

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ISRAEL SPEROTTO DE MELLO**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**ENGENHARIA DE ANTENAS: UMA ABORDAGEM  
DIDÁTICA PARA ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO**

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ENGENHARIA DE ANTENAS: UMA ABORDAGEM  
DIDÁTICA PARA ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ISRAEL SPEROTTO DE MELLO

## **ENGENHARIA DE ANTENAS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA PARA ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica (UNICAMP, Campinas, Brasil)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP – Campinas, Brasil.

Prof. Msc. Ivan Muller, UFRGS

Mestre em Engenharia Elétrica pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Eng. André Michielin Câmara, UFRGS

Engenheiro Eletricista pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil.

Porto Alegre, Julho de 2011.

## **DEDICATÓRIA**

A todas as pessoas que me apoiaram e tornaram este trabalho possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pela força e apoio para chegar até aqui.

Aos meus colegas e amigos, sem os quais este trabalho não existiria.

À minha namorada, Mariana, pela compreensão e pelo apoio incondicional.

À Universidade, pelo ensino de qualidade.

Aos professores que dedicaram parte do seu tempo para a minha formação, em especial ao meu orientador.

## **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo a realização de uma série de experimentos sobre Antenas utilizando o equipamento educacional da empresa Minipa adquirido pela universidade, visando criar um material de apoio didático ao estudo de Antenas. É realizada uma análise qualitativa e quantitativa dos experimentos através da determinação do diagrama de irradiação e do ângulo de meia potência das Antenas, bem como análises relativas a modificações na estrutura das antenas e no casamento de impedância. Quatro diferentes tipos de antenas são estudados neste trabalho: Antena Dipolo de Meia Onda, Antena Dipolo Dobrado, Antena Yagi e Antena Corneta.

**Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Antenas. Diagramas de Irradiação. Medição de Ângulo de Meia Potência.**

## **ABSTRACT**

This study aims to carry out a series of experiments on Antennas using the educational equipment of Minipa Company, acquired by the university, to create a didactic material to support the study of antennas. It performed a qualitative and quantitative analysis of experiments by plotting the radiation diagram and determining the antenna's half-power beamwidth, as well as analysis related to changes in the structure of the antennas and impedance matching. Four different types of antennas are studied in this work: half-wave dipole antenna, Folded Dipole Antenna, Yagi Antenna and Antenna Horn.

**Keywords: Electrical Engineering. Antennas. Radiation Diagrams. Measurement of Half Wave Beamwidth.**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Motivação e Objetivos .....	15
1.2	Estrutura do Trabalho .....	16
2	CARACTERÍSTICAS DOS INSTRUMENTOS DO KIT DIDÁTICO .....	17
2.1	Controlador Principal ( <i>Main Controller</i> ) .....	17
2.2	Antenna Trainer Software .....	24
2.3	Unidade Transmissora ( <i>Transmit Unit</i> ) .....	28
2.3.1	Base da Unidade Transmissora .....	28
2.3.2	Suporte da Antena Transmissora .....	29
2.3.3	Antena Transmissora .....	31
2.4	Unidade Receptora ( <i>Receive Unit</i> ).....	32
2.4.1	Base da Unidade Receptora .....	32
2.4.2	Suporte da Antena Receptora .....	34
2.4.3	Antena Receptora .....	35
2.5	Tipos de Antenas.....	35
2.5.1	Antena Dipolo de Meia Onda .....	38
2.5.2	Antena Dipolo Dobrado .....	40
2.5.3	Antena Yagi.....	41
2.5.4	Antena Corneta.....	42
3	EXPERIMENTO 1 – ANTENA DIPOLO DE MEIA ONDA .....	44
3.1	Fundamentos .....	44
3.1.1	Ressonância do Condutor .....	44
3.1.2	Funcionamento do Dipolo de Meia Onda.....	46
3.1.3	Diretividade .....	47
3.1.4	Impedância do Dipolo de Meia Onda .....	48
3.1.5	Ganho.....	48
3.2	Procedimento Experimental .....	50
3.3	Conclusões .....	65
4	EXPERIMENTO 2 – ANTENA DIPOLO DOBRADO DE MEIA ONDA...	67
4.1	Fundamentos .....	67
4.1.1	Características Físicas do Dipolo Dobrado de Meia Onda .....	68
4.1.2	Impedância do Dipolo Dobrado de Meia Onda.....	69
4.1.3	Casamento de Impedância .....	72
4.2	Procedimento Experimental .....	75
4.3	Conclusões .....	85
5	EXPERIMENTO 3 – ANTENA YAGI.....	86
5.1	Fundamentos .....	86
5.1.1	Construção e Funcionamento da Antena Yagi .....	86
5.1.2	Relação Entre o Número de Elementos e o Ganho da Antena Yagi .....	89
5.1.3	Aplicações da Antena Yagi .....	91
5.2	Procedimento Experimental .....	92
5.3	Conclusões .....	102
6	EXPERIMENTO 4 – ANTENA CORNETA .....	103
6.1	Fundamentos .....	103
6.1.1	Funcionamento da Antena Corneta .....	103
6.1.2	Geometria da Antena Corneta .....	104
6.1.3	Diretividade da Antena Corneta .....	109
6.2	Procedimento Experimental .....	110



<b>6.3</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>119</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>120</b>
<b>7.1</b>	<b>Sugestões Para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>121</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>
	<b>anexo A – programa em matlab para obtenção do diagrama de irradiação do dipolo de meia onda</b>	<b>124</b>
	<b>anexo B – Análise da inadequação do ambiente de trabalho citando como exemplo o experimento realizado com a antena monopolo .....</b>	<b>125</b>
	<b>ANEXO C – ANTENA DROOPING .....</b>	<b>130</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Controlador Principal.....	18
Figura 2.2. Modulação AM ( <i>Amplitude Modulation</i> ).....	19
Figura 2.3. Detalhe do painel frontal do controlador principal responsável pela transmissão. ....	19
Figura 2.4. Cabo SMA.....	20
Figura 2.5. Detalhe do painel frontal do controlador principal responsável pela recepção. ....	21
Figura 2.6. Cabo BNC.....	21
Figura 2.7. Fluxograma do Sistema.....	22
Figura 2.8. Parte posterior do controlador principal.....	23
Figura 2.9. Representação de um conector DB-15 (a). Representação de um conector DB-9 (b). ....	24
Figura 2.10. Janela do programa responsável pela análise dos dados adquiridos.....	26
Figura 2.11. Janela de seleção de porta. ....	26
Figura 2.12. Janela do programa responsável pela aquisição dos dados.....	27
Figura 2.13. Base da unidade de transmissão.....	29
Figura 2.14. Suporte da antena transmissora. (a) Peças que compõem o suporte. (b) Suporte montado. ....	30
Figura 2.15. Peças complementares ao suporte da antena.....	30
Figura 2.16. Unidade de transmissão montada com as duas antenas. Antena Corneta (a) e Antena Yagi (b). ....	31
Figura 2.17. Detalhe das conexões na base da unidade receptora.....	32
Figura 2.18. Conexão RF IN. ....	33
Figura 2.19. Base da unidade receptora.....	34
Figura 2.20. Suporte da antena receptora e peças auxiliares.....	35
Figura 2.21. Diferentes tipos de antenas.....	36
Figura 2.22. Disposição das antenas na caixa. ....	37
Figura 2.23. Representação da antena Dipolo de Meia Onda. ....	38
Figura 2.24. Peças de montagem da antena dipolo de meia onda. ....	39
Figura 2.25. Antena Dipolo de Meia Onda do Sistema de Treinamento em Antenas.....	39
Figura 2.26. Antena dipolo dobrado do Sistema de Treinamento em Antenas.....	40
Figura 2.27. Geometria da antena Yagi.....	41
Figura 2.28. Antena Yagi do Sistema de Treinamento em Antenas.....	42
Figura 2.29. Antena Corneta do Sistema de Treinamento em Antenas.....	42
Figura 3.1. Ressonância no condutor de comprimento $\lambda/2$ . ....	45
Figura 3.2. Distribuição de cargas no dipolo de meia onda. ....	46
Figura 3.3. Distribuição de corrente tensão no dipolo de meia onda. ....	47
Figura 3.4. Diretividade do campo do dipolo de meia onda.....	47
Figura 3.5. Antena Yagi em polarização horizontal.....	50
Figura 3.6. Antena dipolo de meia onda em polarização horizontal e alinhada com o eixo do rotor. ....	51
Figura 3.7. Comprimento real da antena. ....	53
Figura 3.8. Distância entre as antenas, ambas em polarização horizontal.....	54
Figura 3.9. Janela de aquisição de dados ajustada para o primeiro experimento. ....	55
Figura 3.10. Diagrama de irradiação teórico, no plano de Elevação, do dipolo de meia onda polarizado horizontalmente. ....	56
Figura 3.11. Diagrama de irradiação da antena dipolo de meia onda. ....	57
Figura 3.12. Antena Yagi em polarização vertical. ....	58
Figura 3.13. Antena dipolo de meia onda em polarização vertical. ....	59

Figura 3.14. Diagrama de irradiação no plano Horizontal da antena dipolo de meia onda com polarização vertical.....	60
Figura 3.15. Plano de Elevação e Plano Horizontal da antena dipolo de meia onda. ....	61
Figura 3.16. Ângulo de meia potência determinado pelo programa. ....	63
Figura 3.17. Determinação manual do ângulo de meia potência.....	64
Figura 3.18. Plotagem da Eq. 3.16 obtida através do Matlab.....	66
Figura 4.1. Linha de transmissão paralela com condutores isolados.....	68
Figura 4.2. Dipolo Dobrado de Meia Onda. ....	69
Figura 4.3. Tensão aplicada no dipolo dobrado. ....	69
Figura 4.4. Gráfico de alteração da impedância em relação à geometria do dipolo dobrado. Utiliza-se a seguinte notação: S é o espaçamento entre os condutores; $d_1$ e $d_2$ são os diâmetros dos condutores. ....	71
Figura 4.5. Condição para o casamento ideal de impedância.....	72
Figura 4.6. Construção do Balun 4:1.....	74
Figura 4.7. Antenas Yagi e Dipolo Dobrado em polarização horizontal. ....	76
Figura 4.8. Variáveis a serem medidas do Dipolo Dobrado.....	77
Figura 4.9. Alinhamento das antenas na polarização horizontal. ....	78
Figura 4.10. Diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado em polarização horizontal.....	79
Figura 4.11. Superposição dos diagramas de irradiação do Dipolo Dobrado e do Dipolo de Meia Onda. ....	80
Figura 4.12. Antenas Yagi (a) e Dipolo Dobrado (b) em polarização vertical.....	81
Figura 4.13. Diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado em polarização vertical.....	81
Figura 4.14. Determinação do ângulo de meia potência. ....	82
Figura 4.15. Diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado adquirido sem a utilização do <i>Balun</i> . ....	83
Figura 4.16. Sobreposição dos diagramas de irradiação do Dipolo Dobrado com e sem a utilização do <i>Balun</i> . ....	84
Figura 5.1. Elementos da Antena Yagi.....	87
Figura 5.2. Ganho máximo em função do número de elementos.....	89
Figura 5.3. Antenas Yagis em polarização horizontal. (a) Yagi Transmissora. (b) Yagi Receptora. ....	93
Figura 5.4. Alinhamento das antenas Yagis em polarização horizontal.....	94
Figura 5.5. Diagrama de irradiação teórico de uma antena Yagi de seis elementos, no plano de Elevação.....	95
Figura 5.6. Diagrama de irradiação da Antena Yagi no Plano de Elevação (Plano E) obtido experimentalmente.....	96
Figura 5.7. Antena Yagi polarizada verticalmente.....	97
Figura 5.8. Diagrama de irradiação teórico de uma antena Yagi de seis elementos, no plano Horizontal.....	97
Figura 5.9. Diagrama de irradiação da Antena Yagi no Plano Horizontal (Plano H) obtido experimentalmente.....	98
Figura 5.10. Determinação do ângulo de meia potência nos Planos E e H da Antena Yagi. ...	99
Figura 5.11. Diagrama de irradiação da Antena Yagi com espaçamento de 0,115m entre os diretores. ....	101
Figura 5.12. Diagrama de irradiação da Antena Yagi com espaçamento de 0,125m entre os diretores. ....	102
Figura 6.1. Antena Corneta Retangular com abertura Piramidal. ....	104
Figura 6.2. Antena Corneta Piramidal e notações. ....	105
Figura 6.3. Seção vertical do Plano E da antena Corneta.....	106
Figura 6.4. Seção horizontal do Plano H da antena Corneta. ....	107

Figura 6.5. Medidas realizadas nos Planos E e H de antenas cornetas retangulares variando o ângulo de abertura e o comprimento radial. ....	108
Figura 6.6. Gráfico do ângulo de meia potência em função do comprimento axial e do ângulo de abertura. ....	109
Figura 6.7. Antenas Corneta. (a) Transmissora. (b) Receptora. ....	111
Figura 6.8. Alinhamento das antenas Corneta em polarização horizontal. ....	112
Figura 6.9. Diagrama de irradiação da Antena Corneta no plano de Elevação. ....	114
Figura 6.10. Diagrama de irradiação da Antena Corneta no plano de Elevação com a escala corrigida. ....	115
Figura 6.11. Antena Corneta em polarização vertical. ....	116
Figura 6.12. Diagrama de irradiação da Antena Corneta no plano Horizontal. ....	117
Figura 6.13. Determinação do ângulo de meia potência nos Planos E e H da Antena Corneta. ....	118
Figura B.1. Monopolo $\lambda/4$ e a “antena imagem”.....	125
Figura B.2. Padrão de irradiação do Monopolo $\lambda/4$ no plano de Elevação. ....	126
Figura B.3. Diagrama de irradiação do Monopolo $\lambda/4$ no plano Horizontal (Antena Polarizada Verticalmente). ....	127
Figura B.4. Diagrama de irradiação do Monopolo $\lambda/4$ no plano de Elevação (Antena Polarizada Horizontalmente). ....	128
Figura C.1. Esquema representativo da antena Drooping. ....	130
Figura C.2. Antena Drooping do Sistema de Treinamento em Antenas. ....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tipos de antenas do Kit. ....	36
Tabela 3.1. Comprimento da antena dipolo de meia onda. ....	53
Tabela 3.2. Intensidade do sinal em cada ângulo. ....	61
Tabela 3.3. Validação do MSL. ....	62
Tabela 4.1. Dimensões da antena Dipolo Dobrado para a frequência de 500MHz. ....	77
Tabela 4.2. Comparação do ganho da antena com e sem <i>Balun</i> . ....	84
Tabela 5.1. Comprimento da antena dipolo de meia onda. ....	88
Tabela 5.2. Espaçamento entre os elementos em função do número destes. ....	90
Tabela 5.3. Espaçamento entre os elementos: comparação entre teoria e prática. ....	90
Tabela 6.1. Medições realizadas na Antena Corneta. ....	112

## LISTA DE ABREVIATURAS

AM: Modulação em Amplitude (*Amplitude Modulation*).

BNC: Tipo de Conector de Cabo Coaxial (*Bayonet Neill-Concelman*).

CCW: Sentido Anti-horário (*Counterclockwise*).

CW: Sentido Horário (*Clockwise*).

DTE: Terminal de Dados (*Data Terminal Equipment*).

DCE: Comunicador de Dados (*Data Communication Equipment*).

GHZ: Giga Hertz ( $10^9$  ou 1.000.000.000 Hertz).

HPBW: Ângulo de Meia Potência (*Half Power Beamwidth*).

kHz: kilo Hertz ( $10^3$  ou 1.000 Hertz).

MHz: Mega Hertz ( $10^6$  ou 1.000.000 Hertz).

MSL: Nível de Máximo Sinal (*Maximum Signal Level*).

OEM: Onda Eletromagnética.

RF: Frequência de Rádio (*Radio Frequency*).

SMA: Tipo de Cabo Coaxial (*SubMiniature Version A*).

SWR: Taxa de Onda Estacionária (*Standing Wave Ratio*).

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VHF: Frequência Muito Alta (*Very High Frequency*).

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Neste trabalho são analisadas experimentalmente as características e propriedades de diferentes tipos de antenas utilizando o Sistema de Treinamento em Antenas da empresa Minipa. O objetivo principal é criar um material de apoio didático para o estudo de antenas e propagação em nível de ensino de graduação. Para tanto, faz-se necessário estudar o funcionamento dos diferentes equipamentos de transmissão, recepção e medição, bem como a funcionalidade de cada tipo de antena. O equipamento disponível para este estudo trabalha em alta frequência, desta maneira é possível realizar experiências para determinar as características de propagação da antena em um espaço físico pequeno.

Neste trabalho, são estudados quatro tipos de antenas:

1. *Antena Dipolo  $\lambda/2$* : é a antena mais comumente utilizada e também a mais simples. Consiste de duas hastes metálicas alinhadas em um comprimento total de meio comprimento de onda.
2. *Antena Dipolo Dobrado*: também conhecida como *Dipolo Fechado*, é bastante utilizada em sinais VHF (*Very High Frequency*).
3. *Antena Yagi*: é a antena mais representativa para a irradiação longitudinal. É formada por um dipolo de meia onda como elemento irradiador conectado diretamente ao transmissor. Possui também um elemento refletor e um ou mais elementos diretores não conectados ao transmissor, chamados de elementos parasitas.
4. *Antena Corneta*: propaga ondas eletromagnéticas presentes no interior de um guia de onda.

Observa-se que para a antena Yagi é possível controlar o número de elementos e o espaçamento entre eles, permitindo que se projete uma antena com características particulares, tais como diagrama de irradiação de ganho diretivo.

Este trabalho não tem como foco a explicação detalhada sobre Teoria de Antenas, por isso é apoiado nos livros textos de referência. Contudo, os tópicos importantes serão citados a partir destas fontes para as devidas explicações quando necessário para o adequado acompanhamento da experiência prática.

## **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho é organizado como segue: O Cap. 2 descreve os componentes e instrumentos do Sistema de Treinamento em Antenas desenvolvido pela empresa Minipa. Os capítulos subsequentes apresentam um conjunto de experiências propostas, sendo estruturados da seguinte maneira: descrição dos objetivos, estudo básico, descrição do procedimento experimental adotado e os resultados alcançados. Isto posto, o Cap. 3 versa sobre uma experiência para a medição do padrão radial da antena Dipolo  $\lambda/2$ , bem como suas características de polarização e largura do feixe de irradiação. O Cap. 4 analisa as características de irradiação da antena Dipolo Dobrado através da medição do diagrama de irradiação. Cap. 5 descreve uma experiência para a medição do padrão radial da antena Yagi, bem como suas características de polarização e largura do feixe de irradiação. No Cap. 6 é apresentada a experiência de medição do padrão radial da antena Corneta e cálculo da largura do feixe de irradiação. Finalmente, as conclusões e os principais resultados obtidos estão contidos no Cap. 7.



## 2 CARACTERÍSTICAS DOS INSTRUMENTOS DO KIT DIDÁTICO

O Sistema de Treinamento em Antenas é composto por diferentes tipos de equipamentos e dispositivos, utilizados de maneira integrada para as práticas didáticas descritas ao longo deste trabalho.

Na seção 2.1 é descrito o equipamento responsável pelo controle da unidade de recepção e pelo interfaceamento entre o ambiente de medição das ondas eletromagnéticas (OEM) e o computador. Para auxiliar no interfaceamento é utilizado um software fornecido pela Minipa, descrito na seção 2.2. Nas seções 2.3 e 2.4 são descritas, respectivamente, as unidades de transmissão e recepção. Por fim, na seção 2.5 são caracterizados os diferentes tipos de antenas contidos no Kit didático.

### 2.1 CONTROLADOR PRINCIPAL (*MAIN CONTROLLER*)

O controlador principal exerce quatro funções principais:

- Transporta o sinal de RF (*Radio Frequency*) até a antena de transmissão;
- Adquire o sinal captado pela antena receptora instalada na unidade de recepção;
- Transmite os dados recebidos para o computador;
- Controla o ângulo de rotação da base da unidade receptora.

Seu painel frontal é dividido em transmissor (*Transmitter*) e receptor (*Receiver*), conforme mostra a Fig. 2.1.



Figura 2.1. Controlador Principal.

A parte do equipamento responsável pela transmissão possui quatro botões seletores: dois botões de ajuste e três conectores para cabos SMA (*SubMiniature Version A*).

O botão seletor vermelho é responsável por ligar ou desligar um sinal de áudio de  $1\text{kHz}$  que modula a portadora de RF (conforme mostra a Fig. 2.2). O sistema de medição de intensidade de sinal do equipamento é relativo, ou seja, compara o sinal captado com o sinal que foi enviado. O controlador emite um sinal com uma potência de aproximadamente  $10\text{mW}$  e conforme varia o nível de sinal captado, o controlador mostra o ganho de sinal no display denominado de “*signal level*”. O objetivo desta modulação, além de possibilitar uma medição de intensidade de relativa de sinal, é diminuir erros na manipulação dos instrumentos, pois sinais de alta frequência geram ruídos com muita facilidade, de modo que, baseando-se na modulação de  $1\text{kHz}$  os ruídos tornam-se desprezíveis.

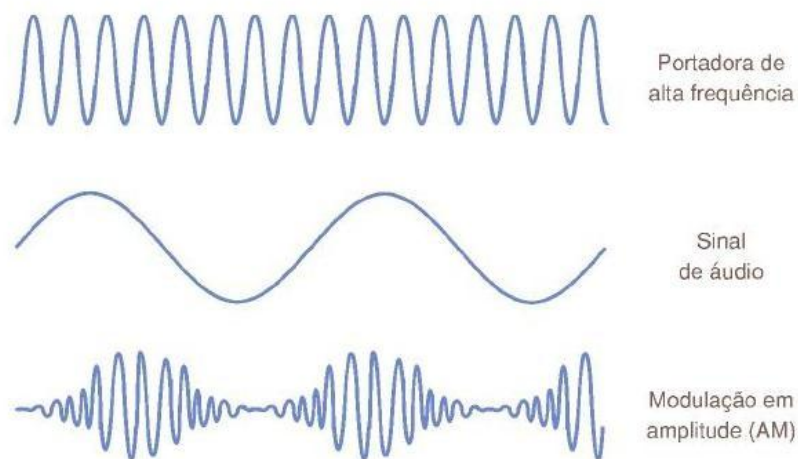


Figura 2.2. Modulação AM (*Amplitude Modulation*).

Os outros três botões servem para selecionar a frequência de operação desejada. Na Fig. 2.3 podemos ver com clareza as frequências selecionáveis: 500MHz, 2GHz e 10GHz. Para cada uma das frequências há um conector de saída que, através de um cabo SMA (conforme mostra a Fig. 2.4), leva o sinal a ser transmitido para a antena.



Figura 2.3. Detalhe do painel frontal do controlador principal responsável pela transmissão.

Os dois botões restantes servem para o ajuste fino das frequências de 500MHz e 2GHz. Conforme o manual, nas posições de mínimo e máximo dos botões de ajuste, as frequências variam de 480MHz a 650MHz e 1,85GHz a 2,35GHz, respectivamente. A frequência de 10GHz não possui um ajuste fino.



Figura 2.4. Cabo SMA.

A Fig. 2.5 mostra a parte responsável pela recepção do sinal de RF do equipamento de controle. Este sistema de recepção apresenta:

- Dois displays, um para o nível de sinal e outro para a posição da antena;
- Botão ON/OFF, responsável por ligar e desligar o controlador;
- Entrada (*Input*) de 1kHz através de um conector BNC (*Bayonet Neill-Concelman*) fêmea que recebe o sinal proveniente da unidade recepção. O cabo BNC macho que realiza esta conexão pode ser observado na Fig. 2.6;
- Quatro botões de controle de rotação da base: “CW”, “CCW”, “*Origin*” e “*Step*”.



Figura 2.5. Detalhe do painel frontal do controlador principal responsável pela recepção.



Figura 2.6. Cabo BNC.

O display denominado “*Signal Level*” possui 4 dígitos e mostra o ganho de sinal em uma faixa de  $-50\text{dBi}$  a  $0\text{dBi}$ . O mostrador chamado de “*Antenna Position*” possui três dígitos e exibe o ângulo de revolução da base da unidade receptora, medido em graus e variando de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Os botões “CW” (*Clockwise*) e “CCW” (*Counterclockwise*) servem, respectivamente, para girar no sentido horário e anti-horário a base da unidade receptora. O botão “*Origin*” ajusta em zero a posição da base. O botão denominado “*Step*” determina em quantos graus irá girar a base para cada vez que forem pressionados os botões CW e CCW, 1°, 5° ou 10°.

O sinal recebido no plug de entrada de 1kHz é a demodulação do sinal que foi enviado pela antena transmissora.

A Fig. 2.7 mostra um diagrama de fluxo que explica o funcionamento do equipamento.

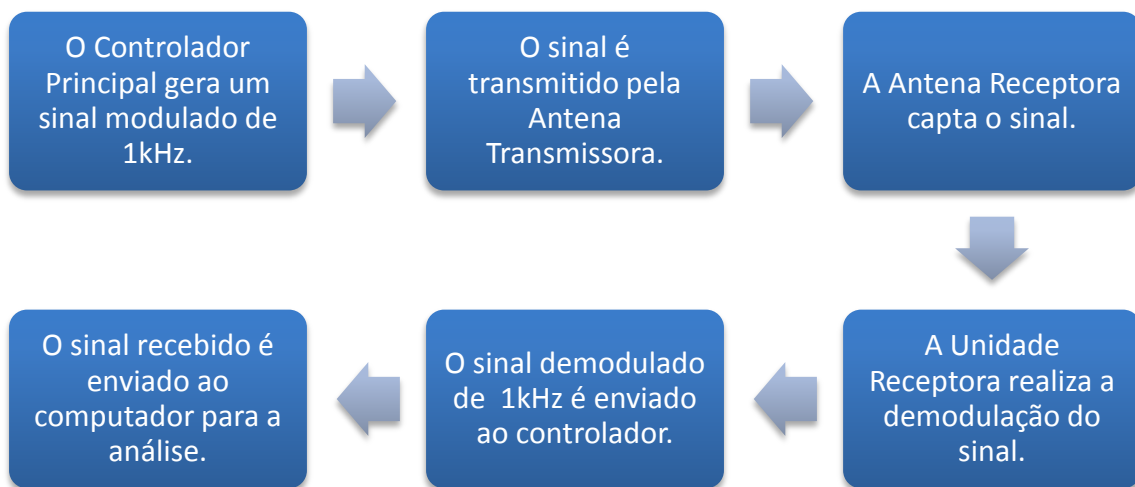


Figura 2.7. Fluxograma do Sistema.



A parte de trás do controlador principal possui três conexões, conforme é mostrado na

Fig. 2.8:

- Alimentação de 220V apenas e corrente máxima de 1A.
- Saída de controle (*Control Out*).
- Porta serial no padrão RS-232C.



Figura 2.8. Parte posterior do controlador principal.

O terminal denominado “*control out*” é plugado à base da unidade receptora através de um cabo do tipo DB-15 (conforme mostra a Fig. 2.9a). O conector “RS-232C” utiliza um cabo DB-9 (conforme mostra a Fig. 2.9b) para se conectar a porta serial de um computador. O termo RS-232C refere-se ao protocolo serial de transmissão de dados entre o terminal de dados (DTE, neste caso o computador) e o comunicador de dados (DCE, neste caso o controlador principal). Foi padronizado em 1969 pela *Electronics Industries Association* (EIA).

