diagramas de radiação para cada uma das combinações.

No final do capítulo são efectuadas as comparações dos resultados simulados com os resultados experimentais.

4.2. Simulação da antena com díodos

O protótipo da antena que servirá para regular o ganho e a largura apresenta os “braços” dos directores afastados de 4 mm, para a colocação dos díodos PIN.

Nestas simulações, serão introduzidos 4 díodos na estrutura da antena, um para cada director, sendo depois polarizados directa ou inversamente para produzir as combinações anteriormente apresentadas. Na montagem foram utilizados os díodos PIN da série HSMP-489x, da Avago [26]. Estes díodos são muito utilizados em RF, UHF e circuitos de microondas, uma vez que este díodo funciona como uma resistência que controla a corrente para estas frequências [27].

Para permitir a simulação dos díodos no programa de simulação CST MWS é preciso utilizar o modelo equivalente dos díodos para altas frequências. Quando o díodo se encontra directamente polarizado, ou seja, ON, este pode ser representado por uma indutância em série com uma resistência, como pode ser visto na Figura 4.1. retirada da referência [28].

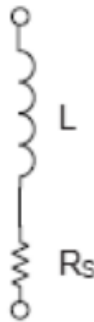


Figura 4.1 Circuito equivalente do Díodo PIN directamente polarizado

Quando o díodo se encontra inversamente polarizado, ou seja, OFF, este pode ser representado por uma bobine em série com o paralelo de um condensador com uma resistência, como pode ser visto na Figura 4.2 retirada da referência [28].

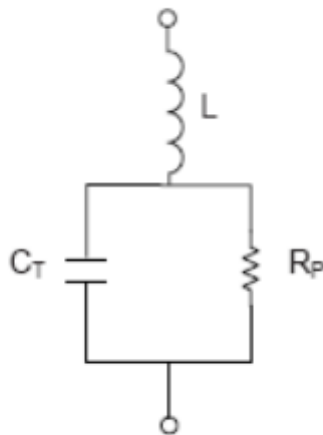


Figura 4.2 Circuito equivalente do Díodo PIN inversamente polarizado

Tendo em conta estes dois esquemas é possível representar os díodos no programa de simulação CST MWS, uma vez que este permite a representação de circuitos RLC. Os valores da resistência, da bobine e do condensador utilizados na simulação encontram-se na Tabela 4.1, uma

vez que o *data sheet* não continha estes valores tivemos de recorrer a alguns fóruns sobre a matéria para encontrar valores tipo [29], utilizados em simulações no programa CST MWS. Os valores reais para este diodo não devem diferir muito dos valores apresentados, logo as simulações não serão muito diferentes se forem utilizados estes valores.

Tabela 4.1 Valores usados na simulação

	Díodo ON	Díodo OFF
Indutância L (nH)	0,45	0,45
Resistência R (Ω)	3,5	3000
Condensador C (pF)	-----	0,08

Na Figura 4.3 pode ser visto em pormenor a colocação do circuito RLC, representado por um cone azul na figura, em cada director da antena simulada. Como pode ser observado, todos os cones tem a mesma orientação e existe um fio a ligar os “braços” do director, este permite fazer a passagem de corrente, quando o diodo estiver ON, entre os “braços” e simular o curto-circuito.

Nas simulações realizadas não foi incluído o sistema de alimentação dos circuitos RLC, para se alternar entre as combinações pretendidas foi preciso alterar os valores de R, L e C manualmente no programa.

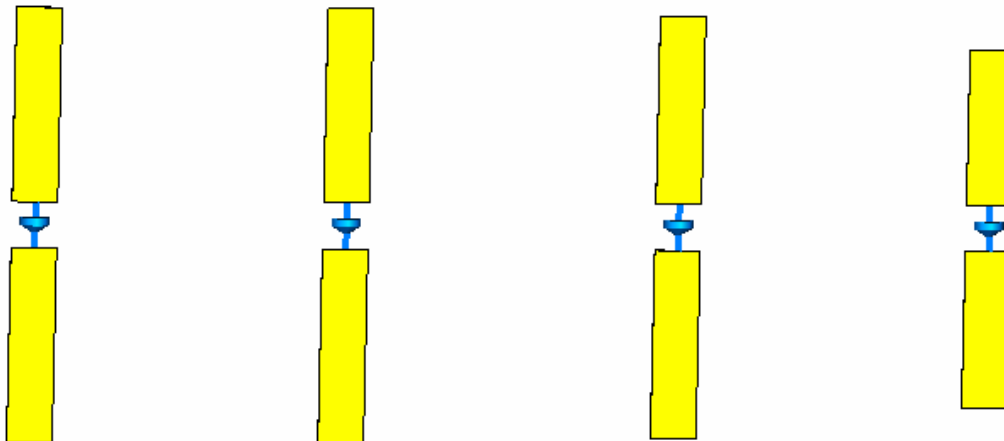


Figura 4.3 Colocação do circuito RLC

4.2.1. Antena com todos os directores em curto-circuito

Esta combinação é obtida colocando todos os diodos “ON”, como existe passagem de corrente os dois “braços” do director ficam em curto-circuito, criando uma ligação física entre os dois braços. Na Figura 4.4 estão representados os diagramas de radiação para o plano E e H. Como pode

ser visualizado esta combinação apresenta um ganho de 8,1 dB e uma HPBW de 58,8° no plano E. O nível de lobos secundários apresenta um valor de -12,4 dB.

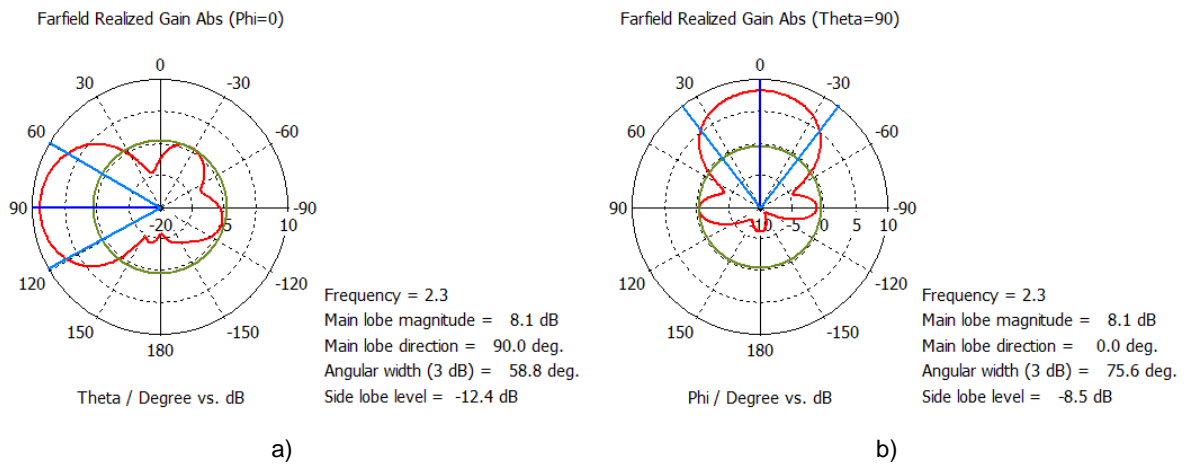


Figura 4.4 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa com díodos

Esta antena encontra-se totalmente adaptada para a frequência pretendida, uma vez que o valor do coeficiente de onda estacionária é muito inferior ao limite previamente estipulado, $|S_{11}|_{dB} \leq -10$ dB, neste caso com -18,1 dB, como pode ser visualizado na Figura 4.5. O pico mais pronunciado encontra-se ligeiramente afastado da frequência de trabalho, o que não é muito relevante, uma vez que mesmo assim continua a ter-se um valor de $|S_{11}|_{dB}$ baixo.

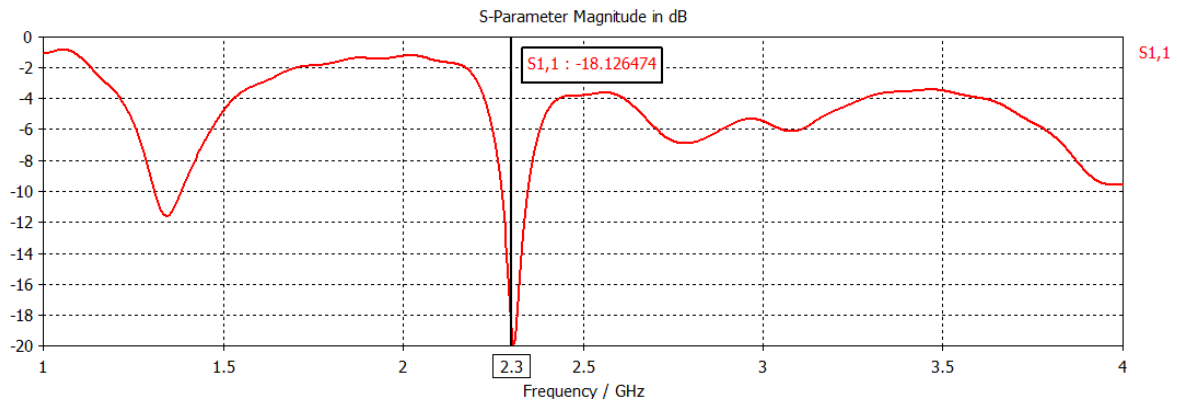


Figura 4.5 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato com díodos

4.2.2. Antena com todos os directores em aberto

Tal como já foi referido, esta simulação foi realizada para estudar o efeito da presença dos díodos nas características de radiação, nesta situação todos os díodos estão “OFF”. Esta combinação apresenta um ganho de 4,6 dB, e uma HPBW de 75,9°, no plano E, como pode ser visualizado na Figura 4.6. Esta combinação tal como acontecia antes de serem inseridos os díodos, é

a combinação que permite obter a maior HPBW. O nível de lobos secundários é elevado, como pode visualizar-se na Figura 4.6, neste caso apresenta um valor de -7,9 dB.

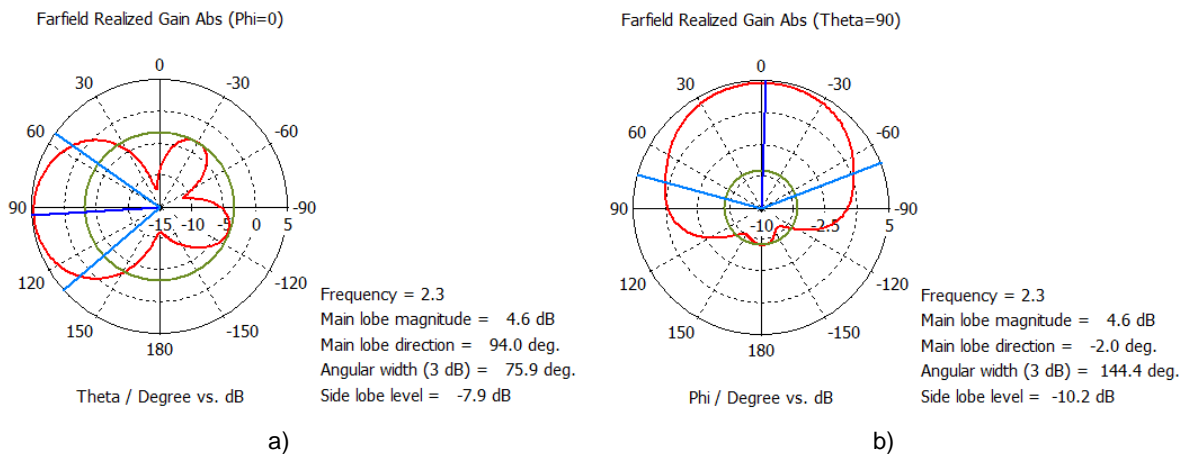


Figura 4.6 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e os directores todos em aberto

Esta antena apresenta uma curva do $|S_{11}|_{dB}$ com pouca definição, apresentando vários picos, dois bem definidos, um deles na frequência pretendida o que permite garantir que a antena está adaptada. Na Figura 4.7 pode ser visto o nível de adaptação desta configuração, como pode observar-se este valor encontra-se muito próximo do valor limite para se considerar adaptada, mas ainda assim a antena encontra-se adaptada com um valor de $|S_{11}|_{dB} = -10,9$ dB.

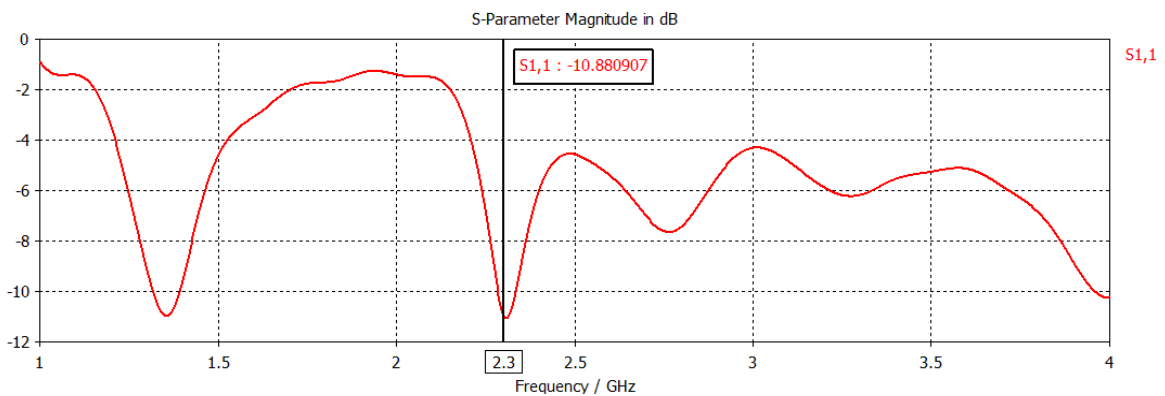


Figura 4.7 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena com díodos e com todos os directores em abertos

4.2.3. Antena com o 3º e 4º director em aberto

Esta combinação apresenta um ganho de 7,9 dB, com uma HPBW de 63,8º, o nível de lobos secundários melhorou e encontra-se agora nos -10,1 dB, como pode ser visto na Figura 4.8 a).

Relativamente ao plano H esta antena apresenta um ganho de 7,9 dB e uma HPBW de 89,3°, como pode ser visualizado na Figura 4.8 b).

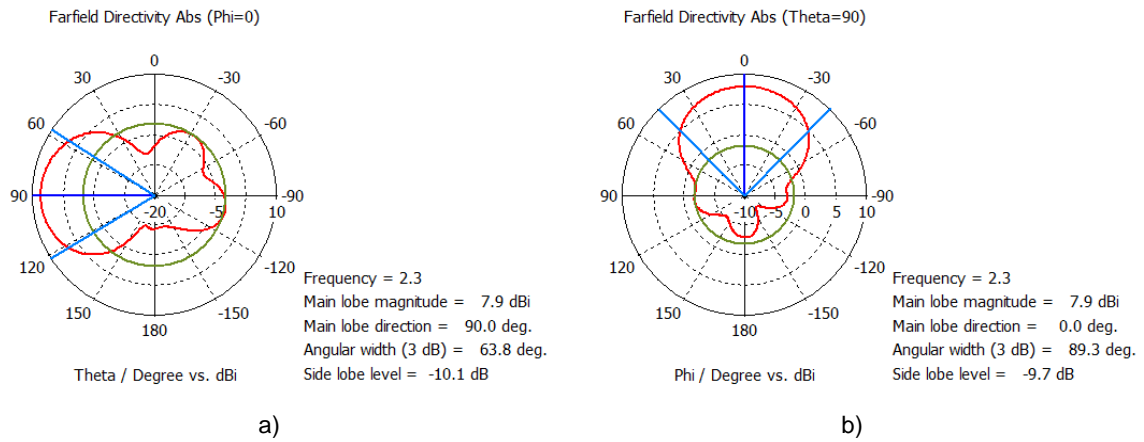


Figura 4.8 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e o 3º e 4º director em aberto

Tal como acontece nas outras combinações também esta se encontra adaptada, apresentando um valor de $|S_{11}|_{dB}$ de -16,9 dB, o pico com melhor definição encontra-se centrado na frequência de trabalho, como pode ser visualizado na Figura 4.9.

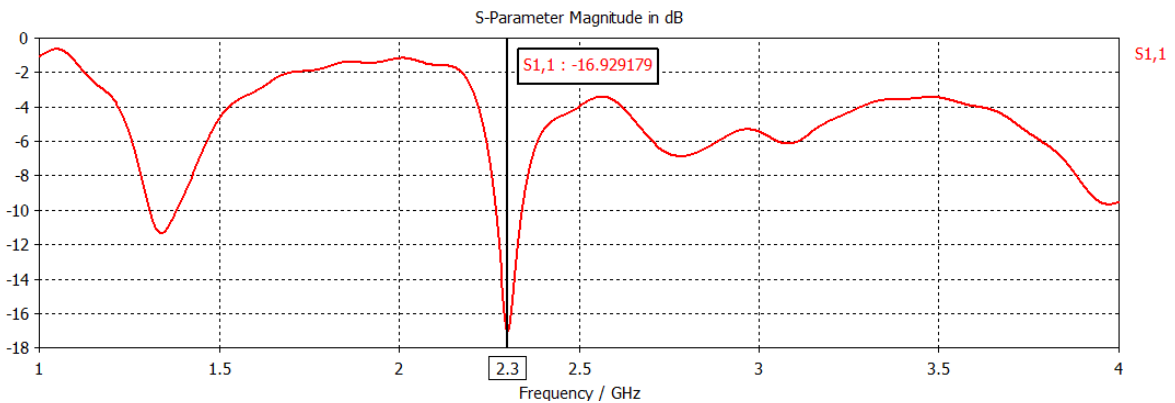


Figura 4.9 Módulo do ccoeficiente de onda estacionária da antena com díodos e os 3º e 4º director em aberto

4.2.4. Antena com 3º director em aberto

Esta combinação é obtida colocando o díodo do 3º director “OFF” e os restantes díodos “ON”, apresentando um ganho de 7,7 dB com uma HPBW de 61,4°, o nível de lobos secundários apresenta um valor na mesma ordem das combinações anteriores, neste caso de -10,3 dB, estas características mantêm-se no plano H, havendo somente alteração na HPBW, como pode ser visto na Figura 4.10.

