

## ANTENA PARA CONTROLO WIRELESS DE UM ROBOT

Gonçalo Soeiro <sup>a1</sup>, Tiago Almeida <sup>a1</sup>, Maria João Martins <sup>a2</sup>, José Mata <sup>a</sup>

<sup>a</sup> CINAMIL - Centro de Investigação da Academia Militar, Academia Militar, Lisboa, Portugal

### ABSTRACT

Wireless communications are increasingly used by contemporary societies, both personally and professionally. The Portuguese Army has bought a robot (ROVIM), whose function is to perform surveillance and reconnaissance actions, in order to obtain information thus avoiding soldier's exposure. In this context it became necessary to design and build an antenna for wireless control of the robot. In this article three antennas are presented, the first is a Classic Yagi – Uda, the second is an antenna with a new design, with a new feature that consists in the possibility to change the radiation pattern and gain of the antenna, using diodes and the third is an antenna Printed Yagi – Uda Antenna. The presence of the diodes on the second antenna will allow control the radiation characteristics of the antenna, namely amplitude gain and half power beamwidth. Both antennas were designed and simulated using the CST MWS simulation program. The antennas were designed simulated and finally tested using a network analyzer and an anechoic chamber.

**Key words:** Smart antennas, Yagi – Uda antennas, Parasitic arrays, Radiation Pattern, anechoic chamber

### RESUMO

A comunicação e transmissão de informação sem fios são cada vez mais utilizadas pelas sociedades contemporâneas. O Exército português adquiriu um robot (ROVIM), cuja função é executar ações de reconhecimento e vigilância. Neste contexto surge a necessidade de dimensionar e construir uma antena para controlo Wireless do robot. Neste artigo estão apresentadas três antenas, a primeira é uma antena Yagi – Uda convencional, a segunda é uma antena com uma nova estrutura, possuindo na sua estrutura díodos e a terceira é uma antena de circuito impresso. A presença dos díodos terá como função controlar as características de radiação da antena, nomeadamente a amplitude

---

<sup>1</sup> O presente artigo resultou do trabalho desenvolvido para as Dissertações de Mestrado elaboradas pelos autores.

<sup>2</sup> Email para contacto: maria.martins@academiamilitar.pt

do ganho e a largura de feixe a meia potência. As antenas foram dimensionadas e simuladas no programa de simulação Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) de forma a operarem na banda dos 2,4 GHz. O diagrama de radiação, assim como, o coeficiente de onda estacionária das antenas construídas foram medidos recorrendo a uma câmara anecóica.

**Palavras-chave:** Antenas Inteligentes, antenas Yagi – Uda, Agregados com elementos parasitas, Diagrama de radiação, câmara anecóica.

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que se evolui na tecnologia, novas necessidades vão aparecendo. Na sociedade contemporânea há a necessidade por parte das forças de segurança internas ou externas, assim como do Exército, de controlar e monitorizar pequenos robôs à distância, de modo a serem empregues em determinadas situações de perigo, de inacessibilidade e de segurança. O Exército português adquiriu um robot com o nome ROVIM, cuja função é efectuar a vigilância terrestre militar, de forma a adquirir dados de forma rápida, segura e prática. Deste modo torna-se essencial construir uma antena que permita o controlo do robot à distância.



**Figura 1** - Robot ROVIM

A antena do operador a dimensionar para comunicar com o ROVIM deverá possuir as seguintes especificações:

- Permitir a regulação da largura de feixe de radiação a meia potência ( $>40^\circ$  e  $<90^\circ$ );
- Emitir um valor de radiação baixo, idealmente próximo de zero, na direção oposta ao deslocamento do robot ( $180^\circ$ );
- Possuir uma estrutura diferente das antenas Yagi – Uda convencionais;
- Ser leve pequena;
- Possuir ganho superior a 6 dB.
- Ter polarização horizontal

## 2. ANTENA YAGI-UDA E AGREGADOS DE ANTENAS

### 2.1 AGREGADOS DE ANTENAS

Um agregado de antenas é um conjunto de elementos radiantes, no qual se pretende que, a interação de campos dos vários elementos seja construtiva nas direções desejadas e destrutiva nas restantes (Guerra, 2010). O campo total radiado por um agregado é calculado como o somatório vetorial dos campos radiados por cada um dos dipolos que o constitui. Para controlar as características de radiação de um agregado de antenas formado por elementos idênticos, podemos atuar em cinco pontos (Balanis, 1997):

- A configuração geométrica do agregado (linear, retangular, circular);
- A disposição relativa entre os elementos;
- A amplitude de excitação da corrente de cada elemento;
- A fase de excitação da corrente de cada elemento;
- O diagrama de radiação relativo de cada elemento

O número de elementos, a disposição geométrica deles, assim como a distância que os separa são parâmetros que influenciam o valor do fator do agregado e por conseguinte influenciam o valor final do campo elétrico da antena (Guerra, 2010 - Elliot, 2003).

### 2.2 ANTENA YAGI-UDA

A antena Yagi – Uda é um agregado de antenas, que pode possuir diferentes tipos de estruturas. Na Figura 2, está o esquema de uma antena Yagi – Uda com elementos lineares.

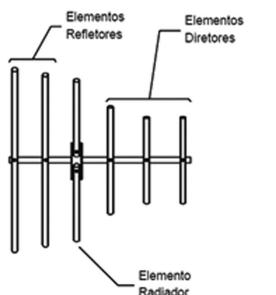


Figura 2 - Antena Yagi – Uda linear (Lima, 2005)

A antena é composta por um ou mais refletores, um elemento ativo e elementos diretores. Neste tipo de antenas apenas um elemento é ativo, geralmente o segundo elemento, quando a antena apresenta apenas um refletor. Todos os outros elementos, diretores e refletor, são passivos e atuam por indução mútua. Numa antena Yagi – Uda, apenas um elemento possui tensão diferente de zero, que é o elemento ativo. Assim, para uma antena de três elementos as equações de tensão vêm apresentadas como um sistema de equações (Fernandes, 1979).

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_e \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V \\ 0 \end{bmatrix}$$

O parâmetro  $I_e$  representa a corrente no elemento ativo,  $I_r$  representa a corrente no elemento refletor e o parâmetro  $I_d$  corresponde a corrente no diretor. O campo total resulta da sobreposição dos campos radiados pelos três elementos da antena (Volakis, 2007).

$$E(\Theta) = E_r(\Theta) + E_e(\Theta) + E_d(\Theta)$$

O campo  $E_r$  representa o campo radiado pelo refletor,  $E_e$  é o campo radiado pelo elemento ativo e  $E_d$  é o campo radiado pelo elemento diretor da antena.

### 3. ANTENA YAGI-UDA CONVENCIONAL

#### 3.1. DIMENSIONAMENTO DA ANTENA

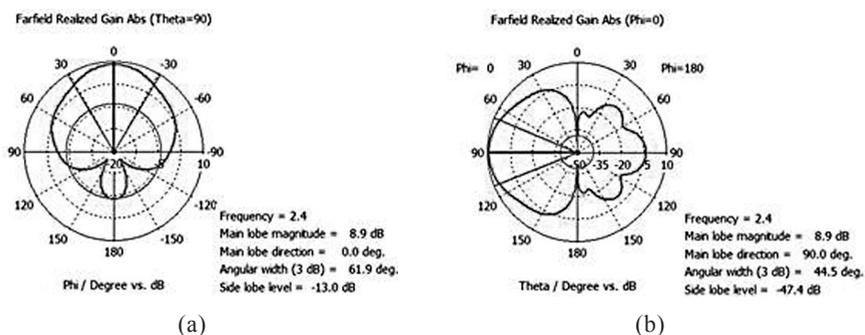
Para dimensionar uma antena pode-se recorrer a vários métodos (Huang, 2010 - Cheng, 1973). Segundo Balanis (1997) existem elementos da antena Yagi – Uda que possuem mais influência nas características de radiação da antenas, afirmando que o comprimento do elemento ativo para a antena estar em ressonância deve estar compreendido entre  $0,45\lambda$  e  $0,49\lambda$ , o comprimento dos diretores entre  $0,4\lambda$  e  $0,45\lambda$  e as distâncias entre diretores  $(0,3-0,4)\lambda$ . Tendo em consideração estes pressupostos, dimensionou-se a antena e após vários estudos e simulações chegou-se ao dimensionamento final apresentado na Tabela 1. As simulações obtidas após a alteração dos diferentes componentes da antena foram visualizadas recorrendo ao programa de simulação *CST Microwave Studio*.