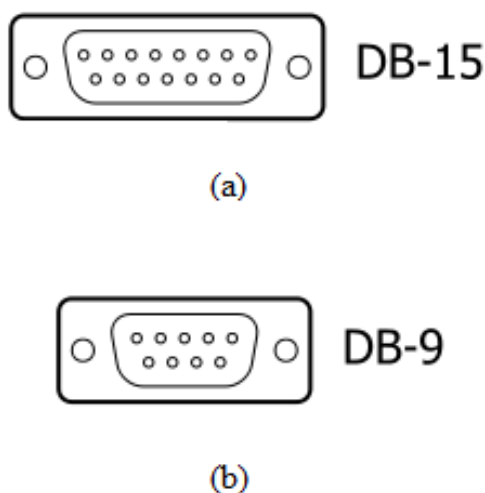


Figura 2.9. Representação de um conector DB-15 (a). Representação de um conector DB-9 (b).

## 2.2 ANTENNA TRAINER SOFTWARE

O software desenvolvido pela Minipa adquire e analisa os dados fornecidos pelo controlador principal. O programa é de simples operação e pode ser dividido em duas partes:

- Análise de dados (conforme mostra a Fig. 2.10);
- Aquisição de dados (conforme mostra a Fig. 2.12).

A janela responsável pela análise dos dados apresenta separadamente informações com relação ao diagrama de irradiação nos planos E e H.

No campo distante os planos E e H são planos ortogonais entre si. Com base na teoria de Coordenadas Altazimutais [6], adota-se o Plano E como sendo o plano de Elevação da antena, ou seja, é medida a variação de intensidade do sinal recebido pela antena em relação ao plano Horizontal. Esta medida é realizada indiretamente, posicionando a antena de maneira horizontal em relação ao plano de terra. Posicionando verticalmente a antena, mede-se o plano Horizontal da antena (Plano H). A união destes dois campos, horizontal e de elevação, forma o diagrama de irradiação da antena.



O software informa também o ângulo e o nível de sinal para os casos em que ele é máximo (botão denominado “*Maximum Signal Level*”) e de meia potência (botão denominado “*Half Power Beamwidth*”). Clicando nestes botões, o programa mostra no gráfico os valores de ângulo e sinal. O símbolo “°” que aparece no programa representa o símbolo de graus (°). Além disso, o programa possui cursores de visualização manual de ângulo e intensidade de sinal localizados abaixo das palavras “*Position*” e “*Signal*”. Estes cursores podem ser habilitados através da opção “*Data Indicator*” da aba “*View*”.

É possível também trabalhar com os dados adquiridos, realizando rotações no eixo polar através dos botões localizados no centro da Fig. 2.10, onde o botão representado por um triângulo gira o gráfico em 1° e o representado por dois triângulos gira o gráfico em 10°. A função dos comandos “*Position*” e “*Signal*” serão explicadas sucintamente quando forem utilizados nos experimentos. É possível ainda visualizar os gráficos em outros planos (cartesiano e 3D).

Ao clicar na aba superior, onde está escrito “*Data Acquisition!*”, uma janela para seleção das portas de comunicação surge, conforme mostra a Fig. 2.11. Na maioria dos casos a porta designada como “*COM1*” é a responsável pela comunicação entre o controlador e o computador.

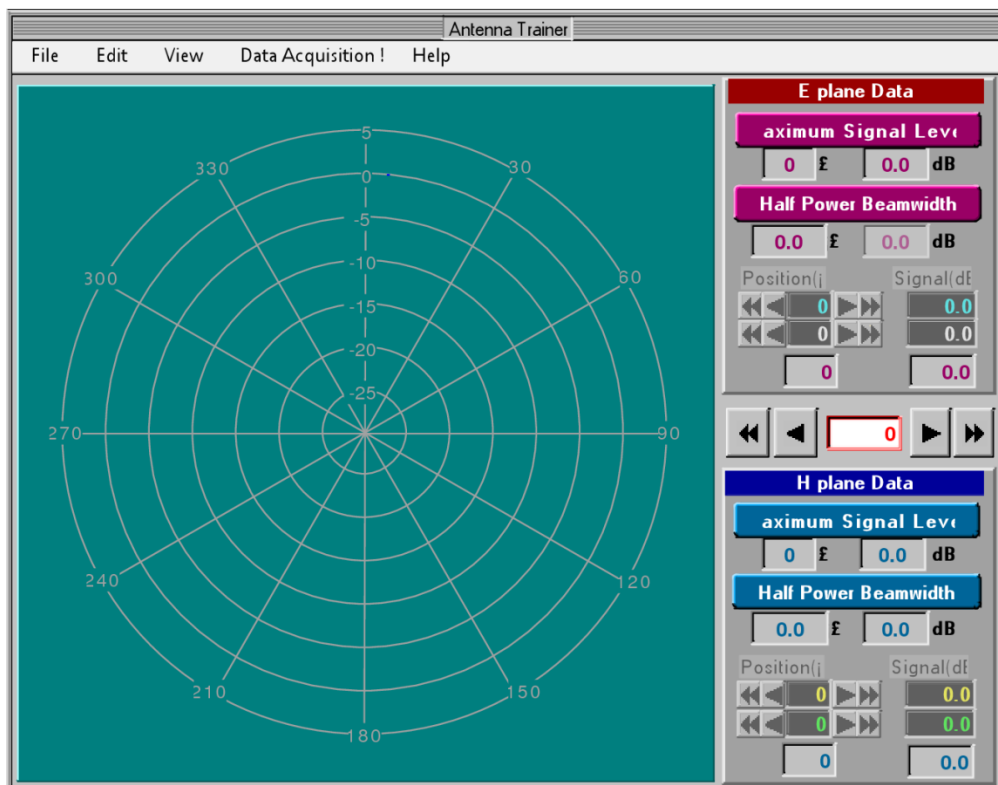


Figura 2.10. Janela do programa responsável pela análise dos dados adquiridos.

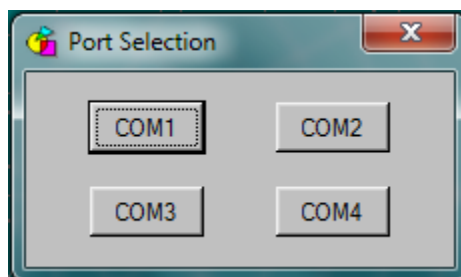


Figura 2.11. Janela de seleção de porta.

Depois de selecionada a porta responsável pela comunicação surge a janela responsável pela aquisição dos dados, conforme mostra a Fig. 2.12. Neste caso, devem ser selecionados o tipo de antena que se está utilizando como receptora e o plano de alinhamento (Horizontal e de Elevação).

O botão denominado “*Reduction*” serve para modificar a intensidade do sinal recebido de maneira que ele fique posicionado no ponto de intensidade zero do gráfico. Por exemplo, no primeiro experimento a ser realizado para cada uma das antenas a intensidade do sinal deve ser ajustada para zero antes de iniciar a aquisição dos dados. Isso pode ser feito para qualquer ângulo, pois os valores adquiridos são em referência ao zero que foi ajustado, mas o fundamental é posicionar a antena receptora na posição de máxima irradiação em relação à antena transmissora.

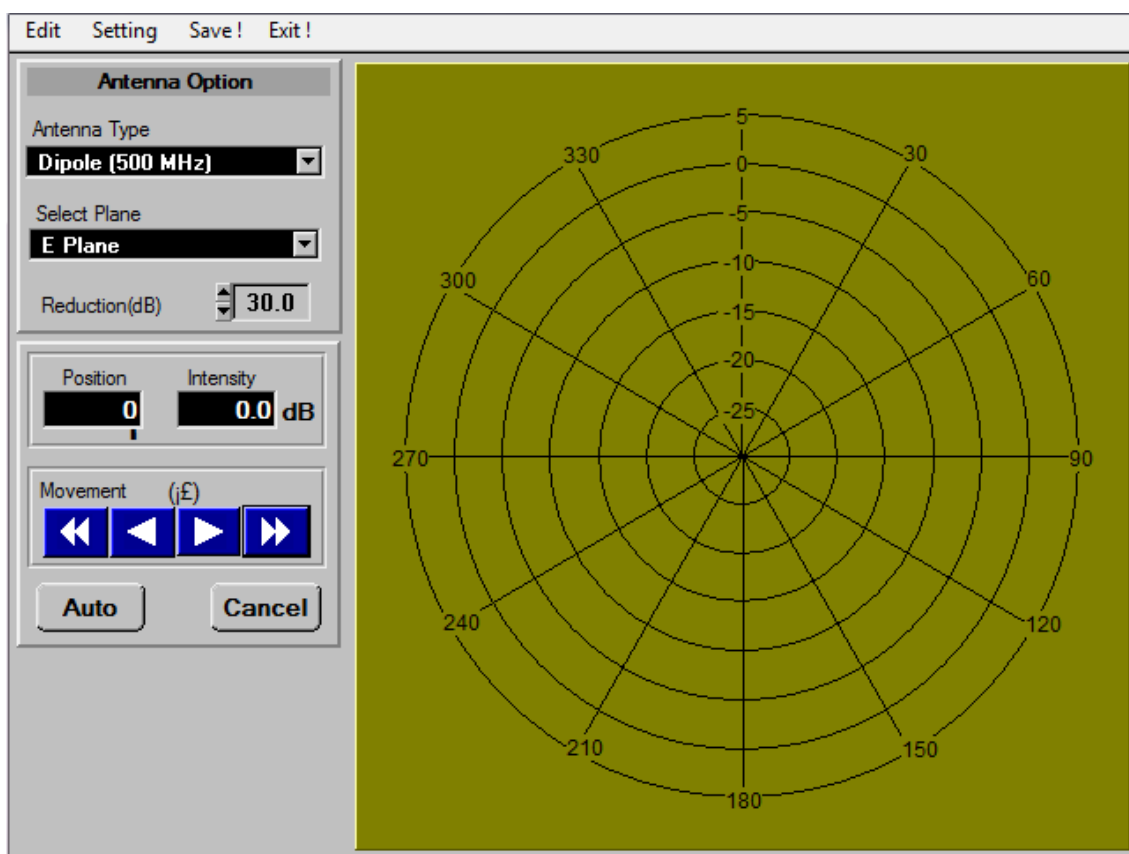


Figura 2.12. Janela do programa responsável pela aquisição dos dados.

Na sub-janela denominada “*Movement*” encontram-se os botões de controle de rotação, onde é possível rotacionar o eixo da unidade receptora em 1° ou 10°. O botão “*Auto*” tem como função realizar um giro de 360° na antena receptora e é o mais indicado para traçar

com precisão o diagrama de irradiação das antenas. As sub-janelas “*Position*” e “*Intensity*” mostram respectivamente a posição e a intensidade do sinal nesta posição.

O controlador também possui botões de controle da rotação da base, conforme visto no item 2.1, porém não realiza a rotação completa.

### **2.3 UNIDADE TRANSMISSORA (*TRANSMIT UNIT*)**

Três elementos em conjunto compõem a unidade transmissora: a base, o suporte da antena e a antena.

#### **2.3.1 BASE DA UNIDADE TRANSMISSORA**

A base da unidade de transmissão, que serve para sustentar e posicionar a antena, é mostrada na Fig. 2.13. Possui um suporte rotatório, e sobre este suporte uma barra graduada. Encaixada nesta barra existe uma peça responsável por sustentar o suporte da antena, esta peça é móvel e se desloca por toda a extensão da barra (0 a 200mm). O objetivo deste deslocamento é auxiliar no alinhamento da antena transmissora com a receptora sem precisar deslocar a base inteira.

A base possui ainda duas alças de transporte nas laterais da base, conforme mostra a Fig. 2.13.



Figura 2.13. Base da unidade de transmissão.

### 2.3.2 SUPORTE DA ANTENA TRANSMISSORA

O suporte da antena da unidade de transmissão é um elemento composto por duas peças encaixadas e um parafuso para auxiliar no ajuste de altura. A sua extremidade inferior se encaixa na base através da peça móvel da barra. Em sua outra extremidade está o controlador de polarização da antena, uma peça móvel que se desloca  $180^\circ$  em apenas um eixo e posiciona a antena na posição horizontal ou vertical. A Fig. 2.14a mostra as duas peças que compõem o suporte da antena de transmissão, onde a peça superior é presa à peça de sustentação e deslocamento do suporte. A peça inferior é encaixada na peça supracitada, formando o suporte completo da antena transmissora. O suporte montado é mostrado na Fig. 2.14b.

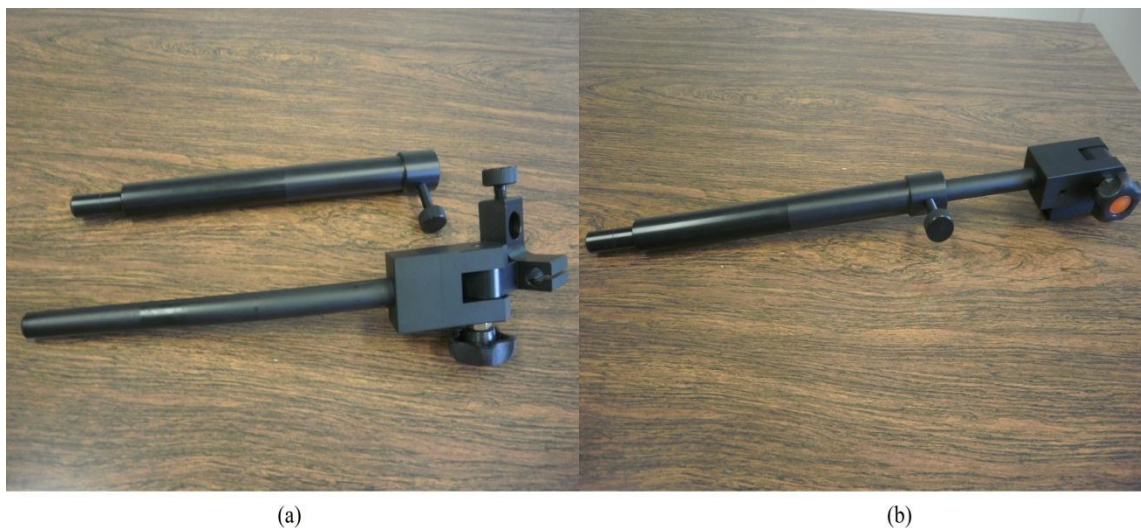


Figura 2.14. Suporte da antena transmissora. (a) Peças que compõem o suporte. (b) Suporte montado.

Dois outros tipos de peças podem ser acoplados ao controlador de polarização para sustentar os diferentes tipos de antenas. Estas peças são mostradas na Fig. 2.15.



Figura 2.15. Peças complementares ao suporte da antena.

### 2.3.3 ANTENA TRANSMISSORA

Nas experiências são utilizadas apenas duas antenas para realizar a transmissão, a antena Yagi e a antena Corneta (apesar de existir a possibilidade de utilizar quaisquer outras antenas do Kit). São antenas com alta diretividade na direção de irradiação máxima e por isso são as mais adequadas para trabalhar como antenas transmissoras nos experimentos. O detalhamento destas antenas é realizado nas seções 2.5.3 e 2.5.4, e nos capítulos 5 e 6 do presente trabalho.

A antena Yagi utilizada opera na frequência de  $500\text{MHz}$ , enquanto a antena corneta opera em  $10\text{GHz}$ .

Para realizar a fixação das antenas no suporte é necessário utilizar as peças complementares mostradas na Fig. 2.15.

Na Fig. 2.16 podemos observar a unidade de transmissão montada com os dois tipos de antenas.

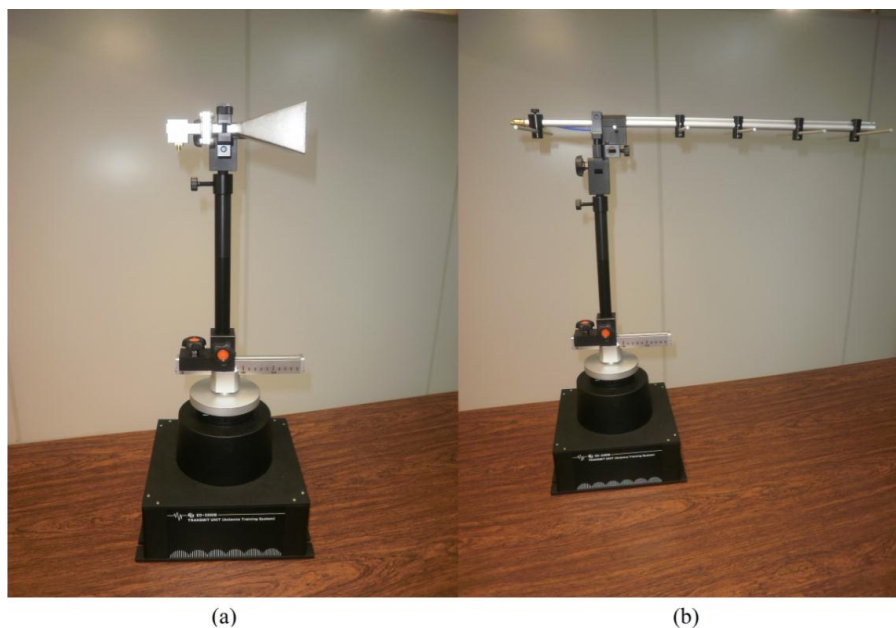


Figura 2.16. Unidade de transmissão montada com as duas antenas. Antena Corneta (a) e Antena Yagi (b).

## 2.4 UNIDADE RECEPTORA (*RECEIVE UNIT*)

A unidade receptora também é composta por três elementos (base, suporte e antena), porém sua base é mais complexa. Em relação ao suporte da antena de transmissão, a única diferença é que este suporte é uma peça única não possui ajuste de altura.

### 2.4.1 BASE DA UNIDADE RECEPTORA

A base da unidade receptora, além de possuir a finalidade básica de dar suporte e posicionamento a antena, demodula o sinal recebido e o transmite para o controlador principal. Possui ainda um motor de passo, responsável por girar a antena.

Conforme a mostra a Fig. 2.17, possui duas conexões com o controle principal:

- Terminal de entrada de controle, referente ao controle de rotação;
- Terminal de saída do sinal demodulado de  $1kHz$ .

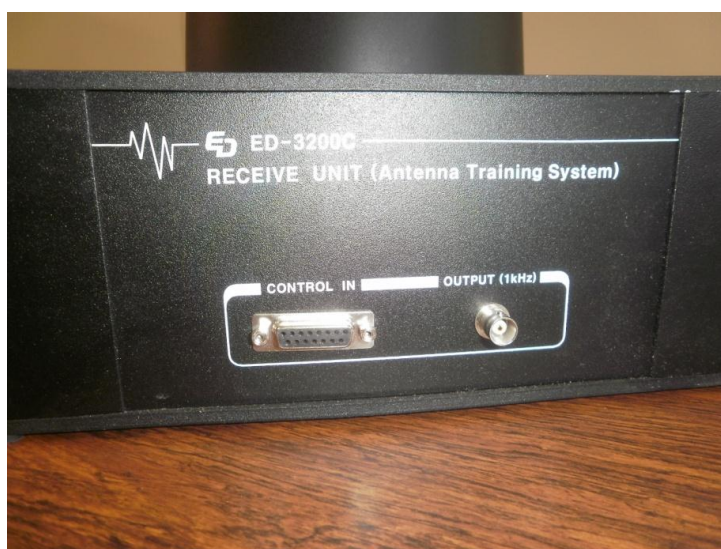


Figura 2.17. Detalhe das conexões na base da unidade receptora.

Na superfície rotora da base existe uma conexão chamada de “RF IN” que deve ser conectada a antena através do cabo SMA, este conector pode ser observado na Fig. 2.18. Pelo



fato do sistema trabalhar em alta frequência, pequenos condutores acabam por receber uma circulação de corrente. Deste modo, a onda de RF, além de gerar corrente elétrica na antena receptora ela gera uma corrente indesejada no cabo SMA. Por este motivo toda análise de intensidade de sinal realizada pelo controlador é baseada no sinal de áudio de  $1kHz$ , minimizando o efeito do ruído por medição.

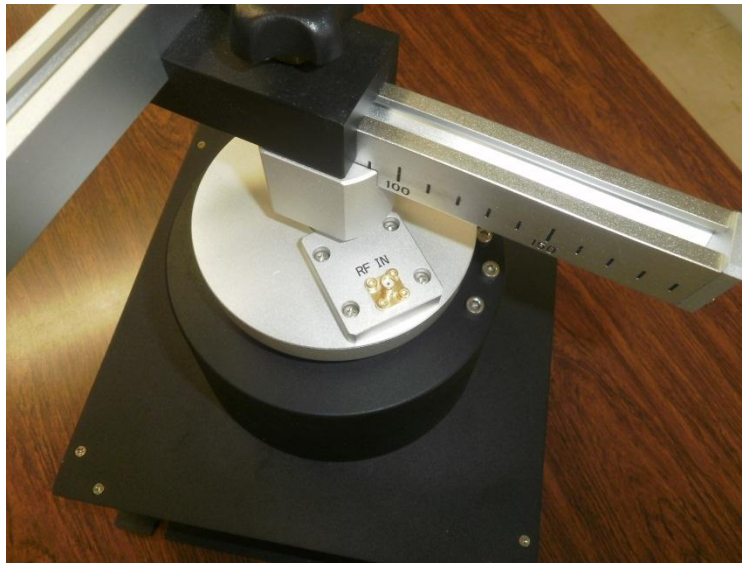


Figura 2.18. Conexão RF IN.

Há ainda sobre a superfície rotora duas barras graduadas que formam um “L” uma com a outra, desse modo é possível posicionar a antena exatamente no centro do eixo de rotação. Nas figuras 2.18 e 2.19 é possível visualizar as duas barras, a menor graduada de 0 a  $200mm$  e a maior de 0 a  $400mm$ .



Figura 2.19. Base da unidade receptora.

#### 2.4.2 SUPORTE DA ANTENA RECEPTORA

Possui as mesmas características do elemento descrito na subseção 2.3.2 com exceção do ajuste de altura por se tratar de uma peça única. As peças mostradas na Fig. 2.15 devem ser encaixadas neste suporte conforme a necessidade de acoplamento da antena receptora. A Fig. 2.20 mostra o suporte já com uma das peças da Fig. 2.15 encaixada no controlador de polarização.



Figura 2.20. Suporte da antena receptora e peças auxiliares.

### 2.4.3 ANTENA RECEPTORA

A antena receptora tem como função básica captar o sinal emitido pela antena transmissora para poder ser caracterizada. Para esta função, são utilizados quatro diferentes tipos de antenas.

As antenas Dipolo de Meia Onda ( $\lambda/2$ ), Dipolo Dobrado e Yagi serão utilizadas na frequência de 500MHz. Para a realização da experiência em 10GHz será utilizada a antena Corneta.

## 2.5 TIPOS DE ANTENAS

O Kit didático possui 16 diferentes tipos de antenas, conforme pode ser observado na Fig. 2.21. Na Fig. 2.22 é possível verificar a disposição das antenas na caixa.

As antenas são divididas conforme a frequência de uso. A Tab. 2.1 mostra como se procede esta divisão bem como a quantidade de antenas disponíveis.

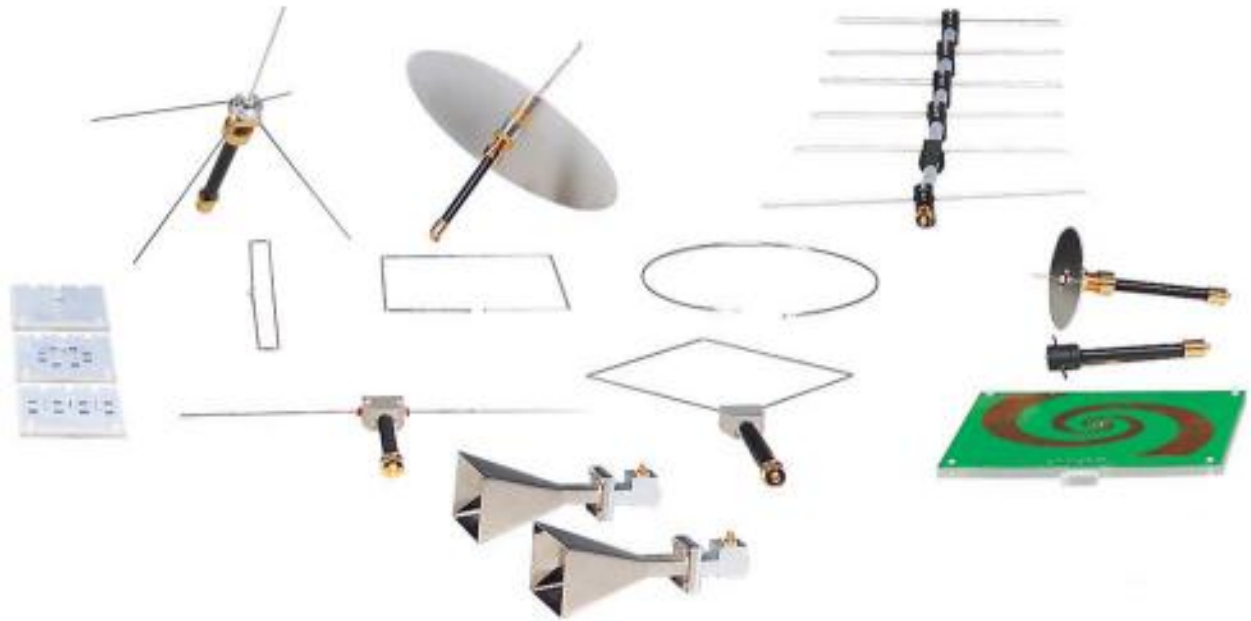


Figura 2.21. Diferentes tipos de antenas.

**Tabela 2.1. Tipos de antenas do Kit.**

Frequência de Uso	Tipo de Antena	Quantidade
500MHz	Antena Dipolo de Meia Onda	1
	Antena Dipolo Dobrada	1
	Antena Yagi	2
	Antena Monopolo ( $\lambda/4$ )	1
	Antena Drooping	1
	Antena Loop Circular	1
	Antena Loop Quadrado	1
2GHz	Antena Loop losango	1
	Antena Dipolo de Meia Onda	2
	Antena Espiral	1
10GHz	Antena Monopolo ( $\lambda/4$ )	1
	Antena Helicoidal	1
	Antena Corneta	2
	Antena Retangular Path	1
	Antena Microfita (Retangular)	1
	Antena Microfita (Circular)	1

A descrição das antenas utilizadas nos experimentos será sucintamente realizada nesta seção, sem entrar em detalhes aprofundados sobre seu funcionamento teórico, pois este é abordado nos capítulos relativos aos experimentos dedicados a cada tipo de antena.



Figura 2.22. Disposição das antenas na caixa.

### 2.5.1 ANTENA DIPOLO DE MEIA ONDA

A antena dipolo de meia onda possui este nome porque seu comprimento é igual à metade do comprimento de onda da frequência de operação. É o tipo de antena mais utilizado e possui uma construção muito simples, são dois condutores retilíneos alinhados, também chamados de radiadores, cada um com  $1/4$  do comprimento de onda. A partir desta antena são projetados outros tipos de antenas, como é o caso do Dipolo Dobrado e da Antena Yagi. Na Fig. 2.23 podemos ver uma representação desta antena, onde  $l$  é o comprimento da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação da OEM.