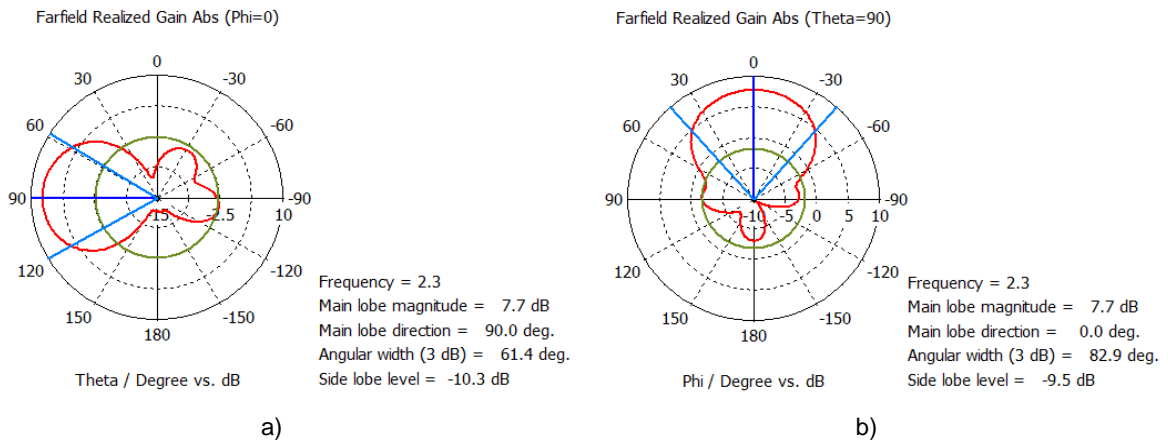


Figura 4.10 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e o 3º director em aberto

Na Figura 4.11 podemos verificar a adaptação da antena, esta encontra-se completamente adaptada, uma vez que apresenta um $|S_{11}|_{dB}$ de -18,3 dB, tal como acontecia na combinação apresentada anteriormente, estando o pico com melhor definição e centrado na frequência pretendida neste caso 2,3 GHz.

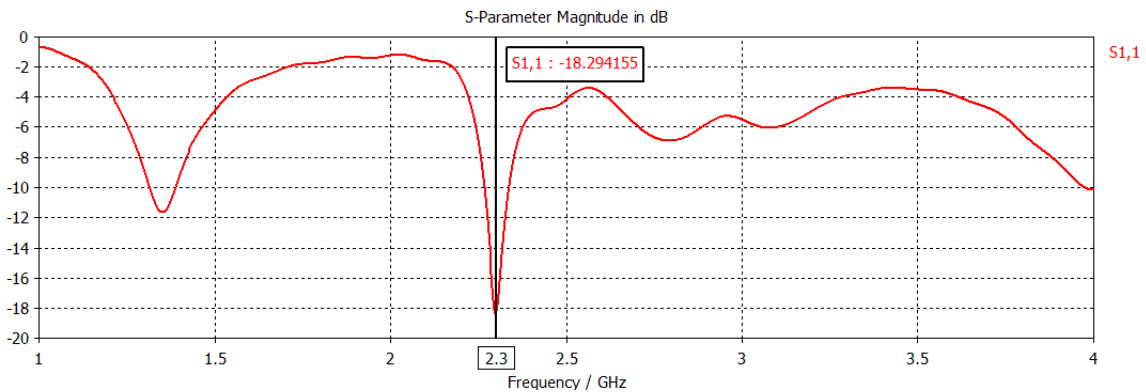


Figura 4.11 Módulo coeficiente de onda estacionária da antena com díodos e o 3º director em aberto

4.2.5. Antena com 1º director em curto-circuito

Na Figura 4.12, está representado o diagrama no plano E e H desta combinação, de onde se pode concluir que esta configuração apresenta um ganho de 6,4 dB e uma HPBW de 67,9º no plano E. No plano H o ganho mantém-se mas a largura aumenta consideravelmente, passando a valer 103,2º. O nível de lobos secundários mantém-se na ordem dos casos anteriores no plano E, -11,7 dB, e diminui no plano H passando a valer -14,5 dB.

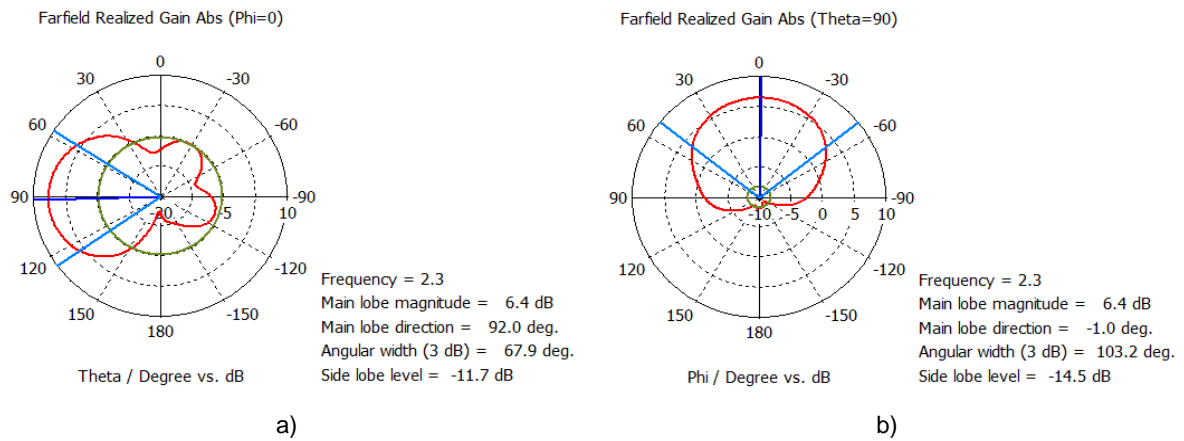


Figura 4.12 Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda com díodos e o 1º director em curto-circuito

Esta combinação encontra-se adaptada à frequência pretendida, como pode ser visualizado na Figura 4.13, apresenta o coeficiente de onda estacionária com um valor de -17 dB muito abaixo do limite imposto. O pico mais definido encontra-se ligeiramente afastado da frequência de trabalho como acontece com algumas combinações anteriormente apresentadas.

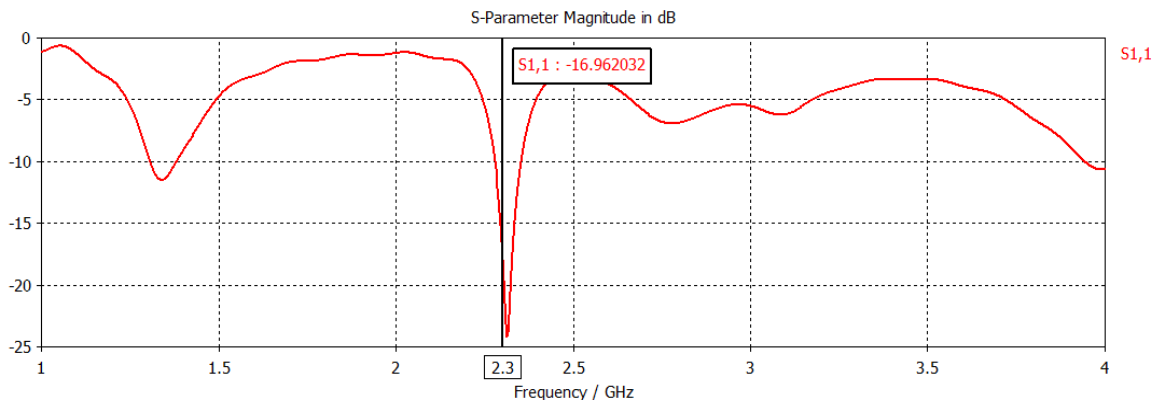


Figura 4.13 Modelo coeficiente de onda estacionária da antena com díodos e o 1º director em curto-circuito

4.3. Sistema de alimentação e comutação dos díodos

Nesta parte do trabalho será apresentado a construção do circuito de polarização e comutação dos díodos. Estes circuitos não são circuitos finais, são simplesmente circuitos simples e de fácil construção que permitem efectuar os testes da antena.

O circuito de polarização dos díodos é constituído por duas resistências do tipo Surface Mounting Devices (SMD) de 1.3 kΩ cada e por uma fonte de alimentação, neste caso uma pilha de 9 V. Na Figura 4.14 a) encontra-se representado um plano da antena com todos os díodos inseridos, e na Figura 4.14 b) pode ser visto o pormenor do díodo com as duas resistências. Pela análise da figura verifica-se que o espaço deixado entre os “braços” dos díodos foi excessivo, uma vez que o

tamanho dos díodos é muito inferior aos 4 mm deixados, para se corrigir este aspecto teve de se colocar um fio a ligar o ânodo do díodo ao “braço” do director, como pode ser visto na Figura 4.14 b)

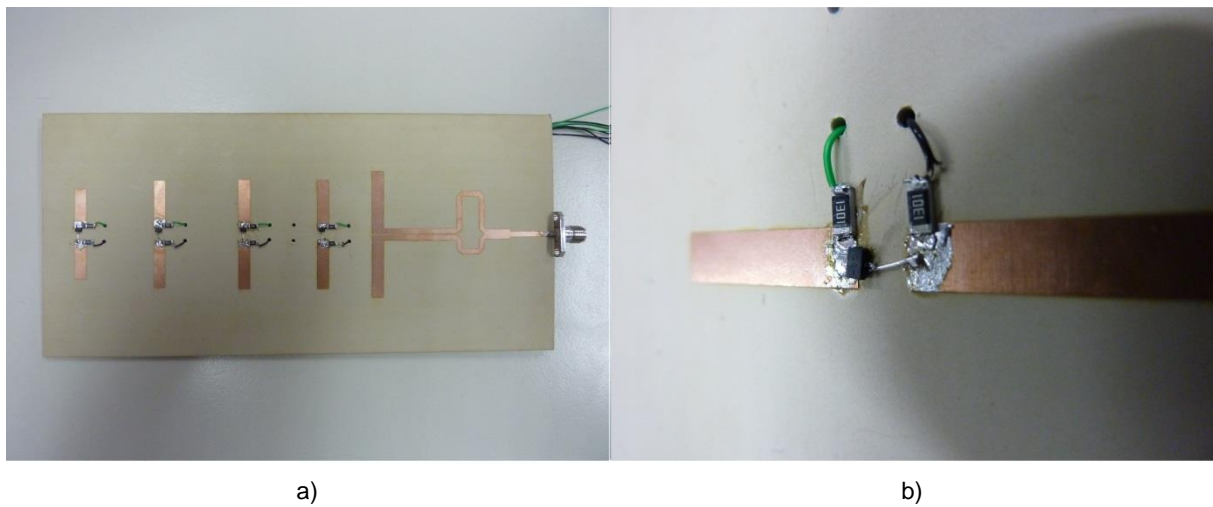


Figura 4.14 a) antena com díodos e resistencias inseridos b) promenor do diodo e das duas resistencias

O sistema de comutação é simples, todos os díodos têm o cátodo ligado ao borne negativo da pilha, enquanto que cada ânodo é ligado ao borne positivo da pilha quando se pretende colocar o díodo em funcionamento, para se saber que díodo se estava a ligar foram utilizados cabos de varias cores em que cada cor correspondia a um díodo, na Figura 4.15 pode ser visto este sistema.

Para se reduzir a influência dos fios de alimentação dos díodos nas medidas decidiu-se introduzir uma placa de espuma rígida de Poliestireno (esferovite) nas costas da antena afastando os fios e reduzindo assim a influência dos mesmos nas medidas. A influência da colocação dos fios pode ser vista no Anexo B.

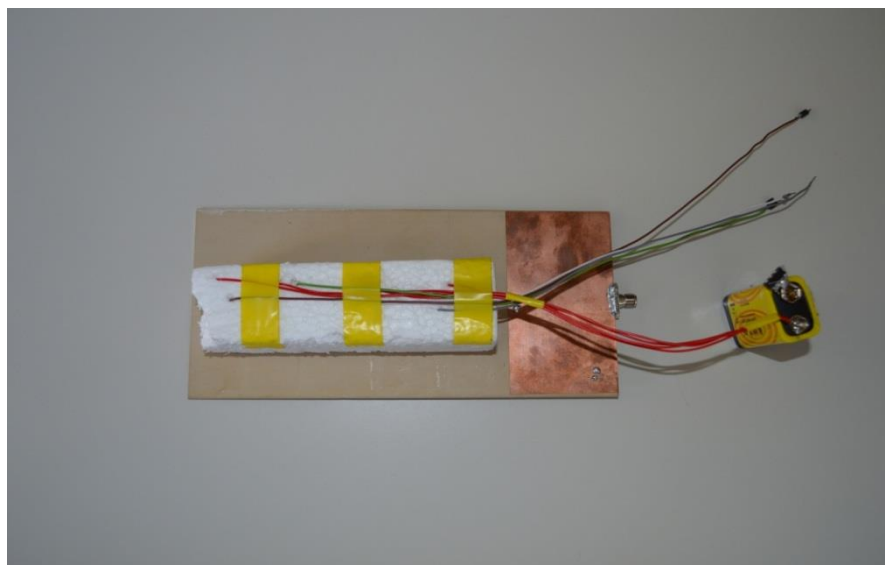


Figura 4.15 Plano do sistema de comutação dos díodos

4.4. Resultados experimentais

Nesta secção serão apresentadas as medidas efectuadas à antena, para verificar o comportamento da mesma em espaço livre. Os parâmetros que foram medidos são: módulo do coeficiente de onda estacionária e os diagramas de radiação para cada uma das combinações anteriormente estudadas.

Para efectuar a medição do $|S_{11}|_{dB}$ foi utilizado um analisador vectorial E8361A (VNA), da Agilent Technologies, que se encontra presente no laboratório de radiofrequência II do IST. Este analisador pode ser visto na Figura 4.16.b), na Figura 4.16 a) encontra-se o esquema da montagem.

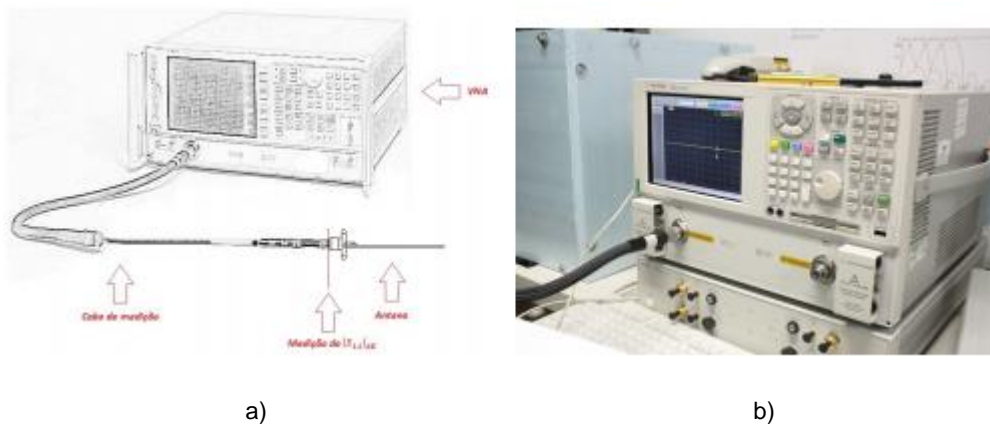


Figura 4.16 a) esquema da montagem b) analisador vectorial E8361A

Antes de se poderem efectuar as medidas do $|S_{11}|_{dB}$ é necessário fazer uma calibração, esta calibração é necessária para se poder obter o $|S_{11}|_{dB}$ à saída do conector SMA, fazendo com que os resultados experimentais fiquem mais próximos dos simulados, esta calibração é efectuada de forma automática. Na Figura 4.17 está representada a calibração do VNA com o cabo de medição.



Figura 4.17 Calibração do VNA com o cabo de medição

Depois de se ter calibrado o VNA com o cabo de medida, efectuou-se um varrimento na frequência de 2 a 3 GHz, para que depois se pudessem comparar os resultados obtidos com os resultados simulados no CST MWS.

As medidas experimentais dos diagramas de radiação no plano magnético e eléctrico foram realizadas com recurso à câmara anecóica presente na Área Científica de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores do Instituto Superior Técnico.

Esta câmara possui um comprimento de 8,5 m, uma largura de 4,6 m e uma altura de 3,6 m, funcionando numa banda de frequência que vai desde 1 até 20 GHz. Para que exista uma boa absorção dos sinais que atingem as paredes da câmara, estas são constituídas por elementos de espuma revestidos de grafite. No interior da câmara encontram-se duas torres, uma onde vai ficar a sonda de recessão que inclui um posicionador de polarização (Horizontal) e outra onde ficará a antena a testar, contendo esta um posicionador de azimute que permite efectuar medições no plano horizontal e vertical. A distância entre a antena de emissão e de recessão é sensivelmente a 5 m uma da outra. Estes posicionadores são alimentados por dois equipamentos:

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

Para gerar o sinal e para fazer a análise do mesmo são necessários mais dois equipamentos, estes equipamentos encontram-se no exterior da câmara. Esses equipamentos são os seguintes:

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

A aquisição de dados, o controlo dos posicionadores, do gerador e do analisador vectorial é efectuado através de um *software* próprio (pertencente ao Laboratório do Instituto de Telecomunicações).

Na Figura 4.18 podem ser vistas em pormenor as duas torres presentes no interior da câmara, bem como os posicionadores, é ainda possível reparar no pormenor da cobertura das paredes. Na Figura 4.18 a) encontram-se presentes a torre e o posicionador para a antena de emissão e na Figura 4.18 b) a torre e posicionador da antena de recessão, a antena utilizada para recessão foi uma antena do tipo corneta, como pode ser observado na figura.