**Tabela 1** - Design da Antena Yagi – Uda Convencional de Seis Elementos

Elemento	Comprimento	Espaçamento
Refletor	Placa de alumínio (100mm x 100mm x 2mm)	_____
Ativo	0,45 $\lambda$	0,15 $\lambda$
Diretor 1	0,43 $\lambda$	0,15 $\lambda$
Diretor 2	0,43 $\lambda$	0,15 $\lambda$
Diretor 3	0,43 $\lambda$	0,15 $\lambda$
Diretor 4	0,43 $\lambda$	0,15 $\lambda$
Ganho (dB)	8,91	

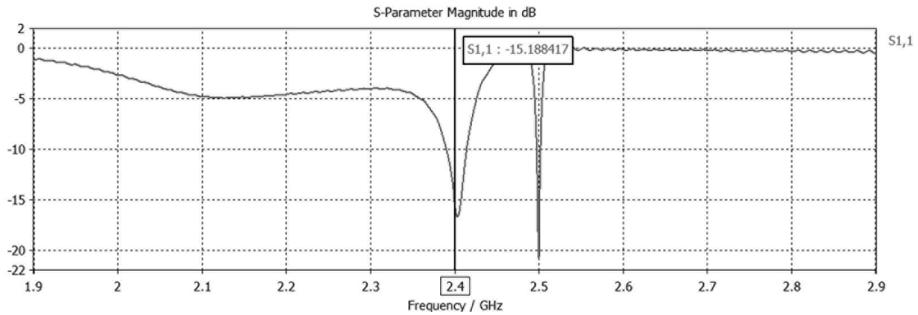
### 3.1.1 Simulação no Programa CST MWS

Os diagramas de radiação da antena da Tabela 1, obtidos no programa de simulação podem ser visualizados na Figura 3.



**Figura 3** - Diagrama de radiação da antena Yagi – Uda convencional final (a) Plano H (b) Plano E

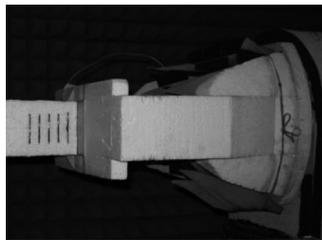
O nível de adaptação da antena obtido no programa de simulação pode ser visualizado na Figura 4.



**Figura 4** - Coeficiente de onda estacionária da antena Yagi – Uda convencional final

### 3.1.2 Resultados Experimentais

Após o dimensionamento final e simulação da antena Yagi – Uda convencional, efetuaram-se medidas na câmara anecóica. Na Figura 5 visualiza-se a antena na câmara anecóica.



**Figura 5** - Antena Yagi – Uda convencional construída

Todos os elementos da antena exceto o plano refletor da antena são fios de cobre com diâmetro de 2 mm. Para suporte destes elementos utilizou-se esfervite, devido a possuir pouca influência no diagrama de radiação da antena, visto que, a sua constante dielétrica relativa tem um valor próximo de um e não apresenta perdas significativas nesta banda de frequências. As medidas obtidas na câmara anecóica podem ser visualizadas na Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

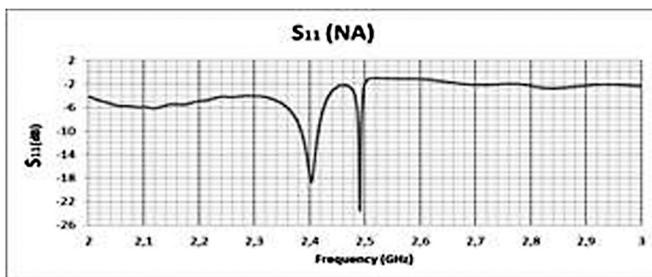


Figura 6 -  $S_{11}$  medido na antena Yagi-Uda convencional

Perante a figura anterior verifica-se que para a frequência de trabalho, 2,4 GHz, a antena encontra-se com um nível de adaptação aceitável ( $S_{11} < -15$  dB), pois  $S_{11} = -17,58$  dB.

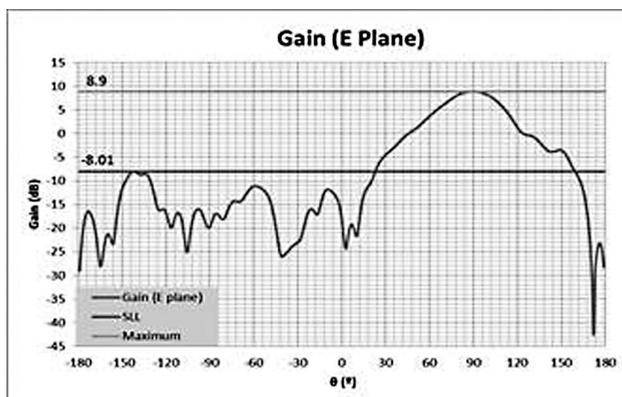


Figura 7 - Diagrama de radiação da antena no Plano E

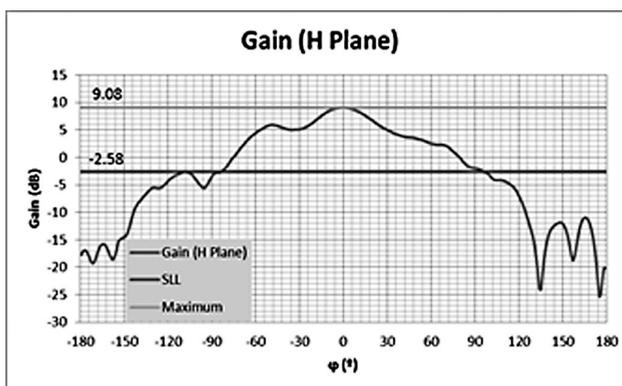
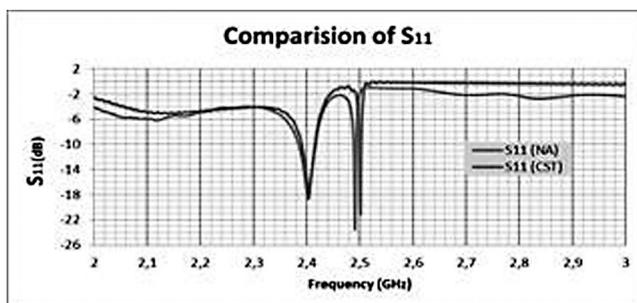


Figura 8 - Diagrama de radiação da antena no Plano H

A curva verde permite visualizar o ganho máximo da antena e a curva vermelha a amplitude dos lóbulos secundários, que por sua vez permitirá chegar ao valor do nível de lóbulos secundários da antena (NLS). Observando os diagramas de radiação nos dois planos, verifica-se que o ganho do plano E (8,9 dB) é praticamente igual ao ganho do plano H (9,08 dB) e que a largura de feixe a -3 dB (HPBW) no plano H é ligeiramente superior, passando de 45° para 46°. Com base na curva vermelha verifica-se que o NLS é superior no plano E (16,91 dB) face ao plano H (11,66 dB).