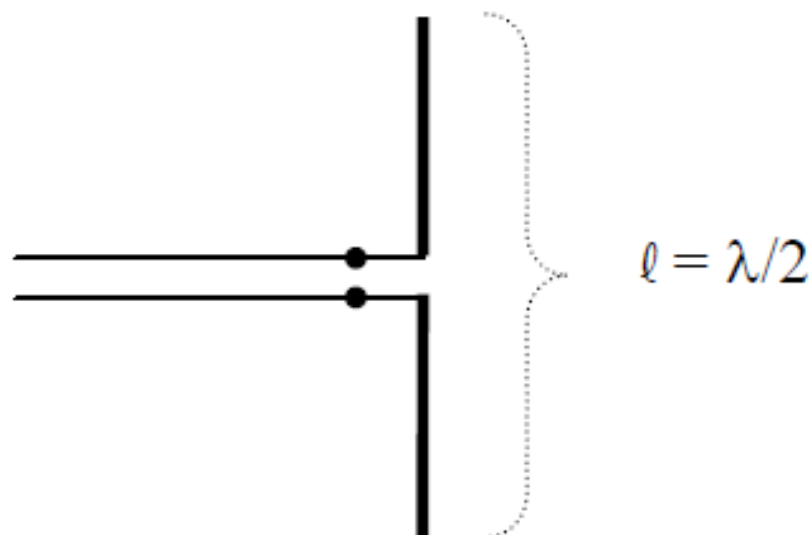


Figura 2.23. Representação da antena Dipolo de Meia Onda.

Para a montagem desta antena são fornecidos três elementos: o alimentador e os dois condutores retilíneos. Estes itens podem ser observados na Fig. 2.24.





Figura 2.24. Peças de montagem da Antena Dipolo de Meia Onda.

O alimentador possui duas conexões para os condutores em uma das extremidades, na outra possui uma conexão para o cabo SMA, por onde é transportado o sinal de RF. A antena já montada pode ser observada na Fig. 2.25.

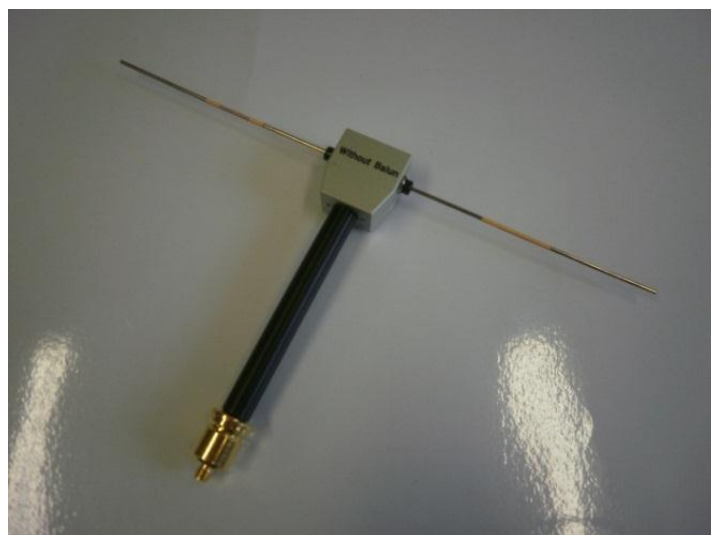


Figura 2.25. Antena Dipolo de Meia Onda do Sistema de Treinamento em Antenas.

### 2.5.2 ANTENA DIPOLO DOBRADO

É uma variação da antena dipolo de meia onda, onde é colocado em curto as extremidades dos radiadores e desse modo aumentando a impedância da antena. Possui um comprimento igual a  $\lambda/2$  e pode trabalhar em frequências um pouco mais altas que a antena dipolo de meia onda.

A antena Dipolo Dobrado possui uma impedância mais alta que o Dipolo de Meia Onda. Pode ser utilizada, por exemplo, como o elemento Emissor de uma antena Yagi no intuito de aumentar sua impedância.

Na Fig. 2.26 podemos observar a antena Dipolo Dobrado utilizada nos experimentos.



Figura 2.26. Antena Dipolo Dobrado do Sistema de Treinamento em Antenas.



### 2.5.3 ANTENA YAGI

A antena Yagi consiste essencialmente de um dipolo de meia-onda, alimentado, e vários dipolos em curto (parasitas) colocados segundo a direção de máxima irradiação desejada, representada na Fig. 2.27 pelo eixo  $y$ .

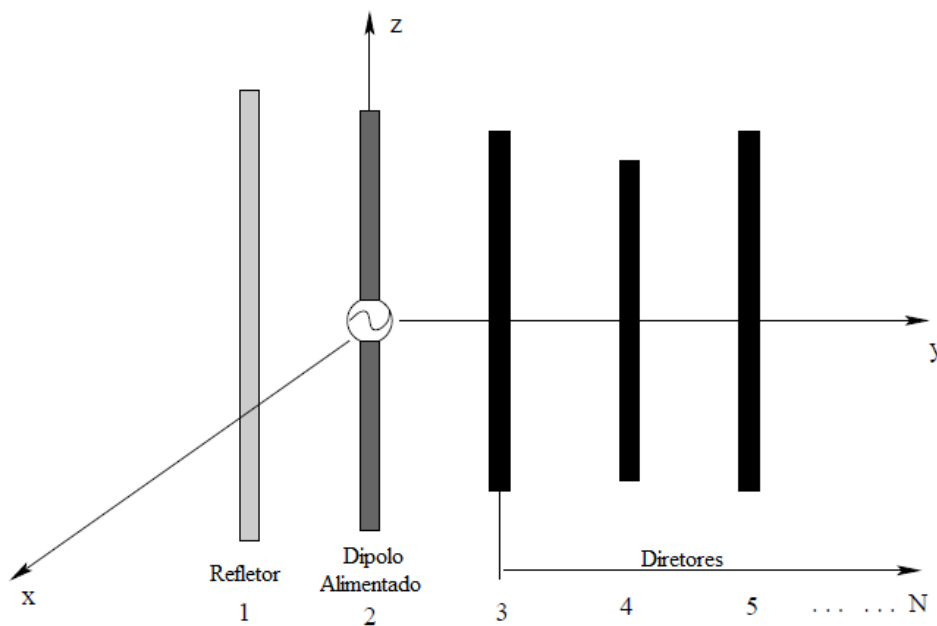


Figura 2.27. Geometria da antena Yagi.

O seu funcionamento básico é simples, o refletor reflete a energia para a direção desejada enquanto os diretores têm neles uma corrente induzida que colabora para concentrar os campos na direção desejada. É uma antena de fácil construção e muito utilizada como receptor televisivo. A antena utilizada nos experimentos pode ser vista na Fig. 2.28.

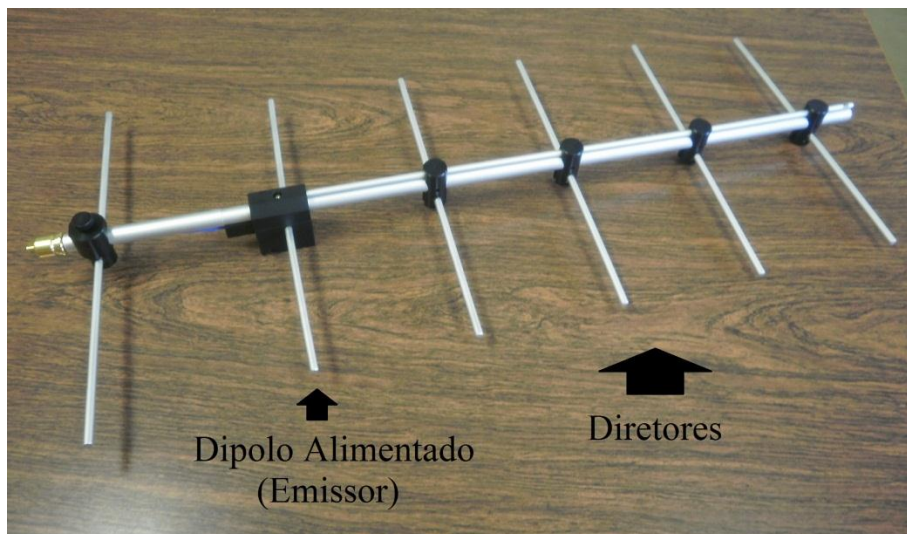


Figura 2.28. Antena Yagi do Sistema de Treinamento em Antenas.

#### 2.5.4 ANTENA CORNETA

A antena corneta propaga a energia da onda eletromagnética (OEM) confinada no interior de um guia de onda, por isso sua construção, apesar de ser uma única peça, possui duas partes: o guia de onda e a antena. Na Fig. 2.29 pode-se observar com clareza o guia de onda retangular e a antena corneta.

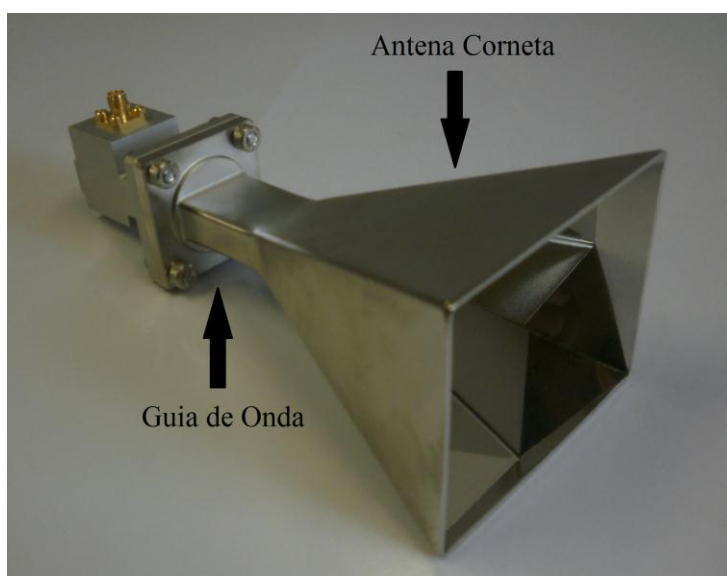


Figura 2.29. Antena Corneta do Sistema de Treinamento em Antenas.

O guia de onda pode propagar vários modos de ondas eletromagnéticas. No caso desta antena, possuindo um ângulo de abertura pequeno o suficiente, somente o modo de onda dominante será propagado.

A antena Corneta é utilizada, por exemplo, como alimentador de antenas maiores (antenas Parabólicas).

### **3 EXPERIMENTO 1 – ANTENA DIPOLO DE MEIA ONDA**

Esta experiência tem como objetivo medir o padrão de irradiação no plano horizontal e no plano de elevação da antena dipolo de meia onda. São estudadas também as características de polarização e a largura do feixe de irradiação da antena.

#### **3.1 FUNDAMENTOS**

O estudo básico do dipolo de meia onda é abordado em cinco maneiras distintas. Primeiramente é explicada a ressonância no condutor. Uma visão física do seu funcionamento é exemplificada na sequência. Posteriormente são explicados conceitos com relação à diretividade e a impedância da antena. Finalmente, é definido o conceito do ganho da antena.

##### **3.1.1 RESSONÂNCIA DO CONDUTOR**

Sendo o comprimento do dipolo significativo em relação ao comprimento de onda da OEM, então a corrente no condutor não pode mais ser considerada constante ao longo do seu comprimento. Assim como a corrente no condutor é variável, e apoiando-se na Lei de Faraday, surgirá no condutor uma OEM proporcional à magnitude de corrente.

A questão importante que surge é como se obter um fluxo ótimo de corrente no condutor de modo que a corrente seja máxima.

Analisando-se a Fig. 3.1, a corrente de alta frequência trafega ao longo do condutor na direção do ponto “A” devido a uma tensão senoidal de alta frequência aplicada no ponto “O”. Esta onda incidente ao atingir o ponto “A” sofre a reflexão completa devido à impedância infinita do meio (no caso o ar) e retorna ao longo do condutor (onda refletida). Desta análise conclui-se que ambas as ondas, incidente e refletida, estão presentes no condutor ao mesmo tempo.

Com o comprimento do condutor igual a  $\lambda/2$ , a onda refletida soma-se com a onda incidente causando a ressonância do condutor, momento o qual ocorre a maior intensidade de corrente possível.

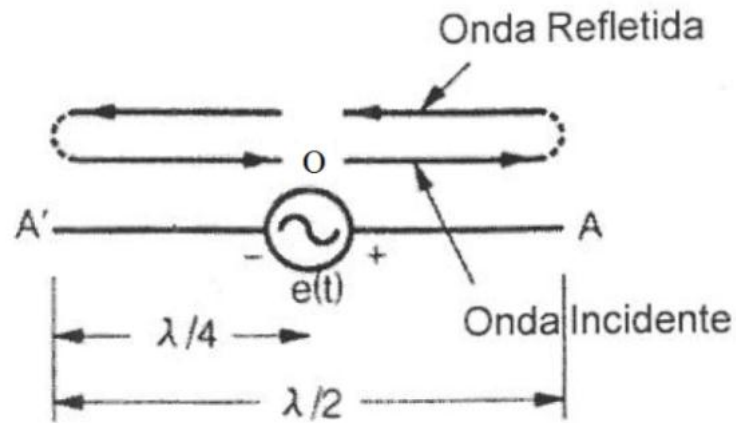


Figura 3.1. Ressonância no condutor de comprimento  $\lambda/2$ .

A relação entre o comprimento “L” do condutor e a frequência de ressonância  $f_0$  pode ser deduzida a partir das equações 3.1 e 3.2.

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (3.1)$$

$$L = \frac{\lambda}{2}. \quad (3.2)$$

Assumindo que “c” é o valor da velocidade da luz no vácuo em  $m/s$  e “f” é a frequência de ressonância ( $f_0$ ), então obtemos que o comprimento de onda em metros é dado por:

$$\lambda = \frac{300 \times 10^6}{f_0}. \quad (3.3)$$

Substituindo a equação 3.3 na equação 3.2, o comprimento do condutor fica definido por:

$$L = \frac{150}{f_0(\text{MHz})} [m] \quad (3.4)$$

### 3.1.2 FUNCIONAMENTO DO DIPOLO DE MEIA ONDA

O nome “dipolo” refere-se ao dipolo elétrico produzido no condutor devido às cargas não oscilatórias distribuídas conforme a polarização da fonte de alimentação. Em função da ressonância, as cargas não se distribuem igualmente ao longo do condutor e polarizam-se conforme a tensão senoidal aplicada, conforme mostra a Fig. 3.2.

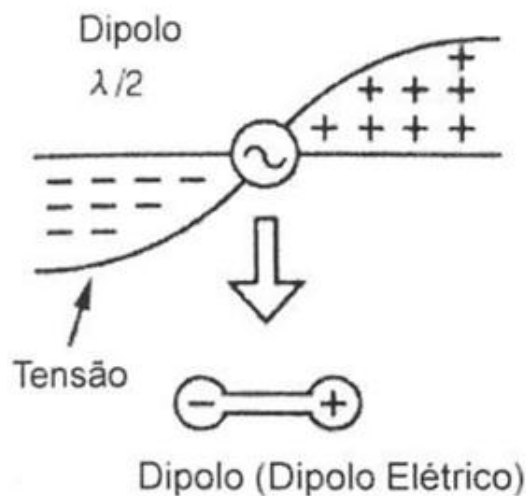


Figura 3.2. Distribuição de cargas no dipolo de meia onda.

O dipolo de meia onda utilizado nas experiências possui alimentação central e uma distribuição de tensão e corrente conforme mostra a Fig. 3.3. No instante da ressonância, a corrente e a tensão estão defasados em 90°.

A corrente máxima localiza-se então no ponto de alimentação do dipolo, e é nesta direção, perpendicular ao seu eixo, que ocorre a sua máxima irradiação.

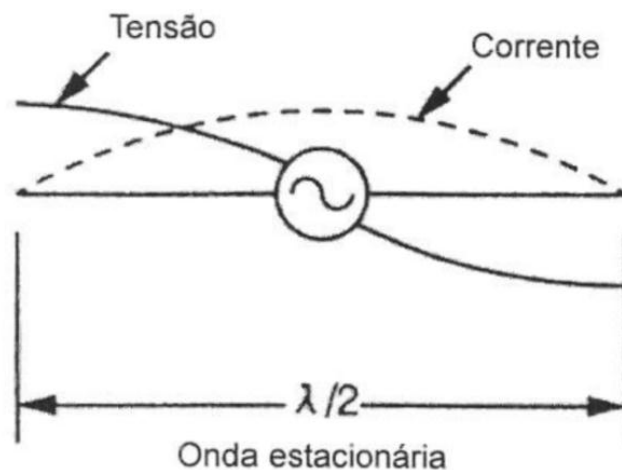


Figura 3.3. Distribuição de corrente tensão no dipolo de meia onda.

### 3.1.3 DIRETIVIDADE

Com relação à diretividade do dipolo de meia onda, pode-se afirmar que possui o mesmo formato do dipolo infinitesimal, porém possui uma diretividade máxima ligeiramente maior e a diretividade cúbica ligeiramente mais achatada, conforme mostra a Fig. 3.4.

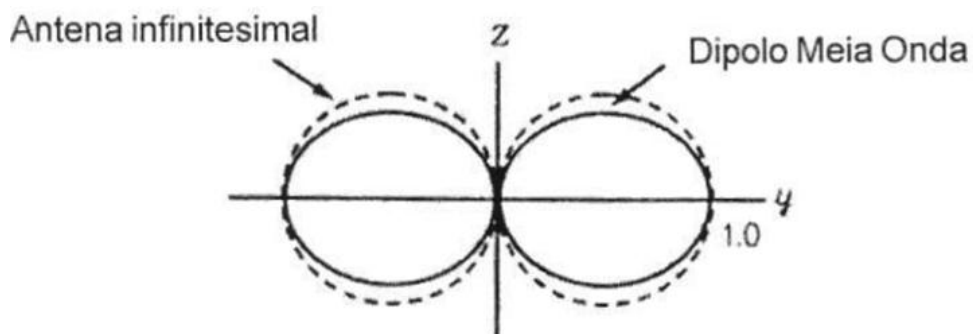


Figura 3.4. Diretividade do campo do dipolo de meia onda.

A diretividade do Dipolo de Meia Onda, em função do ângulo de irradiação, pode ser calculada conforme a Eq. 3.5.

$$D(\vartheta) = \frac{\cos\left[\frac{L}{\lambda}\pi \cos(\vartheta)\right] - \cos\left(\frac{L}{\lambda}\pi\right)}{\sin(\vartheta)}. \quad (3.5)$$

### 3.1.4 IMPEDÂNCIA DO DIPOLO DE MEIA ONDA

É possível calcular a Resistência de Radiação ( $R$ ) do dipolo de meia onda através da Eq. 3.6, onde  $P_r$  é a potência de irradiação total da antena e  $I$  o valor efetivo da corrente no ponto onde é máxima no condutor.

$$R = \frac{P_r}{I^2}. \quad (3.6)$$

No caso da antena dipolo de meia onda com alimentação central o valor da Resistência de Radiação é de  $73,13\Omega$ . Quando o comprimento do condutor é exatamente meio comprimento de onda, a Resistência de Radiação ( $R$ ) possui uma parte reativa indutiva com módulo  $42,55\Omega$ .

### 3.1.5 GANHO

O ganho (definido em relação ao radiador isotrópico) depende conjuntamente da sua diretividade e da sua eficiência e é dado pela Eq. 3.7.

$$G = \eta D, \quad (3.7)$$

onde  $\eta$  é o fator de eficiência da antena que varia entre 0 e 1 e  $D$  é a diretividade da antena.



O ganho é normalmente expresso como o valor máximo. Para o dipolo de meia onda, onde a direção de máximo é em um ângulo reto com o condutor, o ganho pode ser calculado a partir de:

$$G = \frac{4\pi r^2 \cdot P_r}{W}. \quad (3.8)$$

$P_r$  é o vetor Poynting da potência irradiada em uma direção  $\theta$  a uma distância  $r$  da antena, sendo definido por:

$$P_r = \frac{15 \cdot I_m^2}{\pi r^2} \left[ \frac{\cos(\pi/2 \cdot \cos \theta)}{\sin \theta} \right]^2 [W/m^2]. \quad (3.9)$$

Para o dipolo de meia onda, a direção de máxima irradiação ocorre em  $\theta = \pi/2$ . Substituindo este valor em 3.9, obtemos que a Potência Irradiada é dada por:

$$P_r = \frac{15 \cdot I_m^2}{\pi r^2} [W/m^2]. \quad (3.10)$$

A potência total irradiada ( $W$ ) é calculada através da Eq. 3.11.

$$W = \frac{1}{2} \cdot I_m^2 R_r [W]. \quad (3.11)$$

Conforme informado na seção 3.1.4, o valor da resistência de radiação ( $R_r$ ) do dipolo de meia onda possui o valor de  $73,13\Omega$  e substituindo as Eqs. 3.10 e 3.11 na Eq. 3.8 obtemos:

$$G = \frac{15 \cdot I_m^2}{\pi r^2} \cdot 4\pi r^2 \cdot \frac{2}{I_m^2 R_r} = \frac{120}{73,13} \cong 1,64dBi \quad (3.12)$$

### 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deve ser executado conforme os passos descritos a seguir.

1. Distribuir coerentemente os equipamentos levando em conta os comprimentos dos cabos e a localização do computador e das tomadas.
2. Certificar que não haja nenhum obstáculo a menos de três metros das antenas em nenhuma direção.
3. **Não forçar o rotor da unidade de recepção coma as mãos, movimentando-o apenas através do controlador ou do computador.**
4. Fixar a antena Yagi de 500MHz no controlador de polarização do suporte da antena de transmissão. Encaixar o suporte na base da unidade de transmissão e ajustar a antena de modo que fique no mesmo plano em relação à terra (conforme mostra a Fig. 3.5). Neste caso a polarização da antena torna-se horizontal.



Figura 3.5. Antena Yagi em polarização horizontal.

5. Com o equipamento ainda desligado, conectar a saída da oscilação de  $500\text{MHz}$  à antena Yagi através do cabo SMA de dois metros de comprimento.
6. Montar a antena dipolo de meia onda conforme enunciado na seção 2.5.1, utilizando o alimentador sem Balun (*without balun*). A função do Balun será devidamente explicada quando houver necessidade de sua utilização.
7. Fixar a antena montada no controlador de polarização do suporte da antena receptora. Encaixar o suporte na base e ajustar a antena para que fique paralela em relação à terra. Centralizar o eixo da antena com o eixo de rotação da unidade receptora através da peça móvel nas barras graduadas. A montagem correta da unidade de recepção pode ser vista na Fig. 3.6. Neste caso a antena receptora tem polarização horizontal.



Figura 3.6. Antena dipolo de meia onda em polarização horizontal e alinhada com o eixo do rotor.

8. Conectar a antena dipolo de meia onda ao terminal RF IN, localizado na superfície rotora, através do cabo SMA de um metro de comprimento. De acordo com a posição do cabo, parte do sinal de transmissão pode ser recebido indevidamente por ele, por este motivo durante a experiência deve-se manter o comprimento do cabo o mais curto possível ao longo do suporte.
9. Conectar o terminal OUTPUT (1kHz) da unidade de recepção ao terminal INPUT (1kHz) do controlador principal através do cabo BNC.
10. Calcular o comprimento do dipolo de meia onda na frequência de 500MHz através das Eqs. 3.13 e 3.14 e medir o comprimento real da antena (conforme mostra a Fig. 3.7). Registrar os valores na Tabela 3.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.13)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (3.14)$$

Onde:

- $c$  é a velocidade da luz no vácuo em  $m/s$ .
- $f$  é a frequência de operação do sistema em  $Hz$ .
- $L$  é o comprimento da antena em  $m$ .
- $\lambda$  é o comprimento de onda em  $m$ .



Figura 3.7. Comprimento real da antena.

**Tabela 3.1. Comprimento da antena dipolo de meia onda.**

	Comprimento da Antena Teórico	Comprimento da Antena Real
$\lambda$	0,6m	
$\lambda/2$	0,3m	
$L$	0,3m	0,28m
$f$		500MHz

O comprimento real da antena deve ser ligeiramente menor que o teórico no intuito de diminuir a parcela reativa da impedância gerada pelo efeito do acúmulo de carga nas pontas.

11. A aquisição do diagrama de irradiação deve ser feita no campo distante da antena, pois no campo próximo pode ocorrer o acoplamento dos campos eletromagnéticos, mudando as características de impedância e radiação da antena. O limiar entre o campo próximo e o campo distante é dado por:

$$R = \frac{2L^2}{\lambda} [m], \quad (3.15)$$

onde:

- $L$  é a dimensão máxima da antena em metros;
- $\lambda$  é o comprimento de onda em metros.

A máxima dimensão da antena Yagi é de  $0,7m$ , substituindo na Eq. 3.15 temos:

$$R = \frac{2 \cdot 0,7^2}{0,6} \cong 1,63m. \quad (3.16)$$

Portanto, a distância mínima entre as antenas de transmissão e recepção, representada pela letra “ $r$ ” na Fig. 3.8 deve se no mínimo  $1,63m$ .

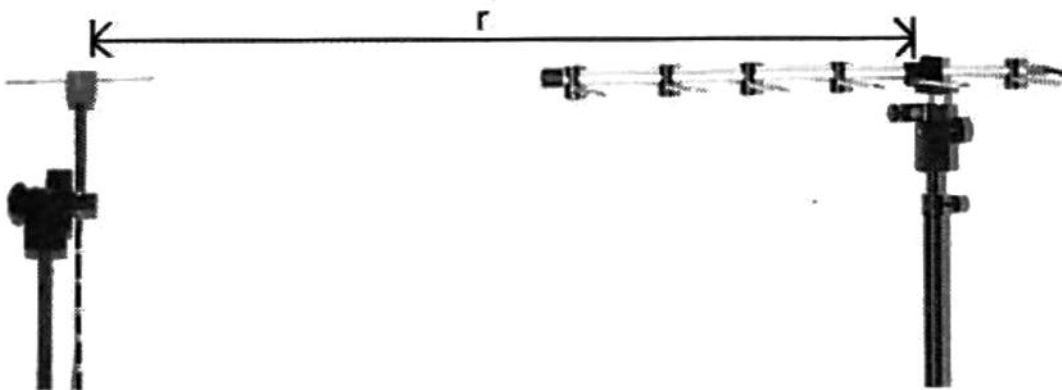


Figura 3.8. Distância entre as antenas, ambas em polarização horizontal.

12. Desabilitar as chaves de oscilação e modulação.
13. Ligar o controlador.
14. Ligar as chaves de oscilação de 500MHz e a chave de modulação (*Mod*).
15. Executar o software *Antenna Trainer*. Clicar na opção “*Data Acquisition*” e escolher a porta “COM1”. Na nova janela que surge seleccionar o tipo de antena como dipolo de meia onda e o Plano de Elevação (E-Plane). Ajustar o mostrador de ganho (*Intensity*) para zero através do controle de atenuação do sinal (*Reduction*), conforme mostra a Fig. 3.9. Pressionar o botão “AUTO” para iniciar a aquisição dos dados.

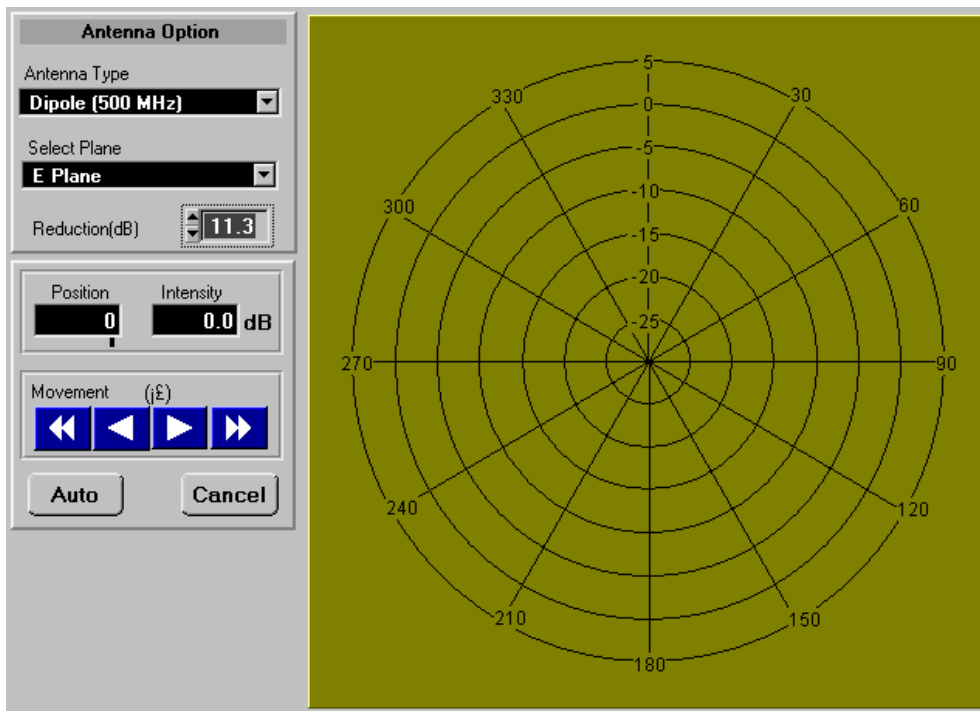


Figura 3.9. Janela de aquisição de dados ajustada para o primeiro experimento.