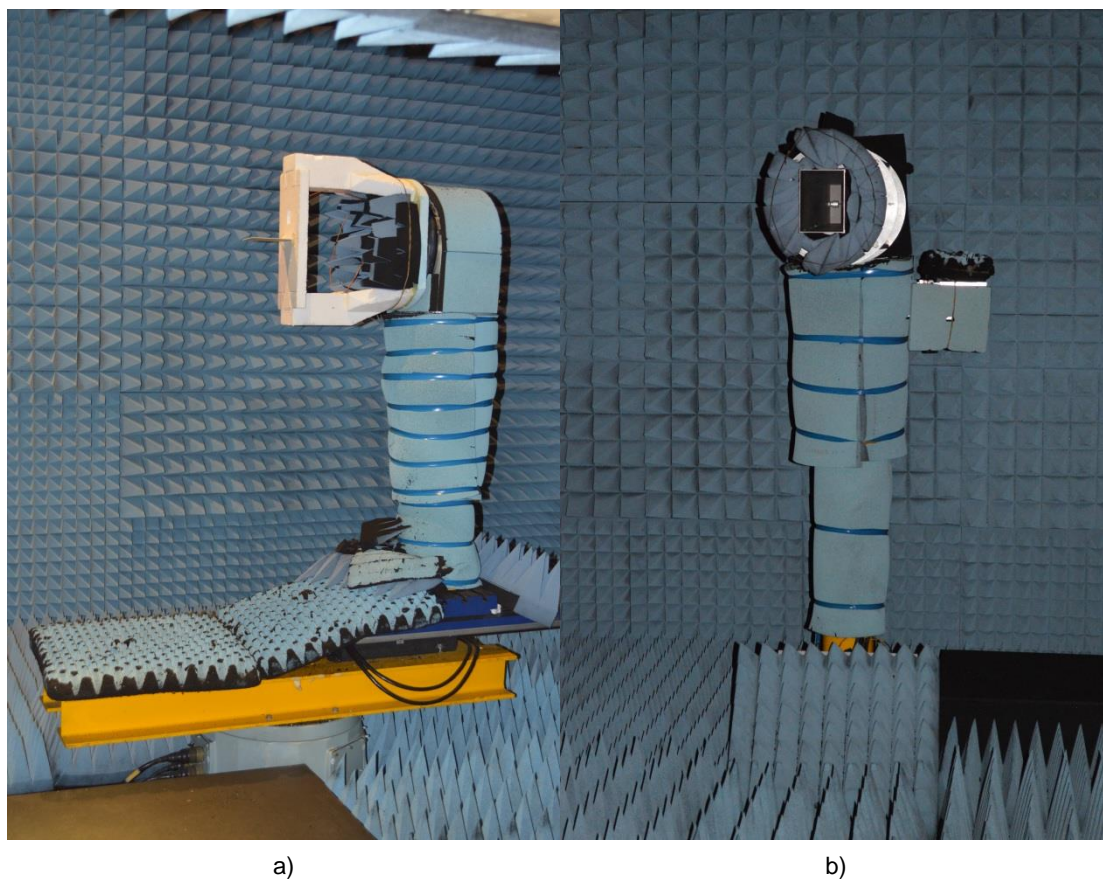
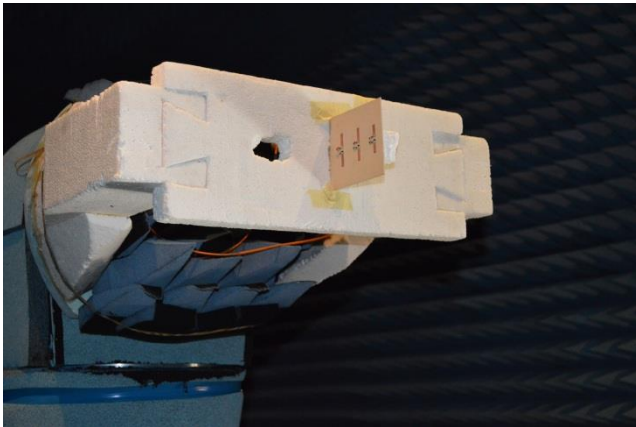


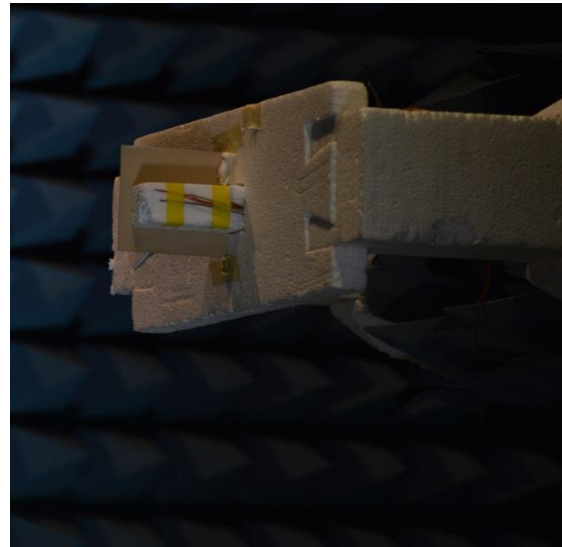
Figura 4.18 a) Torre e posicionador da antena de emissão b) torre e posicionador da antena de recepção

O software utilizado não apresenta os resultados do ganho, mas sim o valor da amplitude, uma vez que, o que se queria comparar era o valor do ganho, para obter esses valores foram utilizadas as cornetas de calibração. As curvas de calibração dos dois planos encontram-se no Anexo A, bem como o método utilizado para o cálculo do ganho da antena.

Antes de se poderem efectuar as medidas dos diagramas de radiação teve de se criar um suporte que permitisse colocar a antena no posicionador. Este suporte foi construído em esferovite para não influenciar as medidas. Na Figura 4.19 a) pode ser visto em pormenor o suporte com a antena já colocada em perspectiva frontal, na Figura 4.19 b) pode ser vista a perspectiva posterior da antena. A antena tem de ficar completamente alinhada e imobilizada, não se podendo mexer aquando da realização das medidas



a)



b)

Figura 4.19 a) suporte com a antena já colocada em perspectiva frontal b) perspectiva posterior da antena

4.4.1. Módulo do coeficiente de onda estacionária ($|S_{11}|_{dB}$)

Foram efectuadas várias medidas, inicialmente efectuaram-se as medidas da antena sem díodos, com todos os directores em aberto e *à posteriori* com todos os directores em curto-circuito, para realizar esta ultima, foi necessário ligar os dois “braços” de cada director através de um fio de cobre. Depois de realizadas estas medidas foram introduzidos os díodos e realizadas as medições de $|S_{11}|_{dB}$ para as combinações pretendidas. As medições foram feitas de uma forma gradual para prevenir algum erro e de forma a que fosse possível detectar em que ponto o erro tinha ocorrido.

Na Figura 4.20 pode ser visto um grande plano da antena aquando da medição, é possível reparar que a antena se encontra segura por uma placa esferovite para evitar qualquer interferência provocada por outro tipo de suporte.

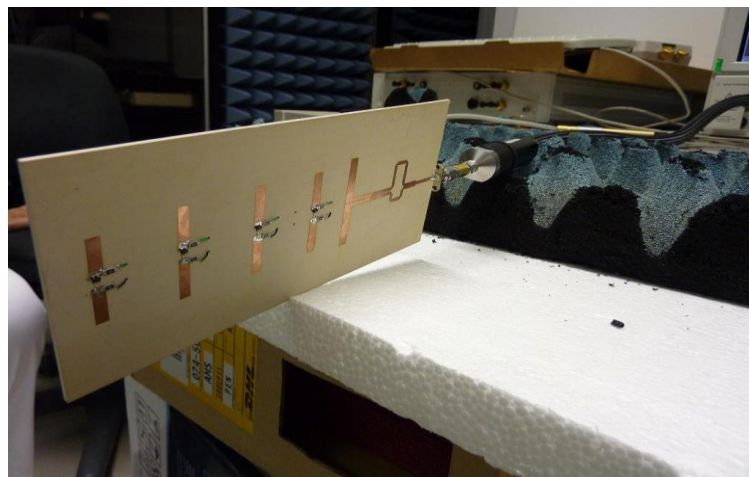


Figura 4.20 Grande plano da antena a quando a medição

A curva referente à medida do $|S_{11}|_{dB}$ da antena sem díodos, com os directores todos em aberto e todos em curto-circuito, pode ser vista no gráfico da Figura 4.21. Pode observar-se que a antena se encontra adaptada para as duas situações, para a frequência pretendida, ou seja, 2,3 GHz o valor do $|S_{11}|_{dB}$ é ≤ -10 dB, (recta marcada a verde no gráfico), no caso em que a antena se encontra com todos os directores em aberto esse valor vale -11,7 dB, (curva vermelha) e no caso de todos os directores em curto-circuito vale -18,1 dB, (curva a azul). Verifica-se ainda que o valor da frequência de ressonância da antena se encontra ligeiramente afastado da frequência inicial, como acontecia nas simulações.

Pode observar-se uma ligeira oscilação ao longo das curvas, resultante de algumas correntes de retorno no cabo durante a medição.

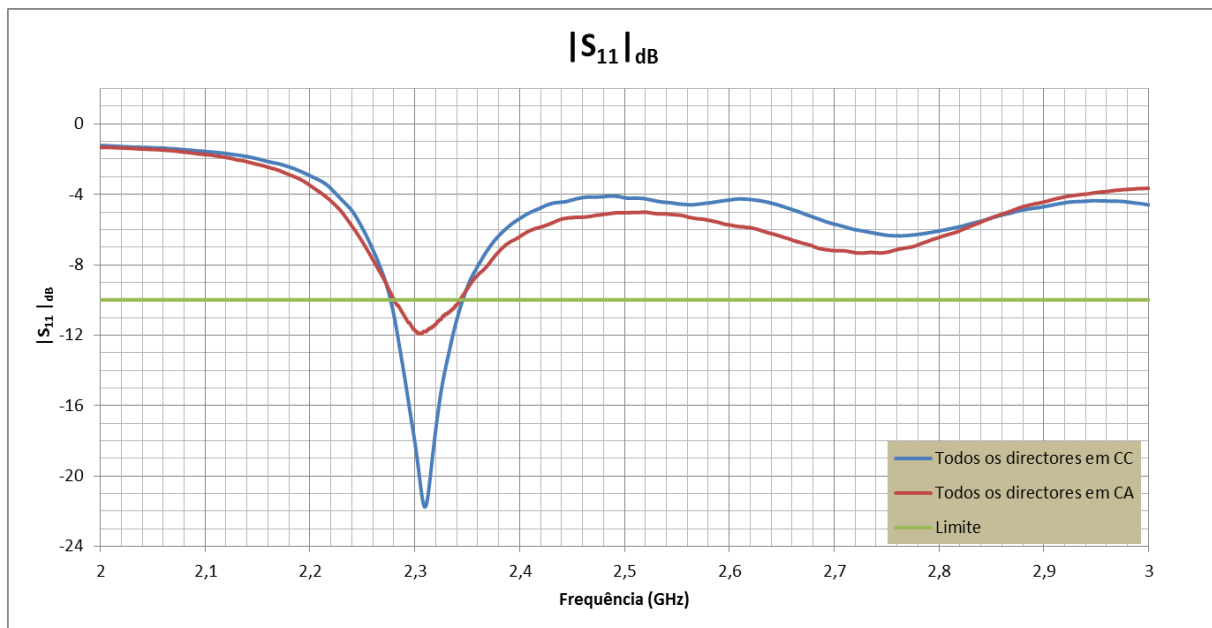


Figura 4.21 Valores medidos do $|S_{11}|_{dB}$ para antena sem díodos

Depois de efectuadas estas medidas, foram inseridos os díodos entre os braços dos directores. Tal como já foi referido, foram efectuadas medidas do $|S_{11}|_{dB}$ para todas as combinações anteriormente estudadas. As curvas obtidas podem ser visualizadas no gráfico presente na Figura 4.22. Para facilitar a legenda foi utilizado um código, neste caso, o código binário, em que “1” significa que o director se encontra em curto-circuito e “0” o director está em aberto, por exemplo 1111 significa que todos os directores se encontram em curto-circuito.

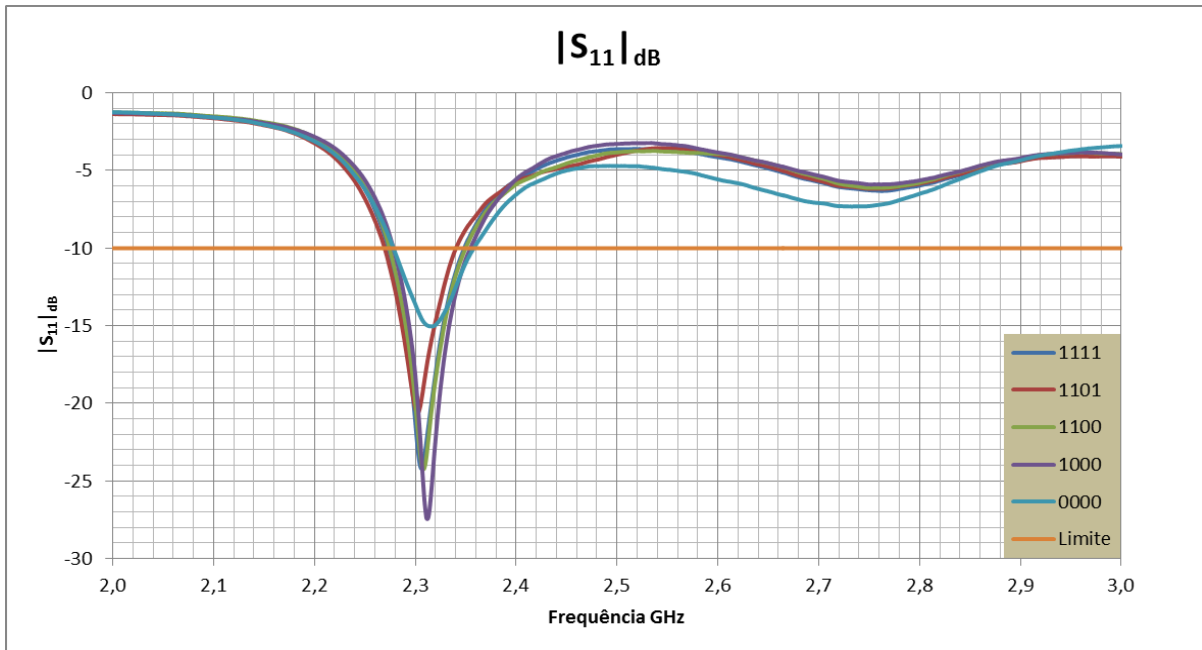


Figura 4.22 Valores medidos do $|S_{11}|_{dB}$ para antena com diodos

Pela análise da figura é possível concluir que em todas as situações a antena se encontra adaptada para a frequência pretendida, todas as curvas ultrapassam a recta do limite inicialmente imposta, neste caso representada a cor de laranja. Concluiu-se ainda, tal como se estava à espera, que a combinação que se apresenta com um nível de adaptação inferior é a que contém todos os directores em aberto, o que confirma o resultado simulado. Tal como acontecia nas medições da antena sem diodos a frequência de ressonância encontra-se ligeiramente afastada da frequência de trabalho. A oscilação nestas medições, já não é tão visível como nas medições efectuadas a antena sem diodos.

4.4.2. Diagramas de Radiação

No gráfico Figura 4.23 estão representados os diagramas de radiação no plano E para todas as combinações estudadas. Como podemos verificar todas as curvas apresentam um comportamento muito semelhante, apresentando uma maior diferença na primeira parte do gráfico, esta diferença pode ser explicada pelos fenómenos causados pela pilha e fios na zona posterior da antena.

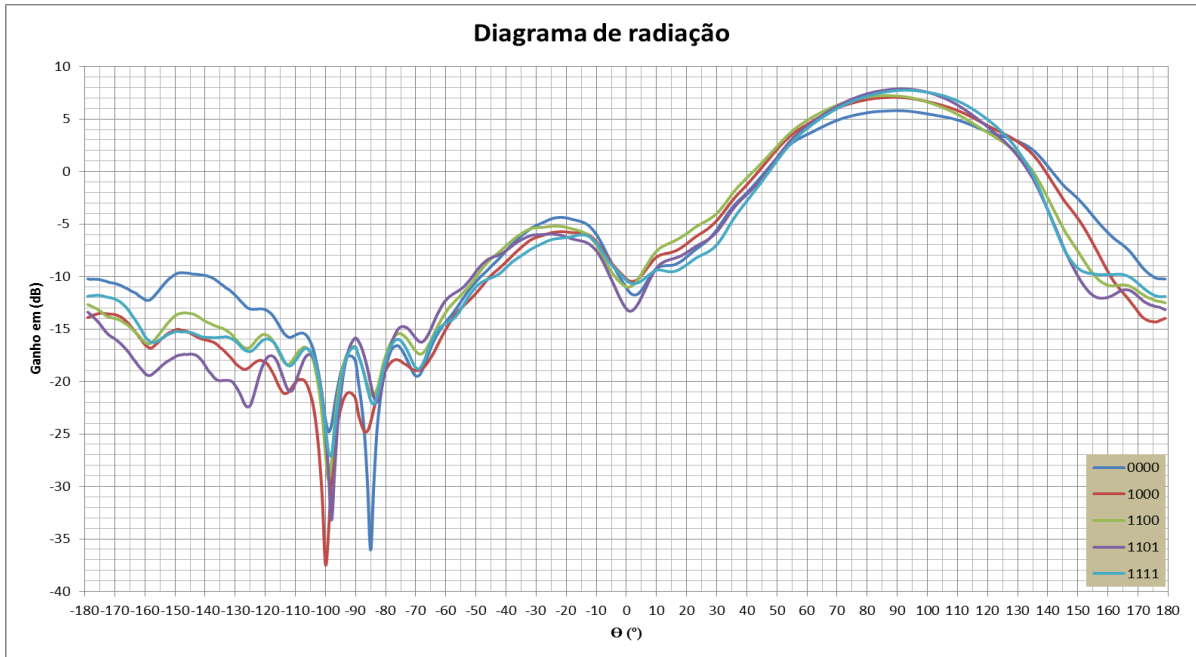


Figura 4.23 Diagramas de radiação no plano E medidos para todas a combinações

Na Figura 4.24 pode ser visto o mesmo gráfico apresentado anteriormente, mas agora com maior ênfase dada ao ganho máximo de cada combinação. Como pode ser visto as curvas de ganho estão escalonadas, apresentando ganhos diferentes para as diferentes combinações, em que o menor ganho é conseguido pela situação em que se encontram todos os díodos "OFF" (0000), 5,8 dB, e a melhor é quando temos o 3º díodo "OFF" (1101), 7,881 dB, pode reparar-se ainda que existem duas curvas com um ganho muito parecido, a curva de todos os díodos "ON" (1111) e a curva que contém só o 3º díodo "OFF" (1101).

Pode ainda reparar-se que o ganho máximo, ocorre sempre muito próximo de $\Theta = 90^\circ$, tal como é pretendido, sendo a maior diferença de 3° .