### 3.1.3 Comparação Entre Resultados Simulados e Medidos



**Figura 9.** Comparação dos valores de  $S_{11}$  obtidos experimentalmente na câmara anecóica e simulados no programa de simulação CST MWS.

Analisando a Figura 9, verifica-se que existe uma grande semelhança entre os resultados simulados (curva vermelha) e os medidos na câmara anecóica (curva azul). Para a frequência de trabalho, 2,4 GHz, as curvas são praticamente coincidentes, no entanto, o valor medido (-17,58 dB) é melhor que o simulado (-15,19 dB). O que indica que a antena possui uma boa adaptação. Quanto aos diagramas de radiação verifica-se que a curva vermelha representa os resultados da simulação no programa CST MWS e a azul as medidas efetuadas na câmara anecóica.

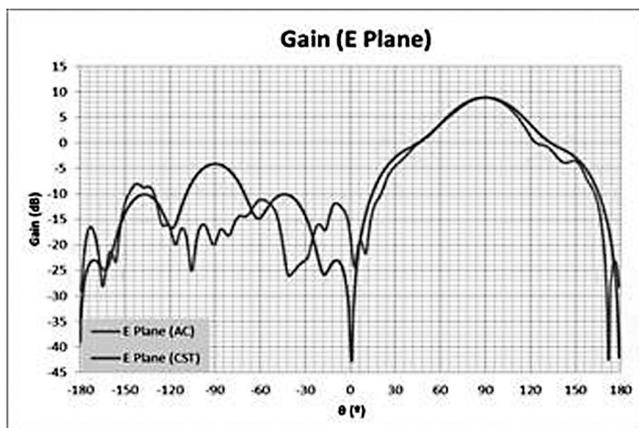


Figura 10 - Comparação do diagrama de radiação da antena no plano E

O ganho máximo da antena ocorre em  $\theta = 90^\circ$  e possui aproximadamente a mesma amplitude nos resultados medidos e simulados. Observa-se que o diagrama de radiação da antena apresenta uma boa simetria.

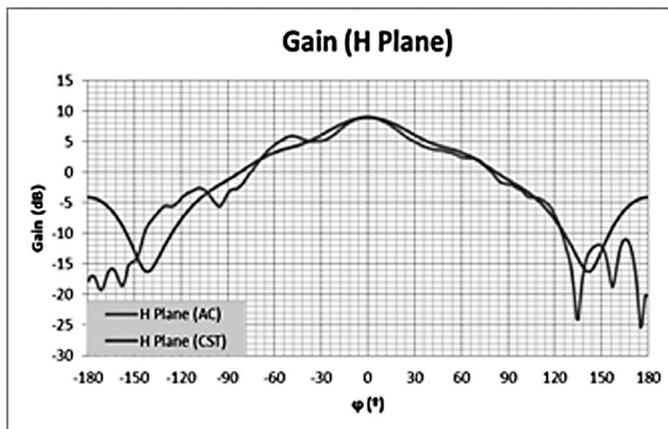


Figura 11. Comparação do diagrama de radiação da antena no plano H

Tanto no plano H como no plano E, os valores medidos e simulados apresentam uma grande semelhança. A diferença entre o ganho máximo medido e simulado é inferior a 0,2 dB.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos. A antena possui praticamente o mesmo ganho (G) em ambos os planos e a adaptação da antena ( $S_{11}$ ) é ligeiramente melhor na antena construída. Na tabela a largura de feixe a meia potência é representada por HPBW (Half Power Beamwidth).

**Tabela 2** - Resumo dos Resultados Experimentais e Simulados

	Resultados Experimentais		Resultados simulados	
	Plano E	Plano H	Plano E	Plano H
HPBW	45º	46º	44,5º	61,9º
G (dB)	8,9	9,08	8,9	8,9
NLS (dB)	-16,91	-11,66	-47,4	-13
S <sub>11</sub> (dB)	-17,58		-15,19	

#### 4 ANTENA YAGI-UDA COM GANHO AJUSTÁVEL

Para a regulação das características de radiação da antena realizou-se o curto-circuito e o circuito aberto dos diretores da antena através de díodos pin. Quando os díodos são polarizados diretamente, conduzem e assim estabelecem o curto-circuito, quando os díodos são polarizados inversamente, ficam ao corte (não conduzem) estabelecendo-se o circuito aberto.

Para a introdução dos díodos houve a necessidade de alterar a estrutura da antena, de modo a que a sua construção fosse exequível. Introduziu-se uma placa de circuito impresso, constituída por uma fina película de cobre impressa num material isolante (epoxy). Esta placa serviu de suporte para soldar os “braços” dos diretores, diodo e fios de polarização do diodo. Os fios de polarização estão ligados ao circuito de polarização dos díodos, que é constituído por uma resistência (2,3K $\Omega$ ), um inversor unipolar, um inversor bipolar e uma fonte de alimentação (3V) que permitirá polarizar o diodo. Na Figura 12 está a antena construída e na Figura 13 visualiza-se os inversores que permitirão polarizar os díodos. O inversor superior permitirá colocar o diretor em curto-circuito quando se encontrar na posição cc (esquerda) e em circuito aberto quando se encontrar na posição ca (direita). O inversor inferior tem a função de ligar ou desligar o circuito de polarização de modo a aumentar o tempo de vida útil da fonte de polarização. Ao primeiro diretor estão associados os inversores mais à direita e ao último diretor (4º diretor) os inversores mais à esquerda.

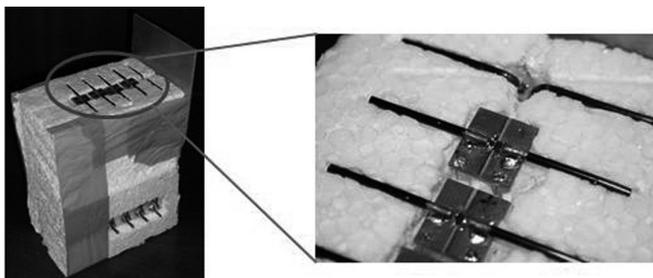


Figura 12 - Antena com díodos

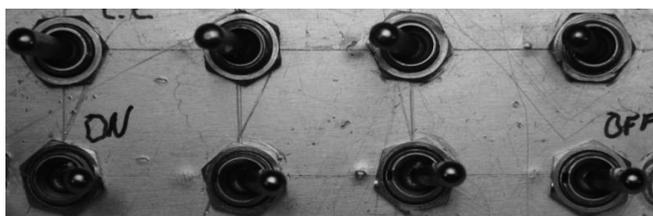


Figura 13 - Inversores da antena

#### 4.1 MEDIDAS EXPERIMENTAIS

Para a realização das medidas experimentais recorreu-se á câmara anecóica. Os resultados experimentais do coeficiente de onda estacionária ( $S_{11}$ ) obtidos para as diferentes configurações da antena com um ou mais diretores em curto-circuito estão na Figura 14, Figura 15 e Figura 16. O parâmetro cc apresentado nas figuras deste artigo indica que esses elementos estão em curto-circuito.