16. Evitar qualquer movimentação nos arredores da antena para não interferir na captação do sinal.

17. Depois de finalizada a aquisição dos dados salvar o diagrama de irradiação obtido em um arquivo. Com ambas as antenas, transmissora e receptora polarizadas horizontalmente, o diagrama de radiação teórico é mostrado na Fig. 3.10.
18. Selecionar a janela responsável pela análise dos dados e ajustar a Posição de Sinal Máximo (MSL) em zero grau para verificar o padrão de irradiação da antena. A Fig. 3.11 mostra o padrão de irradiação do dipolo de meia onda adquirido e já ajustado na janela de análise de dados.

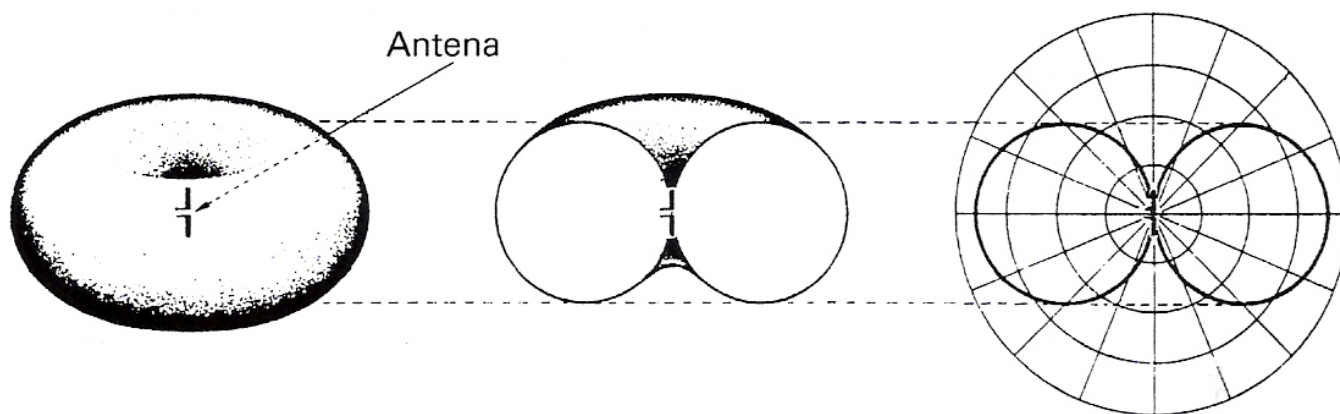


Figura 3.10. Diagrama de irradiação teórico, no plano de Elevação, do dipolo de meia onda polarizado horizontalmente.



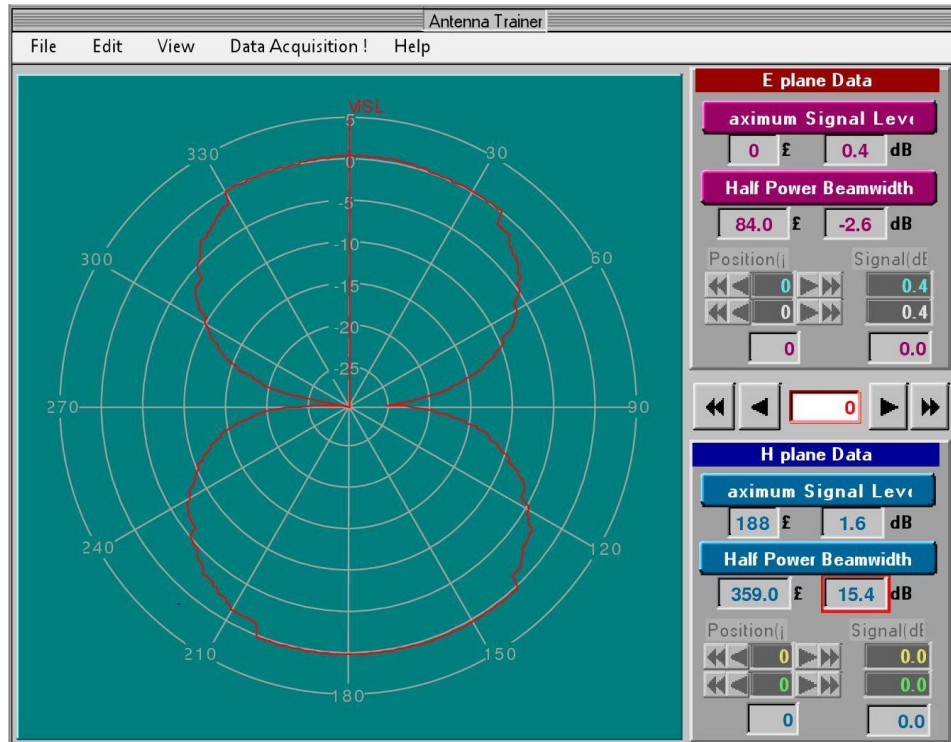


Figura 3.11. Diagrama de irradiação da antena dipolo de meia onda.

Conforme esperado, o dipolo de meia onda possui máxima irradiação no ponto central da antena e mínimos nas extremidades.

19. Em seguida, posicionar a antena Yagi, agora com um ângulo reto em relação ao plano de terra rotacionando  $90^\circ$  o controle de polarização (conforme mostra a Fig. 3.12). Neste caso a antena transmissora tem a polarização vertical.

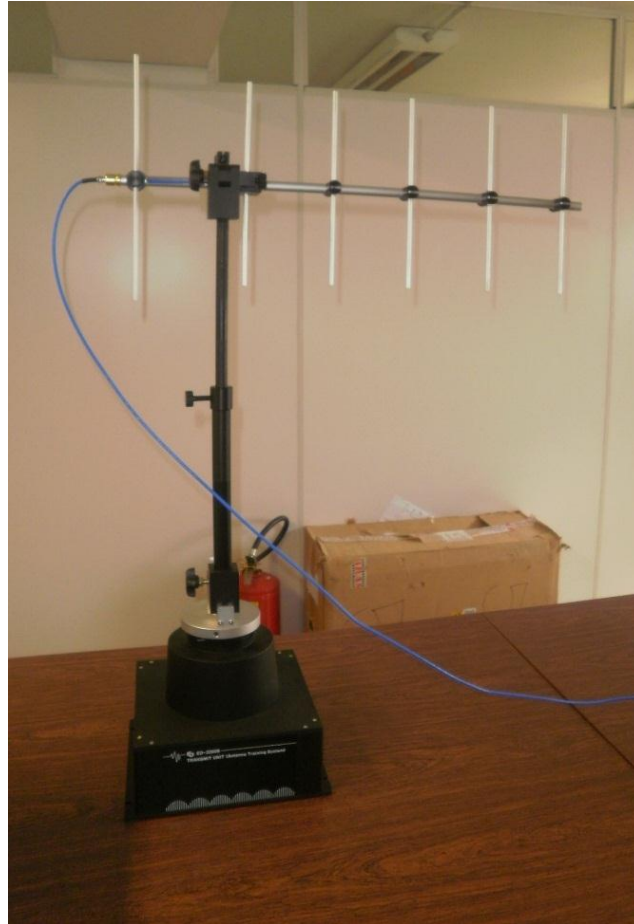


Figura 3.12. Antena Yagi em polarização vertical.

20. Posicionar a antena dipolo de meia onda conforme mostra a Fig. 3.13. É muito importante centrar precisamente o eixo de rotação da antena com o eixo de rotação da base para evitar distorções na aquisição dos dados.



Figura 3.13. Antena dipolo de meia onda em polarização vertical.

A Fig. 3.14c mostra uma visão tridimensional do diagrama de irradiação teórico do dipolo de meia onda, de modo que na polarização vertical a antena irradia uma intensidade de sinal constante em todas as direções. A Fig. 3.14b mostra um corte no diagrama tridimensional de modo a auxiliar na visualização do padrão de irradiação esperado para a irradiação do dipolo de meia onda na polarização vertical (conforme mostra a Fig. 3.14a).

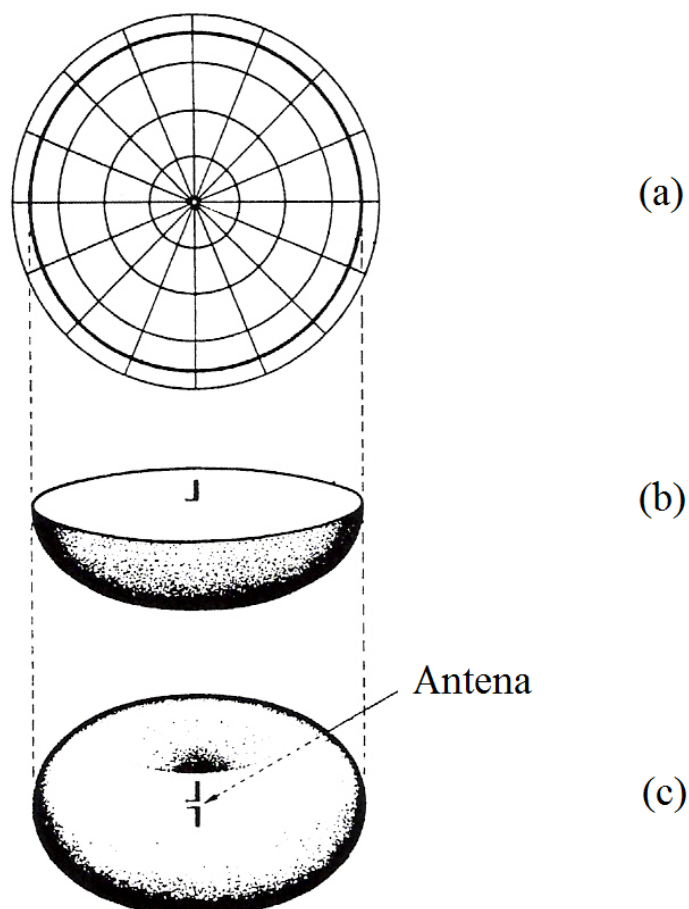


Figura 3.14. Diagrama de irradiação no plano Horizontal da antena dipolo de meia onda com polarização vertical.

21. No computador, selecionar novamente a janela de aquisição de dados. No menu “*Edit*”, selecionar a opção “*Antenna Initialize*”. Selecionar o plano Horizontal (H-Plane) e zerar novamente o mostrador de ganho. Pressionar o botão “AUTO” e após a aquisição salvar o arquivo. O diagrama de irradiação adquirido possui um comportamento constante em todo perímetro da antena e está representado na Fig. 3.15 pela cor azul.

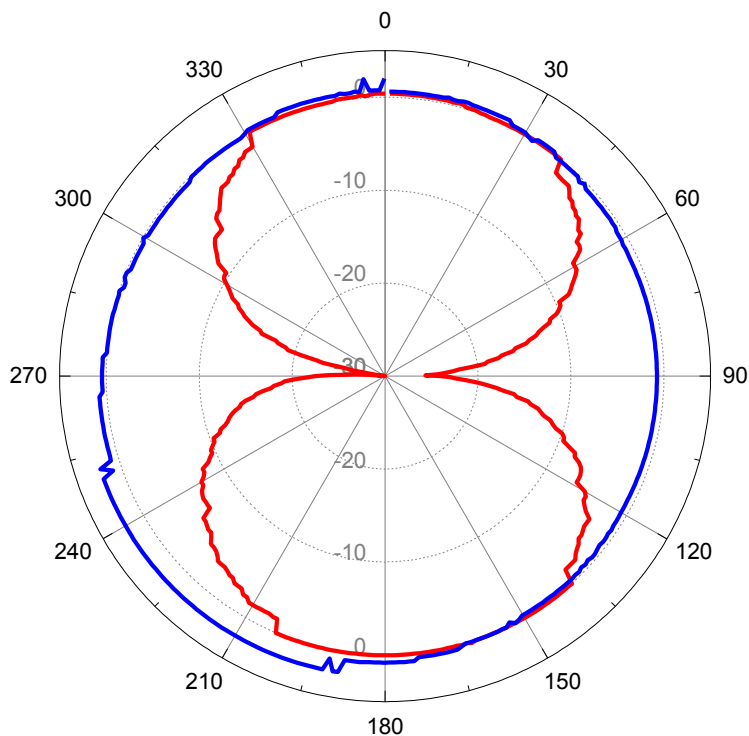


Figura 3.15. Plano de Elevação e Plano Horizontal da antena dipolo de meia onda.

22. Registrar na Tabela 3.2 a potência do sinal para cada ângulo solicitado. Para realizar este trabalho é preciso selecionar a opção “*Data Indicator*” do menu “*View*” da janela de análise de dados. Após selecionada esta opção surgem quatro cursores responsáveis por realizar uma análise pontual dos dados. Os cursores Azul e Branco indicam o ângulo da posição do cursor e a potência naquele instante para os valores do Plano E. Os cursores Verde e Amarelo realizam a mesma função, porém para o plano H.

**Tabela 3.2. Intensidade do sinal em cada ângulo.**

Ângulo	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Potência de recepção para o Plano E (dB)	0,4	0	-6,5	-23,1	-4,9	0	0	-1,6	-7,7	-24,1	-9,8	0
Potência de recepção para o Plano H (dB)	0	-0,7	-1,6	-1,6	-1,6	-1	0	1,6	1,6	-0,4	-1,2	-0,4

Os dados da tabela mostram-se consistentes em relação ao diagrama de irradiação obtido (vide Fig. 3.15). Com o diagrama ajustado para obter-se o valor máximo em  $0^\circ$ , a intensidade de sinal registrada foi de  $0,4dB$ . Era de se esperar que esse valor máximo se repetisse em  $180^\circ$ , mas em virtude de alguma assimetria no posicionamento da antena a intensidade de sinal marcou apenas zero. Nos outros extremos do diagrama de irradiação ( $90^\circ$  e  $270^\circ$ ) a intensidade de sinal atingiu seus valores mínimos.

No plano vertical é possível notar que a intensidade do sinal pouco se alterou ao longo da variação do posicionamento da antena, sendo esta alteração de intensidade causada pelo ambiente inadequado, com proximidade de objetos, e assimetria no posicionamento da antena.

23. Utilizando um dos cursores do Plano Elevação (azul ou branco), encontrar o ângulo para a máxima potência e comparar com valor fornecido pelo botão de “*Maximum Signal Level*” (MSL). Registrar na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3. Validação do MSL.**

Valor utilizando um cursor	Potência de Recepção	0,4
	Ângulo	$0^\circ$
Valor utilizando o botão de MSL	Potência de Recepção	0,4
	Ângulo	$0^\circ$

24. Obter o ângulo de meia potência do feixe principal no Plano E. Entende-se por ângulo de meia potência (*HPBW*) como sendo o ângulo em que a potência é reduzida pela metade, ou seja, sofre uma atenuação de  $3dB$  conforme demonstrado na Eq. 3.17.

$$10 \log 0,5 = -3dB \quad (3.17)$$

25. O ângulo de meia potência pode ser obtido de duas maneiras, primeiramente pelo botão “*Half Power Beamwidth*” na janela de tratamento dos dados. O programa irá mostrar automaticamente o ângulo de meia potência desde que o ângulo de máxima potência esteja corretamente posicionado em zero. A Fig. 3.16 mostra a utilização do comando automático de determinação do ângulo de meia potência. O valor fornecido pelo programa é de  $84^\circ$ .

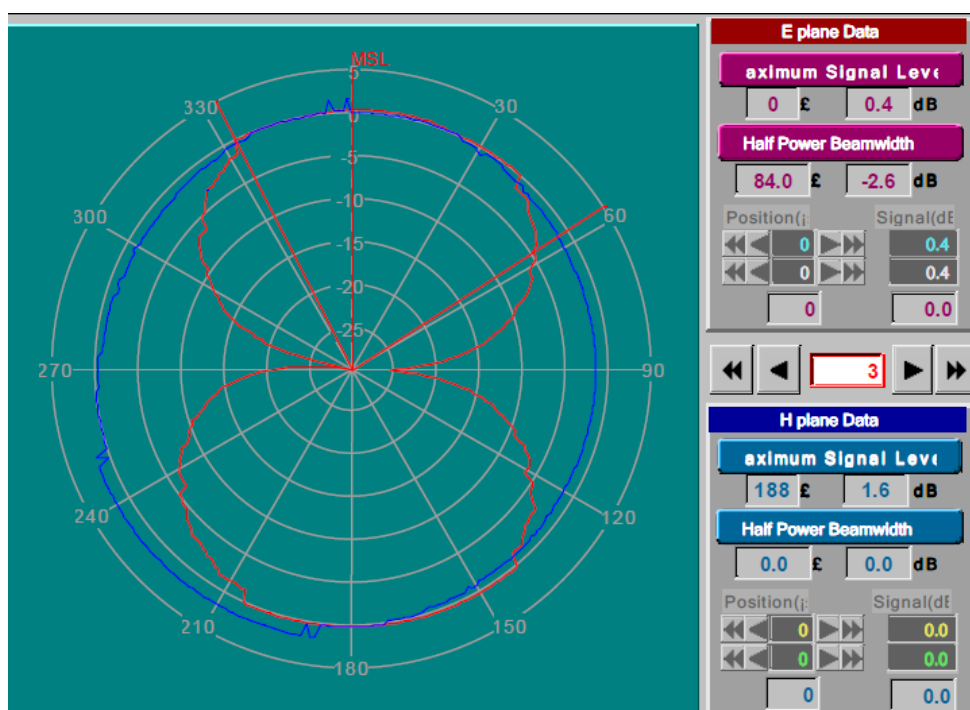


Figura 3.16. Ângulo de meia potência determinado pelo programa.

26. O ângulo de meia potência pode ser obtido também manualmente, através da variação dos cursores. Conforme mostra a Fig. 3.17, os cursores azul e branco podem ser variados a partir do MSL até o instante que o sinal decaia  $3dB$ . Neste instante o  $HPBW$  pode ser calculado conforme a Eq. 3.18.

$$HPBW_E = (360^\circ - 277^\circ) = 83^\circ \quad (3.18)$$

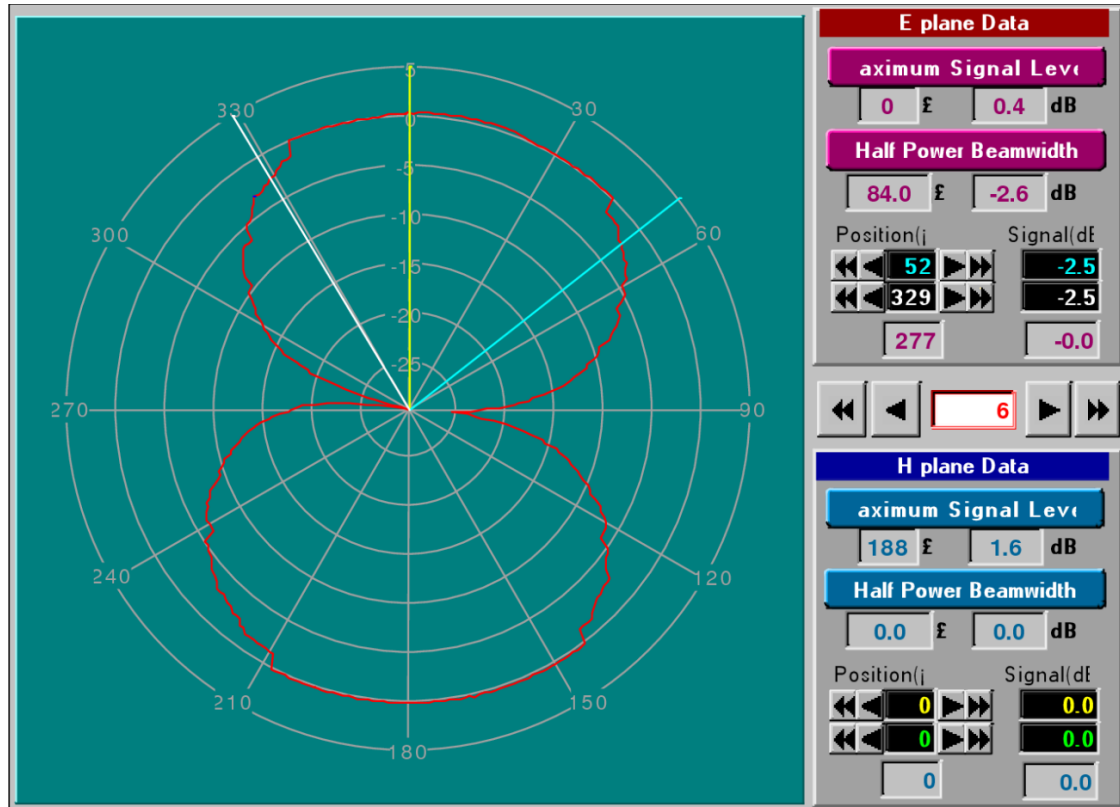


Figura 3.17. Determinação manual do ângulo de meia potência.



### 3.3 CONCLUSÕES

O diagrama de irradiação é coerente com o padrão teórico do dipolo de meia onda. Para comprovar tal fato, calcula-se a diretividade ( $D$ ) do dipolo de meia onda variando o ângulo ( $\vartheta$ ) de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  na Eq. 3.19.

$$D(\vartheta) = \frac{\cos\left[\frac{L}{\lambda}\pi \cos(\vartheta)\right] - \cos\left(\frac{L}{\lambda}\pi\right)}{\sin(\vartheta)}. \quad (3.19)$$

Onde:

- $L$  é o comprimento do dipolo de meia onda em  $m$ .
- $\lambda$  é o comprimento de onda em  $m$ .

Para realizar os cálculos e a plotagem do diagrama de irradiação foi utilizado o *software* Matlab da empresa *MathWorks* [2]. A plotagem obtida pode ser observada na Fig. 3.18. Uma descrição mais detalhada do programa que gerou a plotagem pode ser observada no Anexo A do presente trabalho.

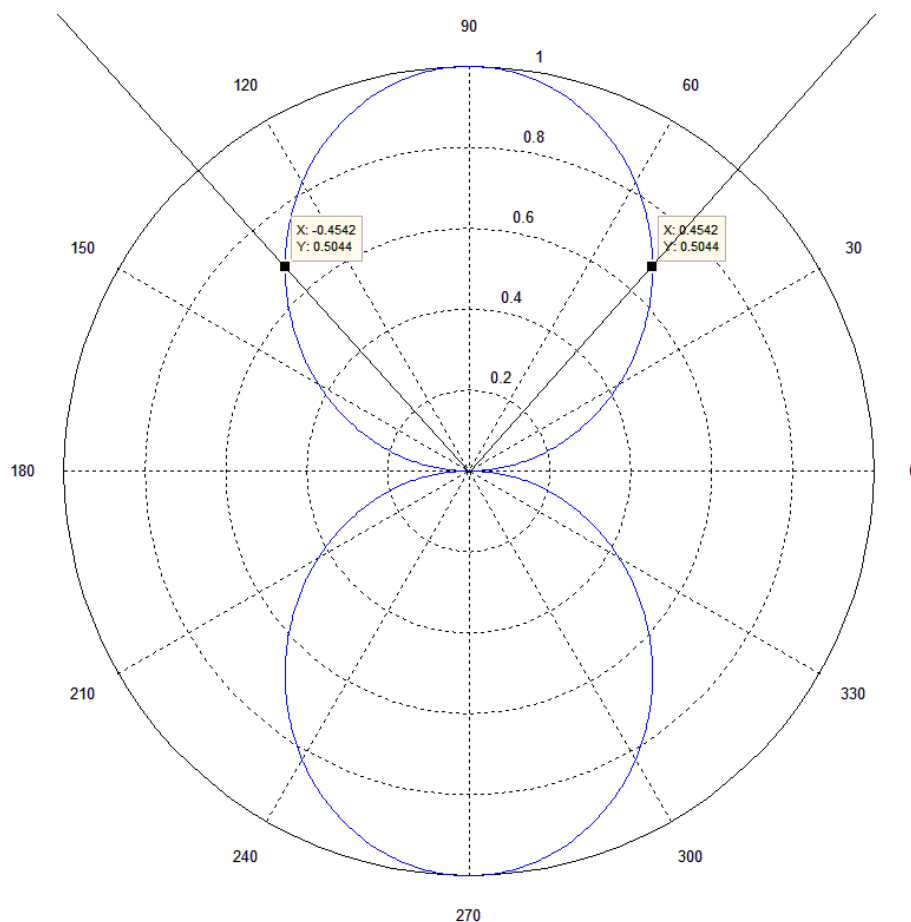


Figura 3.18. Plotagem da Eq. 3.16 obtida através do Matlab.

O ângulo de meia potência pode ser determinado medindo o ângulo em que a diretividade possui o valor de 0,5 (metade da diretividade máxima). É perceptível no gráfico da Fig. 3.18 que o ângulo de meia potência possui um valor de aproximadamente  $78^\circ$ .

As imperfeições do diagrama de irradiação e a divergência entre teoria e prática do ângulo de meia potência ocorreram devido à inadequação do ambiente de trabalho.

A proximidade de objetos ao redor das antenas acaba por refletir as OEM de volta para a antena receptora agregando-se ao sinal diretamente transmitido. Esse fenômeno explica o aumento do ângulo de meia potência medido na prática da antena Dipolo de Meia Onda em relação ao teórico.

## 4 EXPERIMENTO 2 – ANTENA DIPOLO DOBRADO DE MEIA ONDA

Esta experiência tem como objetivo principal medir o padrão de irradiação no plano horizontal e no plano de elevação da antena Dipolo Dobrado de Meia Onda. São estudadas também as características de polarização e a largura do feixe de irradiação da antena, bem como as implicações da utilização do Balun para realizar o casamento de impedância.

### 4.1 FUNDAMENTOS

Conforme visto no capítulo anterior, o Dipolo de Meia Onda possui uma resistência de aproximadamente  $73\Omega$ . Caso haja necessidade de conectar esta antena a uma linha de transmissão de dois fios paralelos (*two-wire line*) mostrada na Fig. 4.1, cuja impedância característica varia de  $300\Omega$  a  $600\Omega$ , é necessário utilizar um sistema casador de impedância (*Balun*). O descasamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão do sinal resulta em perda de potência e distorções na forma da onda transmitida. A antena Dipolo Dobrado, por suas características de construção, possui uma impedância quatro vezes maior que o Dipolo de Meia Onda, ou seja, aproximadamente  $292\Omega$ . Desse modo, uma linha de transmissão de sinal com uma impedância de  $300\Omega$  pode ser conectada diretamente ao Dipolo Dobrado sem a utilização de um Balun.



Figura 4.1. Linha de transmissão paralela com condutores isolados.

A fundamentação do Dipolo Dobrado será abordada de quatro maneiras distintas. Primeiramente é explicada a construção e o funcionamento da antena. Na sequência é explicado o motivo da impedância do Dipolo Dobrado ser quatro vezes maior que a impedância do Dipolo de Meia Onda, juntamente com uma análise da alteração de impedância do Dipolo Dobrado em função da mudança de sua geometria. Finalmente é estudado o casamento de impedâncias bem como o equipamento utilizado para tanto. Como as características de diretividade e ganho da antena Dipolo Dobrado são iguais ao Dipolo de Meia Onda elas serão sucintamente descritas neste capítulo.