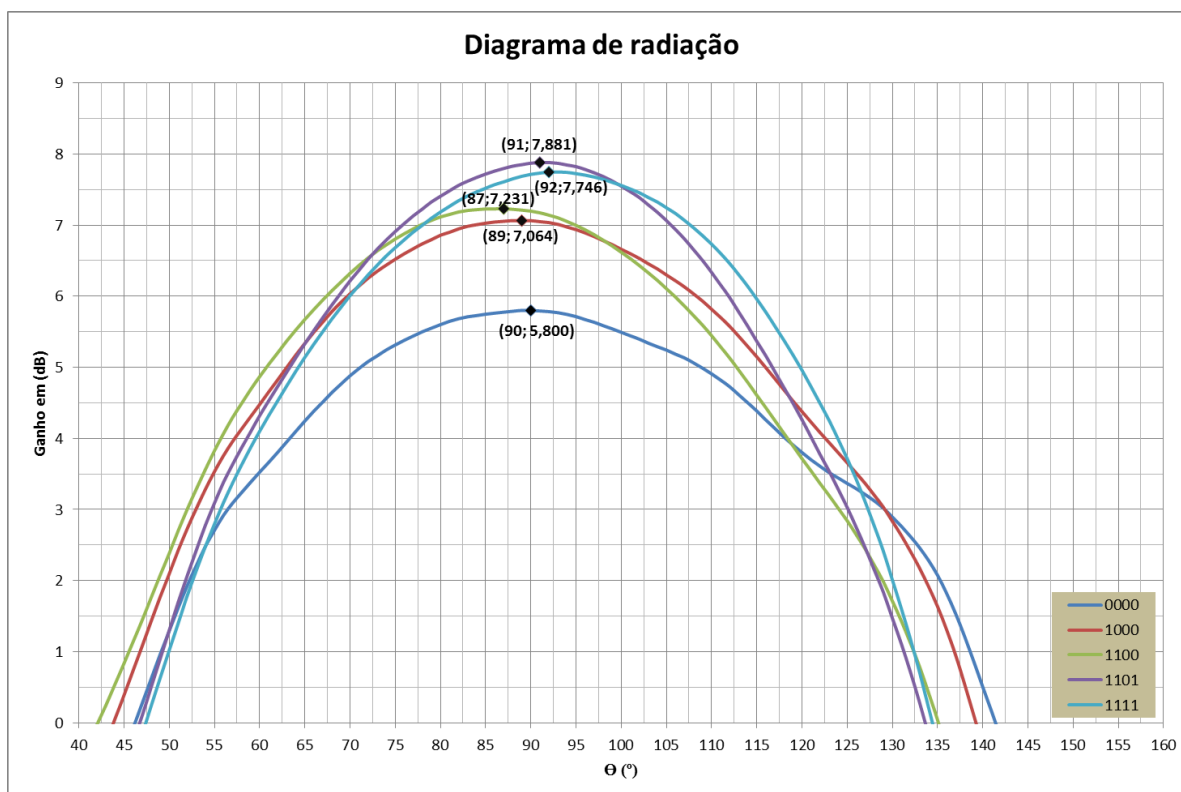


Figura 4.24 Diagramas de radiação no plano E entre 40 e 160°

Na Tabela 4.2 está representado um resumo das medidas efectuadas para o plano E, nesta tabela pode ser observada a localização de máximo, o máximo obtido e a HPBW para todas as combinações.

Tabela 4.2 Resumo das medidas efectuadas no plano E

Combinação	Localização de máximo (°)	Máximo de ganho (dB)	HPBW (°)
0000	90	5,8	76
1000	89	7,1	65
1100	87	7,2	60
1101	91	7,9	54
1111	92	7,7	58

Depois de apresentadas as medidas do plano E, são agora apresentadas as medidas do plano H. Na Figura 4.25 encontram-se representados os diagramas de radiação no plano H para todas as combinações estudadas. Como se pode confirmar todas as curvas apresentam um comportamento semelhante em todas as combinações, tal como acontecia no plano E.

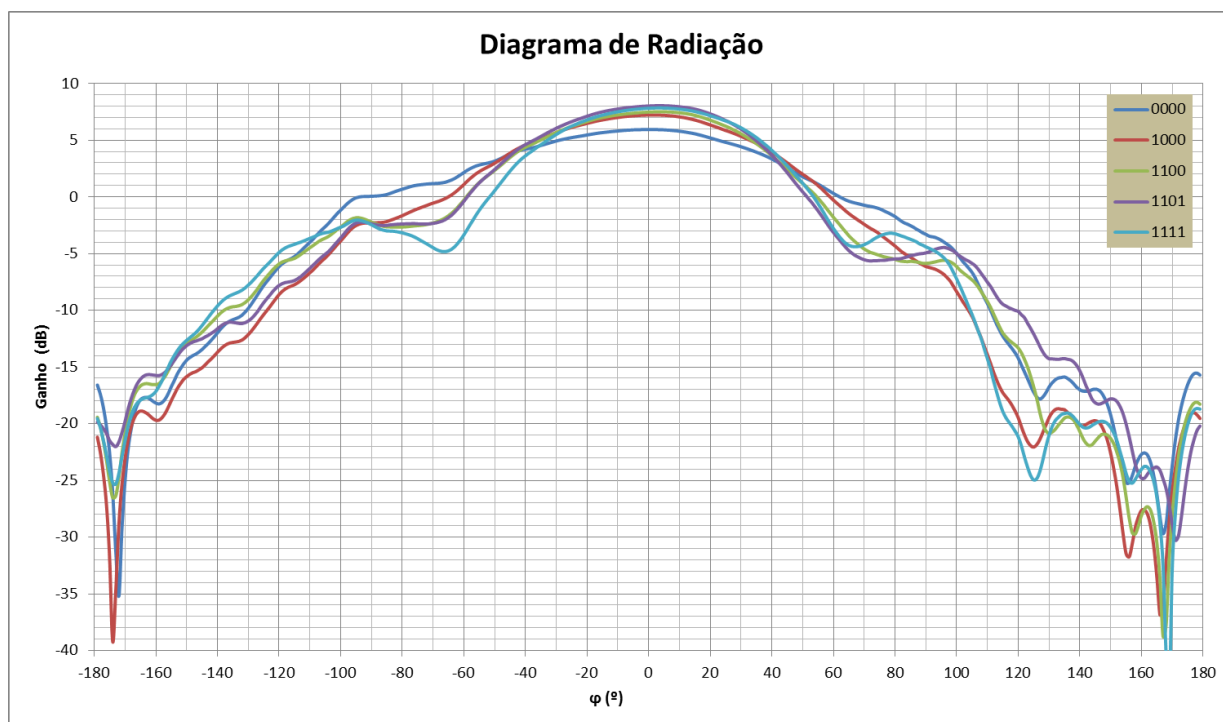


Figura 4.25 Diagramas de radiação no plano H medidos para todas a combinações

Na Tabela 4.3 encontram-se as principais características medidas para o plano H, pode concluir-se que o máximo de ganho se encontra muito perto do 0° , que era o pretendido, apresentando um desvio máximo de 4° . O ganho máximo é ligeiramente superior ao apresentado no plano E e a HPBW é superior, o que já era de esperar. Neste plano também se verifica que a curva que apresenta maior ganho é a 1101, ou seja, quando só o 3º díodo se encontra "OFF".

Tabela 4.3 Resumo das medidas efectuadas no plano H

Combinação	Localização de máximo ($^\circ$)	Máximo de ganho (dB)	HPBW ($^\circ$)
0000	1	5,9	96
1000	2	7,2	82
1100	4	7,5	75
1101	3	8,1	72
1111	3	7,8	71

4.5. Comparação de resultados

Nesta secção, numa primeira fase, serão comparados os resultados simulados da antena com os díodos já inseridos, com as simulações da antena sem díodos, realizadas no 3º capítulo. Depois de apresentadas estas conclusões serão comparados os resultados obtidos

experimentalmente na câmara anecóica com os simulados no início deste capítulo e verificar-se-ão as semelhanças e diferenças apresentadas nas características de radiação.

4.5.1. Comparação das simulações com e sem díodos

Após uma análise cuidada dos resultados das simulações com e sem díodos chegou-se à conclusão que o parâmetro que sofre maior variação com a introdução dos díodos é o módulo do coeficiente de onda estacionária $|S_{11}|_{dB}$, este apresenta em média uma melhoria de 2 a 3 dB quando comparado com o valor obtido sem os díodos. A combinação 0000, todos os díodos “OFF”, não sofre uma alteração muito significativa, mantendo-se o valor de $|S_{11}|_{dB}$ praticamente constante.

Como consequência deste aumento, o ganho apresentado pela antena com díodos é superior ao da antena sem díodos em todos os casos, podendo a diferença ser da ordem de 1 dB.

Ao nível da HPBW verifica-se que a introdução dos díodos faz com que este parâmetro fique menor em todas as combinações testadas, sendo este um parâmetro importante para o objectivo final da tese, uma vez que, pode verificar-se que se obteve uma variação inferior à inicialmente proposta.

Pode concluir-se que a introdução dos díodos melhora o coeficiente de onda estacionária e o ganho, fazendo com que a antena se encontre mais adaptada e com um maior ganho, que era um dos objectivos. Por outro lado, a introdução dos mesmos prejudicou a HPBW, diminuindo este valor em todas as combinações de forma substancial.

4.5.2. Comparação das simulações com os resultados experimentais

Depois de os dados experimentais terem sido tratados, é possível fazer uma comparação entre os valores esperados (resultados simulados) com os reais (resultados medidos na câmara anecóica). Nesta subsecção serão comparados os resultados simulados no programa CST MWS com os resultados medidos na câmara. Os parâmetros a comparar serão o módulo do coeficiente de onda estacionária, o ganho e os diagramas de radiação em ambos os planos.

Serão ainda apresentados vários gráficos que comparam os resultados esperados com os resultados experimentais de duas das combinações, com a finalidade de se perceber qual a evolução dos parâmetros a comparar, no final será apresentada uma tabela que resume a comparação de todas as combinações. No Anexo C podem ser vistos os gráficos de todas as combinações.

Na Figura 4.26 encontra-se representada a curva do $|S_{11}|_{dB}$, para a combinação de todos os directores em curto-circuito sem díodos, como pode ser visualizado existe uma grande semelhança entre as duas curvas. No entanto, o valor de pico obtido na medida experimental é inferior ao simulado, a frequência de ressonância é muito parecida nas duas curvas. Para a frequência pretendida, 2,3 GHz o valor medido (curva a azul) vale -21,8 dB enquanto que o valor simulado (curva a vermelho) vale -16 dB.

A medida com todos os directores em aberto apresenta um comportamento idêntico ao simulado, como acontece no caso apresentado, variando somente o valor de pico, sendo o valor medido inferior ao simulado.

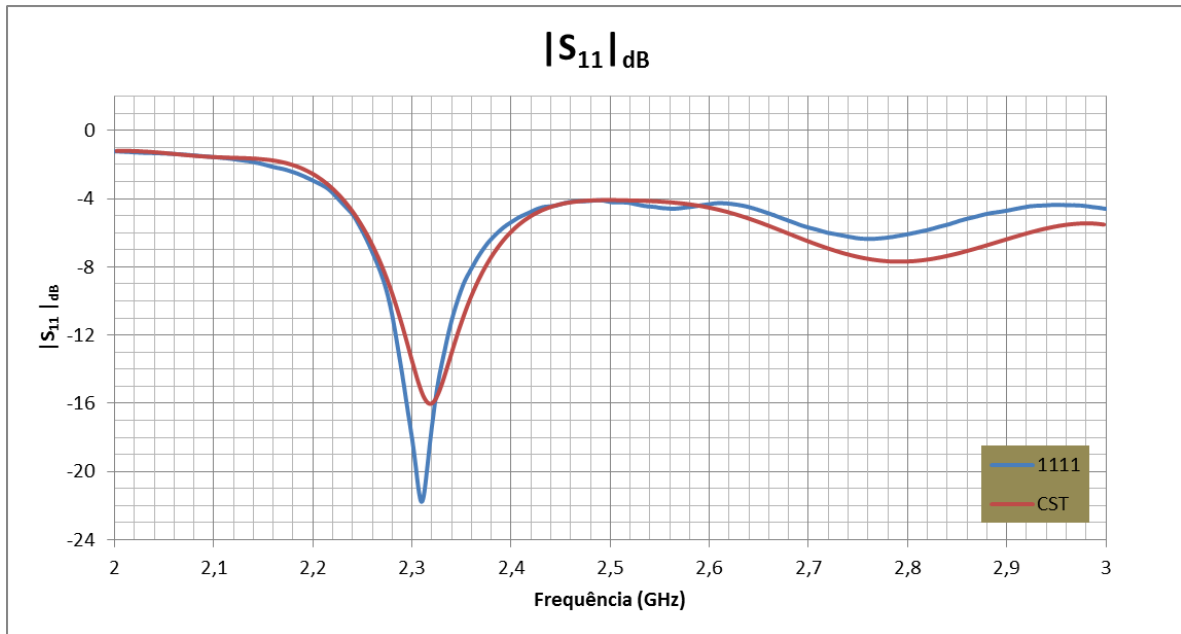


Figura 4.26 Comparação dos valores de $|S_{11}|_{dB}$ obtidos experimentalmente no NA e simulados no programa de simulação CST MWS para todos os directores em curto-circuito sem díodos

Seguidamente serão apresentados os graficos das comparações entre os diagramas de radiação nos dois planos, para a mesma combinação apresentada anteriormente. O plano E está representado na Figura 4.27, enquanto que o plano H está representado na Figura 4.28.

No plano E, pode reparar-se que as curvas experimental e simulada, diferem uma da outra, na zona dos -180 aos 20° , sendo o valor de máximo simulado ligeiramente superior ao valor medido, no entanto o valor medido encontra-se centrado nos 90° , tal como era pretendido.

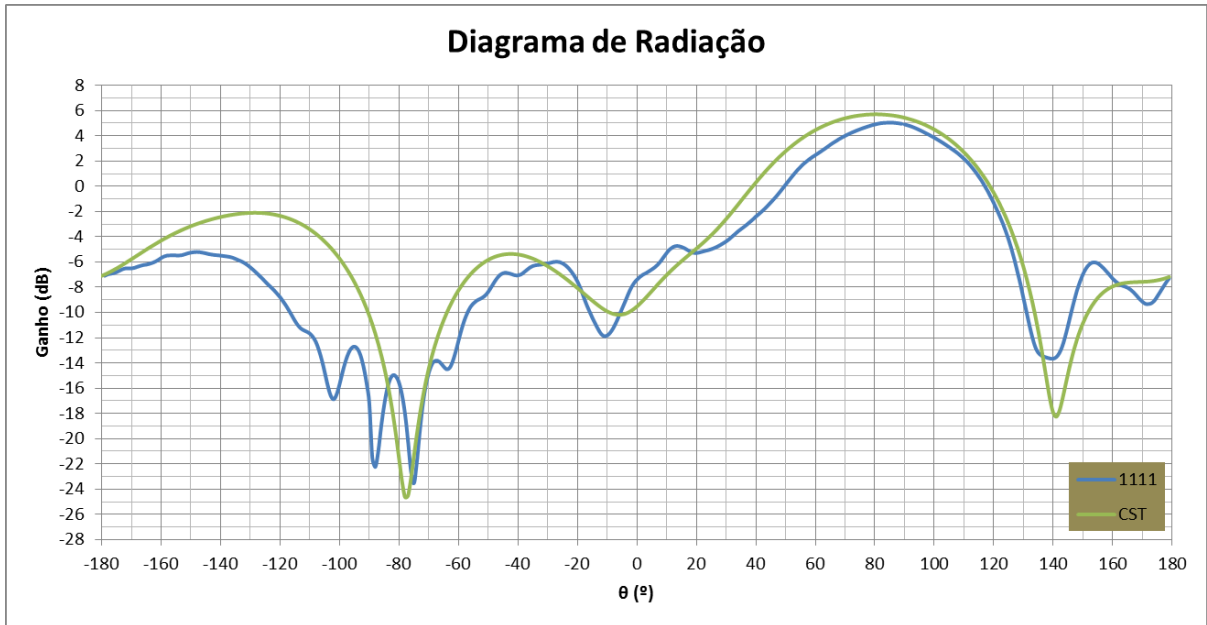


Figura 4.27 Comparação dos diagramas de radiação no plano E para antena em curto-circuito sem díodos

No plano H, tal como acontecia no plano E, as curvas apresentam uma grande semelhança entre os -40 e 40° . Reparámos que o valor de máximo é coincidente nas duas curvas, sendo que a HPBW é inferior na curva medida. Fora dessa banda, as curvas apresentam uma diferença acentuada, sendo os valores medidos sempre inferiores aos simulados. A curva medida não apresenta uma simetria tão boa como a curva simulada.

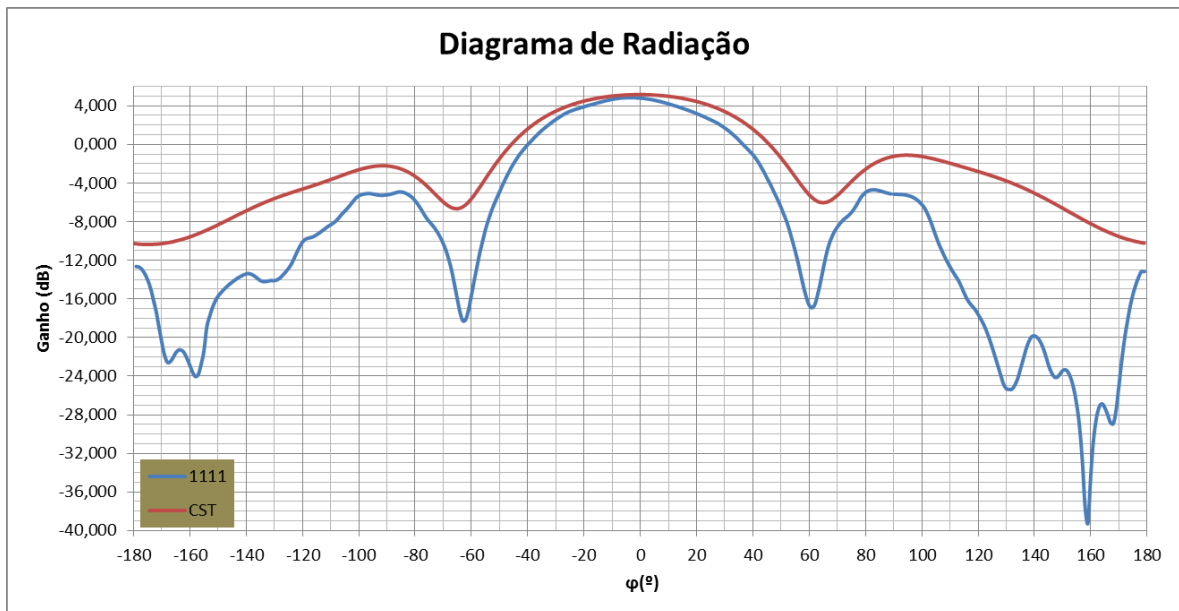


Figura 4.28 Comparação dos diagramas de radiação no plano H para antena em curto-circuito sem díodos

Depois de apresentadas as comparações da antena sem os díodos inseridos vão agora ser feitas as comparações dos resultados medidos com os simulados da antena com díodos.