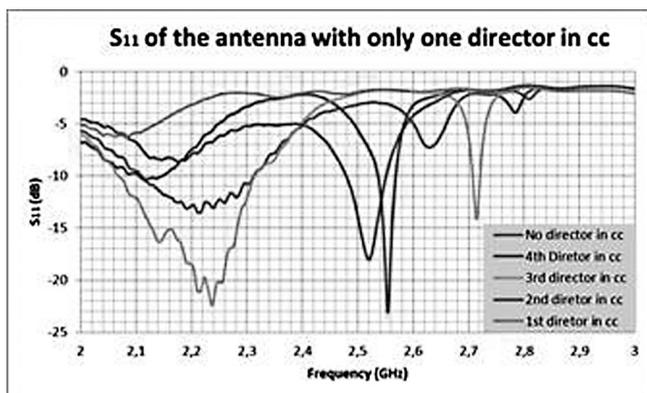


Figura 14.  $S_{11}$  experimental da antena com um diretor em curto-circuito

Após a visualização da figura anterior, verifica-se que apenas a curva que representa o primeiro diretor em curto-circuito não apresenta um pico de adaptação. O valor mais baixo de  $S_{11}$  ocorre quando o quarto diretor está em curto-circuito. ( $S_{11} = -23,1$  dB em  $f = 2,554$  GHz).

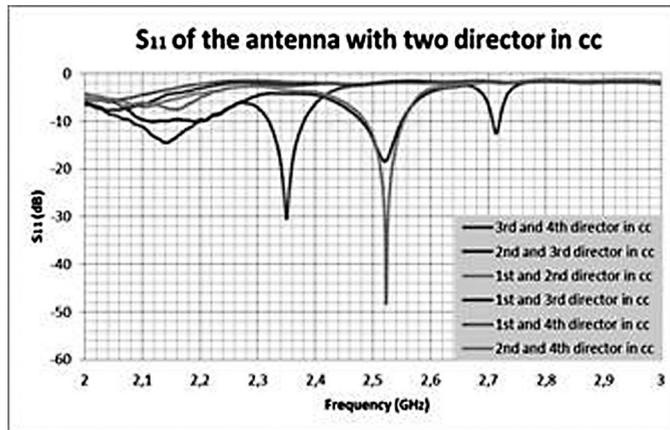


Figura 15.  $S_{11}$  experimental da antenna com dois diretores em curto-circuito

Na Figura 15 é possível visualizar os resultados experimentais obtidos do  $S_{11}$  quando a antenna apresenta dois diretores em curto-circuito. Verifica-se que as melhores adaptações da antenna ocorrem sempre que o primeiro diretor está em circuito-aberto. Os melhores valores de  $S_{11}$  obtidos ocorrem quando a antenna possui o terceiro e quarto diretor em curto-circuito e o segundo e quarto diretor em curto-circuito.

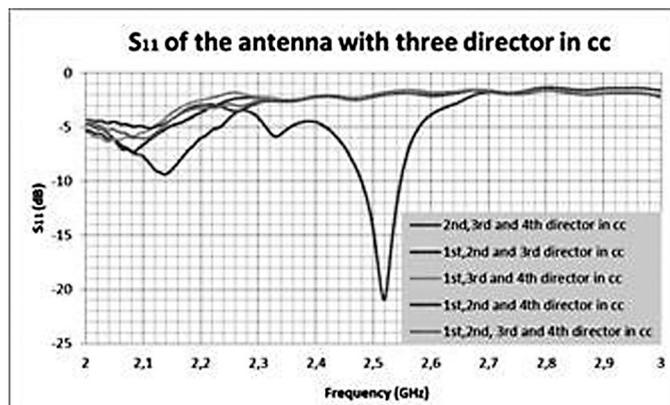


Figura 16.  $S_{11}$  experimental da antenna com três diretores em curto-circuito

Através da Figura 16 verifica-se que o primeiro diretor da antena desempenha um papel determinante no valor de  $S_{11}$  obtido. Quando está em curto-circuito, verifica-se que as curvas de  $S_{11}$  ficam praticamente coincidentes. Quando o primeiro diretor não se encontra em curto-circuito, verifica-se um pico de adaptação bem delineado ( $S_{11} = -20,95$  dB) na frequência 2,519 GHz.

## 5. ANTENA YAGI-UDA IMPRESSA

Após a construção e medição das antenas anteriores, optou-se por uma antena que fosse mais compacta, mas que permitisse alterar as suas características de radiação. Após observações, pesquisas e estudos optou-se por uma antena impressa.

### 5.1 ESCOLHA DO SUBSTRATO

O substrato escolhido para a antena foi o Gil GML 1000. A sua escolha teve como princípio a frequência a utilizar na antena, o fato de apresentar uma constante dielétrica baixa e estável, podendo operar num intervalo grande de temperatura e em ambientes húmidos (Technologies). Características importantes para que a antena opere em todas as condições ambientais.

Na Tabela 3 são apresentadas algumas características físicas do Gil GML 1000, nomeadamente permitividade dielétrica relativa,  $\epsilon_r$ , e a tangente do ângulo de perdas,  $\tan \delta$ .

**Tabela 3** - Propriedades Físicas do Gil GML 1000

Material	Gil GML 1000	
Aplicação	Substrato da antena	
Propriedades Físicas	$\epsilon_r$ (@ 2,45 GHz) = 3,2114±0,05	$\tan \delta$ (@ 2,45 GHz) = 0,0018
Banda de temperatura em que o $\epsilon_r$ é estável	-55 °C até 125 °C	
Altura	1,52 mm	

Algumas das propriedades físicas presentes na Tabela 3 nomeadamente o  $\epsilon_r$  e a  $\tan \delta$  são usados 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 datasheet (Technologies).

## 5.2 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento da antena impressa tem como origem a antena Yagi-Uda convencional anteriormente dimensionada pelo Algoritmo Genético, contudo será efectuado um redimensionamento das medidas para a antena impressa. 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 de passar a ser uma tira estreita com altura mínima, muito próxima de zero e com 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,  $\lambda_g$ , este valor é obtido pela Equação 1, em que  $F$  representa a frequência em GHz e  $\epsilon_{eff}$  representa a constante dielétrica efetiva. O resultado desta equação encontra-se em milímetros (mm).

$$\lambda_g = \frac{300}{F * \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

Os novos valores são obtidos dividindo as dimensões da antena convencional pelo comprimento de onda, em espaço livre,  $\lambda$ , e depois multiplicando esse valor pelo comprimento de onda no guia,  $\lambda_g$ , que neste caso vale 92,4 mm. Os novos valores são menores como seria de esperar. As dimensões finais da antena dimensionada estão presentes na Tabela 4, o espaçamento entre elementos está indicado relativamente ao elemento ativo.

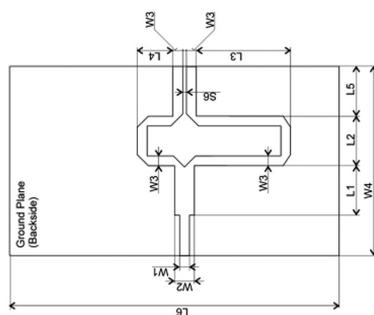
**Tabela 4** - Dimensões Finais da Antena Yagi – Uda Impressa

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 constituídas por três partes essenciais, a primeira parte é a antena Yagi – Uda em si já dimensionada, a segunda parte é um balun que tem como função a adaptação e a terceira parte é a linha de alimentação que faz a passagem do balun até ao elemento ativo.

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  $180^\circ$ , adaptando a linha de alimentação à frequência de trabalho (H. Karbalaee, 2012). O balun é constituído por um transformador de  $\lambda/4$  com três portos. Na Figura 7 está representado o balun e a linha de alimentação.