#### **4.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO DIPOLO DOBRADO DE MEIA ONDA**

A antena consiste em dois dipolos de meia onda ligeiramente espaçados e conectados pelas suas extremidades, conforme mostra a Fig. 4.2. Com  $S \ll \lambda$ , a corrente em ambos os elementos é substancialmente igual em módulo e fase [1, p. 511-512]. Nestas condições, o

Dipolo Dobrado possui as mesmas características de funcionamento que o Dipolo de Meia Onda.

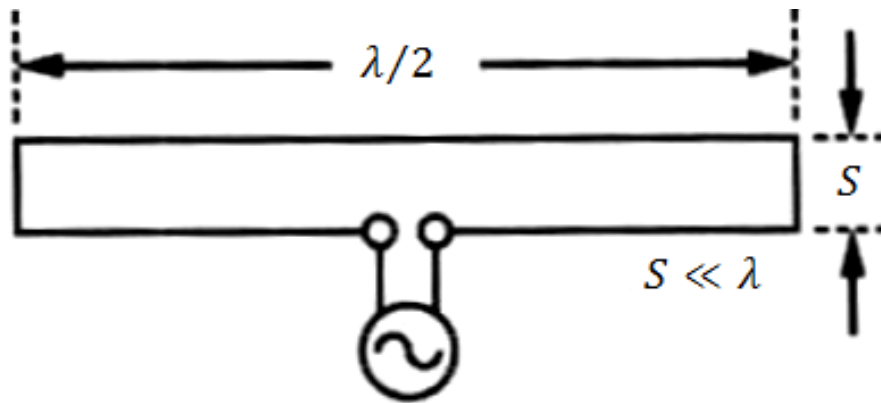


Figura 4.2. Dipolo Dobrado de Meia Onda.

#### 4.1.2 IMPEDÂNCIA DO DIPOLO DOBRADO DE MEIA ONDA

Para o cálculo da impedância do dipolo dobrado divide-se a tensão aplicada a antena entre os dois dipolos, conforme mostra a Fig. 4.3.

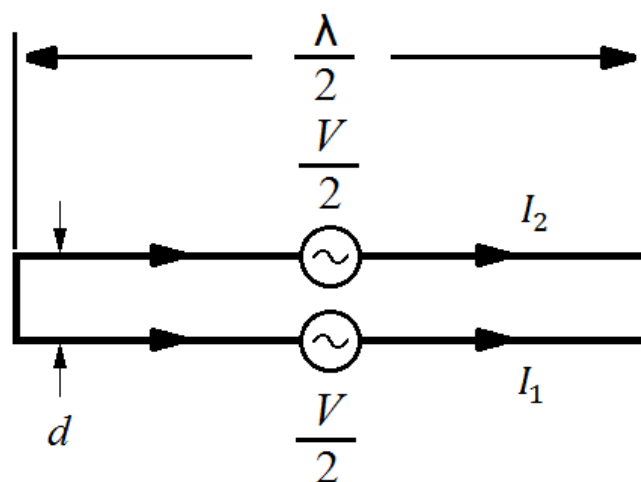


Figura 4.3. Tensão aplicada no dipolo dobrado.

A partir desta configuração mostrada na Fig. 4.3, a equação da Lei de Ohm pode ser escrita conforme a Eq. 4.1.

$$\frac{V}{2} = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12}. \quad (4.1)$$

Onde:

- $I_1$  é a corrente nos terminais do primeiro dipolo, em *Ampères*.
- $I_2$  é a corrente nos terminais do segundo dipolo, em *Ampères*.
- $Z_{11}$  é a impedância do primeiro dipolo, em  $\Omega$ .
- $Z_{12}$  é a impedância mútua entre os dois dipolos, em  $\Omega$ .

Como  $I_1 = I_2$ , a Eq. 4.1 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$V = 2I_1(Z_{11} + Z_{12}). \quad (4.2)$$

Usualmente, à distância “ $d$ ” é da ordem de  $\lambda/100$  e deste modo pode-se assumir que  $Z_{12} \cong Z_{11}$ , [1, p. 512]. Logo:

$$Z = \frac{V}{I_1} \cong 4Z_{11}. \quad (4.3)$$

$Z_{11}$  é a impedância entre os terminais de um dipolo de meia onda e seu valor é de aproximadamente  $73\Omega$ . Logo, a impedância do dipolo dobrado de dois condutores é então aproximadamente  $292\Omega$ .

A partir do equacionamento apresentado é possível observar que a impedância aumenta de maneira quadrática com relação ao aumento de condutores, de modo que para um dipolo dobrado de  $N$  condutores a sua impedância é determinada pela Eq. 4.4.

$$Z_N = 73 \cdot N^2. \quad (4.4)$$

A alteração do diâmetro entre os condutores e o espaçamento entre eles altera a impedância da antena, conforme mostra a Fig. 4.4 [3, p. 34]. As linhas retas no interior do gráfico representam o multiplicador da impedância base, que é a do dipolo de meia onda.

Os condutores do dipolo dobrado utilizado neste experimento possuem um diâmetro de  $0,002m$  e um espaçamento entre eles de  $0,016m$ , de modo que, analisando o gráfico, sua impedância deve possuir um valor entre 3,5 a 4 vezes maior que a impedância do dipolo de meia onda.

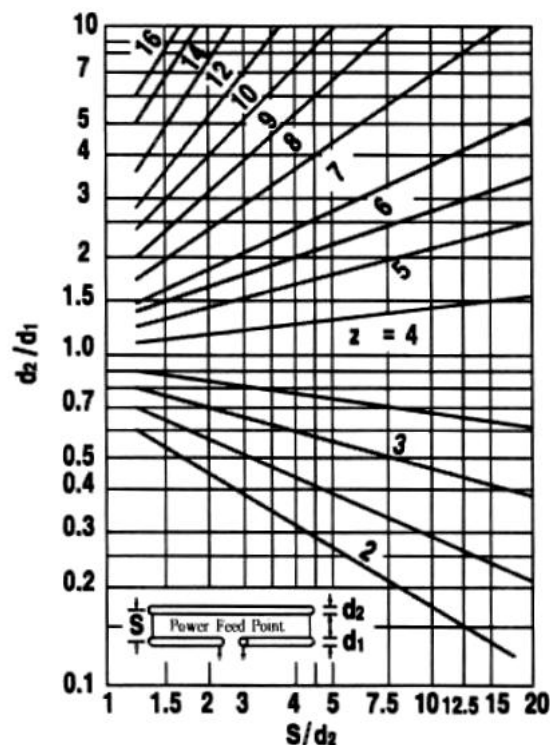


Figura 4.4. Gráfico de alteração da impedância em relação à geometria do dipolo dobrado. Utiliza-se a seguinte notação:  $S$  é o espaçamento entre os condutores;  $d_1$  e  $d_2$  são os diâmetros dos condutores.

### 4.1.3 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

Para uma ótima transmissão de potência, a impedância da linha de transmissão deve ser igual à impedância da antena, ou seja, as impedâncias devem estar casadas. Na Fig. 4.5 pode se observar como deve ser o sistema de transmissão ou recepção para que se obtenha um casamento de impedância ideal.

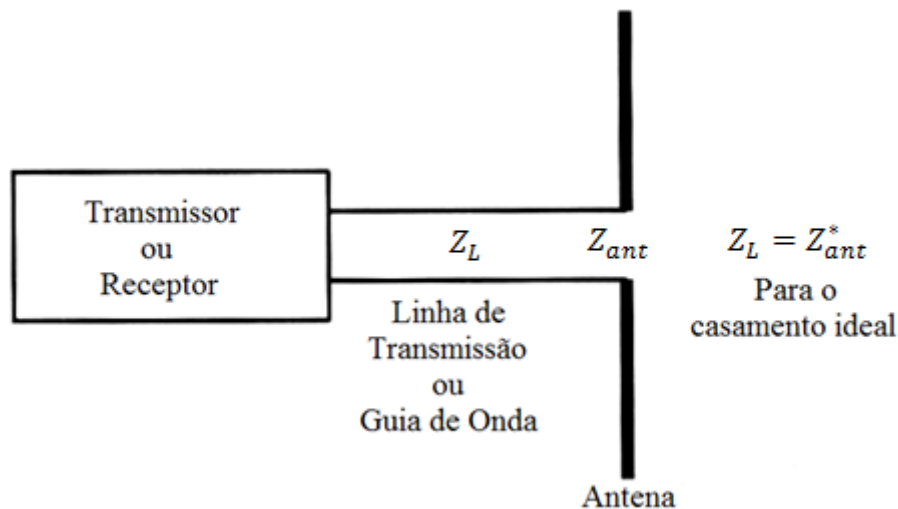


Figura 4.5. Condição para o casamento ideal de impedância.

Quando a linha de transmissão e a antena não estão totalmente casadas uma parte da potência transmitida não é irradiada através da antena e retorna por reflexão. No caso da antena receptora, parte da potência recebida não é transmitida para o receptor e é irradiada novamente pela antena [3]. A relação entre a potência transmitida e a potência refletida no caso de não existir o casamento de impedância é dado por:

$$P_T = 1 - P_{Rfl} = 1 - \left| \frac{SWR-1}{SWR+1} \right|^2. \quad (4.5)$$



Onde  $P_T$  é a potência transmitida através do ponto impedância não uniforme,  $P_{Rfl}$  é a potência refletida neste mesmo ponto e  $SWR$  é a taxa de onda estacionária, dada por:

$$SWR = \frac{Z_{ant}}{Z_l}. \quad (4.6)$$

Substituindo a Eq. 4.6 na Eq. 4.5 tem-se então:

$$P_T = 1 - P_{Rfl} = 1 - \left| \frac{SWR-1}{SWR+1} \right|^2 = 1 - \left| \frac{Z_{ant}-Z_l}{Z_{ant}+Z_l} \right|^2. \quad (4.7)$$

Pode ser demonstrado através da Eq. 4.7 que, no caso do casamento de impedância ( $Z_{ant} = Z_l$ ), não há onda estacionária ( $SWR = 1$ ) e por consequência a potência refletida será nula, conforme mostra a Eq. 4.8.

$$P_{Rfl} = \left| \frac{SWR-1}{SWR+1} \right|^2 = \left| \frac{0}{1} \right|^2 = 0. \quad (4.8)$$

O cabo SMA utilizado nos experimentos apresenta uma impedância de aproximadamente  $50\Omega$  de modo que a eficiência de recepção da antena dipolo dobrado é de 50%, ou seja, 50% da potência é recebida e 50% é refletida conforme mostra a Eq. 4.9.

$$P_T = 1 - P_{Rfl} = 1 - \left| \frac{292-50}{292+50} \right|^2 \cong 0,5. \quad (4.9)$$

É inviável que o sistema trabalhe com 50% de eficiência. Para corrigir tal fato, o *Balun* de alteração de impedância de 4:1 deve ser utilizado. Ainda que não seja o ideal, pois o cabo possui uma impedância de  $50\Omega$  e com *Balun* passa a ter  $200\Omega$ , é suficiente para aumentar a eficiência de transmissão para 96%, conforme mostra a Eq. 4.10.

$$P_T = 1 - P_{Rfl} = 1 - \left| \frac{292-200}{292+200} \right|^2 = 0,965. \quad (4.10)$$

A construção do *Balun* é mostrada na Fig. 4.6.  $Z_0$  é a impedância da linha de transmissão a ser conectada ao *Balun*. Com o comprimento do cabo de balanceamento igual a meio comprimento de onda, o *Balun* será do tipo 4:1, ou seja, a impedância de saída do *Balun* ( $Z_B$ ) é igual a quatro vezes a impedância da linha de transmissão.

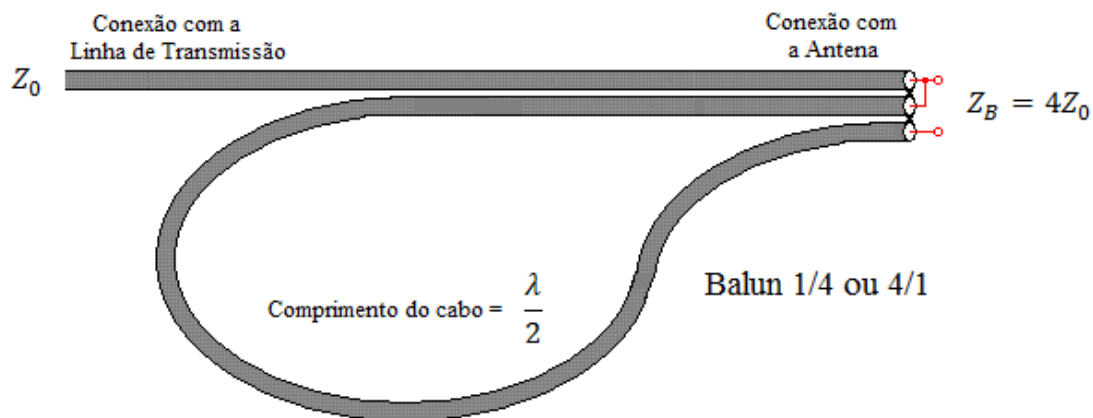


Figura 4.6. Construção do Balun 4:1.

## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deve ser executado conforme os passos descritos a seguir.

1. Distribuir coerentemente os equipamentos levando em conta os comprimentos dos cabos e a localização do computador e das tomadas.
2. Certificar que não haja nenhum obstáculo a menos de três metros das antenas em nenhuma direção.
3. **Não forçar o rotor da unidade de recepção coma as mãos, movimentando-o apenas através do controlador ou do computador.**
4. Fixar a antena Yagi de 500MHz no controlador de polarização do suporte da antena de transmissão. Encaixar o suporte na base da unidade de transmissão e ajustar a antena de modo que fique no mesmo plano em relação à terra (conforme mostra a Fig. 4.7a). Neste caso a polarização da antena torna-se horizontal.
5. Com o equipamento ainda desligado, conectar a saída da oscilação de 500MHz à antena Yagi através do cabo SMA de dois metros de comprimento.
6. Conectar a antena Dipolo Dobrado na unidade receptora utilizando o alimentador com *Balun 4:1*. Ajustar a antena para que fique paralela em relação à terra, deste modo a polarização do Dipolo Dobrado torna-se horizontal. Ajustar o centro de rotação da antena com o centro de rotação da unidade receptora conforme mostra a Fig. 4.7b. Conectar também a antena ao terminal de entrada do sinal de RF (RF IN) através do cabo SMA.

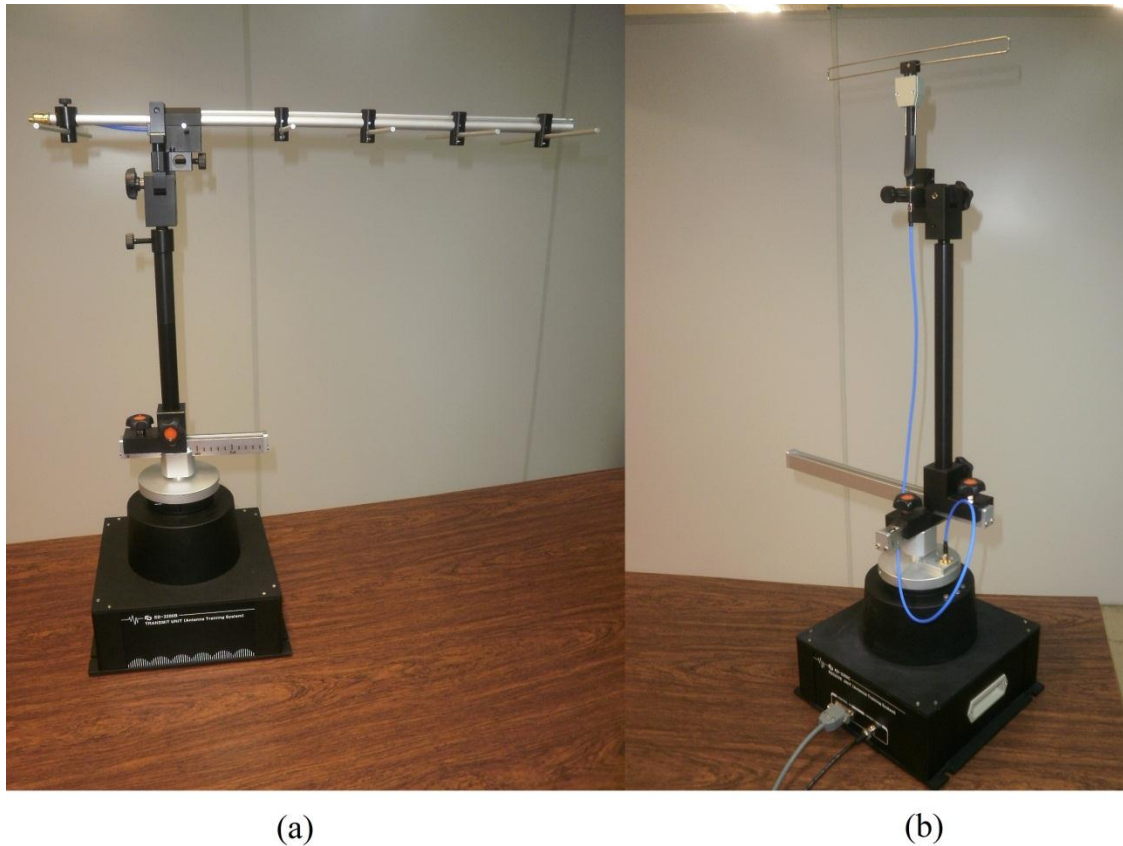


Figura 4.7. Antenas Yagi e Dipolo Dobrado em polarização horizontal.

Nesta situação é medido o padrão de irradiação do Dipolo Dobrado no plano de Elevação (Plano E), conforme explicado detalhadamente na seção 2.2 do presente trabalho.

7. Conectar o terminal OUTPUT (1kHz) da unidade de recepção ao terminal INPUT (1kHz) do controlador principal através do cabo BNC.
8. Calcular as medidas do Dipolo Dobrado de acordo com as Eqs. 4.11, 4.12 e 4.13. Realizar medições na antena, conforme as informações contidas na Fig. 4.8, comprovando as medidas calculadas e registrar na Tabela 4.1 os valores obtidos.

$$\lambda = \frac{c}{f}; \quad (4.11)$$

$$L = \frac{\lambda}{2}; \quad (4.12)$$

$$d = 8t. \quad (4.13)$$

Onde:

- $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  é a velocidade da luz no vácuo.
- $f$  é a frequência de operação do sistema em  $\text{Hz}$ .
- $L$  é o comprimento da antena em  $m$ .
- $\lambda$  é o comprimento de onda em  $m$ .
- $d$  é a distância entre os condutores em  $m$ .
- $t$  é o diâmetro dos condutores em  $m$ .

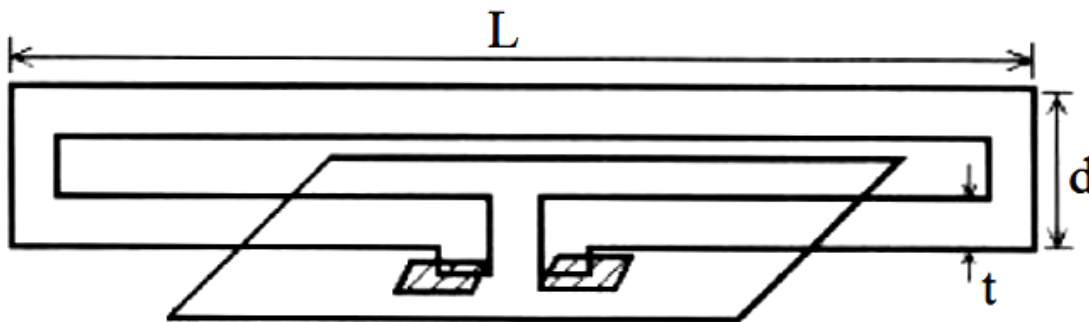


Figura 4.8. Variáveis a serem medidas do Dipolo Dobrado.

**Tabela 4.1. Dimensões da antena Dipolo Dobrado para a frequência de 500MHz.**

	Comprimento da Antena Teórico	Comprimento da Antena Real
$\lambda$	0,6m	
$\lambda/2$	0,3m	
$L$	0,3m	0,285m
$d$	0,016m	0,017m
$t$		0,002m

9. A distância entre as antenas, representada pela letra “ $r$ ” na Fig. 4.9, deve ser de  $1,63m$ , conforme visto no Cap. 3. A parte central de ambas as antenas devem estar centralizadas e o componente irradiador da antena Yagi deve estar posicionado entre os condutores do Dipolo Dobrado, conforme mostra a Fig. 4.9.

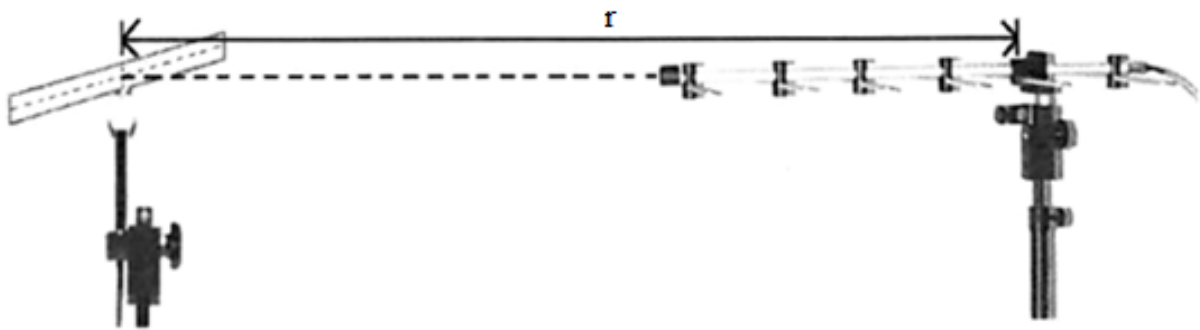


Figura 4.9. Alinhamento das antenas na polarização horizontal.

10. Desabilitar as chaves de oscilação e modulação de frequência.
11. Ligar o controlador.
12. Ligar as chaves de oscilação de  $500MHz$  e a chave de modulação (*Mod*).
13. Adquirir o padrão radial do Dipolo Dobrado.

É de se esperar que o diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado seja semelhante ao do Dipolo de Meia Onda, pois a única diferença entre ambos é a sua impedância, portanto não ocorre alteração na diretividade. A Fig. 4.10 mostra o diagrama de irradiação adquirido do Dipolo Dobrado, já ajustado com o valor máximo do sinal em  $0^\circ$ .

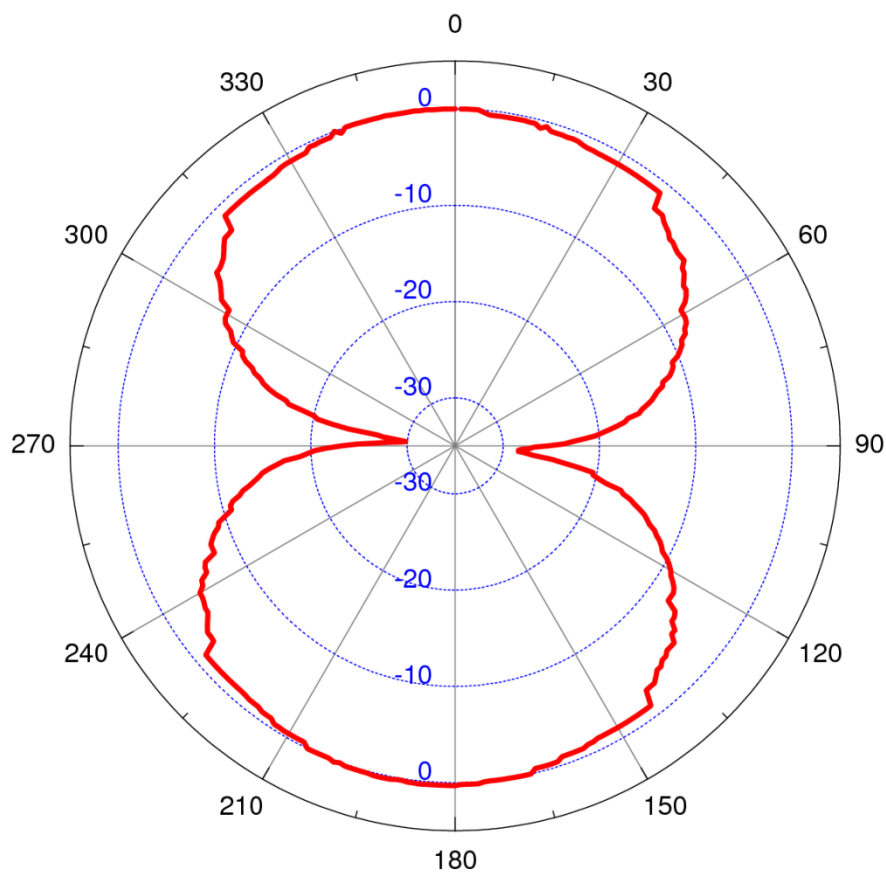


Figura 4.10. Diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado em polarização horizontal.

O padrão de irradiação adquirido está de acordo com o padrão teórico esperado, tendo em vista a semelhança do Dipolo Dobrado com o Dipolo de Meia Onda.

A Fig. 4.11 é uma superposição do diagrama do Dipolo Dobrado (linha vermelha) com o Dipolo de Meia Onda (linha azul), no qual se percebe um ligeiro aumento no ângulo de meia potência por parte do Dipolo Dobrado. Isso mostra que o Dipolo Dobrado, por apresentar um ângulo de meia potência maior, possui um ganho menor.

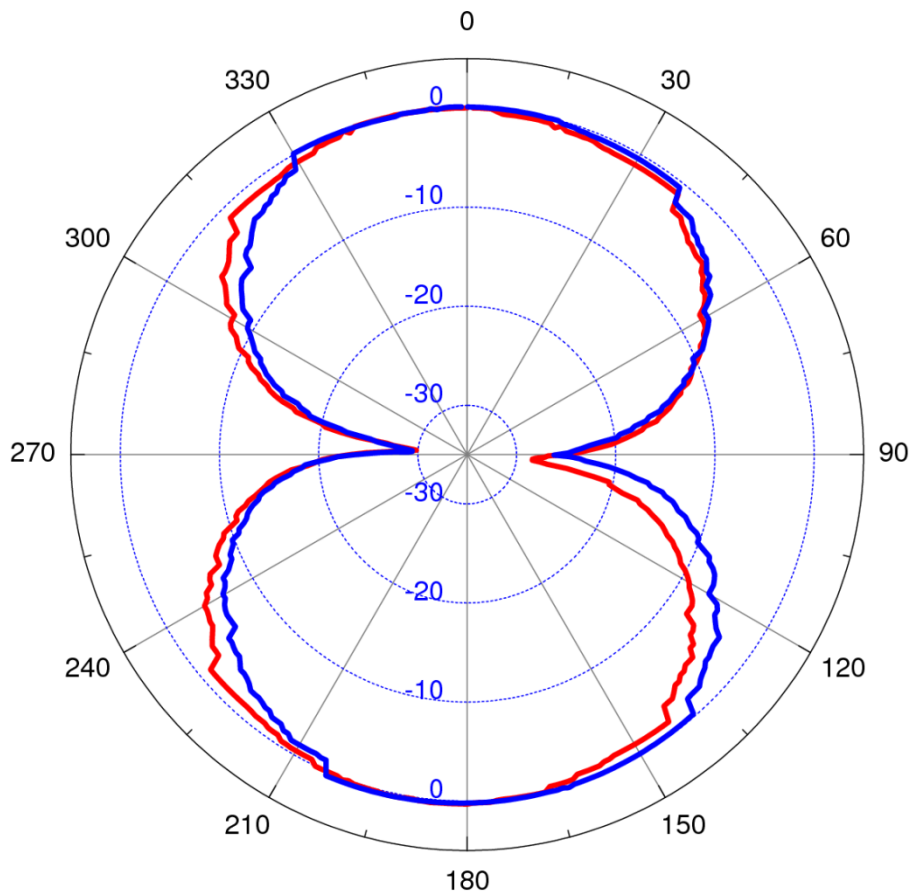


Figura 4.11. Superposição dos diagramas de irradiação do Dipolo Dobrado e do Dipolo de Meia Onda.