No gráfico da Figura 4.29 encontra-se representada a curva obtida experimentalmente e a curva obtida no programa de simulação CST MWS da antenna com todos os díodos "ON". Estas curvas apresentam uma grande semelhança sendo o valor de pico experimental inferior ao simulado fazendo com que a antenna testada se encontre melhor adaptada que a simulada, sendo o valor experimental -24,2 dB e o valor simulado -20,2 dB na frequência pretendida. Em suma os resultados obtidos experimentalmente são melhores que os simulados.

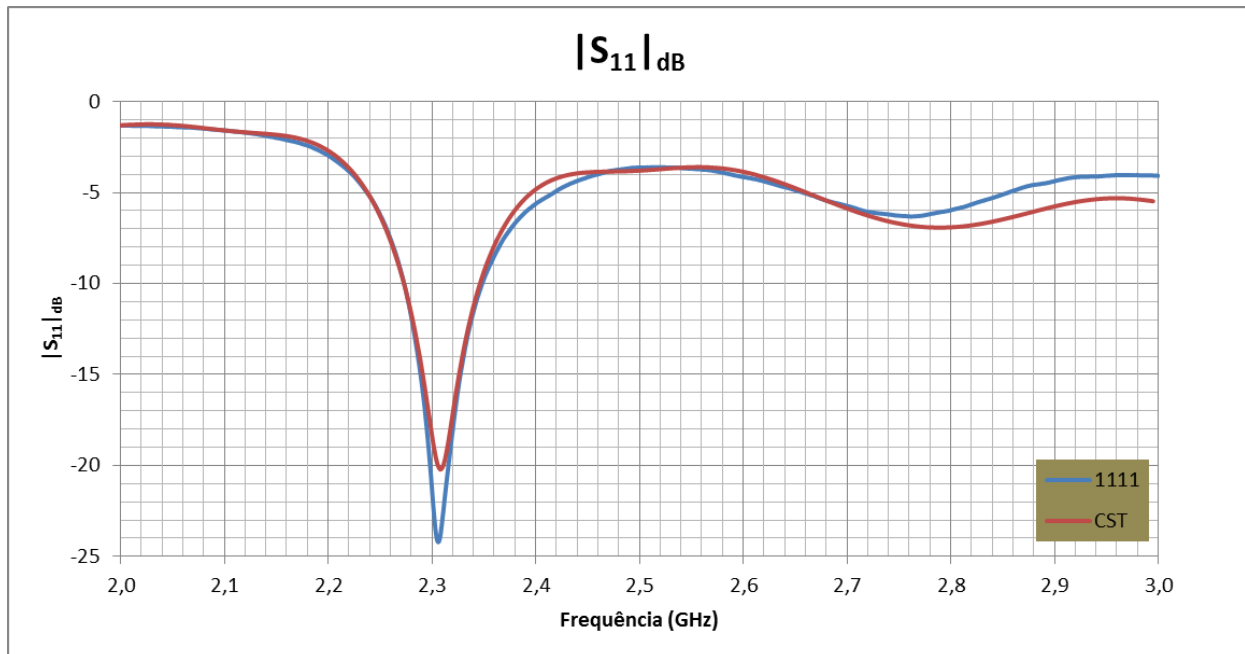


Figura 4.29 Comparação dos valores de $|S_{11}|_{dB}$ para a antenna com todos os directores em curto-circuito com díodos

Na Figura 4.30 pode ser observada a comparação dos diagramas de radiação, o simulado (a vermelho) e o medido (a verde) no plano E. Estas duas curvas encontram-se praticamente sobrepostas na banda dos 20 até aos 140°, fora desta banda verifica-se que as curvas apresentam alguma discrepância, mas esta discrepância pode ser explicada pela interferência provocada pela fonte de alimentação e cabos que alimentam os díodos. Esta discrepância faz com que a antenna medida apresente um nível de lobos secundários inferiores à antenna simulada

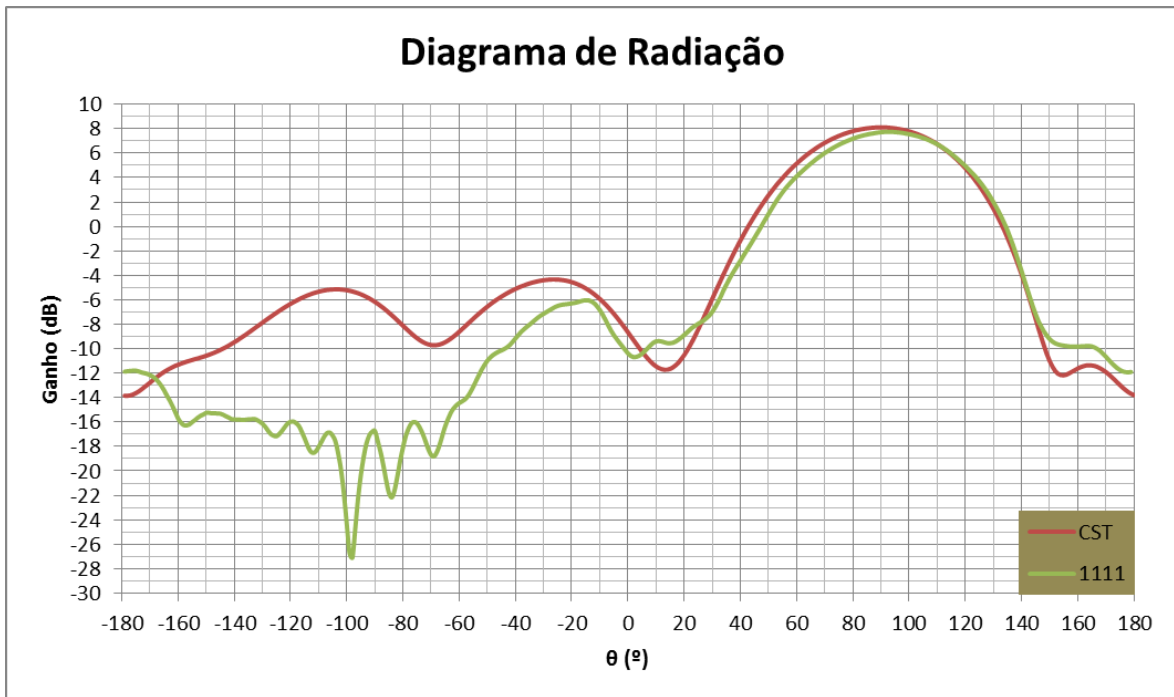


Figura 4.30 Comparação dos diagramas de radiação no plano E para antena em curto-circuito com diodos

O diagrama de radiação polar no plano E encontra-se na Figura 4.31. Nesta figura pode confirmar-se o que foi dito anteriormente, a curva medida apresenta uma simetria muito boa dos 40 aos 140° e apresenta alguma discrepância na zona do -90°, fazendo com que a antena medida seja melhor que a simulada uma vez que radia menos nesta direcção.

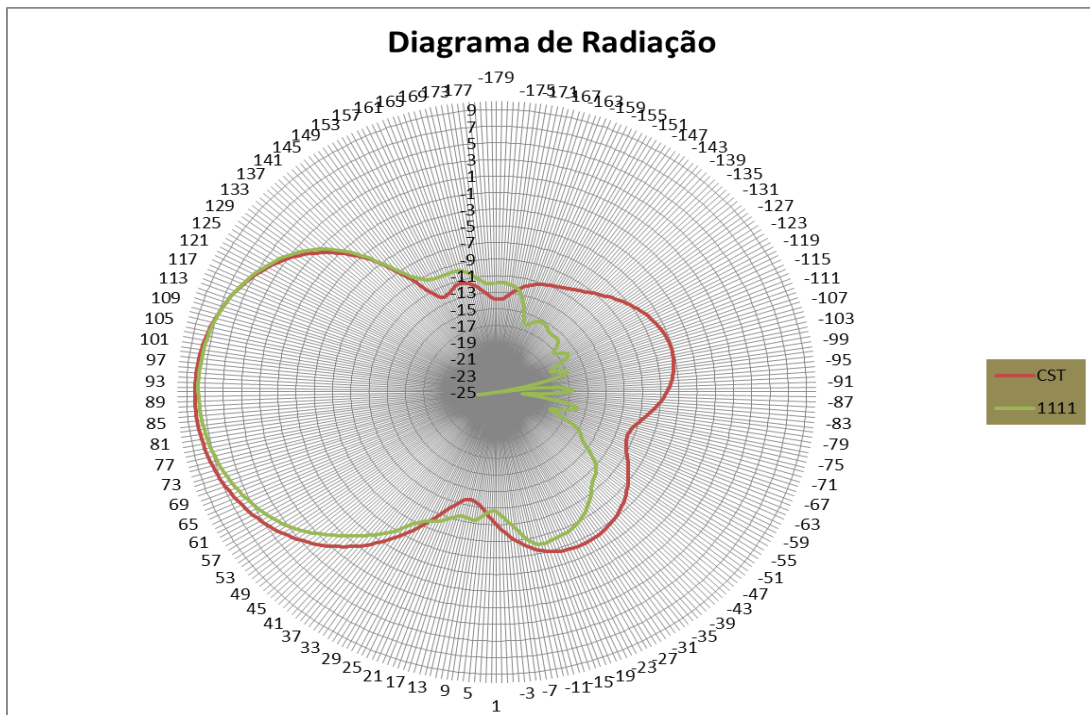


Figura 4.31 Comparação do diagrama de radiação polar no plano E para a antena em curto-circuito com diodos

Na Figura 4.32 encontra-se representada a comparação do diagrama de radiação no plano H para a mesma combinação. Também neste plano as curvas apresentam uma grande coincidência na direcção do lobo principal, apresentando praticamente o mesmo ganho e a mesma HPBW. Pode visualizar-se que, a maior discrepância encontra-se na direcção oposta à do lobo principal, o que mais uma vez pode ser explicado pela influência da pilha e cabos de alimentação dos díodos.

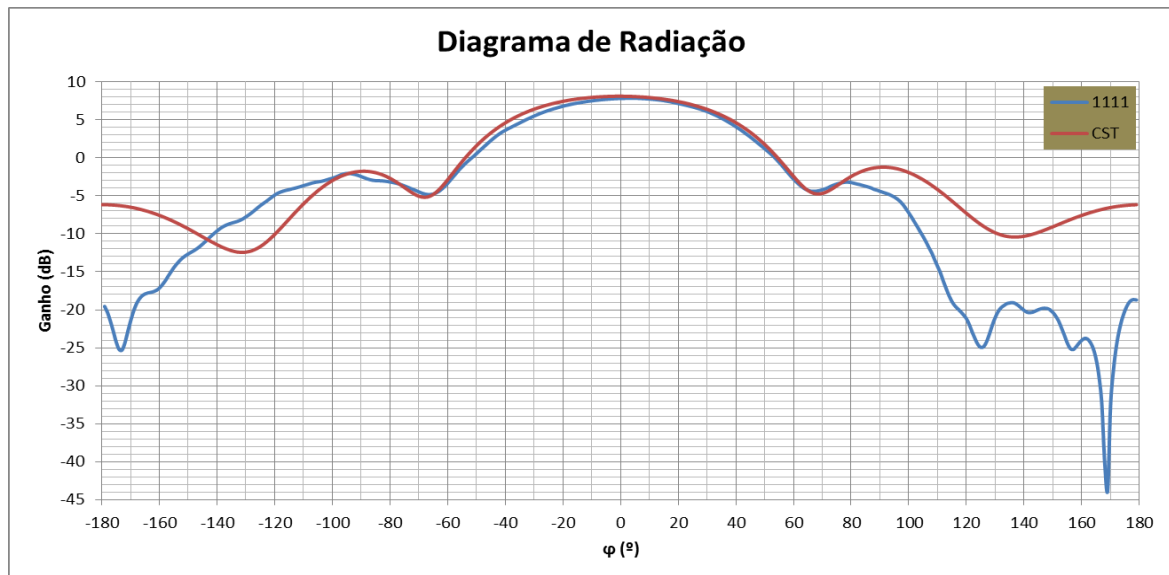


Figura 4.32 Comparação dos diagramas de radiação no plano H para antena em curto-circuito com díodos

Na Tabela 4.4, encontram-se representadas as medidas simuladas e as medidas experimentais para todas as combinações no plano E. As realizadas no plano H encontram-se na Tabela 4.5

Em suma, pode concluir-se, que as medidas experimentais apresentam uma melhoria significativa quando comparadas com as simuladas. Pode visualizar-se que a combinação 1101 apresenta uma grande diferença da simulada, apresentando neste caso um ganho mais elevado e uma HPBW mais baixa.

Tabela 4.4 Comparação de todas as combinações estudadas no plano E

Combinações	Medidas Experimentais				Medidas Simuladas			
	$|S_{11}|_{dB}$	Loc. do máx. (°)	Ganho (dB)	HPBW (°)	$|S_{11}|_{dB}$	Loc. do máx. (°)	Ganho (dB)	HPBW (°)
0000	-13,6	90	5,8	76	-10,8	94	4,6	75,9
1000	-18,2	89	7,1	65	-16,9	92	6,4	67,9
1100	-19,9	87	7,2	60	-16,9	90	7,9	63,8
1101	-20,3	91	7,9	54	-18,3	90	7,7	61,4
1111	-21,3	92	7,7	58	-18,1	90	8,1	58,8

No plano H verifica-se a mesma evolução que no caso anterior. Nesta situação a HPBW, é bastante inferior à simulada, o que pode ser explicado pela interferência provocada pelos cabos de alimentação.

Tabela 4.5 Comparação de todas as combinações estudadas no plano H

Combinações	Medidas Experimentais				Medidas Simuladas			
	$|S_{11}|_{dB}$	Loc. do máx. (°)	Ganho (dB)	HPBW (°)	$|S_{11}|_{dB}$	Loc. do máx. (°)	Ganho (dB)	HPBW (°)
0000	-13,6	1	5,9	96	-10,8	-2	4,6	144,4
1000	-18,2	2	7,2	82	-16,9	-1	6,4	103,2
1100	-19,9	4	7,5	75	-16,9	0	7,9	89,3
1101	-20,3	3	8,1	72	-18,3	0	7,7	82,9
1111	-21,3	3	7,8	71	-18,1	0	8,1	75,6

Capítulo 5

5. Dimensionamento da antena a construir no futuro

Pelos motivos já anteriormente referidos, não foi possível construir uma nova antena dimensionada para o substrato Rogers RO3003™. No entanto neste capítulo é apresentado o dimensionamento e simulação para a frequência de 2,45 GHz da antena, para que no futuro a antena seja construída nesse substrato para funcionar nessa frequência.

5.1. Dimensionamento

Para o dimensionamento desta antena foi usado o mesmo método apresentado no capítulo 3. Também esta antena foi obtida a partir da antena Yagi-Uda convencional dimensionada no capítulo 2, em que as dimensões desta foram divididas pelo comprimento de onda em espaço livre, λ , e depois o resultado multiplicado pelo comprimento de onda no guia, λ_g , que neste caso vale 90,57 mm. Para otimizar ainda mais estas dimensões, foram usadas as referências Parameter Sweep e Optimazer do programa CST MWS. As novas dimensões encontram-se presentes na Tabela 5.1. Estas dimensões referem-se ao elemento activo.

Tabela 5.1 Dimensões finais da Antena Yagi-Uda Impressa no substrato RO3003™ (medidas em mm)

Elemento	Comprimento	Espaçamento
Plano Reflector	82x45,58	11
Activo	42,53	-----
Director 1	36,98	22,5
Director 2	36,98	26,81
Director 3	36,06	28,66
Director 4	30,51	26,81

O dimensionamento do *balun* também foi obtido com a ajuda destas duas ferramentas. Inicialmente foram utilizadas as medidas apresentadas no capítulo 3 e depois foram aplicadas as duas ferramentas para encontrar quais os valores que permitem obter o menor valor do $|S_{11}|_{dB}$, os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Medidas do *Balun* Utilizado para o substrato RO3003™ (medidas em mm)

<i>Balun</i>		
L1=9,8	L2=10,1	L3=12,9
L4=4,5	L5=9,9	L6=82
W1=1,71	W2=2,91	W3=1,6
W4=45,58	S6=0,5	

5.2. Simulação da antena

Utilizando o programa CST MWS foi simulado um protótipo com as medidas anteriormente apresentadas. O diagrama de radiação em 3D para a frequência de 2,45 GHz encontra-se na Figura 5.1.

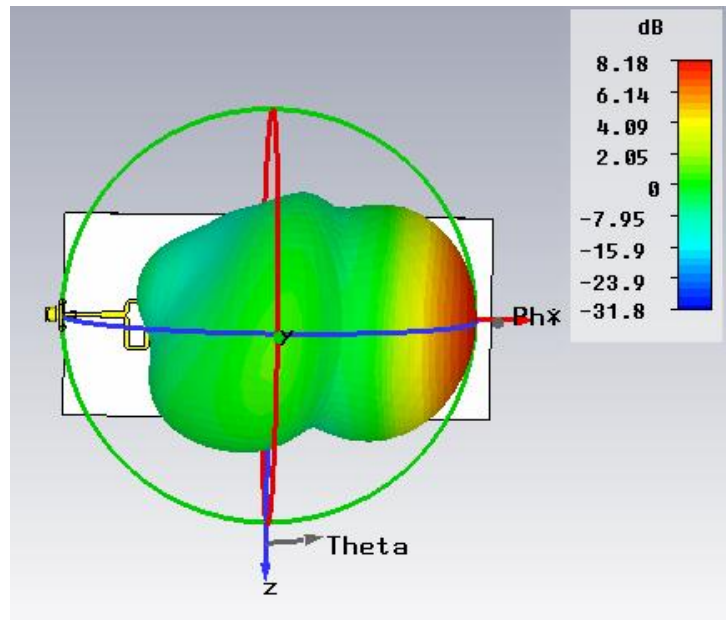


Figura 5.1 Diagrama de radiação em 3D da antena para 2,45 GHz

Na Figura 5.2 encontram-se representados os diagramas de radiação no plano E e H desta antena. Pela análise da figura, verifica-se que esta antena apresenta um ganho de 8,2 dB nos dois planos. No plano E, apresenta uma HPBW de $59,4^\circ$ e no plano H, apresenta $74,1^\circ$, o nível de lobos secundários apresentam valores aceitáveis nos dois planos sendo inferior no plano E.