Para fazer o dimensionamento desta estrutura recorreu-se a um estudo dos vários artigos que abordam o assunto (Polivka; Karbalaee, 2012; Grajek, 2004).



**Figura 17** - Estrutura do *Balun*

Com a utilização da ferramenta *Parameter Sweep* do CST MWS e numa fase posterior da ferramenta *Optimizer*, do Transient Solver Parameter, do mesmo programa, foram realizados diferentes varrimentos nas medidas apresentadas em artigos estudados, com o objetivo de otimizar a adaptação. O objectivo final será encontrar 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, uma vez que este é o limite para se considerar que a antena se encontra adaptada (Balanis, 1997). A Tabela 5 possui as medidas utilizadas na construção da antena.

**Tabela 5** - Medidas do *Balun*

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	

### 5.3 SIMULAÇÃO NO PROGRAMA CST MWS

A antena foi simulada no programa CST MWS, pelo que na Figura 18 é possível visualizar em 3D o diagrama de radiação da antena para a frequência 2,45GHz.

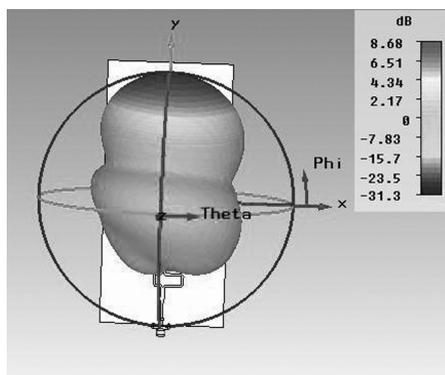


Figura 18 - Diagrama de radiação 3D da antena

A antena apresenta um ganho de 8,68 dB, um nível de lobos secundários muito reduzidos e encontra-se totalmente adaptada para a banda de frequência pretendida, podendo ser funcional em qualquer canal Wireless. Segundo Balanis, o critério para se considerar uma antena adaptada é  $|S_{11}|_{dB} \leq -10$  dB, pelo que a Figura 19 permite afirmar que a antena se encontra adaptada,  $|S_{11}|_{dB} = -15,659$  dB.

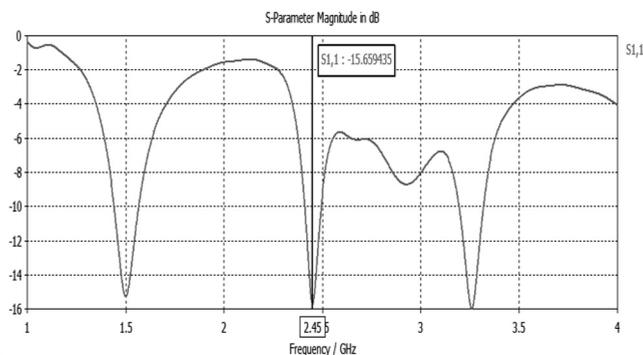


Figura 19 - Módulo do coeficiente de onda estacionária

Devido á impossibilidade de contactar o fornecedor europeu ou mesmo o fabricante do substrato Gil GML 1000, nos Estados Unidos da América, porque os meios de comunicação fornecidos no sítio do produto estarem

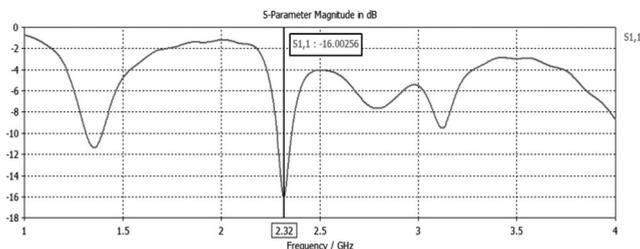
desativados ou desatualizados, optou-se pela troca de substrato. O substrato utilizado foi o Rogers RO3003™, este substrato apresenta um bom desempenho em radiofrequência (Rogers Corporation, 2011), estando na Tabela 6 apresentadas algumas características.

**Tabela 6** - Substrato Utilizado

Material	RO3003™	
Aplicação	Substrato da antena	
Propriedades Físicas	$\epsilon_r$ (@ 2,45 GHz) = 3,0035±0.04	$\tan \delta$ (@ 2.45 GHz) = 0,0006
Altura	1,52 mm	

Estes valores foram obtidos através das ferramentas do CST MWS, as mesmas que foram utilizadas para encontrar os valores para o primeiro substrato. Para verificarmos que características de radiação se alteraram simulamos a antena com as dimensões anteriores (substrato Gil GML 1000) mas com o substrato Rogers RO3003™.

Depois de simulada a antena verificou-se que o pico de frequência mais pronunciado deixou de estar centrado na frequência pretendida, passando a estar em 2,3 GHz, ou seja, a antena deixou de estar adaptada, como podemos ver na Figura 20, e o ganho por conseguinte também diminuiu.



**Figura 20** - Módulo do Coeficiente de Onda Estacionária para o Substrato

Para se poder efectuar uma comparação entre os resultados experimentais e simulados, optou-se por fazer as simulações para a frequência de 2,3 GHz. Os resultados obtidos nesta frequência serão equivalentes aos obtidos para a frequência pretendida.

## 6 ANTENA COM REGULAÇÃO DO GANHO E DA LARGURA DO LOBO PRINCIPAL (-3dB)

### 6.1 PROTÓTIPO DA ANTENA

A antena inicialmente dimensionada teve de ser alterada, para permitir a regulação e alteração do ganho e da largura de feixe. Essa regulação é realizada através da combinação de diretores em curto-circuito e em circuito aberto. Para se determinar quais as combinações que permitiam obter os resultados pretendidos foram simuladas todas as combinações possíveis, chegando-se à conclusão que apenas cinco combinações é que apresentavam os resultados pretendidos. As cinco combinações são as seguintes: todos os diretores em aberto, o primeiro diretor em curto-circuito, o primeiro e o segundo diretor em curto-circuito, o terceiro diretor em circuito aberto e todos os diretores em curto-circuito.

É então necessário criar um sistema que permita colocar os diretores em curto-circuito ou em circuito aberto. Para fazer esta comutação foram usados díodos PIN, colocados entre os “braços” dos diretores, que quando polarizados diretamente, permitem a passagem de corrente estabelecendo-se o curto-circuito e quando polarizados inversamente, não conduzem, simulando o circuito aberto. Os “braços” dos diretores foram afastados 4 mm para colocar os díodos entre os dois braços.

### 6.2 SIMULAÇÃO DA ANTENA COM DÍODOS

Neste ponto foram simuladas as combinações anteriormente apresentadas. Para se realizar estas simulações no programa CST MWS foi preciso utilizar o esquema equivalente dos díodos, uma vez que o programa não permite a simulação com os mesmos. Na Tabela 7 encontram-se representados os valores do circuito RLC quando os díodos estão “ON” ou “OFF”.

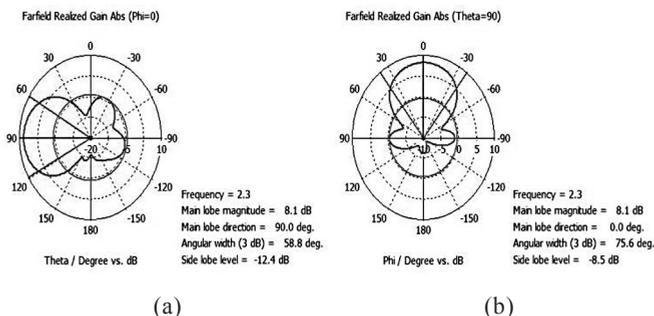
**Tabela 7** - Valores Usados na Simulação

	Díodo ON	Díodo OFF
Bobine L (nH)	0,45	0,45
Resistência R ( $\Omega$ )	3,5	3000
Condensador C (pF)	-----	0,08

Apenas serão apresentadas as simulações da antena que permitem obter o máximo e mínimo da HPBW, isto é, com todos os directores em curto-circuito e com todos os directores em circuito aberto.