14. Após salvar o padrão radial adquirido em um arquivo, polarizar verticalmente as antenas Yagi e Dipolo Dobrado conforme mostra a Fig. 4.12. A polarização vertical das antenas tem como objetivo medir o Plano Horizontal (Plano H) da antena receptora, conforme explicado detalhadamente na seção 2.2.
15. O padrão radial adquirido é mostrado na Fig. 4.13. Do mesmo modo que para o plano horizontal, o plano vertical do dipolo dobrado é idêntico ao do dipolo de meia onda.



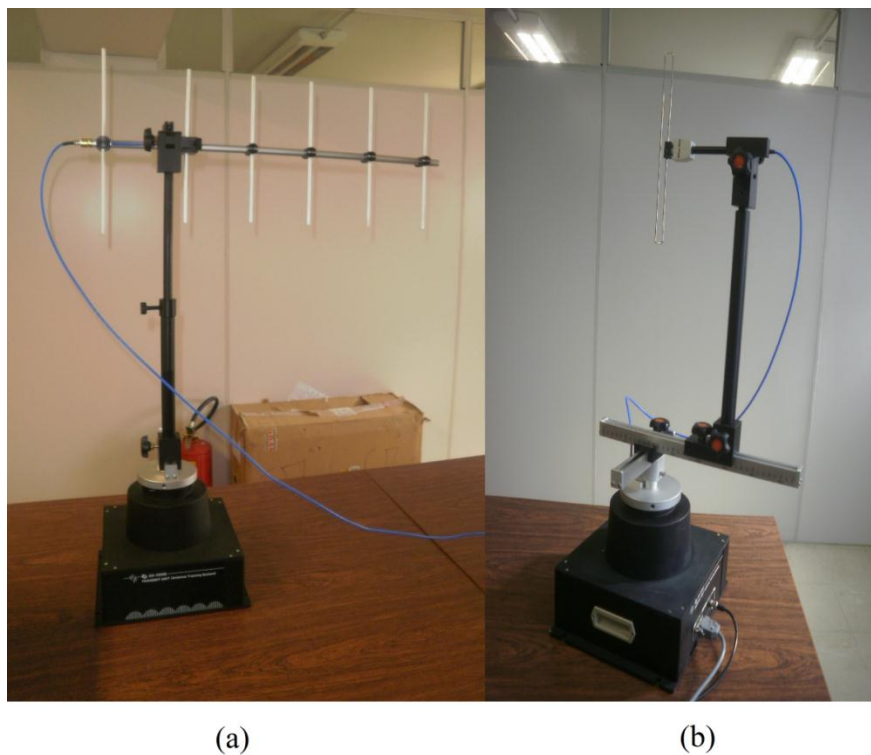


Figura 4.12. Antenas Yagi (a) e Dipolo Dobrado (b) em polarização vertical.

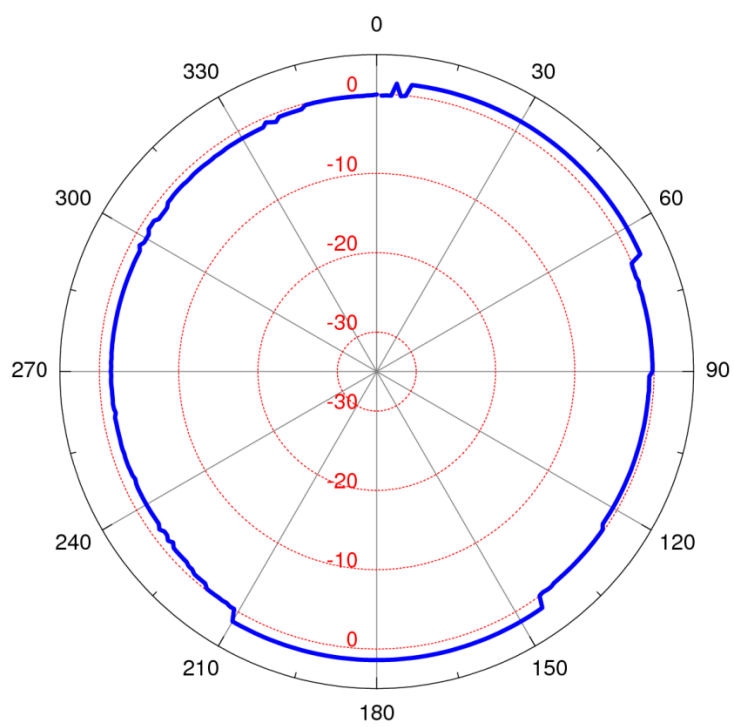


Figura 4.13. Diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado em polarização vertical.

16. Verificar o ângulo de meia potência informado pelo programa através do botão “*Half Power Beamwidth*” na janela de tratamento dos dados. Validar a informação utilizando os cursores (*Data Indicator*). Conforme mostra a Fig. 4.14, a informação retornada pelo programa não condiz com a teoria do ângulo de meia potência. Conforme a análise através dos cursores, o ângulo de meia potência é de  $89^\circ$ , conforme mostra a Eq. 4.14, e não  $94^\circ$  conforme informa o programa. Ainda assim os valores estão muito acima do padrão teórico do Dipolo de Meia Onda, que é aproximadamente  $78^\circ$ . O aumento do ângulo de meia potência sugere uma diminuição do ganho, que pode ser explicado pelas condições inadequadas de trabalho ou por interferências na medição.

$$HPBW_E = 360^\circ - 271^\circ = 89^\circ \quad (4.14)$$

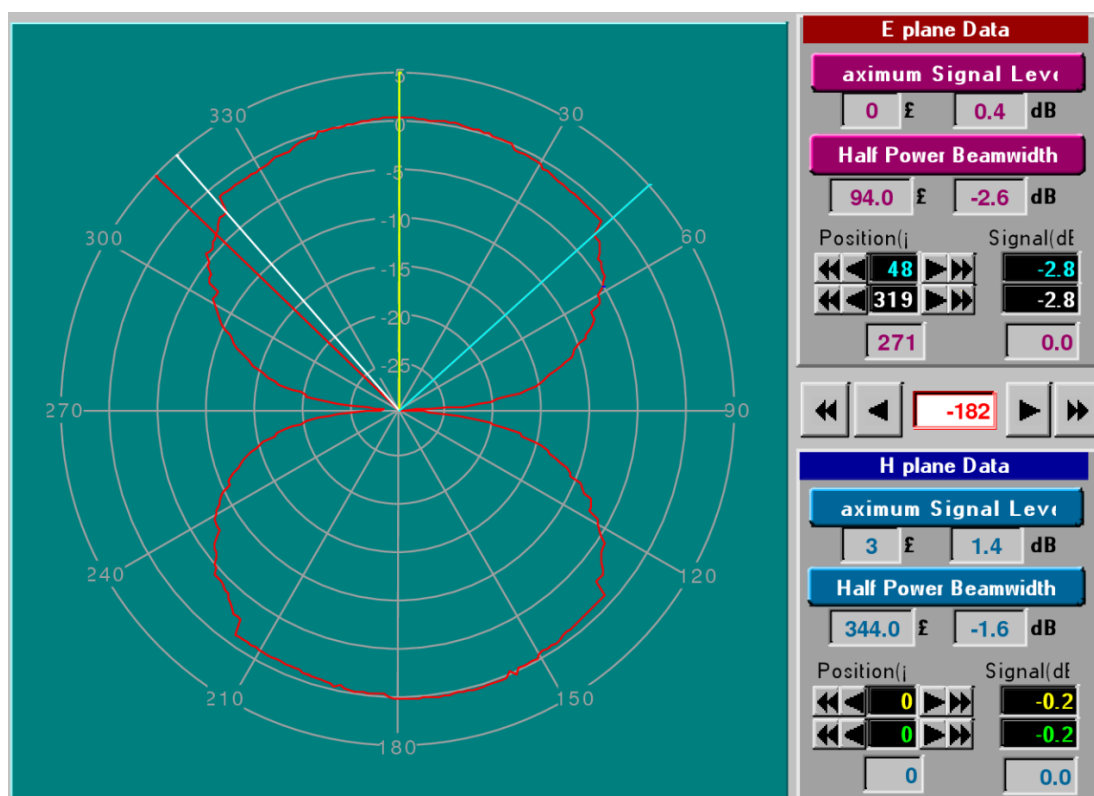


Figura 4.14. Determinação do ângulo de meia potência.

17. Verificar o prejuízo do não casamento de impedância adquirindo os padrões radiais, horizontal e vertical, utilizando um alimentador sem *Balun*. Sem a utilização do *Balun* a eficiência de recepção da antena torna-se 50% conforme a Eq. 4.9 e o diagrama de irradiação é mostrado na Fig. 4.15.

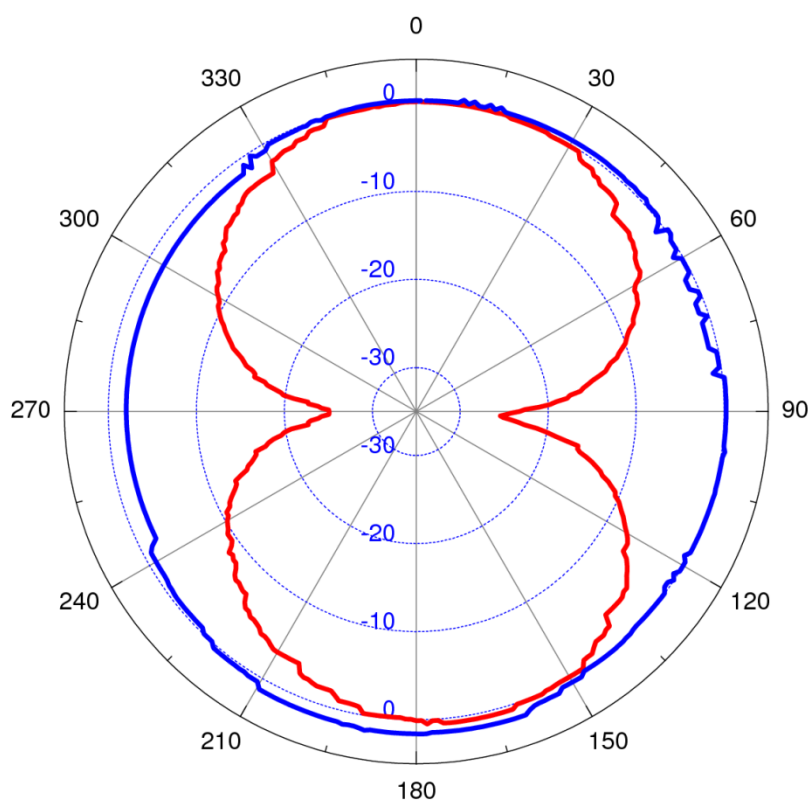


Figura 4.15. Diagrama de irradiação do Dipolo Dobrado adquirido sem a utilização do *Balun*.

Através do diagrama de irradiação no plano horizontal (Plano H) não é possível tirar nenhuma conclusão quanto à perda de eficiência, pois as variações no ganho do sinal são muito pequenas. Através do diagrama do plano de elevação (Plano E) é possível comparar a perda de eficiência com a mudança na variação do sinal relativo.

Posicionando os cursores nas posições de mínimo e máximo dos diagramas de irradiação com e sem *Balun* expostos na Fig. 4.16, é perceptível uma diminuição na variação do sinal conforme as informações da Tabela 4.2.

**Tabela 4.2. Comparação do ganho da antena com e sem *Balun*.**

	Alimentador Com <i>Balun</i>	Alimentador Sem <i>Balun</i>
Valor Mínimo de Ganho (dBi)	-29,9	-25,4
Valor Máximo de Ganho (dBi)	0,4	0,6
Variação de Ganho (dBi)	30,3	26

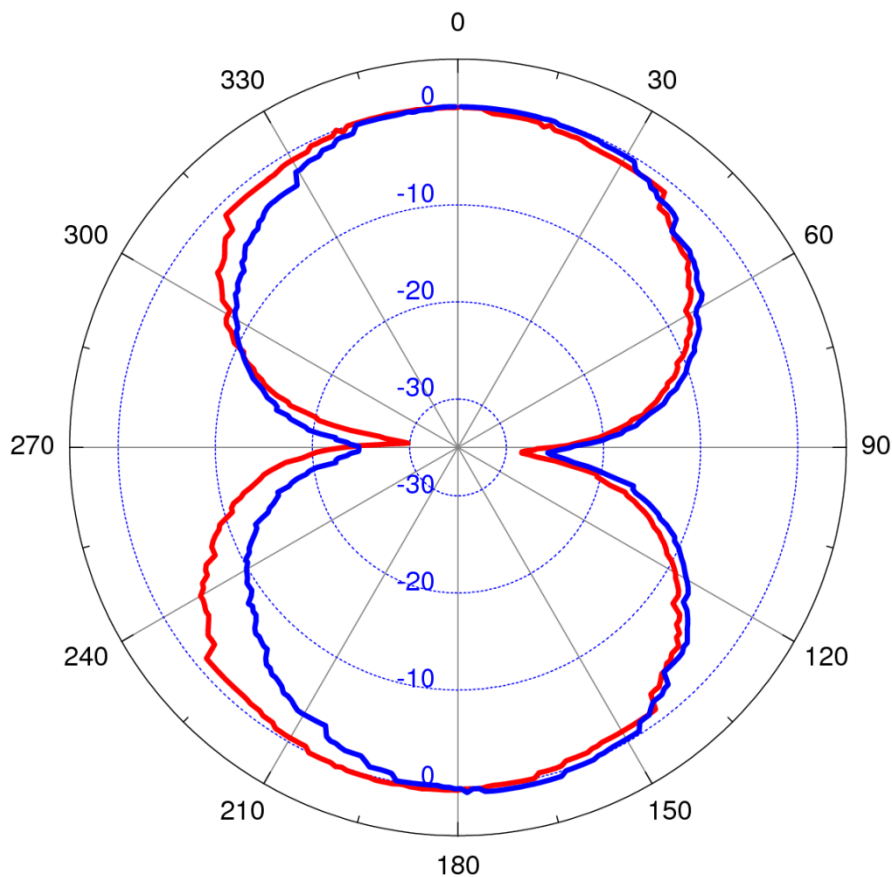


Figura 4.16. Sobreposição dos diagramas de irradiação do Dipolo Dobrado com e sem a utilização do *Balun*.

O fato da variação do ganho ser maior com o uso do Balun sugere uma maior eficiência de radiação na direção de máximo nível de sinal da antena. Na aquisição dos padrões radiais das antenas o nível de sinal é normalizado em zero, logo, a antena que apresentar a maior variação de ganho conseqüentemente transmitiu mais potência.

### **4.3 CONCLUSÕES**

O diagrama de irradiação obtido experimentalmente é o mesmo do Dipolo de Meia Onda. As pequenas diferenças ficam por conta do desempenho inferior obtido com o Dipolo Dobrado, que proporcionou um ganho menor e por conseqüência um maior ângulo de meia potência.

O uso do Balun provou-se essencial para o experimento, sem o qual não há como adquirir um padrão radial com características válidas. O Balun evita que haja a necessidade de aumentar a potência transmitida para obter um mesmo resultado. É útil também quando se faz necessário acoplar antenas e linhas de transmissão de diferentes impedâncias.

A proximidade de objetos ao redor das antenas acaba por refletir as OEM de volta para a antena receptora agregando-se ao sinal diretamente transmitido. Esse fenômeno explica o aumento do ângulo de meia potência das antenas Dipolo de Meia Onda e Dipolo Dobrado em relação ao valor teórico de  $78^\circ$ .

## **5 EXPERIMENTO 3 – ANTENA YAGI**

Esta experiência tem como objetivo principal medir o padrão de radiação nos planos horizontal e de elevação da antena Yagi. São estudadas as características de polarização e largura do feixe de irradiação, bem como as suas principais aplicações e modos de construção.

### **5.1 FUNDAMENTOS**

A fundamentação da antena Yagi é abordada de três maneiras distintas. Primeiramente é explicado seu funcionamento e suas características de construção. Em seguida é realizado um estudo comparando as características de ganho da antena com a quantidade de elementos que a compõem. Finalmente são citados alguns usos mais comuns da antena Yagi.

#### **5.1.1 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DA ANTENA YAGI**

A antena Yagi consiste em um arranjo de elementos utilizados para aumentar a diretividade de um dipolo. Alguns elementos parasitas são montados próximos do dipolo a ser orientado sem nenhuma conexão com a fonte. Desse modo, o campo irradiado pelo dipolo induz corrente elétrica nos elementos parasitas, estes por sua vez passam a irradiar campos elétricos que, se dimensionados corretamente, somam-se ao do dipolo, produzindo um aumento na diretividade.

A Fig. 5.1 mostra um desenho representando os elementos da antena Yagi. O irradiador mais comumente utilizado é o dipolo de meia onda. Os elementos 1, 3, 4 e 5 na Fig. 5.1 são os chamados de elementos parasitas, não conectados ao transmissor. O elemento de número 2 é o radiador, conectado diretamente a linha de transmissão. O elemento

“Refletor” na Fig. 5.1, como diz o nome, tem a função de refletir a OEM na direção desejada, neste caso o eixo “y”. O seu comprimento um pouco maior propicia este efeito reflexivo [4]. Os “Diretores” têm como função apenas aumentar o ganho da antena na direção desejada (eixo “y”). Analogamente ao efeito causado pelo refletor, o dimensionamento um pouco menor dos Diretores, em função do seu comportamento capacitivo, propicia um aumento na OEM irradiada [4].

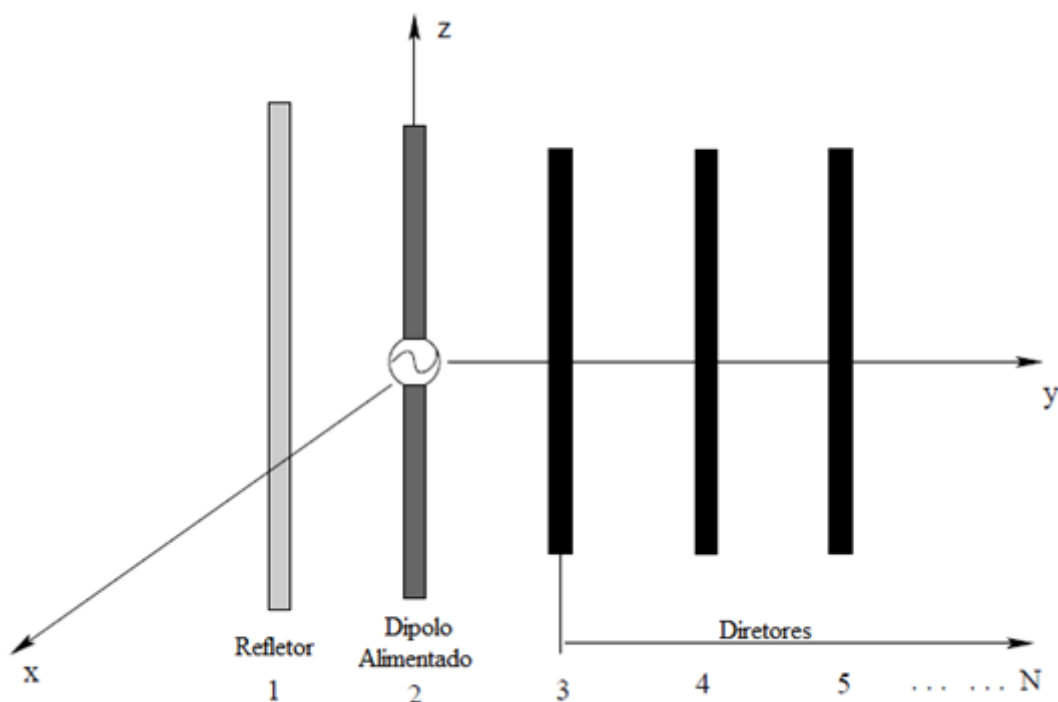


Figura 5.1. Elementos da Antena Yagi.

Este arranjo de elementos que compõe a antena Yagi não é um arranjo qualquer. O Professor de Engenharia Elétrica da universidade de Tohoku no Japão, Hidetsugu Yagi e seu assistente, o Professor Shintaro Uda, realizaram na década de 1920 uma série de experiências para medição do padrão de irradiação e do ganho de arranjos simples, com um elemento refletor e um elemento diretor, e arranjos mais complexos, com um refletor e até 30 diretores. O maior ganho encontrado foi no caso de um refletor com comprimento um pouco maior que

$\lambda/2$  e a uma distância de  $\lambda/4$  do elemento radiador e diretores em torno de 10% menores que  $\lambda/2$  e espaçados de  $\lambda/3$  uns dos outros [1]. É importante ressaltar que a adição de mais de um refletor não apresenta uma melhora significativa de desempenho do conjunto [4].

A antena utilizada nos experimentos está dimensionada da seguinte maneira:

- O refletor possui um comprimento um pouco maior que  $\lambda/2$  e está a uma distância de  $\lambda/4$  do elemento radiador.
- O radiador (emissor) é um dipolo de meia onda. Seu comprimento é um pouco menor que  $\lambda/2$  no intuito de reduzir a parcela reativa da impedância gerada pelo efeito do acúmulo de carga nas pontas, conforme visto na seção 3.2.
- Os diretores são em torno de 10% menores que o radiador e possuem um espaçamento de  $\lambda/5$  entre eles. A antena possui quatro elementos diretores.

A Tab. 5.1 mostra as medições realizadas com a antena, onde o espaçamento se dá em relação ao radiador. Essas dimensões são satisfatórias para a realização do experimento. Um comparativo dos diagramas de irradiação da antena com diferentes espaçamentos será apresentado na sequência, comprovando que o dimensionamento utilizado é o mais eficaz.

**Tabela 5.1. Comprimento da antena dipolo de meia onda.**

Antena Yagi	Refletor	Radiador	Diretores
Comprimento (m)	0,33	0,28	0,275
Espaçamento (m)	0,15		0,12



### 5.1.2 RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE ELEMENTOS E O GANHO DA ANTENA YAGI

A relação de ganho e número de elementos da antena Yagi é simples, quanto mais elementos, maior é o ganho. A Fig. 5.2 mostra o ganho máximo da antena Yagi em relação ao dipolo de meia onda em função do número de elementos. Na necessidade de se projetar uma antena Yagi com um determinado ganho, então é possível saber quantos elementos devem ser utilizados a partir da Fig. 5.2.

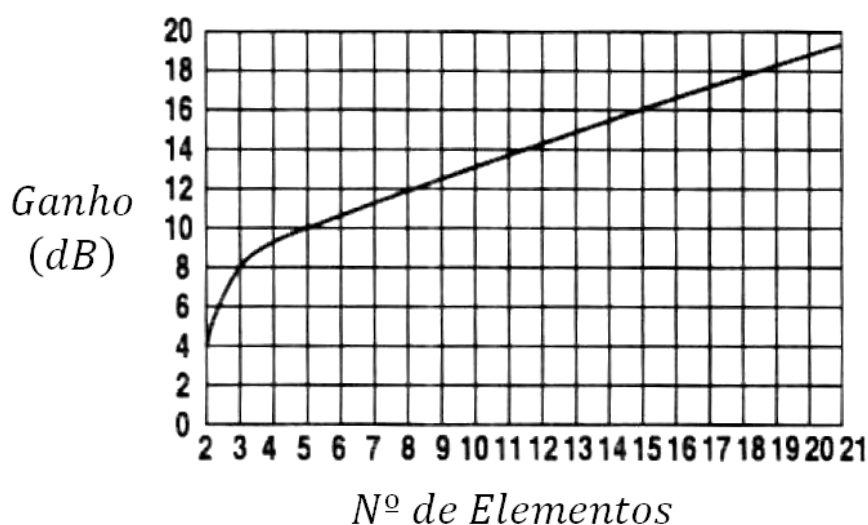


Figura 5.2. Ganho máximo em função do número de elementos.

Para a antena Yagi com mais de três elementos o ganho máximo é determinado principalmente pelo comprimento do conjunto. Contudo, é interessante adotar-se um critério de espaçamentos que leve em consideração também a impedância do conjunto. Com este objetivo, a Tab. 5.2 apresenta os espaçamentos entre elementos para Yagis com um número qualquer de elementos. Para um número superior a 6 diretores, o espaçamento entre eles devem ser constantes dentro do intervalo de  $0,35\lambda$  a  $0,42\lambda$ . Ainda nesta tabela verifica-se que, à medida que os diretores se afastam do excitador, o espaçamento entre eles aumenta, mantendo-se a impedância em níveis razoáveis [4].

**Tabela 5.2. Espaçamento entre os elementos em função do número destes.**

<i>Nº de Elementos</i>	<i>R – E</i>	<i>E – D<sub>1</sub></i>	<i>D<sub>1</sub> – D<sub>2</sub></i>	<i>D<sub>2</sub> – D<sub>3</sub></i>	<i>D<sub>3</sub> – D<sub>4</sub></i>	<i>D<sub>4</sub> – D<sub>5</sub></i>	<i>D<sub>5</sub> – D<sub>6</sub></i>
2	0,15λ a 0,20λ						
2		0,07λ a 0,11λ					
3	0,16λ a 0,25λ	0,16λ a 0,19λ					
4	0,18λ a 0,28λ	0,13λ a 0,17λ	0,14λ a 0,18λ				
5	0,18λ a 0,22λ	0,14λ a 0,17λ	0,15λ a 0,20λ	0,17λ a 0,23λ			
6	0,16λ a 0,20λ	0,14λ a 0,17λ	0,16λ a 0,25λ	0,22λ a 0,30λ	0,25λ a 0,32λ		
7	0,16λ a 0,20λ	0,14λ a 0,16λ	0,18λ a 0,25λ	0,25λ a 0,35λ	0,27λ a 0,32λ	0,27λ a 0,33λ	0,30λ a 0,40λ
8 a N	0,16λ a 0,20λ	0,14λ a 0,16λ	0,18λ a 0,25λ	0,25λ a 0,35λ	0,27λ a 0,32λ	0,27λ a 0,33λ	0,35λ a 0,42λ

As letras R, E e D, mostradas na Tab. 5.2 designam respectivamente, o Refletor, o Excitador (Radiador ou Emissor) e o Diretor. A simbologia R – E representa o espaçamento entre o Refletor e o Excitador. A primeira linha da tabela sugere uma antena Yagi construída apenas com um Refletor e um Emissor. A segunda linha sugere uma antena construída apenas com um Emissor e um diretor. O raciocínio segue o mesmo para todas as linhas da Tab. 5.2, sendo que para antenas com mais de oito elementos o espaçamento a partir do sexto diretor deve se manter na faixa de 0,35λ a 0,42λ.