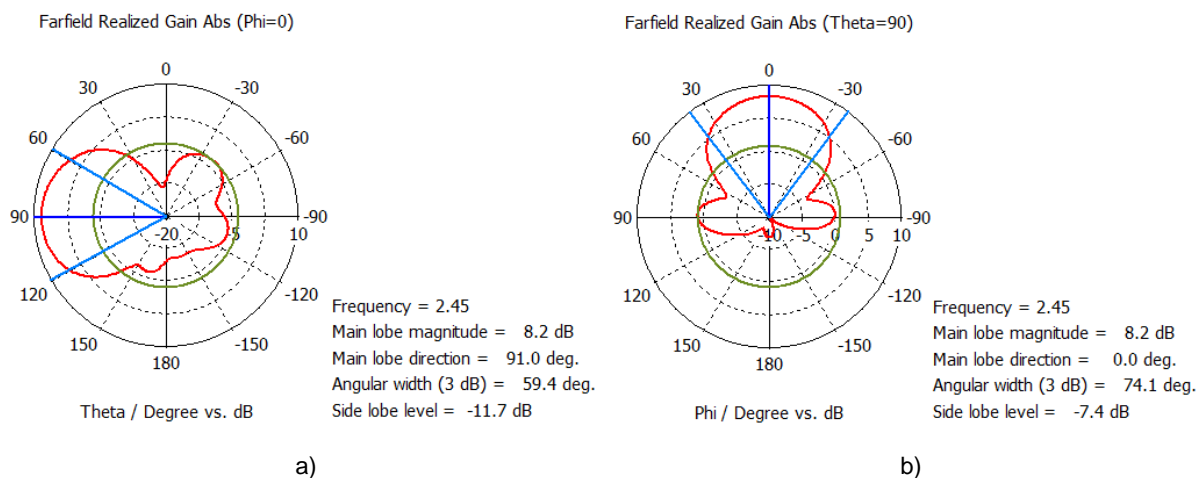


Figura 5.2 a) Diagrama de radiação no plano E b) Diagrama de radiação no plano H da antena Yagi – Uda impressa no substrato RO3003™ para 2,45 GHz

Relativamente à adaptação, esta antena encontra-se completamente adaptada como pode ser visto na Figura 5.3. O $|S_{11}|_{dB}$ encontra-se abaixo do valor estipulado para se considerar a antena adaptada, neste caso vale -15,1 dB. Pode ainda verificar-se que o pico com melhor definição se encontra centrado na frequência de trabalho utilizada.

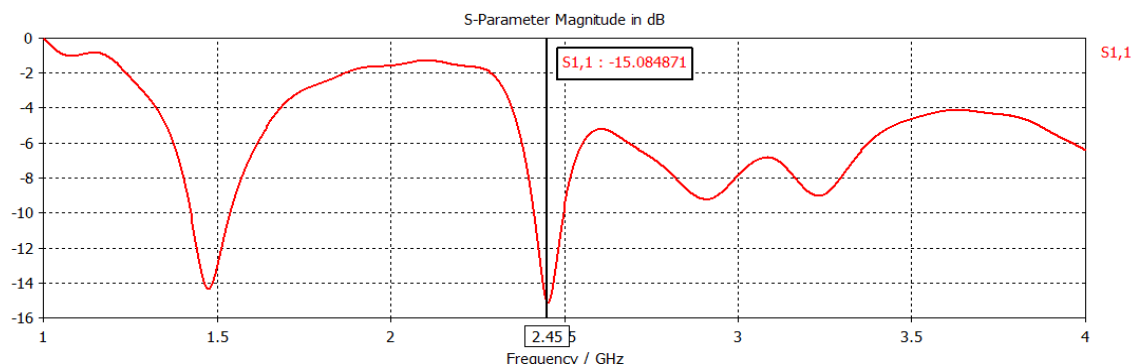


Figura 5.3 Módulo do coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato RO3003™ para 2,45 GHz

5.3. Comparação desta antena com a antena apresentada no capítulo 3

Quando comparadas estas duas antenas, chega-se à conclusão que estas apresentam características de radiação muito semelhantes, diferindo somente na frequência onde se encontra centrado o pico do módulo do coeficiente de onda estacionário com melhor definição. Na Tabela 5.3, de forma a facilitar a comparação, encontram-se representadas as características de radiação das duas antenas.

Tabela 5.3 Comparação das duas antenas

Frequência	2,3 GHz		2,45 GHz	
	E	H	E	H
Ganho (dB)	7,4	7,4	8,2	8,2
HPBW (°)	62,9	84,9	59,4	74,1
NLS (dB)	-11,4	-7,8	-11,7	-7,4
$|S_{11}|_{dB}$	-13,5		-15,08	

Após esta comparação, pode concluir-se que a opção de construir a antena com o dimensionamento feito para o antigo substrato é aceitável e não afecta as conclusões que se podem retirar desta dissertação.

Capítulo 6

6. Conclusões

6.1. Introdução

A tese aqui apresentada teve como principal objectivo o estudo e projecto de uma antena que permitisse obter um ganho elevado e controlar a HPBW. Esta antena tinha ainda de apresentar determinadas características, tais como: ser de pequenas dimensões e ser robusta. Neste capítulo é feito um resumo geral das conclusões que se foram retirando ao longo da dissertação, assim como dos objectivos cumpridos. Todas as simulações efectuadas ao longo do trabalho foram realizadas com recurso ao programa de simulação CST MWS. As medidas foram realizadas na Câmara anecóica da área científica de Telecomunicações do Instituto Superior Técnico, com recurso a diversos equipamentos, desde um analisador vectorial E8361A (VNA), um calibrador de VNA, Power Control Unit, Position Controller, MXG Analog Signal Generator e um PNA-X Measurement Receiver.

Neste capítulo são ainda apresentadas as contribuições originais dos sistemas de transmissão implementados e as propostas de trabalho futuro.

6.2. Considerações Finais

Para se conseguir produzir o produto final, foi preciso ultrapassar diferentes etapas e dificuldades, que foram documentadas ao longo dos capítulos desta dissertação. Sendo a primeira a escolha da antena a utilizar para cumprir os requisitos pretendidos. Optou-se por utilizar uma antena do tipo Yagi-Uda Impressa, uma vez que estas permitem obter um ganho relativamente elevado, ter dimensões reduzidas, são robustas quando montadas em superfícies rígidas e são de fabrico simples. Outro factor que foi tido em conta, foi que a estrutura desta antena pode ser facilmente alterada, permitindo assim regular a HPBW e o ganho.

Para se obter a antena Yagi-Uda Impressa com regulação da HPBW foi necessário arranjar um método para dimensionar a mesma. Começou-se por dimensionar uma antena Yagi-Uda convencional (capítulo 2), e só depois de se ter efectuado o dimensionamento e simulação desta antena, é que se passou à etapa seguinte, o dimensionamento da antena impressa. O dimensionamento da antena convencional pode ser feito utilizando vários algoritmos, optou-se por usar o Algoritmo Genético após uma análise das várias possibilidades. Esta escolha deveu-se ao facto de este ser um método relativamente recente, que permite utilizar varias variáveis e parâmetros ao mesmo tempo, permitindo assim otimizar varias características ao mesmo tempo. Depois da antena dimensionada recorreu-se ao programa CST MWS para verificar as características de radiação e a influência de algumas alterações introduzidas na estrutura da antena.

Para modificar a HPBW decidiu-se alterar as características dos directores, uma vez que, são estes que a influenciam. Simularam-se todas as combinações de directores (em curto-circuito e em circuito aberto) chegando-se à conclusão que destas apenas cinco apresentavam vantagens para o efeito pretendido: todos os directores em curto-circuito, o primeiro director em curto-circuito, o primeiro e o segundo em curto-circuito, o terceiro director em aberto e todos os directores em aberto. Estas combinações permitem obter um ganho relativamente elevado em todas as combinações e regular a HPBW passando de um lobo principal de radiação mais estreito a um mais largo.

Uma vez que, o dimensionamento da antena convencional foi feito de forma eficaz e cumpre os requisitos pretendidos, utilizaram-se essas dimensões para fazer o dimensionamento da antena impressa (capítulo 3), redimensionando-as para uma estrutura planar (substrato). Este redimensionamento foi feito através da razão entre as medidas da antena convencional e o comprimento de onda em espaço livre e depois multiplicando o resultado pelo comprimento de onda no guia. A escolha do substrato recaiu sobre o Gil GML 1000, sendo a antena impressa dimensionada para funcionar neste substrato, este substrato foi escolhido por conter uma permitividade dieléctrica relativa baixa, $\epsilon_r = 3.2114 \pm 0.05$, uma tangente do ângulo de perdas, $\tan \delta = 0.0018 @ 2,45 \text{ GHz}$, e por permitir operar num intervalo grande de temperaturas, entre -55 e os 80°C , e em ambientes com algum grau de humidade.

Para a antena funcionar na frequência pretendida, esta tinha de se encontrar adaptada e neste tipo de antenas é normal utilizar-se um *balun* para esse efeito. Para fazer o dimensionamento do mesmo, utilizaram-se duas ferramentas presentes no programa CST MWS, o Parameter Sweep e numa fase posterior o Optimazer, do Transient Solver Parameter, este último só tem como objectivo a optimização das dimensões do *balun* para que o parâmetro $|S_{11}|_{\text{dB}}$ seja o menor possível.

Depois de dimensionados todos os componentes da antena procedeu-se à simulação das combinações anteriormente determinadas. Estas foram realizadas para verificar se a passagem de uma antena convencional para uma planar não tinha alterado as características de radiação.

Não foi possível obter o substrato pretendido uma vez que o *site* do fabricante se encontrava inoperante.

Devido à escassez de tempo, decidiu-se utilizar um substrato de outro fabricante. O substrato utilizado foi o Rogers RO3003TM, este apresenta uma permitividade dieléctrica relativa, $\epsilon_r = 3.0035 \pm 0.04$ e tangente do ângulo de perdas, $\tan \delta = 0.0006 @ 2,45 \text{ GHz}$. Durante a construção realizou-se uma simulação em que se alterou o substrato para ver as alterações provocadas, concluiu-se que a principal alteração provocada pela alteração do substrato foi a frequência de ressonância desviar-se da frequência pretendida, passando para os $2,3 \text{ GHz}$. Para serem realizadas posteriormente as comparações entre as medidas realizadas experimentalmente e as simuladas, optou-se por repetir todas as simulações para a nova frequência de ressonância, ou seja, $2,3 \text{ GHz}$, sendo estas simulações apresentadas ao longo da dissertação.

Para realizar as combinações pretendidas foram introduzidos díodos PIN entre os “braços” dos directores, para que fosse possível simular os directores em curto-circuito, ou em circuito aberto. Os díodos são alimentados por uma fonte de alimentação de 9 V , neste caso uma pilha, a ligação entre a pilha e os díodos foi realizada com cabos de cobre. Para verificar a influência dos díodos nas

características de radiação foram realizadas varias simulações com os díodos inseridos, de onde se pode concluir que os díodos não provocam grande influência nestes parâmetros. O parâmetro mais afectado é o coeficiente de onda estacionária, obtendo-se uma melhoria de cerca de 2 a 3 dB. Como o programa não aceita os díodos directamente foi preciso passar os mesmos para os esquemas equivalentes, obtendo-se um circuito RLC equivalente.

Durante a colocação dos díodos, teve-se em atenção alguns aspectos com o intuito de evitar interferências: no circuito de alimentação dos díodos foram introduzidas resistências SMD de 1,3 k Ω e os cabos de alimentação foram afastados da antena.

Depois de efectuadas as medidas experimentais, foi possível comparar estes resultados com os obtidos nas simulações. Verificou-se uma grande semelhança entre ambos, principalmente na direcção do lobo principal verificou-se ainda, que os valores medidos apresentam melhorias significativas quando comparadas com as simulações, obtendo-se um ganho mais elevado em todos os casos e um valor de $|S_{11}|_{dB}$ inferior.

Deste modo verifica-se que todos os dados obtidos são muito satisfatórios e que coincidem com os simulados. Apesar de algumas dificuldades e contratempos surgidos durante a realização desta antena, verifica-se que a antena construída apresenta um funcionamento válido e que cumpre os objectivos propostos. Verifica-se também que o sistema que permite alterar a HPBW, funciona bem sem provocar influências nas características de radiação, podendo assim esta antena funcionar com diferentes ganhos e HPBW.

Para realização desta dissertação foram utilizadas várias ferramentas para desenvolvimento da antena. A ferramenta mais utilizada foi o programa de simulação CST MWS, foram também usadas várias ferramentas durante a construção e durante a realização das medidas experimentais, em que cada uma era essencial ao processo que estava a ser tratado.

Como já foi referido, esta dissertação prova que a antena dimensionada e construída cumpre os requisitos propostos.

Em suma, com a realização desta dissertação adquiriu-se um vasto leque de conhecimentos, na simulação, construção e no teste e medida das características de antenas, que serão muito úteis no meu futuro profissional.

6.3. Contribuições Originais

Esta dissertação constitui um trabalho inovador numa área ainda não muito explorada e inserida num projecto com benefícios para o Exército. Como já foi dito, esta antena permite a comutação do ganho e da HPBW, podendo assim ser utilizada para facilitar e melhorar a navegação dos robôs recentemente adquiridos e em desenvolvimento pelo Exército.

Após a realização e análise desta dissertação verificou-se a existência de várias contribuições originais. Esta dissertação iniciou-se com o dimensionamento da antena Yagi-Uda convencional, já existem vários estudos realizados sobre este tema, no entanto esta foi dimensionada usando uma técnica recente, os algoritmos genéticos.

O dimensionamento da antena impressa foi feito de forma inovadora através da antena Yagi-Uda convencional e feito o seu estudo no programa de simulação CST MWS, sendo verificada a influência da introdução dos díodos na estrutura da antena.

A antena com regulação de ganho e da HPBW é uma antena inovadora e ainda pouco estudada, uma vez que as antenas Yagi-Udas presentes no mercado e estudadas, apenas permitem operar com um ganho e uma largura do lobo principal de radiação.

6.4. Perspectivas de trabalho futuro

Uma vez que esta dissertação é inovadora e sobre um tema pouco estudado, existe um vasto leque de trabalhos futuros que podem ser realizados. Um dos trabalhos futuros que pode ser realizado é efectuar o dimensionamento das pistas de alimentação dos díodos na própria antena, evitando assim alguma interferência provocada pelos fios, outro trabalho que se poderia realizar, seria alterar a estrutura da antena para que esta permita uma maior diferença entre a largura máxima e mínima da HPBW.

Um trabalho que poderá ser realizado no futuro no âmbito Militar é a inclusão desta antena nos rádios utilizados pelo Exército Português, ou então dimensionar uma nova antena impressa na caixa do rádio, permitindo assim usar a caixa do rádio como antena para comunicar com o robô. Na Figura 6.1 pode ser visualizado o rádio P/PRC-525 utilizado pelo Exército Português [30].



Figura 6.1 Rádio P/PRC – 525

Bibliografia

- [1] "Revolution in Military Affairs (RMA)," [Online]. Available: <http://www.defencejournal.com/2000/sept/military.htm>. [Acedido em 20 05 2013].
- [2] The Project on Defense Alternatives, "The RMA Debate," [Online]. Available: <http://www.comw.org/rma/>. [Acedido em 20 05 2013].
- [3] C. A. Cheng e D. K. C. ., "Optimum Element Lengths for Yagi-Uda Arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. Ap-23, No. 1, January 1975.
- [4] D. K. Cheng e C. A. Chen, "Optimum Element Spacing for Yagi-Uda Arrays", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-21, No. 5, 1973.
- [5] Y. Kuawahara, "Multiobjective Optimization Design of Yagi-Uda Antenna", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 6, June 2005.
- [6] H. Karbalaee, M. R. Salehifar e S. Soleimany, "Designing Yagi-Uda Antenna Fed by Microstrip Line and Simulated by HFSS," IEEE, 2012.
- [7] M. Polivka e T. Korinek, "Planar Five-Element Yagi-Uda Antenna", Dept. of Electromagnetic Field at Electrotechnical Faculty of CTU in Prague ed., Dept. of Electromagnetic Field at Electrotechnical Faculty of CTU in Prague , 2012.
- [8] P. R. Grajek, B. Schoenlinner e G. M. Rebeiz, "A 24-GHz High-Gain Yagi-Uda Antenna Array", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 5, May 2004, 2004.
- [9] H. Huang, J. Lu e P. Hsu, "A Simple Planar High-Directivity Yagi-Uda Antenna with a Concave Parabolic Reflector".
- [10] M. Al-Aqil e M. Khodier, "Design and optimisation of Yagi-Uda antenna arrays", IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol. 4, Iss.4, pp. 426-436, 2010.
- [11] D. Correia, A. J. M. Soares e M. A. B. Terada, "Optimization of Gain, Impedance and Bandwidth in Yagi-Uda Antennas Using Genetic Algorithm".
- [12] U. Singh, M. Rattan e N. Singh, "Optimization of Gain and Impedance of Yagi-Uda Antenna Using Simulated Annealing", [Online]. Available: www.ieee.org. [Acedido em Janeiro 2013].
- [13] M. Saad e B. Soudan, "An Evolutionary Dynamic Population Size PSO", IEEE ed., Sharjah, United Arab Emirates: University of Sharjah .
- [14] Y. Jiang e G. Zeng, "A Modified PSO Algorithm With Line Search", IEEE, 2012.
- [15] Y. Zhang, Q. Huang, F. Gao e X. Sun, "Optimal Reservoir Operation Using a Hybrid", IEEE ed., 2011.
- [16] C. A. Rajan e K. Venkatesan, "A Simulated Annealing Method for Solving Multi-Area Unit", India: 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011.
- [17] G. Lv, X. Sun e J. Wang, "A Simulated Annealing- New Genetic Algorithm and its Application", International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE 2011), 2011.