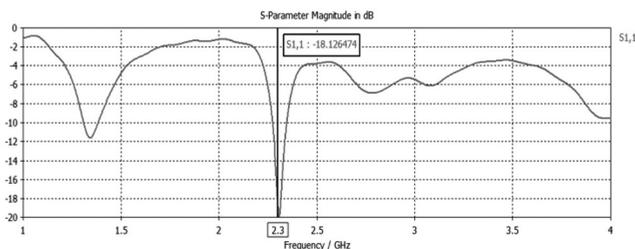
### 6.2.1 Antena com Todos os Directores em Curto-Circuito

Na Figura 21 estão representados os diagramas de radiação para o plano E e H. Como se pode observar a antena apresenta um ganho de 8,1 dB, no plano E uma largura do lobo principal a -3 dB de 58,8°, e o nível de lóbulos secundários apresenta um valor de -12,4 dB.



**Figura 21** - (a) Diagrama de radiação no plano E (b) Diagrama de radiação no plano H

Esta antena encontra-se totalmente adaptada para a frequência pretendida, uma vez que  $|S_{11}|_{dB} \leq -10$  dB, neste caso estamos com -18,127 dB, como pode ser visualizado na Fig 22.



**Figura 22** - Módulo do Coeficiente de onda estacionária da antena impressa no substrato com díodos

## 6.2.2 Antena com Todos os Diretores em Aberto

Esta combinação apresenta um ganho de 4,6 dB, e uma HPBW de 75,9°, no plano E, como pode ser visto na Figura 23. Esta combinação é a que permite obter a maior largura do lobo principal (-3 dB), apresentando um nível de lóbulos secundários elevado, -7,9 dB, como se pode visualizar na Figura 23.

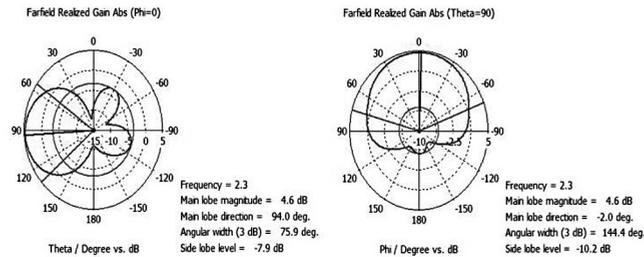


Figura 23 - (a) Diagrama de radiação no plano E (b) Diagrama de radiação no plano H

Através da Figura 24 verifica-se que a curva do  $|S_{11}|_{dB}$  possui pouca definição, apresentado dois picos bem definidos, um deles na frequência pretendida, permitindo assim garantir que a antena está adaptada. Na Figura 24 pode ser visto o nível de adaptação desta configuração, afirmando-se que a mesma se encontra muito próximo do valor limite para se considerar adaptada, mas ainda assim a antena encontra-se adaptada com um valor de  $|S_{11}|_{dB} = -10,881$  dB.

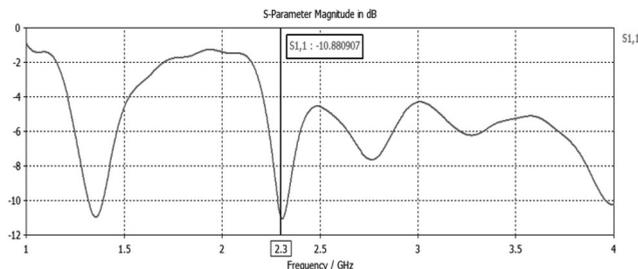


Figura 24 - Módulo do Coeficiente de onda estacionária

## 6.3 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DA ANTENA

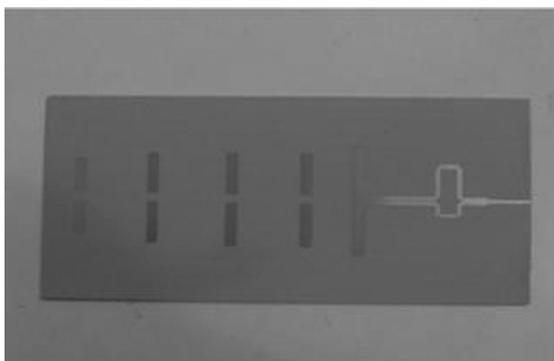
Concluída a fase de dimensionamento e simulação da antena, procedeu-se a construção física da mesma.

Para construir a antena foi necessário criar um layout da mesma, a partir do qual se começa a construção. O layout desta antena foi realizado no

programa SolidWorks, para o qual foram importados os pontos que definiam a antena no programa CST MWS.

Este layout tinha de ter um fator de escala associado, este podia ser  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{1}{4}$ , ou seja, as medidas iam ser aumentadas 50 ou 25%, optando-se por usar um fator de escala de  $\frac{1}{2}$ , o que permite minimizar qualquer erro existente no desenho. 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 com a intensidade de luz existente na sala onde é realizada esta operação. O layout construído é introduzido numa máquina (REPRO-MASTER 2200 II amplifying) onde é retirado todo o ar, ficando o desenho no vácuo, de seguida é bombeado por uma luz intensa, dando origem ao negativo. Este depois passa para outra máquina (RAPLINE 43 revealing) onde é revelado, ficando o positivo, que será utilizado para a construção da antena. Como a antena apresenta parte superior e inferior é preciso repetir este processo duas vezes, uma para cada parte.

A placa de substrato antes de ser introduzida entre os positivos necessita de tratamento e de limpeza. Após a limpeza, a placa é 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 a placa foi retirada do meio dos positivos verificou-se que o desenho da antena já se encontrava na placa, tal obrigou á utilização de ácido para retirar o cobre que não faz parte da antena. Este processo tem de ser repetido várias vezes para que o cobre que se encontra a mais e em excesso seja retirado. Após a remoção de todo o cobre excedentário, a placa é lavada com acetona, estando concluído o processo de construção da antena. O produto final pode ser visto na Figura 25



**Figura 25** Antena Construída

#### 6.4 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO E COMUTAÇÃO DOS DÍODOS

O circuito de polarização dos díodos é constituído por duas resistências do tipo Surface Mounting Devices (SMD) de 1,3 K $\Omega$  cada e por uma fonte de alimentação, neste caso uma pilha de 9 V.

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 fios de varias cores em que cada cor correspondia a um díodo, na Figura 26 pode ser visto o sistema utilizado. 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.

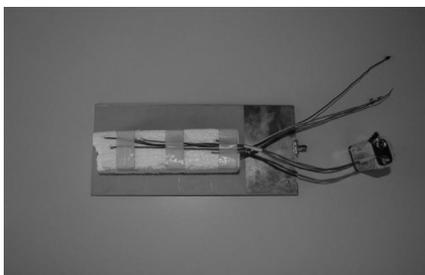


Figura 26 - Plano do sistema de comutação dos díodos

#### 6.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO

Depois de simulação da antena estar completa é necessário avaliar o comportamento da mesma em espaço livre. Esse comportamento foi feito com recurso a câmara anecóica e ao analisador vetorial E8361A presentes no Instituto Superior Técnico (IST). Na Fig. 27 encontra-se representada a antena colocada no suporte.