Com base nos dados da Tab. 5.2, podemos verificar se o dimensionamento da antena utilizada nos experimentos está de acordo. Para tanto, a Tab. 5.3 mostra o espaçamento esperado (teórico) e o medido entre os elementos, onde a frequência utilizada é a de 500MHz, logo o comprimento de onda de operação é  $\lambda = 0,6m$ . Como a antena utilizada possui seis elementos, a Tab. 5.3 deve ser preenchida da seguinte maneira:

**Tabela 5.3. Espaçamento entre os elementos: comparação entre teoria e prática.**

Antena Yagi	<i>R – E</i>	<i>E – D<sub>1</sub></i>	<i>D<sub>1</sub> – D<sub>2</sub></i>	<i>D<sub>2</sub> – D<sub>3</sub></i>	<i>D<sub>3</sub> – D<sub>4</sub></i>
Espaçamento Teórico (m)	0,096 a 0,12	0,084 a 0,102	0,096 a 0,15	0,132 a 0,18	0,15 a 0,192
Espaçamento Real (m)	0,15	0,12	0,12	0,12	0,12

Conforme já mencionado, a Tab. 5.2 é apenas um guia para manter a impedância em níveis razoáveis, logo pequenas divergências encontradas não irão causar grandes efeitos no casamento de impedância e por consequência não irão afetar diagrama de irradiação da antena.

### **5.1.3 APLICAÇÕES DA ANTENA YAGI**

A antena Yagi é mais comumente utilizada para trabalhar nas frequências de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), apresentando ganhos bastante elevados e simplicidade de construção.

As antenas Yagi podem ser dimensionadas para uma frequência central do canal de operação (Yagi de banda estreita) ou para uma certa faixa de operação (Yagi de banda larga).

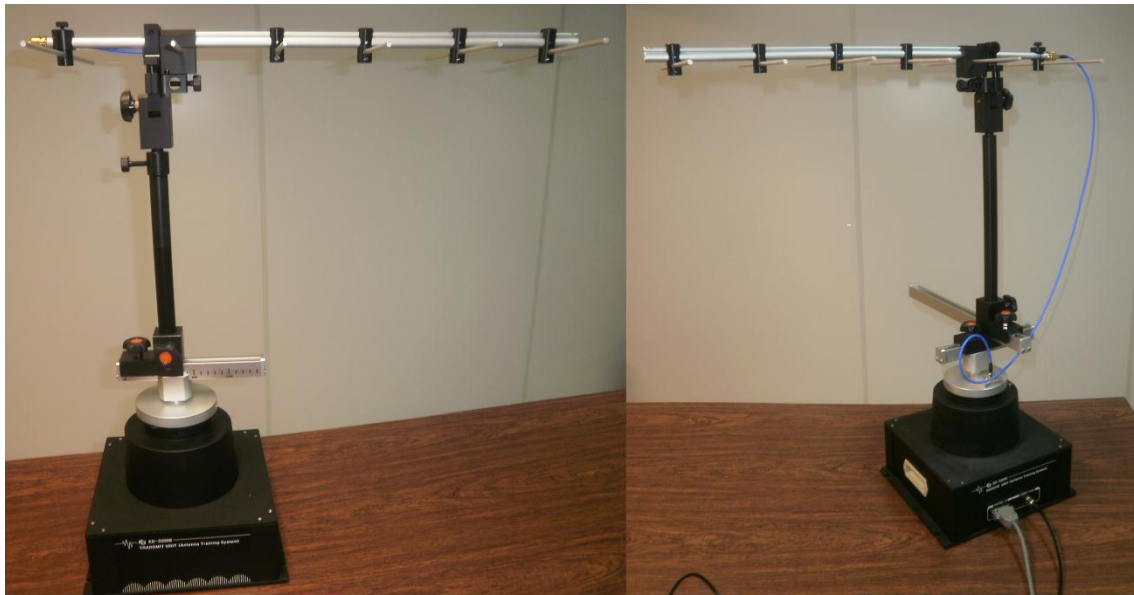
A antena Yagi de banda larga deve conter o refletor dimensionado para a frequência inferior da faixa, o excitador para a frequência central e os diretores para a frequência superior da faixa.

É possível ainda modificar a impedância de entrada da antena Yagi utilizando como excitador um Dipolo Dobrado [4].

## 5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deve ser executado conforme os passos descritos a seguir.

1. Distribuir adequadamente os equipamentos levando em conta os comprimentos dos cabos e a localização do computador e das tomadas.
2. Certificar que não haja nenhum obstáculo a menos de três metros das antenas em nenhuma direção.
3. **Não forçar o rotor da unidade de recepção coma as mãos, movimentando-o apenas através do controlador ou do computador.**
4. Fixar a antena Yagi Transmissora de  $500\text{MHz}$  no controlador de polarização do suporte da antena de transmissão. Encaixar o suporte na base da unidade de transmissão e ajustar a antena de modo que fique no mesmo plano em relação à terra (conforme mostra a Fig. 5.3a). Neste caso a polarização da antena torna-se horizontal. É importante frisar que ambas as antenas, transmissora e receptora, possuem as mesmas dimensões. No decorrer dos experimentos, apenas a antena Yagi Receptora sofrerá algumas modificações.
5. Com o equipamento ainda desligado, conectar a saída da oscilação de  $500\text{MHz}$  à antena Yagi através do cabo SMA de dois metros de comprimento.
6. Conectar a Antena Yagi Receptora no suporte da unidade receptora. Ajustar a antena para que fique em paralelo com o plano de terra, deste modo a polarização da antena torna-se horizontal. Ajustar o centro de rotação da antena com o centro de rotação da unidade receptora, conforme mostra a Fig. 5.3b. Conectar também a antena ao terminal de entrada do sinal de RF (RF IN) através do cabo SMA.



(a)

(b)

Figura 5.3. Antenas Yagis em polarização horizontal. (a) Yagi Transmissora. (b) Yagi Receptora.

Nesta configuração é medido indiretamente o padrão de irradiação da Antena Yagi no plano de Elevação (Plano E), conforme explicado detalhadamente na seção 2.2 do presente trabalho.

7. Conectar o terminal OUTPUT (1kHz) da unidade de recepção ao terminal INPUT (1kHz) do controlador principal através do cabo BNC.
8. A distância entre as antenas, representada pela letra  $r$  na Fig. 5.4, deve ser no mínimo 1,7m, pois desta maneira é garantido que as medidas estão sendo realizadas no campo distante da antena, conforme visto no Cap. 3. As antenas devem estar posicionadas na mesma direção e sentidos opostos, conforme mostra a Fig. 5.4.

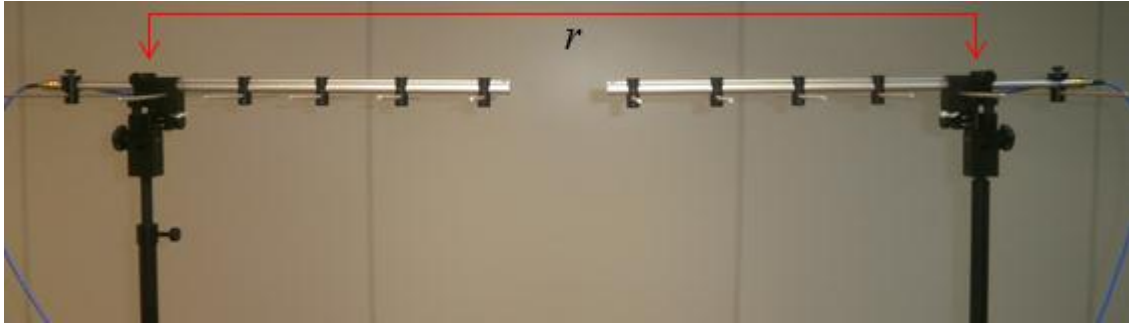


Figura 5.4. Alinhamento das antenas Yagis em polarização horizontal.

9. Desabilitar as chaves de oscilação e modulação de frequência.
10. Ligar o controlador.
11. Ligar as chaves de oscilação de 500MHz e a chave de modulação (*Mod*).
12. Adquirir o padrão de irradiação da Antena Yagi.

É esperado teoricamente que o diagrama de irradiação da antena Yagi apresente uma alta diretividade, ou seja, toda potência irradiada se concentra em uma região mais estreita se comparado ao Dipolo de Meia Onda. Neste caso, o ângulo de meia potência será pequeno, em função da alta diretividade, e o diagrama de irradiação teórico esperado é mostrado na Fig. 5.5.

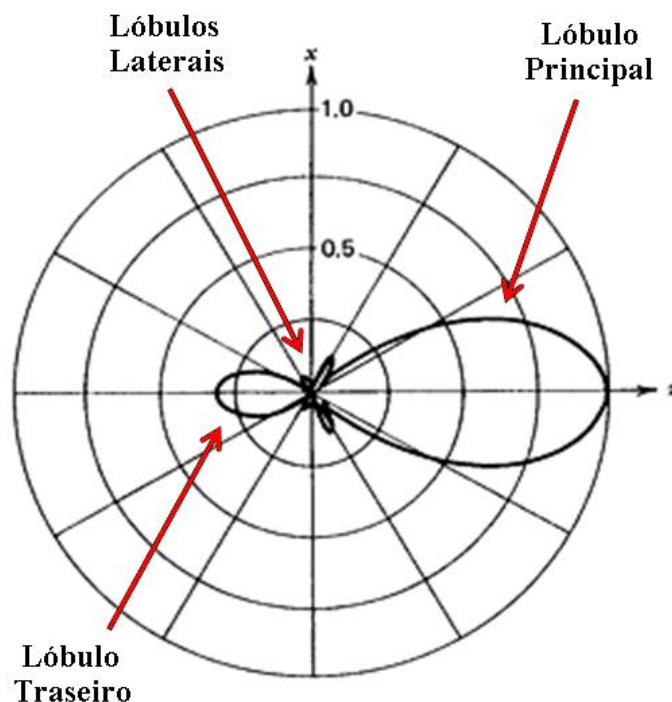


Figura 5.5. Diagrama de irradiação teórico de uma antena Yagi de seis elementos, no plano de Elevação.

Na Fig. 5.5 o maior lóbulo, orientado na direção de “z”, é chamado de lóbulo principal e o menor, no sentido oposto, é o lóbulo traseiro. Os lóbulos pequenos orientados na direção de “x” são chamados de lóbulos laterais.

O diagrama mostrado na Fig. 5.6 está de acordo com o padrão teórico apresentado. É possível notar todos os lóbulos citados, levando em conta as distorções em função das interferências causadas pela inadequação do ambiente onde foi realizado o experimento. Os diagramas apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6 apresentam diferentes referências, ou seja, na Fig. 5.5 o eixo de máxima irradiação é na direção horizontal da página e na Fig. 5.6 é na direção vertical da página. Essas referências não interferem na análise.

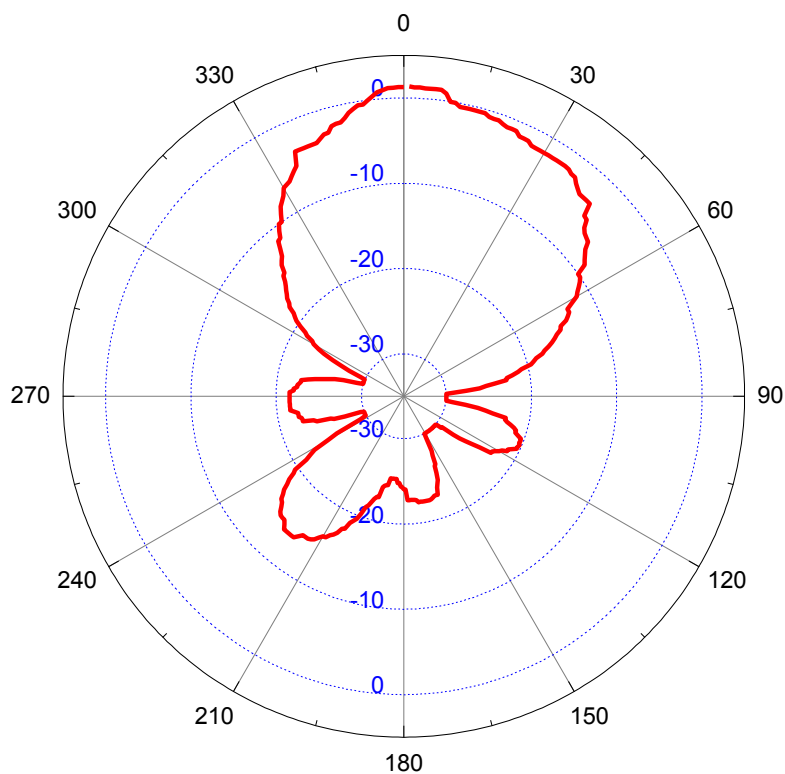


Figura 5.6. Diagrama de irradiação da Antena Yagi no Plano de Elevação (Plano E) obtido experimentalmente.

13. Após salvar o diagrama de irradiação adquirido em um arquivo, polarizar verticalmente as antenas Yagis, girando-as  $90^\circ$ , conforme mostra a Fig. 5.7. A polarização vertical das antenas tem como objetivo medir o Plano Horizontal (Plano H) da antena receptora, conforme visto detalhadamente na seção 2.2 do presente trabalho.

O padrão de irradiação teórico nesta configuração é mostrado na Fig. 5.8. Possui características semelhantes ao Plano de Elevação, mas apresenta os lóbulos laterais um pouco maiores.





Figura 5.7. Antena Yagi polarizada verticalmente.

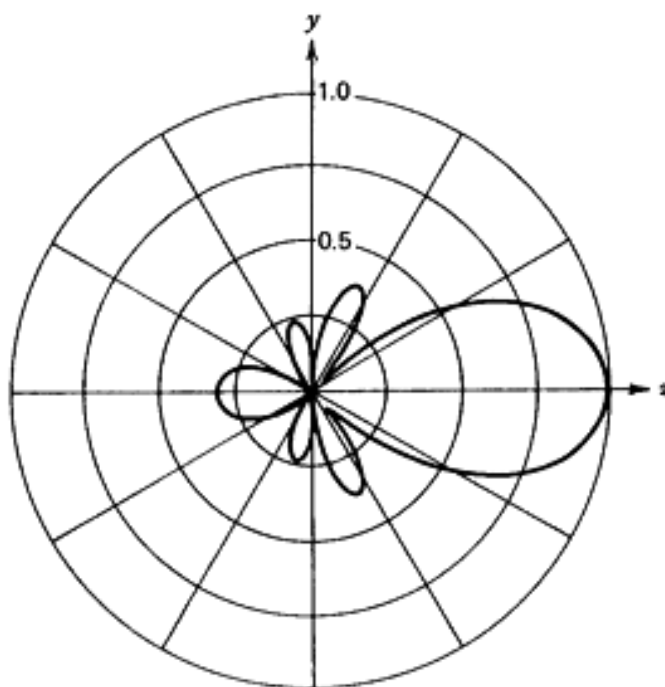


Figura 5.8. Diagrama de irradiação teórico de uma antena Yagi de seis elementos, no plano Horizontal.

O diagrama de irradiação obtido experimentalmente é mostrado na Fig. 5.9. Conforme esperado, os lóbulos laterais são consideravelmente maiores, prejudicando a diretividade da antena no eixo de máxima irradiação. Isto se explica pelo fato de que a potência transmitida não está totalmente concentrada no lóbulo principal, conforme visto no Plano de Elevação, e se “espalha” entre os lóbulos laterais. Neste caso, o ganho relativo da antena é menor, em relação ao Plano E, e o seu ângulo de meia potência é maior.

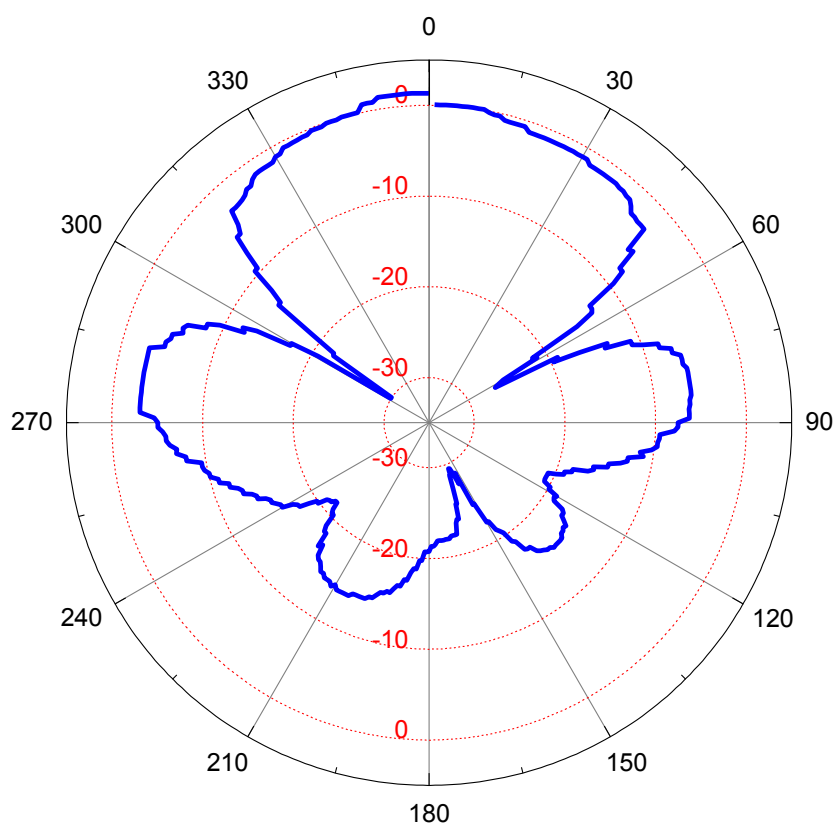


Figura 5.9. Diagrama de irradiação da Antena Yagi no Plano Horizontal (Plano H) obtido experimentalmente.

14. Determinar o ângulo de meia potência através da utilização dos cursores. A Fig. 5.10 apresenta o procedimento efetuado na determinação do ângulo de meia potência para os padrões de irradiação no Plano E e no Plano H, respectivamente.

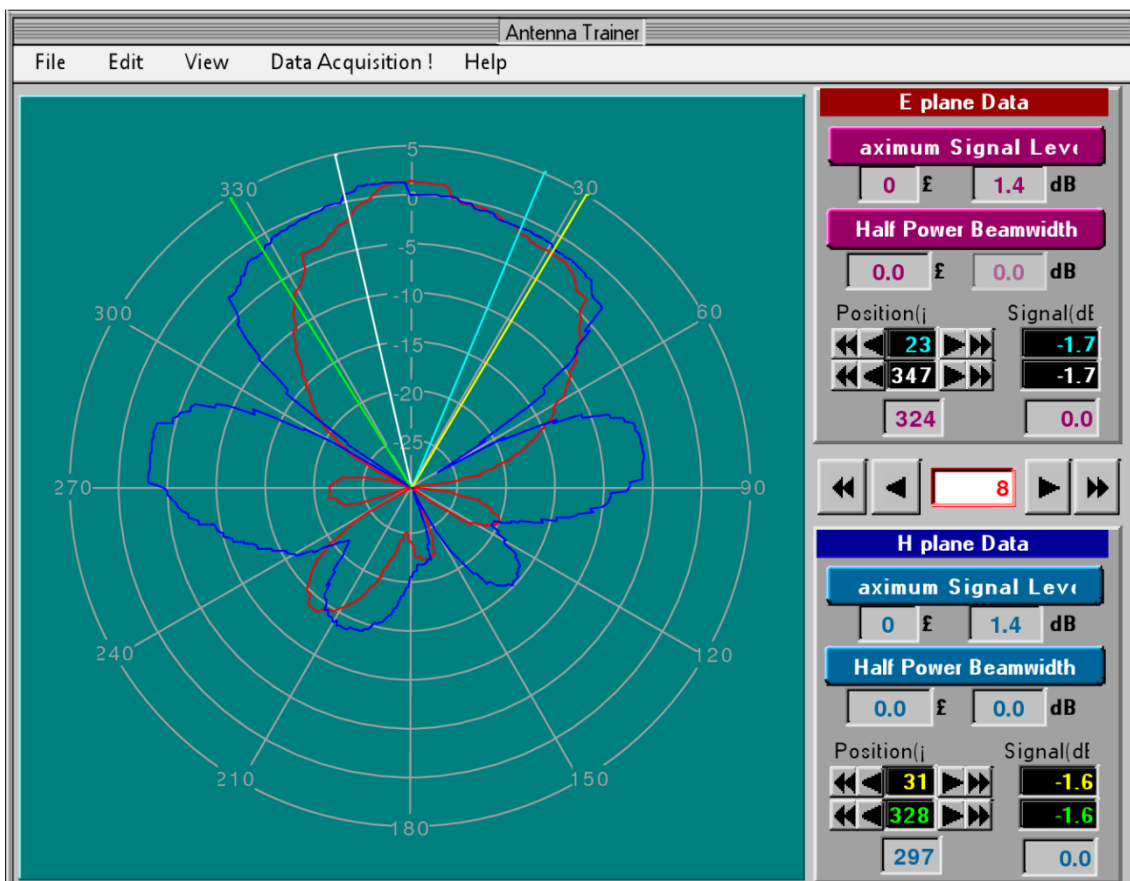


Figura 5.10. Determinação do ângulo de meia potência nos Planos E e H da Antena Yagi.

Para este experimento, o programa não consegue mostrar automaticamente os ângulos de meia potência para estes padrões de irradiação, conforme pode ser visto pelos valores zerados nas abas denominadas “*Half Power Beamwidth*”. Neste caso a utilização dos cursores é imprescindível.

Os cursores azul e branco, referentes ao Plano E, devem ser posicionados no ponto onde a potência decresce  $3dB$  em relação ao seu valor máximo, ou seja,  $1,4dB - 3dB = -1,6dB$ . Os valores mostrados na aba “*Position*” são, de cima para baixo, ângulo de posicionamento do cursor azul, ângulo de posicionamento do cursor branco e a diferença entre eles ( $\Delta_{Dif}$ ). Para se obter o valor do ângulo de meia potência é necessário fazer:

$$HPBW = 360^\circ - \Delta_{Dif}. \quad (5.1)$$

A determinação do ângulo de meia potência para o plano H é análoga ao Plano E, os cursores amarelo e verde devem ser posicionados no ângulo em que o sinal decresce  $3dB$  e a Fórmula 5.1 dever ser utilizada igualmente.

Sendo assim, os ângulos de meia potência para o Plano E e o Plano H são, respectivamente,  $36^\circ$  e  $63^\circ$ .

É difícil determinar teoricamente o ângulo de meia potência da Antena Yagi, mas para algumas antenas comerciais pesquisadas, o ângulo de meia potência está em torno de  $45^\circ$  no plano de Elevação e  $60^\circ$  no plano Horizontal.

15. Alterar o espaçamento entre os elementos Diretores da Antena Yagi de maneira arbitrária e refazer os passos 4 a 12.

A Fig. 5.11 mostra o diagrama de irradiação no Plano E da antena Yagi com os espaçamentos entre os Diretores reduzidos de  $0,12m$  para  $0,115m$ , representada no gráfico pela curva verde. A curva vermelha é o padrão de irradiação original da Antena Yagi no plano de Elevação. É possível notar que a antena Yagi está originalmente bem dimensionada. Isso se prova analisando o tamanho do lóbulo traseiro da Antena Yagi alterada, que neste

caso é bem maior e causa uma redução na diretividade da antena no eixo de maior irradiação (sentido do lóbulo principal). Alterar os espaçamentos entre os Diretores altera também a impedância de entrada da antena, causando assim um descasamento de impedância e prejudicando a eficiência de transmissão da antena.

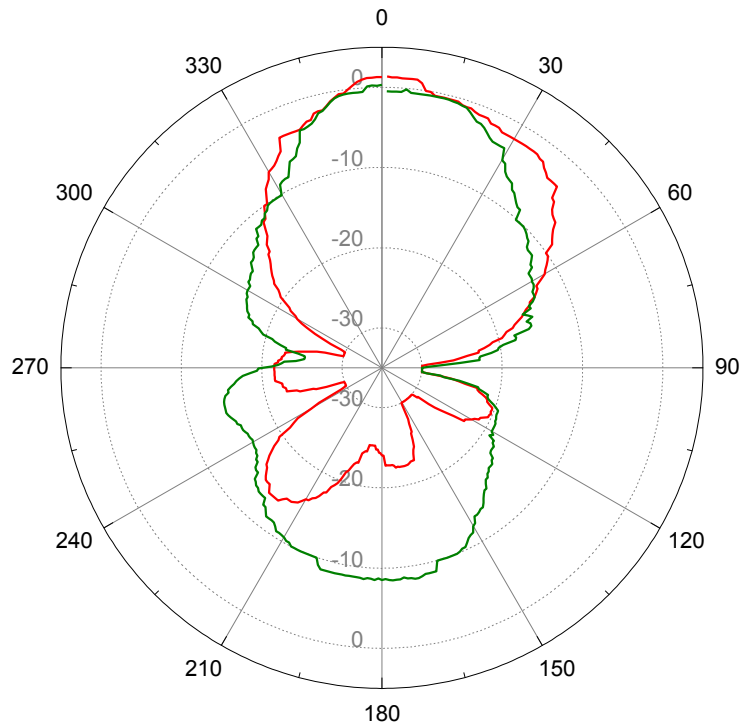


Figura 5.11. Diagrama de irradiação da Antena Yagi com espaçamento de  $0,115m$  entre os diretores.

A Fig. 5.12 mostra o diagrama de irradiação da Antena Yagi com os espaçamentos entre diretores ajustados em  $0,125m$  (curva azul). A conclusão é a mesma que no caso dos espaçamentos de  $0,115m$ , a antena perde eficiência e diretividade e seu padrão de irradiação começa a se aproximar ao do Dipolo de Meia Onda.

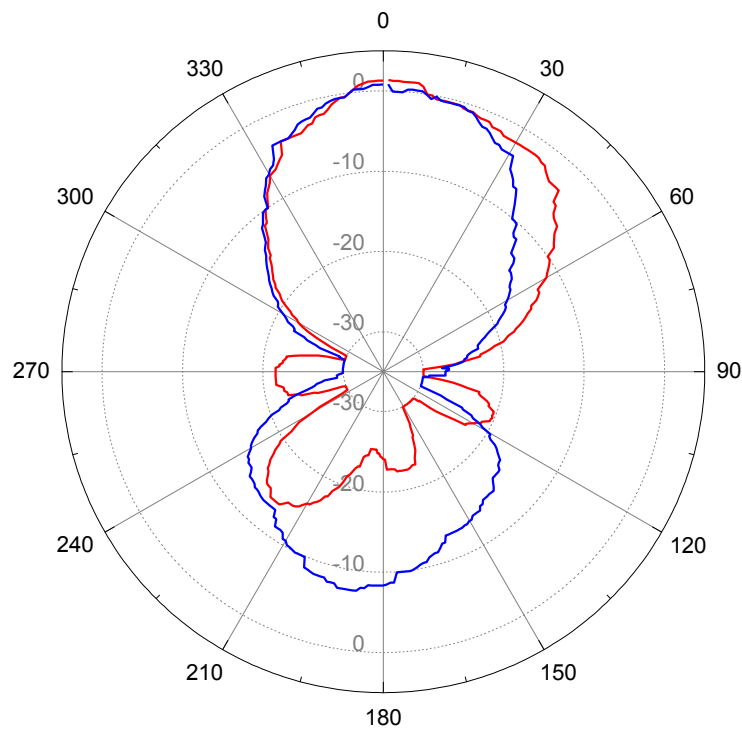


Figura 5.12. Diagrama de irradiação da Antena Yagi com espaçamento de  $0,125m$  entre os diretores.

### 5.3 CONCLUSÕES

Em suma, a antena Yagi concentra a potência de irradiação do Dipolo de Meia Onda na direção escolhida. É uma antena simples de se construir, pois todos seus parâmetros são pré-definidos, conforme mostrado nas seções 5.1.1 e 5.1.2. Apesar de sua simplicidade, apresenta um ótimo ganho diretivo e por consequência um ângulo de meia potência muito pequeno.

Alterações no espaçamento dos elementos diretores devem ser cuidadosas. É preciso analisar o quanto será modificada a impedância da antena para evitar perdas de potência em função do descasamento de impedância.