- [18] C. A. Balanis, "Antenna Theory and Design", Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, INC, 1997.
- [19] W. T. Joines e E. A. Jones, "Design of Yagi-Uda Antennas Using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, No. 9, September 1997.
- [20] H. J. Wang, K. F. Man, C. H. Chan e K. M. Luk, "Optimization of Yagi Array by Hierarchical Genetic Algorithms", 2003. [Online]. Available: www.ieee.org. [Acedido em Janeiro 2013].
- [21] GIL Technologies, "GML 1000 High Frequency Laminate".
- [22] T. C. Edwards, "Foundations for microstrip circuit design", John Wiley & Sons Canada, Limited, 1992, 1992.
- [23] RADIAL, "Square Flange Jack Receptacle with Solder pot contact", RADIAL, 2012.
- [24] Rogers Corporation, "Data Sheet and Processing Guidelines for RO3003 Series Bondply", 20011.
- [25] Rogers Corporation, "RO3000® Series Circuit Materials", Rogers Corporation, 2011.
- [26] Avago Technologies, "HSMP-389x Series, HSMP-489x Series, Surface Mount RF PIN Switch Diodes", Copyright © 2005-2009 Avago Technologies.
- [27] W. M. J. Noor e S. N. Mohammad, "Simulations of Variable I-Layer Thickness Effects on Silicon PIN Diode I-V Characteristics", 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2010), October 3-5, 2010, Penang, Malaysia, 2010.
- [28] L. A. I. Hinojosa, "Comparación de parámetros de dispositivos diodos P-I-N de diferentes materiales para aplicaciones en antenas de arreglos de fase y sistemas radares", México, 2010.
- [29] Edaboard.com, "How to simulate PIN diode in CST MWS with both OFF and ON states", Edaboard.com, [Online]. Available: <http://www.edaboard.com/thread260093.html>. [Acedido em 23 04 2013].
- [30] Comissão da História das Transmissões, "P/PRC-525", [Online]. Available: <http://historiadastransmissoes.wordpress.com/tag/prc-525/>. [Acedido em 03 09 2013].

Anexo A

Curvas de calibração

Para se determinar o ganho da antena testada foi preciso recorrer as cornetas de calibração nos dois planos. Estas cornetas permitem obter as curvas de calibração nos dois planos, na Figura A. 1 esta representado a curva de calibração no plano E e na Figura A. 2 está representado a curva no plano H.

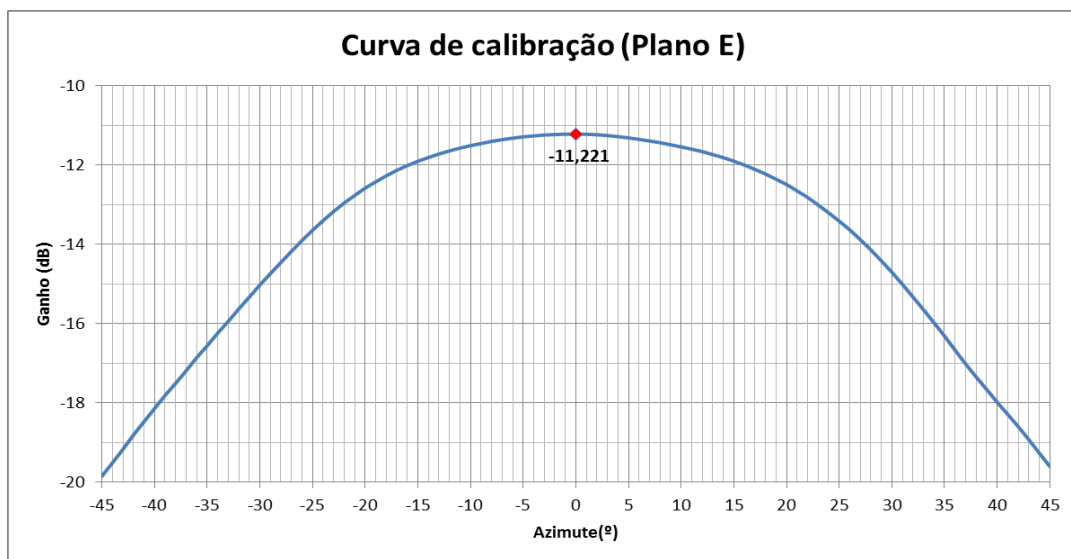


Figura A. 1 Curva de calibração no plano E

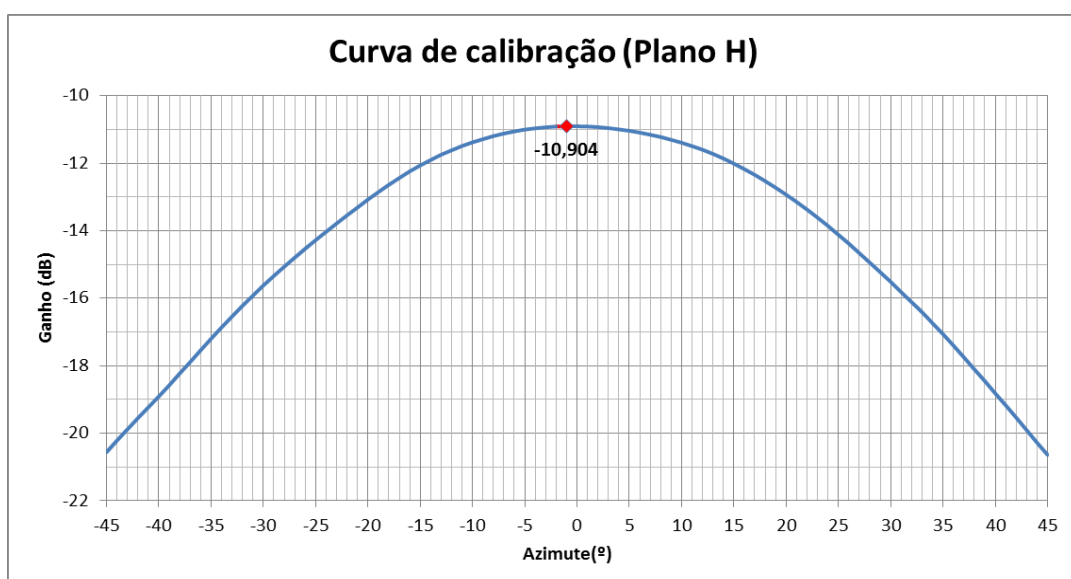


Figura A. 2 Curva de calibração no plano H

Como pode ser observado, o ganho no plano E é -11,2 dB e no plano H é -10,9 dB, verifica-se que estes valores apresentam alguma discrepância, que pode dever-se a um deslocamento da torre ou mesmo a uma pequena oscilação da mesma. Possuindo estes valores e sabendo o valor do ganho presente no catálogo da torre é possível saber o ganho da antena através da seguinte expressão.

$$G_{antena} = CA + G_{catálogo} - G_{max da cc} [dB]$$

Em que G_{antena} é o ganho da antena, o CA é o valor obtido na câmara anecóica, o $G_{catálogo}$ é o ganho da corneta presente no catálogo e o $G_{max da cc}$ é o ganho máximo obtido na curva de calibração. Para facilitar estas contas e realizar os diagramas de radiação foi utilizada a ferramenta Excel.

Anexo B

Estudo da influência do sistema de alimentação dos díodos

A colocação dos fios de alimentação na estrutura da antena influencia as características de radiação, para se estudar este efeito e achar a melhor solução foram realizadas e testadas três configurações distintas de colocar os fios de alimentação dos díodos.

A primeira configuração testada, foi colocar os fios a passar na parte inferior da antena, juntando todos os fios no centro e vindo depois todos juntos até a pilha de alimentação, como pode ser visto na Figura B. 1.



Figura B. 1 Primeira configuração

A segunda configuração testada, consistiu em passar todos os fios para uma das extremidades da antena e depois fazer correr os fios até à pilha de alimentação, Figura B. 2.

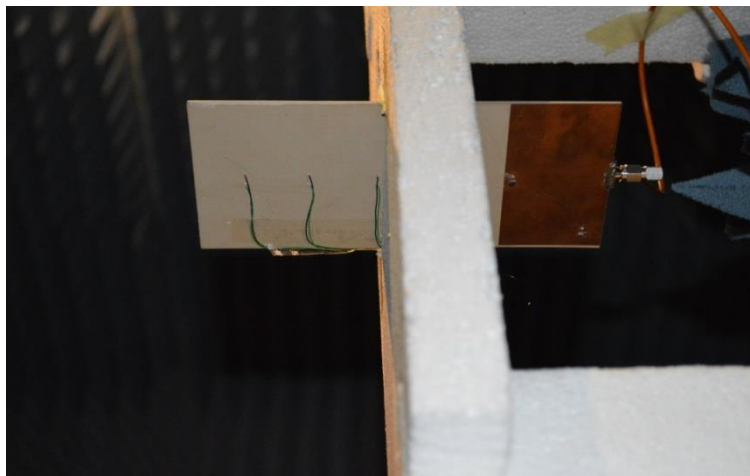


Figura B. 2 Segunda configuração

A última configuração testada foi colocar uma placa de esferovite entre os fios e a estrutura da antena, esta configuração pode ser vista na Figura B. 3.

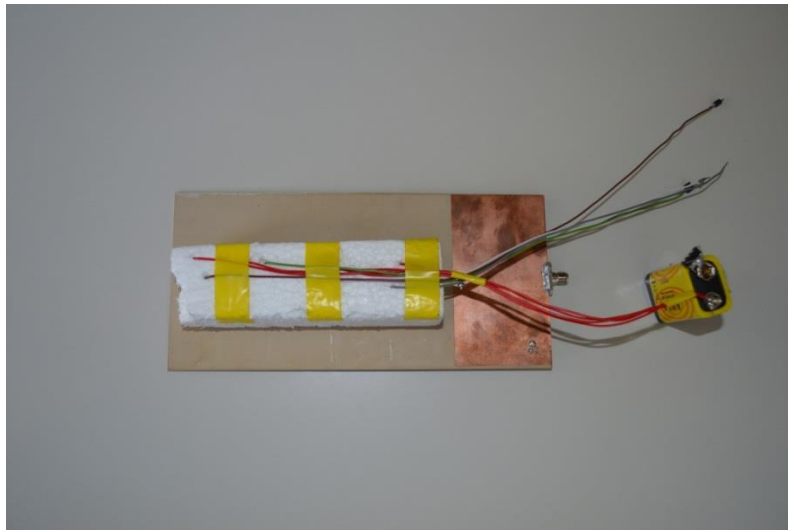


Figura B. 3 Terceira configuração

Para se saber qual das configurações produzia melhores resultados, foram realizadas algumas medidas da antena para cada uma das configurações. No gráfico da imagem Figura B. 4 pode ser vista a comparação das três configurações no plano E para a antena com os directores em aberto e na imagem Figura B. 5 para a antena com os directores em curto-circuito.

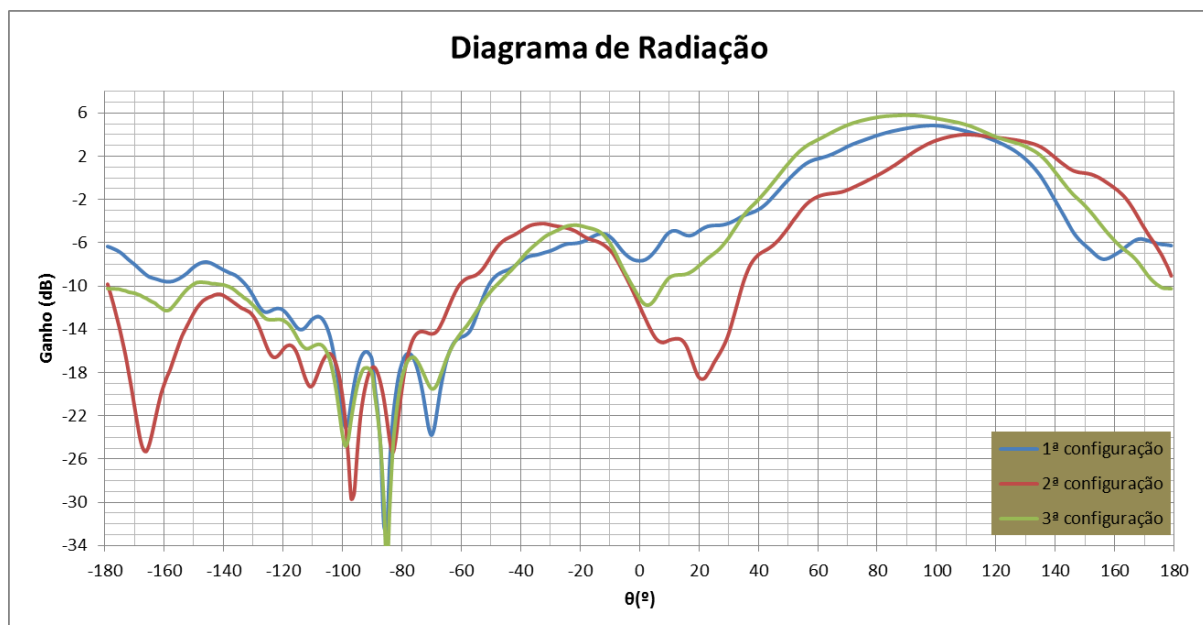


Figura B. 4 Comparação das três configurações para a antena com os directores em aberto no plano E

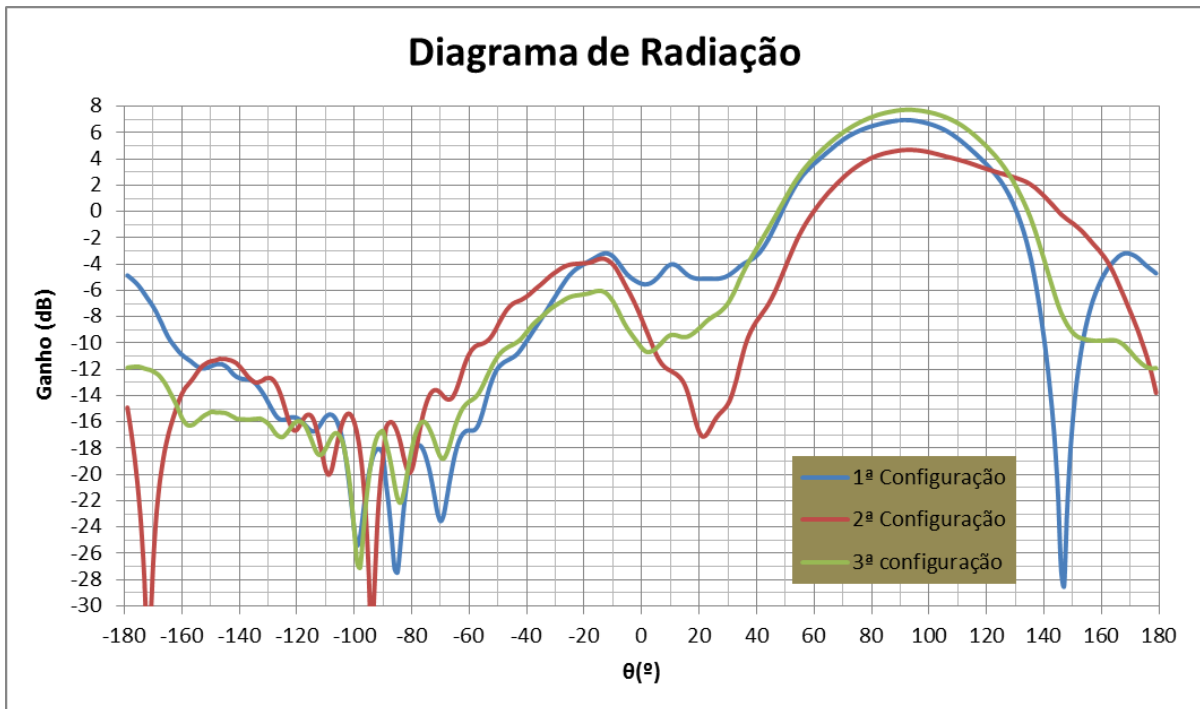


Figura B. 5 Comparação das três configurações para a antena com os directores em curto-circuito no plano E

Pela análise dos gráficos anteriormente apresentados verifica-se que a combinação que produz melhores efeitos é a terceira, uma vez que esta apresenta um ganho mais elevado nas duas situações e o valor de pico se encontra mais centrado nos 90° . Pode reparar-se ainda que a segunda combinação apresenta os piores resultados.

No plano H, também se pode concluir que a terceira combinação é a melhor e a segunda a pior, como pode ser visualizado na Figura B. 6 e Figura B. 7.