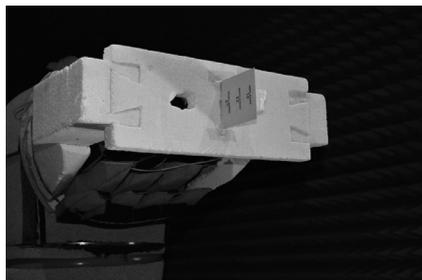
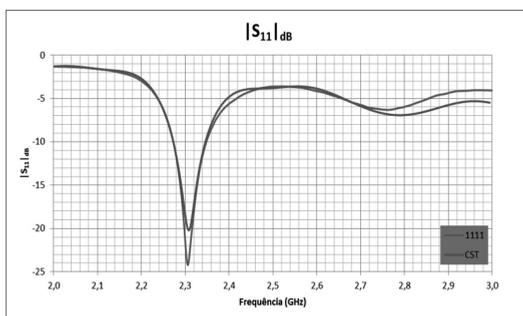


Figura 27 - Antena colocada no suporte

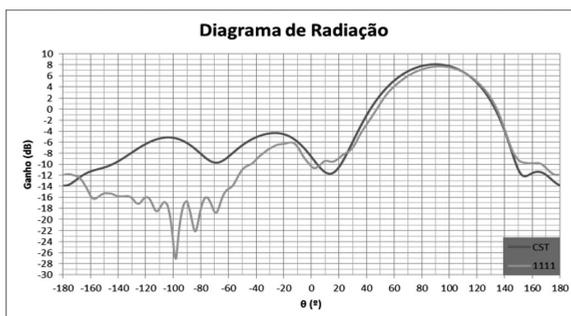
### 6.5.1 Antena com Todos os Diretores em Curto-Circuito

Como se pode ver na Figura 28, as curvas apresentam uma grande semelhança sendo o valor de pico experimental é inferior ao simulado, fazendo com que a antena testada se encontre melhor adaptada que a simulada. O valor experimental é  $-21,238$  dB e o valor simulado vale  $-18,126$  dB na frequência pretendida. Em suma os resultados obtidos experimentalmente são melhores que os simulados. Para facilitar a percepção das figuras e tabelas foi utilizado um código, neste caso utilizou-se o código binário, em que “1” significa que o diretor se encontra em curto-circuito e “0” o diretor que está em aberto. Por exemplo 1111 significa que todos os diretores se encontram em curto-circuito.



**Figura 28** - Comparação dos valores de  $|S_{11}|_{db}$  para a combinação 1111

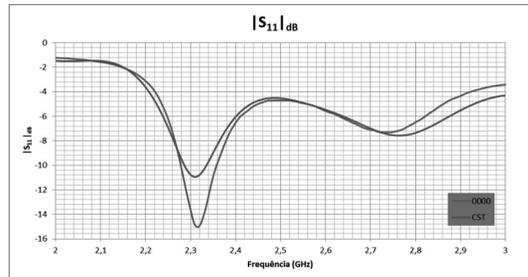
Na Figura 29 pode-se ver a comparação dos diagramas de radiação, o simulado (vermelho) e o medido experimentalmente (verde) no plano E. Estas duas curvas encontram-se praticamente sobrepostas na banda dos  $20^\circ$  até aos  $140^\circ$ , fora desta banda verificamos que as curvas apresentam alguma discrepância mas esta discrepância pode ser explicada pela interferência provocada pela fonte de alimentação e cabos que alimentam os díodos. Esta discrepância faz que a antena medida apresente um nível de lobos secundários inferiores à antena simulada



**Figura 29** Comparação dos diagramas de radiação no plano E para a combinação 1111

### 6.5.2 Antena com Todos os Diretores em Circuito Aberto

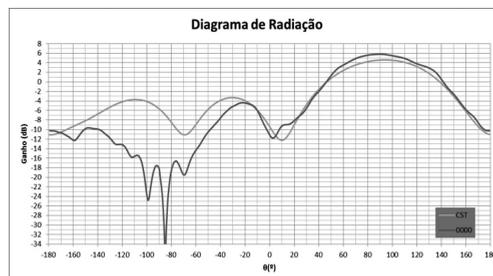
A curva experimental e a curva simulada apresentam uma grande semelhança, como se pode ver na Figura 30. Tal como acontecia na combinação anterior também o valor de pico medido é inferior ao simulado, neste caso é cerca de 4 dB inferior.



**Figura 30** Comparação dos valores de  $|S_{11}|_{db}$  para a combinação 0000

O diagrama de radiação no plano E apresenta uma grande semelhança entre os  $20^\circ$  e os  $180^\circ$ , diferindo ligeiramente no valor de pico e na sua localização, como pode ser visto na Figura 31. O valor de ganho medido, 5,8 dB, é superior ao valor de ganho esperado.

Fora desta banda as curvas apresentam alguma divergência, sendo melhor a curva medida.



**Figura 31** Comparação dos diagramas de radiação no plano E para a combinação 0000

Na Tabela 8 e Tabela 9, encontra-se o resumo das medidas experimentais e das simulações. Como podemos visualizar todas os resultados medidos apresentam-se melhores que os simulados, fazendo com que a antena construída tenha melhores condições de propagação que a esperada. Podemos ainda visualizar que a combinação 1101 apresenta uma grande diferença da simulada, apresentando neste caso um ganho mais elevado e uma HPBW mais baixa.

**Tabela 8** - Valores Experimentais

Combinações	Medidas Experimentais			
	$ S_{11} _{dB}$	Loc. do máx. (°)	Ganho (dB)	HPBW (°)
0000	-13,6	90	5,8	76
1000	-18,2	89	7,064	65
1100	-19,9	87	7,231	60
1101	-20,3	91	7,881	54
1111	-21,3	92	7,746	58

**Tabela 9** - Valores Simulados

Combinações	Medidas Simulados			
	$ S_{11} _{dB}$	Loc. do máx. (°)	Ganho (dB)	HPBW (°)
0000	-10,8	94	4,6	75,9
1000	-16,9	92	6,4	67,9
1100	-16,9	90	7,9	63,8
1101	-18,3	90	7,7	61,4
1111	-18,1	90	8,1	58,8

Os resultados para o plano H, não são apresentados mas apresentam um comportamento semelhante ao apresentado no plano E, ou seja, todos os resultados medidos são melhores que os esperados.

## 7 DIMENSIONAMENTO DA ANTENA A CONSTRUIR NO FUTURO

### 7.1 DIMENSIONAMENTO

Pelos motivos já anteriormente referidos não foi possível construir uma nova antena dimensionada para o substrato Rogers RO3003<sup>TM</sup>. No entanto nesta secção 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 o dimensionamento desta antena foi usado o mesmo método apresentado anteriormente.

Para otimizar as dimensões obtidas foram usadas as referências Parameter Sweep e Optimazer do programa CST MWS. As novas dimensões encontram-se presentes nas Tabela 10. Estas dimensões encontram-se referidas ao elemento ativo.

**Tabela 10** - Dimensões Finais da Antena Yagi – Uda Impressa no substrato RO3003TM

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

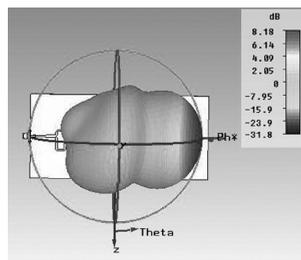
O dimensionamento do balun também foi obtido com a ajuda destas duas ferramentas. Inicialmente usaram-se as medidas apresentadas para o primeiro substrato e depois foram aplicadas as duas ferramentas para achar quais os valores que permitem obter o menor valor do  $|S_{11}|_{dB}$ , os resultados obtidos encontram-se na Tabela XI.

**Tabela 11** - Medidas do Balun Utilizado para o substrato RO3003TM

Balun		
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	

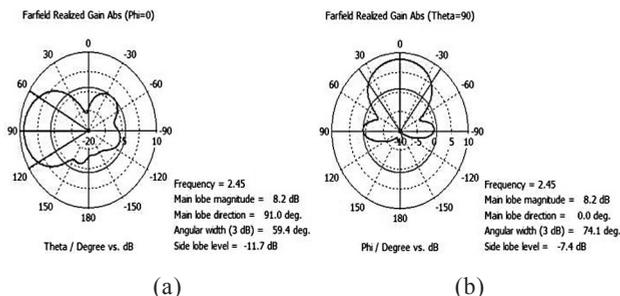
## 7.2 SIMULAÇÃO

O diagrama de radiação em 3D para a frequência de 2,45 GHz encontra-se na Figura 32.

**Figura 32** - Diagrama de radiação em 3D

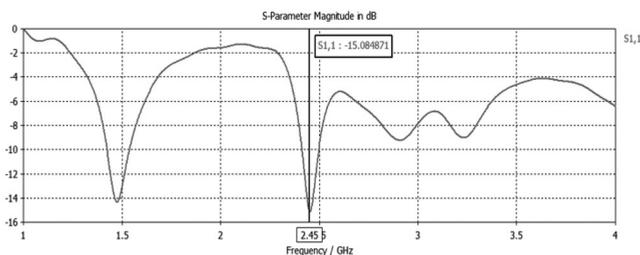
O ganho da antena, 8,18 dB, pode ver visto na Figura 31 e os diagramas de radiação polar para os dois planos na Figura 33.

Esta antena apresenta uma HPBW no plano elétrico de 59,4° e no plano magnético 74,1°. O NLS apresenta valores aceitáveis nos dois planos podendo considerar-se que estes não afetam a radiação no lobo principal.



**Figura 33** - (a) Diagrama de radiação no plano E (b) Diagrama de radiação no plano H

Relativamente a adaptação esta antena encontra-se completamente adaptada como pode ser visto na Figura 34,  $|S_{11}|_{dB} = -15,08$  dB. Pode-se ainda verificar que o pico com melhor definição se encontra centrado na frequência de trabalho.



**Figura 34** - Módulo do Coeficiente de onda estacionária

### 7.3 COMPARAÇÃO DAS ANTENAS

Quando comparamos estas duas antenas chegamos a 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 12 encontram-se representadas as características de radiação das duas antenas para uma melhor comparação.

**Tabela 12** - Comparação das Duas Antenas

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

## 8. CONCLUSÕES

O grande objetivo deste trabalho foi dimensionar, construir e analisar uma antena que permitisse a regulação da amplitude do ganho e da sua largura de feixe a meia potência, tendo em vista o controlo wireless do robot. Tendo em vista esse objetivo começou-se pelo dimensionamento de uma antena Yagi - Uda convencional. Após comparar-se os resultados medidos e simulados, verificou-se uma grande semelhança, sendo que a diferença entre ganhos segundo o plano elétrico (Plano E) é nulo e no plano magnético (Plano H) é de apenas 0,18 dB. Quanto á adaptação da antena verifica-se que a diferença entre o valor simulado ( $S_{11} = -15.189$  dB) e medido ( $S_{11} = -17.58$  dB) é menor que 2.5 dB. A antena Yagi-Uda convencional dimensionada foi o ponto de partida para o dimensionamento das novas antenas. Para se obter a antena Yagi-Uda Impressa com regulação da HPBW teve de se encontrar um método para dimensionar a mesma. Começou-se por dimensionar uma antena Yagi-Uda convencional, e só depois de se ter efetuado 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, depois da uma análise a cada um dos algoritmos optou-se por usar o Algoritmo Genético. Esta escolha deve-se ao facto de estes serem 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. Após a verificação das características de radiação da antena convencional decidiu-se utilizar as dimensões desta antena para fazer o dimensionamento da antena impressa, 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 recaiu sobre o substrato Gil GML 1000, sendo a antena impressa dimensionada para funcionar neste substrato, este substrato foi escolhido por conter uma permitividade dielétrica relativa baixa,  $\epsilon_r = 3,2114 \pm 0,05$ , uma tangente do ângulo de perdas,  $\tan \delta = 0,0018 @ 2,45$  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 controlar as características de radiação da antena, modificou-se a estrutura da antena e introduziram-se díodos pin. Os díodos pin tinham a função de estabelecer o curto-circuito entre os “braços” dos diretores quando polarizados diretamente e o circuito aberto quando polarizados inversamente. Após a visualização das medidas experimentais da antena impressa, pode-se afirmar que o protótipo da antena construída com os díodos permite a regulação das características de radiação da antena.

## 9. BIBLIOGRAFIA

J. P. A. P. R. Guerra, *Projecto, Realização e Teste de um Agregado de Antenas Helicoidais*, Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2010.

C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, INC, 1997.

J. D. Kraus, *Antennas*, Estados Unidos da América: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1950.

A. C. d. C. Lima, *Fundamentos de Telecomunicações: Teoria Eletromagnética e Aplicações*, Salvador: P&A Editora, 2005.

A. S. d. C. Fernandes, *Antenas de onda estacionária: Métodos e modelos de análise*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979.

R. S. Elliot, *Antenna Theory and Design: Revised Edition*, New Jersey: John Wiley & Sons, INC, 2003.

H.-C. Huang, J.-C. Lu e P. Hsu, “A Simple Planar High-Directivity Yagi-Uda Antenna with a Concave Parabolic Reflector,” *IEEE*, 2010.

Y. Kuwahara, “Multiobjective Optimization Design of Yagi-Uda Antenna,” *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 53, pp. 1984-1992, Junho, 2005.

C. A. Chen e D. K. Cheng, “Optimum element lengths for Yagi-Uda arrays,” *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 1, pp. 8-15, 1975.

D. K. Cheng e C. A. Chen, "Optimum Element Spacings for Yagi-Uda Arrays," IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, Vol. 1, pp. 615-623, 1973.

J. L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, McGraw-Hill Companies, 2007. Technologies, GIL. GML 1000 High Frequency Laminate.

Polivka, T. Korinek e M. Planar Five-Element Yagi-Uda Antenna. Dept. of Electromagnetic Field at Electrotechnical Faculty of CTU in Prague.

P. R. Grajek, B. Schoenlinner e G. M. Rebeiz. A 24-GHz High-Gain Yagi-Uda Antenna Array. s.l. : IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 5, May 2004.

H. Karbalaee, M. R. Salehifar e S. Soleimany. Designing Yagi-Uda Antenna Fed by Microstrip Line and Simulated by HFSS. IEEE, 2012.

Gonçalo Soeiro is a Lieutenant from the Signal Corps of Portuguese Army. He holds a Master degree in Military Electrical Engineering from the Portuguese Military Academy.

Tiago Almeida is a Lieutenant from the Signal Corps of Portuguese Army. He holds a Master degree in Military Electrical Engineering from the Portuguese Military Academy.

Maria João Martins Completed the "Licenciatura" and Doctoral Degree, both at Instituto Superior Tecnico, Lisbon, where she taught as Professor in the Department of Electrical and Computer Engineering. She was an invited Professor in the Universities of Karlsruhe, Germany, (1992) and Rennes I, France (2004), She served as Expert-evaluator for the European Commission, in the 5th and 6th Framework Programs. She is since 2012 Professor in the Military Academy in Lisbon.

António Baptista Completed the "Licenciatura", Master and Doctoral Degree, at Instituto Superior Tecnico, Lisbon, where he has been teaching as Professor in the Department of Electrical and Computer Engineering to the present day.