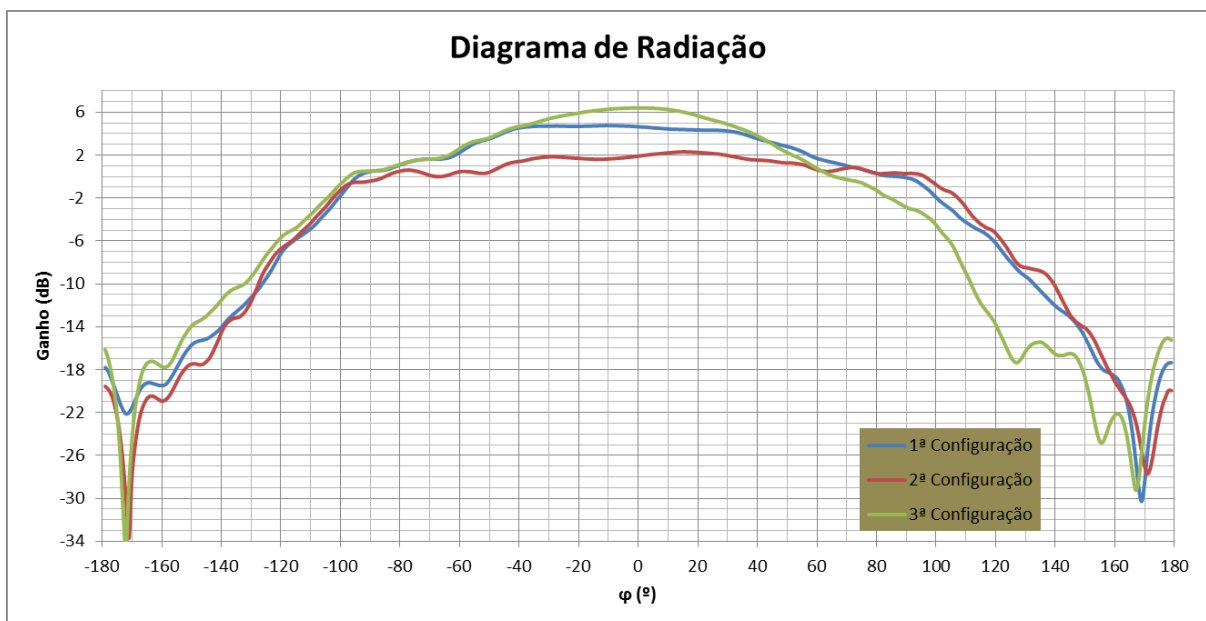


Figura B. 6 Comparação das três configurações para a antena com os directores em aberto no plano H

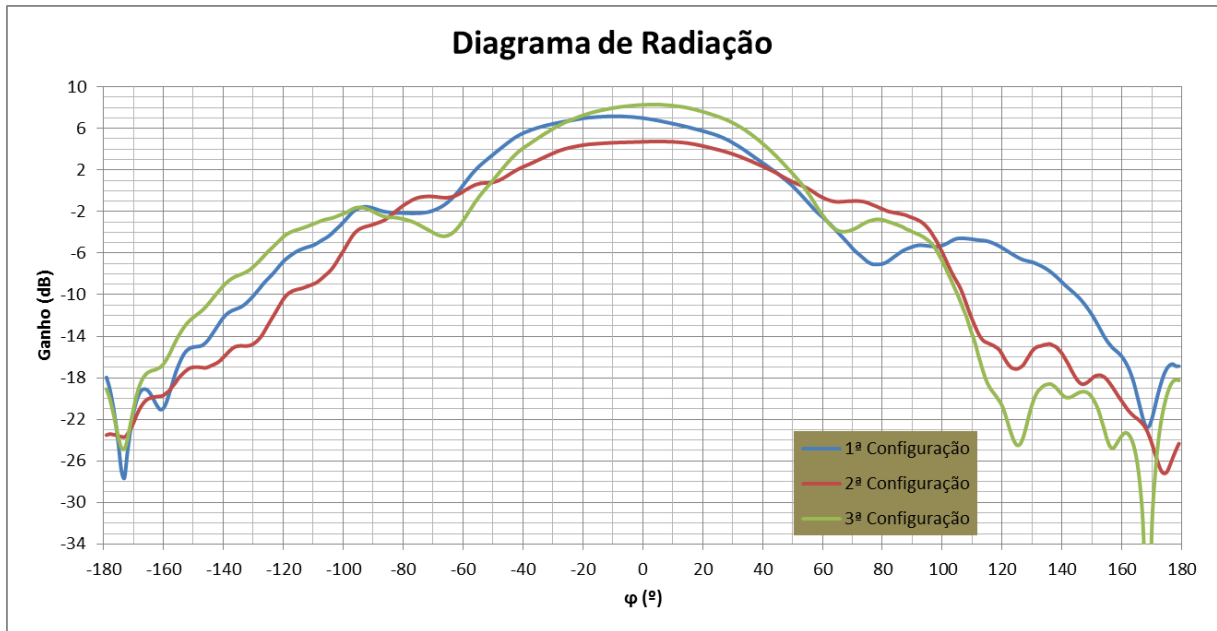


Figura B. 7 Comparação das três configurações para a antena com os directores em curto-circuito no plano H

Anexo C

Comparação dos resultados obtidos para as várias combinações dos elementos directores da antena.

Neste anexo serão apresentadas as comparações dos resultados experimentais com os simulados para as configurações que não foram apresentadas no corpo da dissertação. Para cada configuração será comparado as curvas do módulo do coeficiente de onda estacionária e os diagramas de radiação nos dois planos.

- Antena com todos os directores em aberto

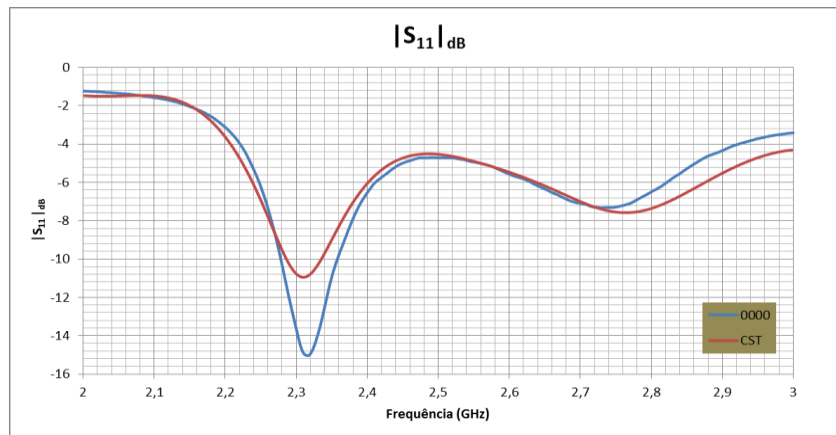


Figura C. 1 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 0000

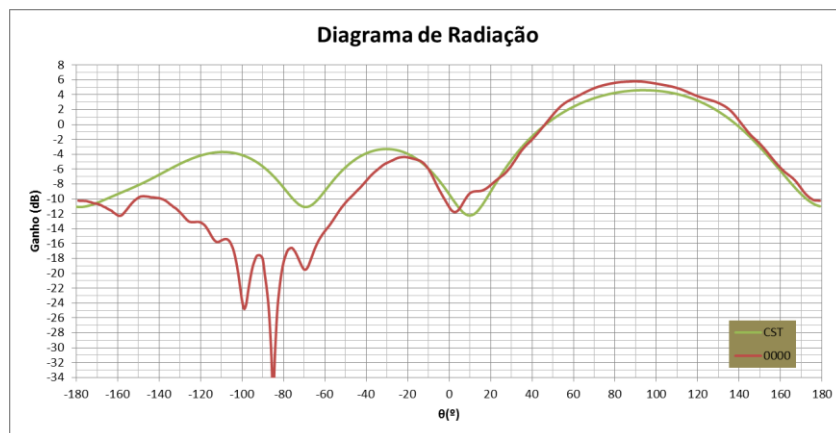


Figura C. 2 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 0000

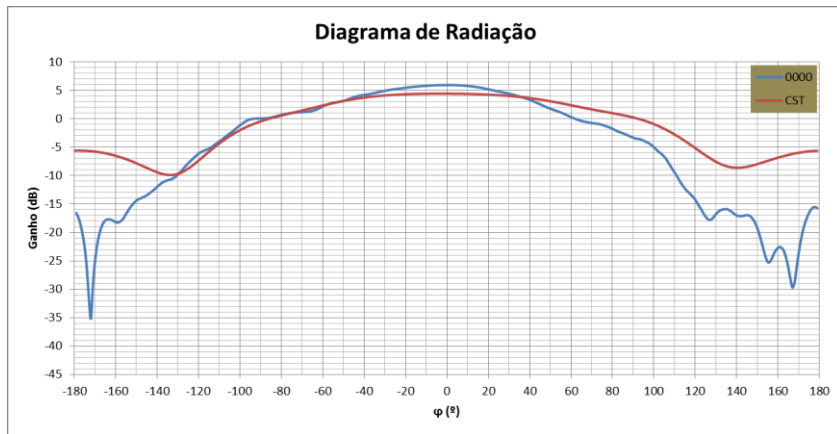


Figura C. 3 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 0000

- Antena com o 1º director em curto-circuito

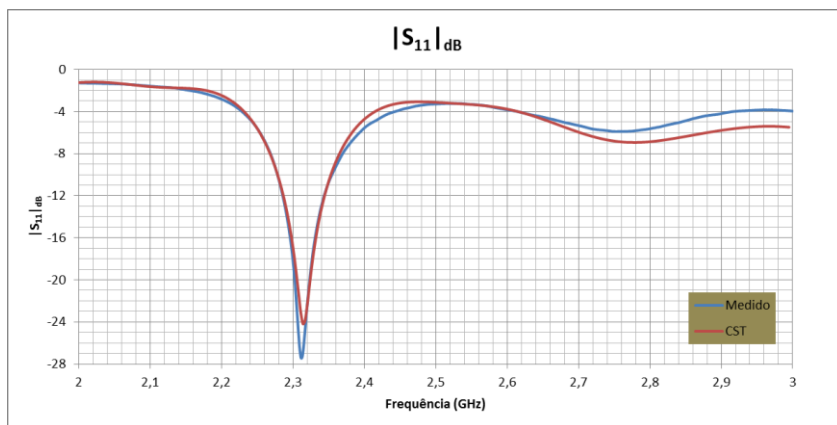


Figura C. 4 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 1000

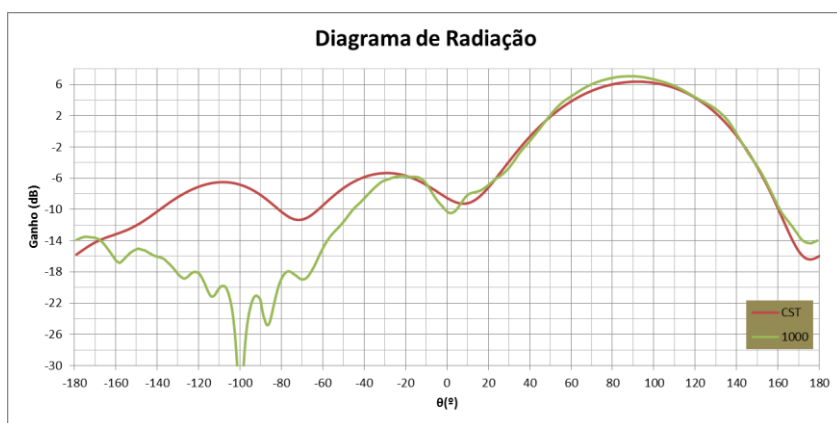


Figura C. 5 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 1000

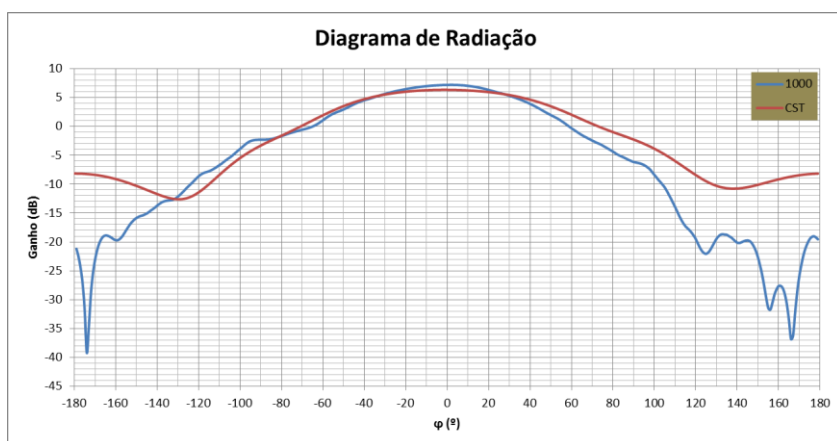


Figura C. 6 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 1000

- Antena com 1º e 2º director em curto-circuito

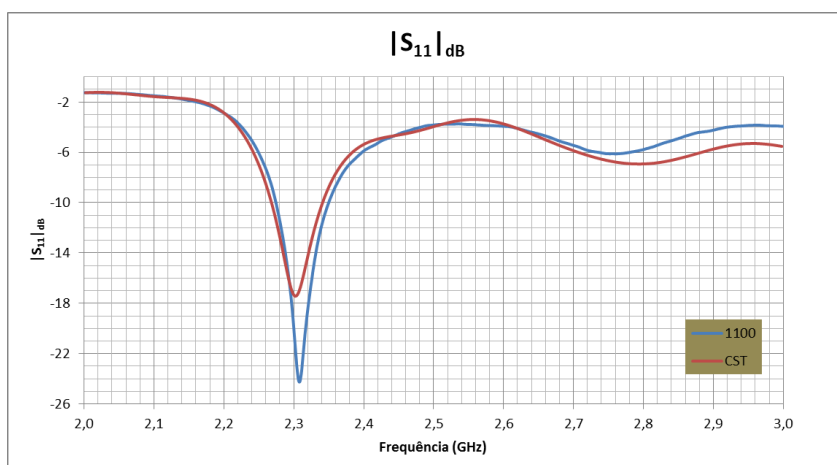


Figura C. 7 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 1100

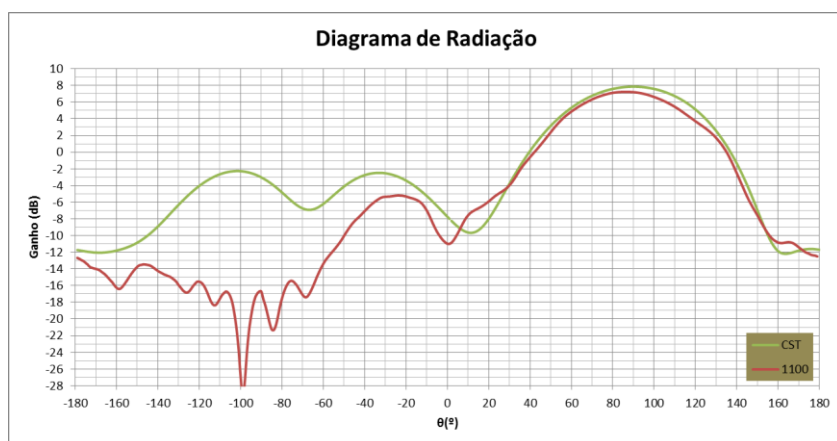


Figura C. 8 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 1100

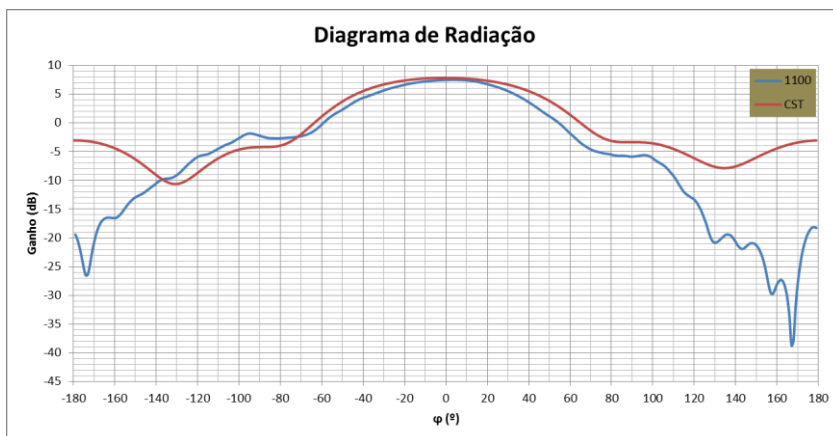


Figura C. 9 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 1100

- Antena com o 3º director em circuito aberto

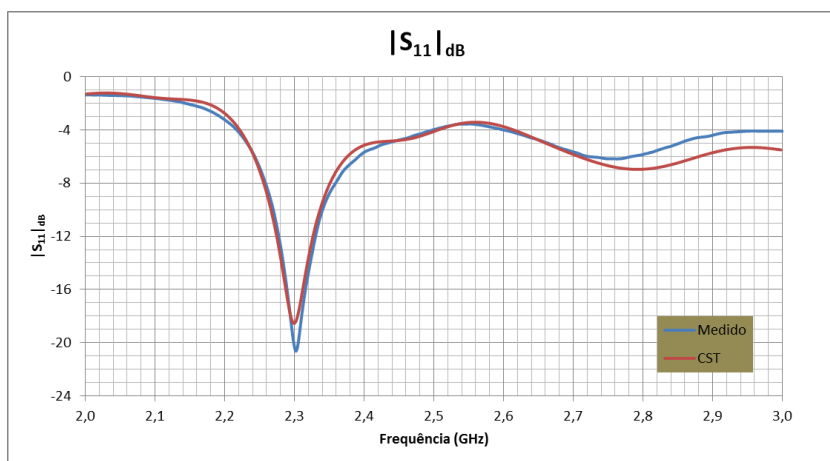


Figura C. 10 Comparação do $|S_{11}|_{dB}$ para 1101

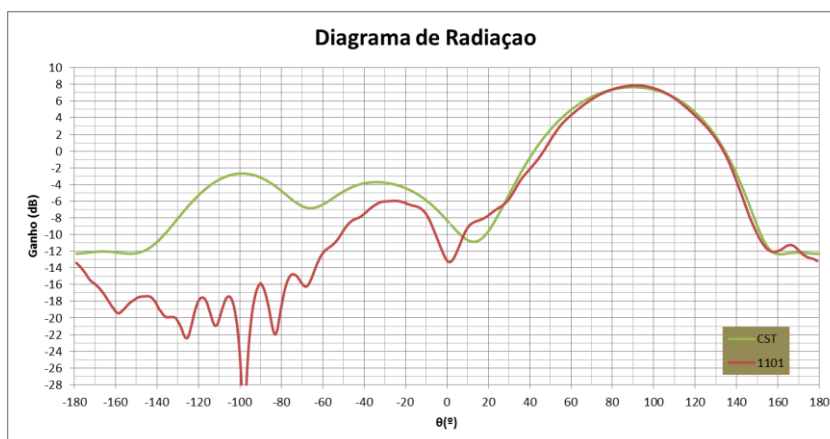


Figura C. 11 Comparação do diagrama de radiação no plano E para 1101

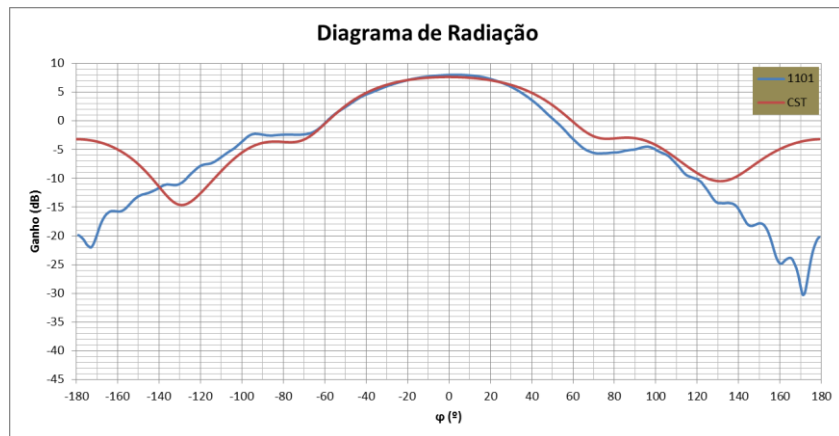


Figura C. 12 Comparação do diagrama de radiação no plano H para 1101

Conclusões

Pela análise dos gráficos apresentados anteriormente pode-se concluir que os valores medidos apresentam-se melhores que os valores simulados. Existindo uma grande coincidência dos valores simulados e medidos no plano principal de radiação principal. Fora destes os resultados apresentam alguma discrepância, mas esta pode ser explicada pela influência dos fios de alimentação dos díodos ou mesmo da pilha de alimentação dos mesmos.

Em suma podemos concluir que a antena apresenta melhores resultados do que o esperado em todas as configurações de elementos directores da antena.