## 6 EXPERIMENTO 4 – ANTENA CORNETA

Esta experiência tem como objetivo principal medir o padrão de irradiação no plano horizontal e no plano de elevação da antena Corneta. São estudadas as características de polarização e largura do feixe do padrão de irradiação, bem como os diferentes modos da antena Corneta.

### 6.1 FUNDAMENTOS

A antena Corneta é estudada neste capítulo de três maneiras distintas. Primeiramente é explicado seu funcionamento. Em seguida, são abordadas questões relativas a sua geometria. Finalmente, são estudadas as características de diretividade da antena.

#### 6.1.1 FUNCIONAMENTO DA ANTENA CORNETA

A antena Corneta surge da necessidade de irradiar com eficiência OEM contidas no interior de um guia de onda. No caso das ondas emergirem do guia de onda retangular diretamente no ar, ocorre uma descontinuidade na constante de propagação da OEM, gerando ondas estacionárias e, por consequência, causando perdas por reflexão<sup>1</sup>.

A antena Corneta nada mais é do que uma extensão do guia de onda, dimensionada de maneira que o modo principal da OEM presente no guia de onda seja transmitida com a menor atenuação possível.

---

<sup>1</sup> Informações mais aprofundadas com relação à propagação das OEM em guias de onda podem ser encontradas no capítulo 9 do livro **Electromagnetic Waves and Antennas**, Sophocles J. Orfanidis, digitalizado em <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ch09.pdf>.

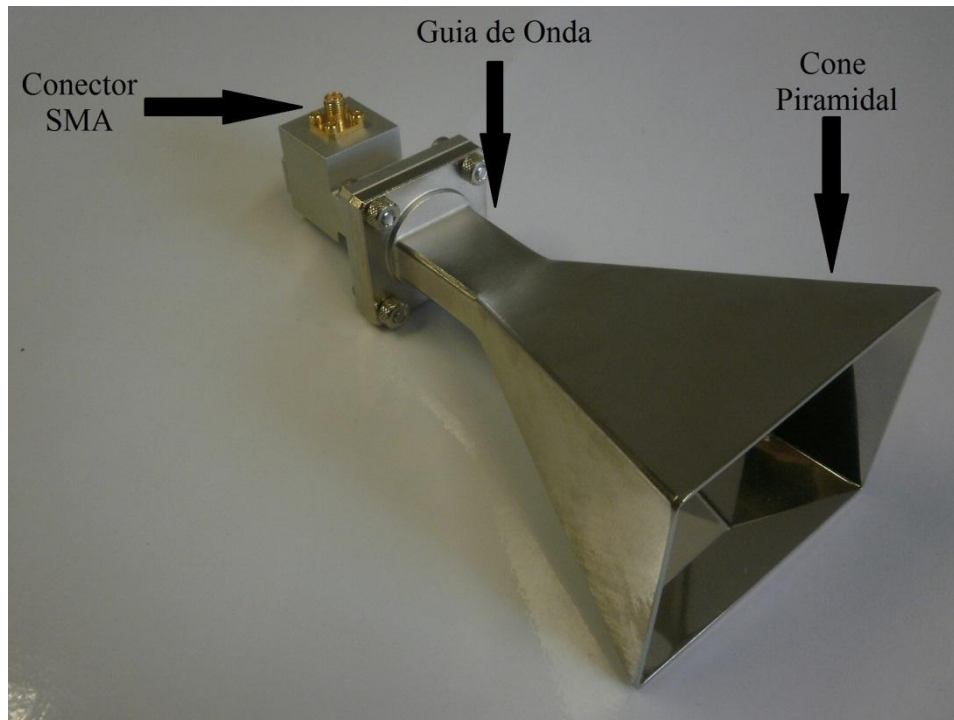


Figura 6.1. Antena Corneta Retangular com abertura Piramidal.

A Fig. 6.1 mostra a antena Corneta utilizada no experimento. A parte posterior possui um conector para o cabo SMA e em seu interior existe uma pequena antena que irradia a OEM no interior do guia de onda. O cone piramidal na outra extremidade é responsável pela transição da OEM para o meio externo. Corretamente dimensionada, a antena apresenta uma alta diretividade nos planos E e H.

### 6.1.2 GEOMETRIA DA ANTENA CORNETA

Vários fatores geométricos influenciam o desempenho da antena Corneta. A abertura piramidal utilizada neste experimento apresenta um ótimo ganho de diretividade em relação a sua simplicidade de construção. Existem outros tipos de construção do cone de abertura da antena Corneta, mas suas características de irradiação não serão avaliadas neste trabalho [1, p. 644-645].



Para realizar uma análise do desempenho da antena utilizada neste experimento, a Fig. 6.2 serve como referência geométrica das informações que serão expostas.

As setas perpendiculares desenhadas na parte central do bocal da antena representam os Planos de Elevação e Horizontal (Planos E e H, respectivamente). As aberturas no plano E e no plano H são respectivamente  $a_E$  e  $a_H$ .

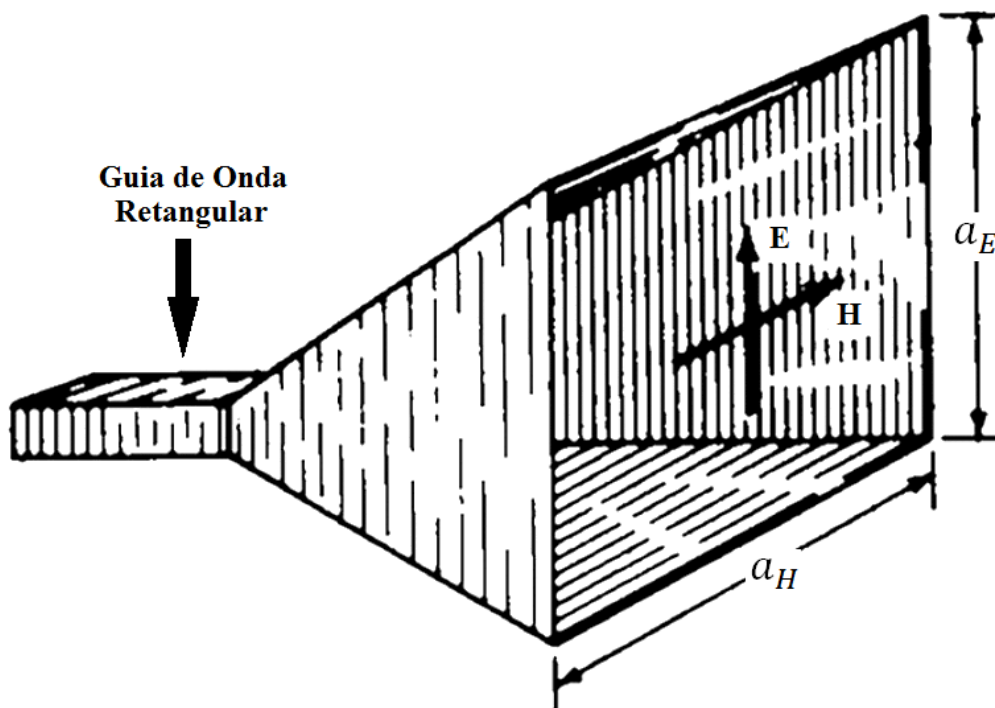


Figura 6.2. Antena Corneta Piramidal e notações.

A Fig. 6.3 mostra um corte transversal em relação ao plano de elevação da antena Corneta. O Plano E orientado para a parte superior da página indica que foi realizado um corte vertical na antena.

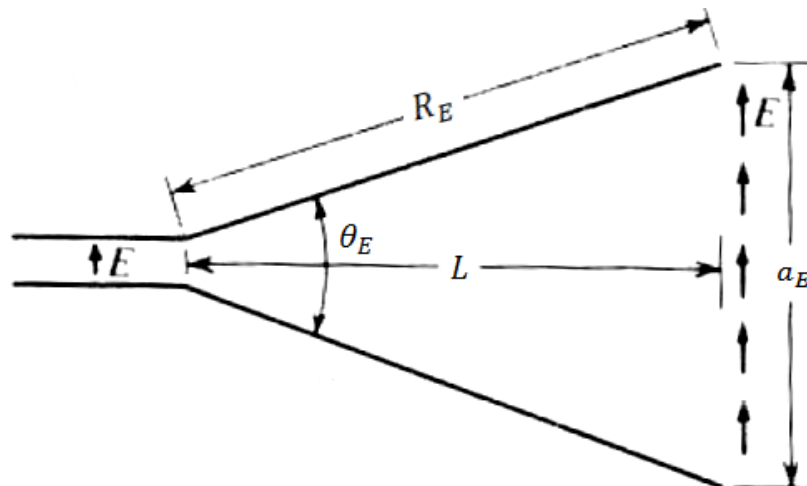


Figura 6.3. Seção vertical do Plano E da antena Corneta.

O ângulo representado por  $\theta_E$  é chamado de ângulo de abertura do plano de elevação. O comprimento axial é denominado pela letra  $L$  e o comprimento radial no Plano E é expresso por  $R_E$ . De posse destas informações é possível escrever as seguintes equações:

$$\cos \frac{\theta_E}{2} = \frac{L}{R_E}; \quad (6.1)$$

$$\sin \frac{\theta_E}{2} = \frac{a_E}{2R_E}; \quad (6.2)$$

$$\tan \frac{\theta_E}{2} = \frac{a_E}{2L}. \quad (6.3)$$

A Fig. 6.4 mostra a seção cruzada do plano horizontal da antena corneta. A orientação do Plano E agora é no sentido de sair da página, indicando que foi realizado um corte horizontal na antena.

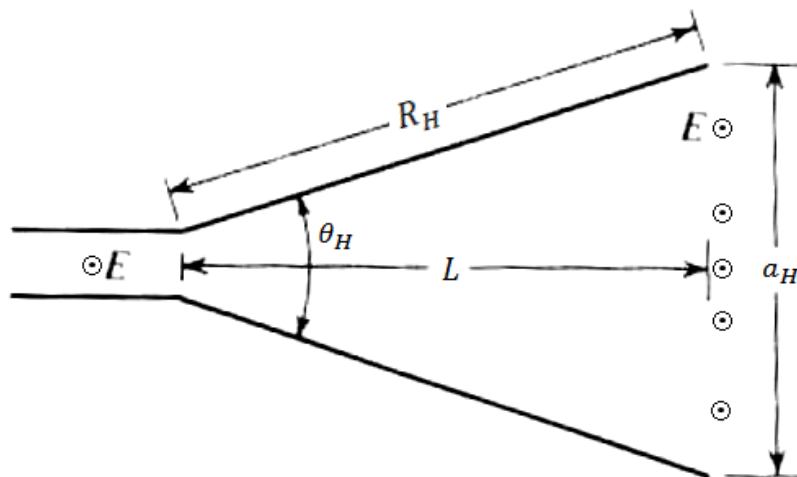


Figura 6.4. Seção horizontal do Plano H da antena Corneta.

Analogamente ao plano de elevação,  $\theta_H$  é chamado de ângulo de abertura do plano horizontal.  $L$  é o comprimento axial e  $R_H$  é o comprimento radial no Plano H. As equações a seguir são escritas a partir destas informações.

$$\cos \frac{\theta_H}{2} = \frac{L}{R_H}; \quad (6.4)$$

$$\sin \frac{\theta_H}{2} = \frac{a_H}{2R_H}; \quad (6.5)$$

$$\tan \frac{\theta_H}{2} = \frac{a_H}{2L}. \quad (6.6)$$

Para melhor entender o desempenho do cone retangular em função das suas dimensões analisaremos os padrões de irradiação medidos por Donald Rhodes<sup>2</sup> mostrados na Fig. 6.5.

<sup>2</sup> D. R. Rhodes, "An Experimental Investigation of the Radiation Patterns of Electromagnetic Horn Antennas, Proc. IRE, 36, 1101-1105, Setembro 1948.

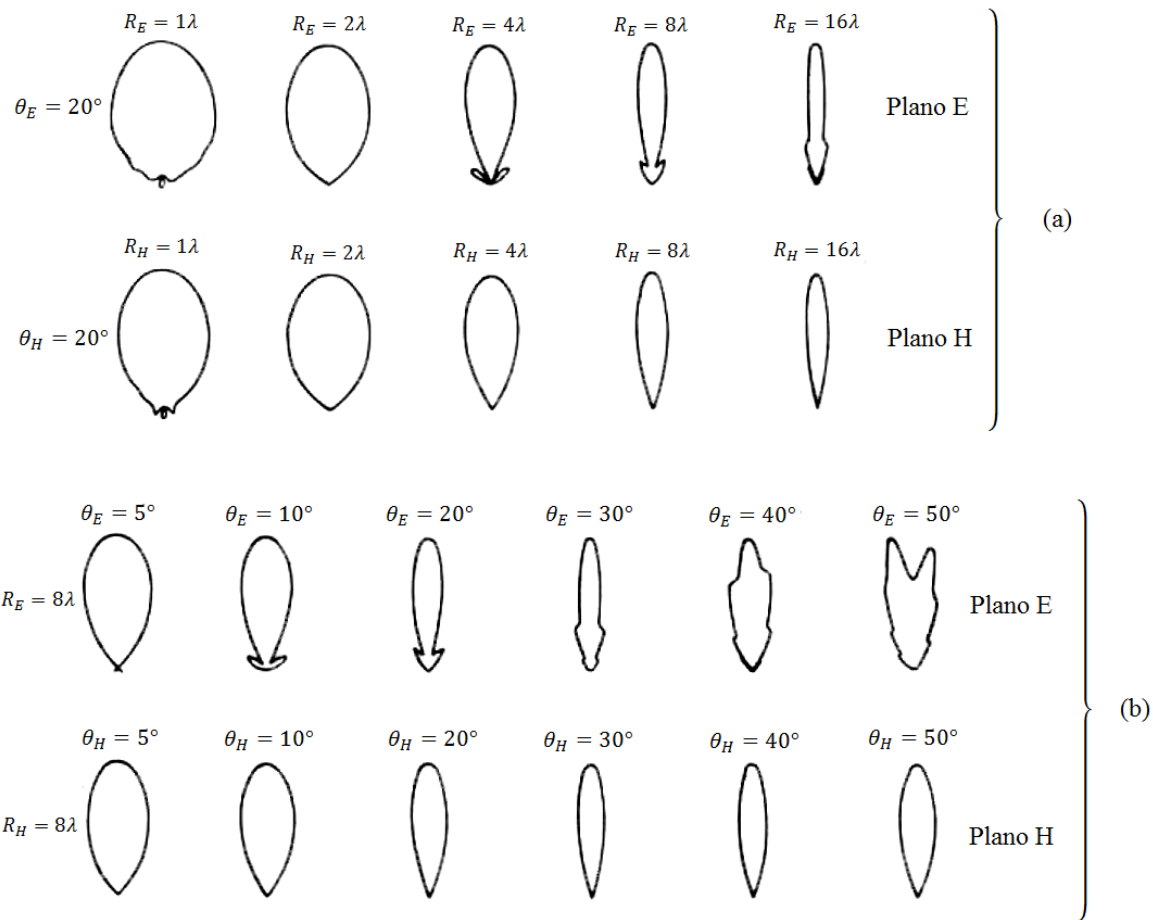


Figura 6.5. Medidas realizadas nos Planos E e H de antenas cornetas retangulares variando o ângulo de abertura e o comprimento radial.

Na Fig. 6.5a, os padrões de irradiação no plano E e no plano H são analisados como sendo uma função de  $R$ . O valor do ângulo de abertura é mantido em  $20^\circ$  para ambos os planos e comprimento radial ( $R$ ) varia de um a dezesseis comprimentos de onda.

Na Fig. 6.5b os padrões de irradiação são analisados como sendo função do ângulo de abertura. O comprimento radial é mantido em  $8\lambda$  e o ângulo de abertura varia de  $5^\circ$  a  $50^\circ$ .

Com base nestes padrões de irradiação apresentados por Rhodes, a Fig. 6.6 mostra os ângulos de meia potência para diferentes comprimentos axiais e ângulos de abertura da antena Corneta. Nesta figura, o comprimento axial é dado como função do comprimento de onda, ou seja,  $L_\lambda = L/\lambda$ .

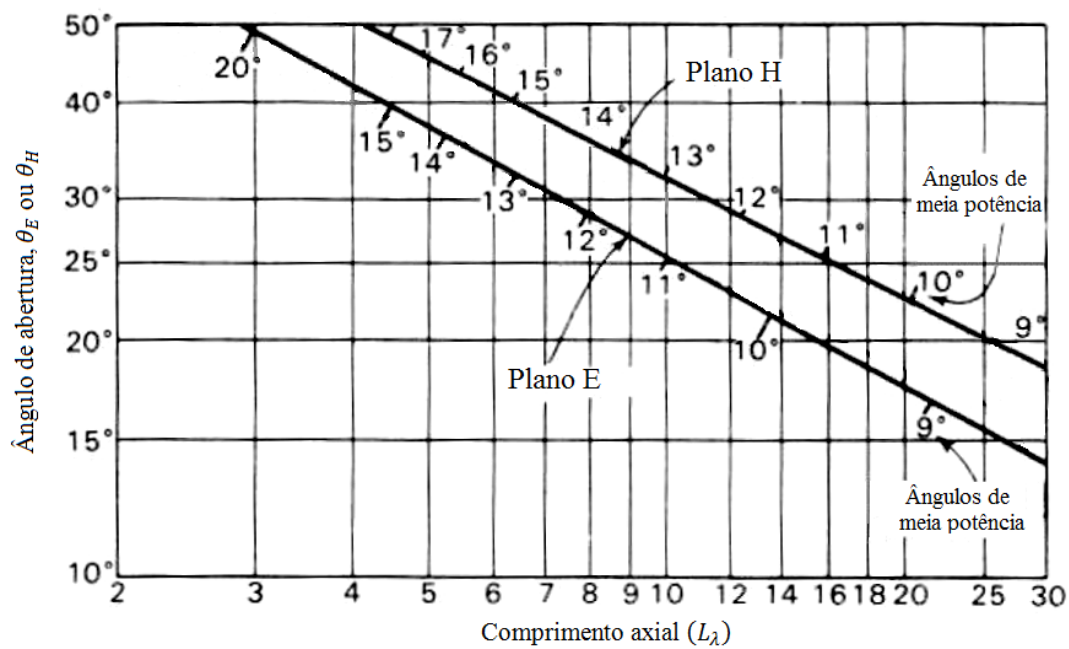


Figura 6.6. Gráfico do ângulo de meia potência em função do comprimento axial e do ângulo de abertura.

### 6.1.3 DIRETIVIDADE DA ANTENA CORNETA

A diretividade da antena corneta pode ser expressa em função de sua abertura efetiva.

Sendo assim,

$$D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi \varepsilon_{ap} A_p}{\lambda^2}, \quad (6.7)$$

onde:

- $A_e$  é a abertura efetiva em  $m^2$ ;
- $A_p$  é a abertura física em  $m^2$ ;
- $\varepsilon_{ap}$  é a eficiência de abertura, dada por  $A_e/A_p$ ;
- $\lambda$  é o comprimento de onda em  $m$ .

Para a antena corneta retangular piramidal analisada,  $A_p = a_E a_H$  (vide Fig. 6.2).

Assumindo que as dimensões de  $a_E$  e  $a_H$  são maiores que um comprimento de onda, pode-se

assumir que  $\varepsilon_{ap} \approx 0,6$  [1, p. 651]. Deste modo, a Eq. 6.7 pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$D \approx \frac{7,5A_p}{\lambda^2} = 10 \log \left( \frac{7,5a_E a_H}{\lambda^2} \right) \text{ (dBi)}. \quad (6.8)$$

## 6.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deve ser executado conforme os passos descritos a seguir.

1. Distribuir adequadamente os equipamentos levando em conta os comprimentos dos cabos e a localização do computador e das tomadas.
2. Certificar que não haja nenhum obstáculo a menos de três metros das antenas em nenhuma direção.
3. **Não forçar o rotor da unidade de recepção coma as mãos, movimentando-o apenas através do controlador ou do computador.**
4. Fixar a antena Corneta de 10GHz no controlador de polarização do suporte da antena de transmissão. Encaixar o suporte na base da unidade de transmissão e ajustar a antena de modo que fique no mesmo plano em relação à terra (conforme mostra a Fig. 6.7a). Neste caso a polarização da antena torna-se horizontal.
5. Com o equipamento ainda desligado, conectar a saída da oscilação de 10GHz à antena Corneta através do cabo SMA de dois metros de comprimento.
6. Conectar a outra antena Corneta no suporte unidade receptora. Ajustar a antena para que fique paralela em relação à terra, deste modo a polarização torna-se horizontal. Ajustar o centro de rotação da antena com o centro de rotação da unidade receptora conforme mostra a Fig. 6.7b. Conectar também a antena ao terminal de entrada do sinal de RF (RF IN) através do cabo SMA.

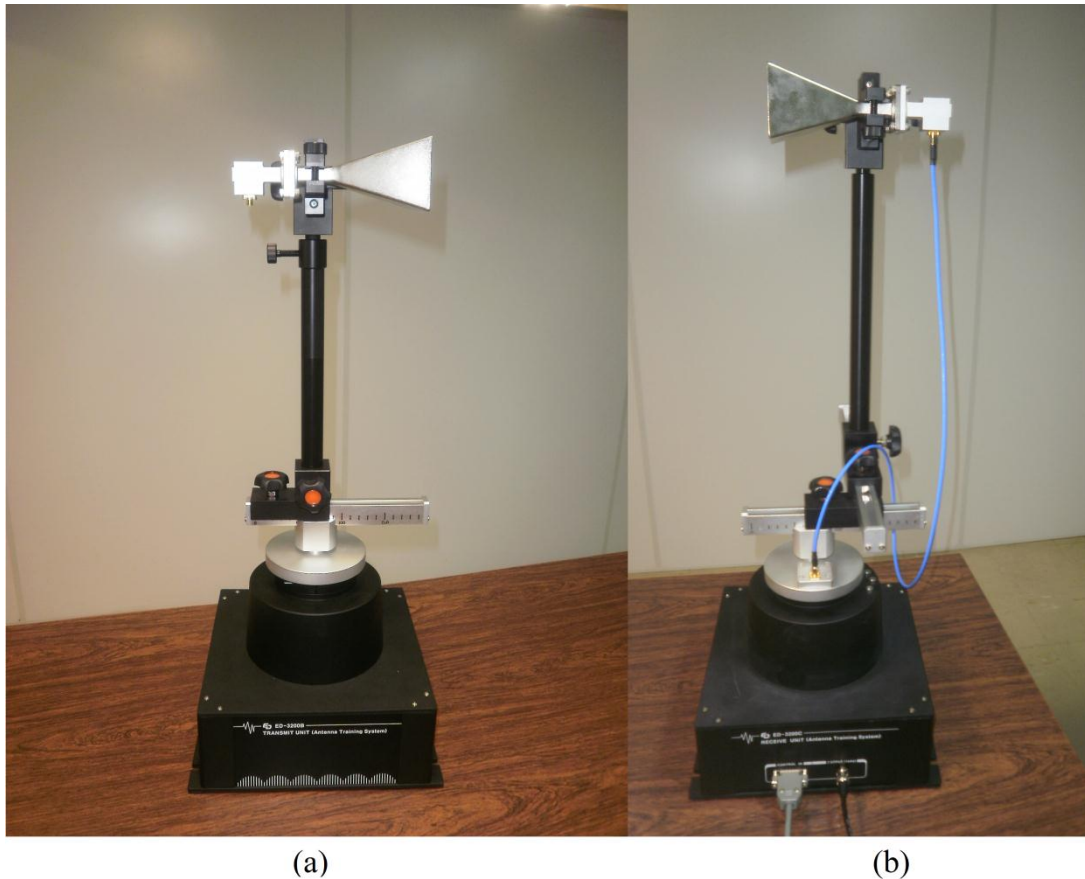


Figura 6.7. Antenas Corneta. (a) Transmissora. (b) Receptora.

Nesta configuração é medido indiretamente o padrão de irradiação da Antena Corneta, com polarização vertical, no plano de Elevação (Plano E), conforme explicado detalhadamente na seção 2.2 do presente trabalho.

7. Conectar o terminal OUTPUT (1kHz) da unidade de recepção ao terminal INPUT (1kHz) do controlador principal através do cabo BNC.
8. A distância entre as antenas, representada pela letra “r” na Fig. 6.8, deve ser no mínimo 0,96m, conforme mostra a Eq. 6.9. Desta maneira é garantido que as medidas estão sendo realizadas no campo distante da antena, conforme visto no Cap. 3.

$$r = \frac{2L^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0,12^2}{0,03} = 0,96m. \quad (6.9)$$

Onde:

- $L$  é a dimensão máxima da antena, em  $m$ .
- $\lambda$  é o comprimento de onda, em  $m$ .

O comprimento axial ( $L$ ), conforme visto na Fig. 6.3, é a dimensão máxima da antena e mede  $0,12m$ . O comprimento de onda ( $\lambda$ ) calculado para a frequência de  $10GHz$  é de  $0,03m$ .

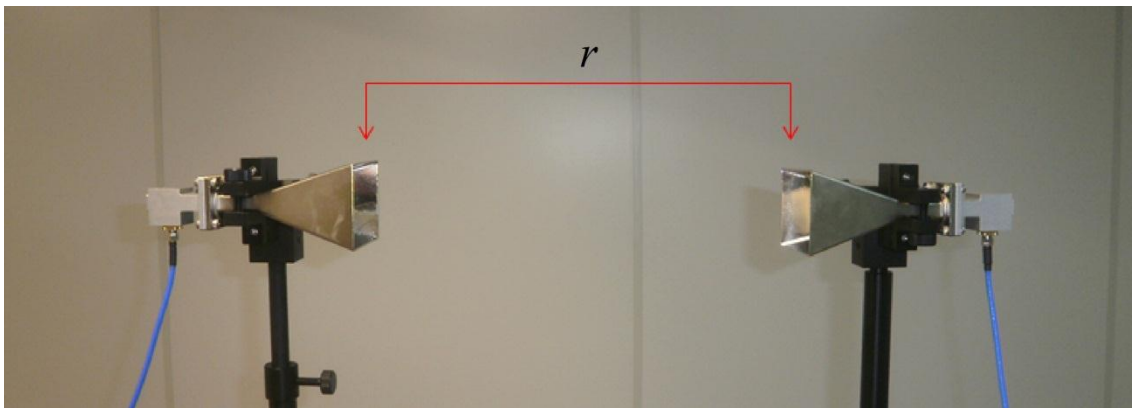


Figura 6.8. Alinhamento das antenas Corneta em polarização horizontal.

9. Medir as dimensões da Antena Corneta e registrar na Tab. 6.1. Utilizar como base as definições das Figuras 6.2 a 6.4.

**Tabela 6.1. Medições realizadas na Antena Corneta.**

Antena Corneta	Comprimento ( $m$ )
Comprimento Axial ( $L$ )	0,12
Comprimento Radial no Plano E ( $R_E$ )	0,124
Comprimento Radial no Plano H ( $R_H$ )	0,126
Abertura no Plano E ( $a_E$ )	0,06
Abertura no Plano H ( $a_H$ )	0,08



De posse destas medições da Tab. 6.1 é possível determinar os ângulos de abertura para os planos E e H através das Eqs. 6.1 e 6.4.

Com  $L = 0,12m$ ,  $R_E = 0,124m$  e  $R_H = 0,126m$ , os valores de  $\theta_E$  e  $\theta_H$  são respectivamente  $29,2^\circ$  e  $35,5^\circ$ .

A diretividade da antena pode ser determinada a partir da Eq. 6.8. Com  $a_E = 0,06m$  e  $a_H = 0,08m$ , a diretividade possui o valor de  $D = 16dBi$ .

10. Desabilitar as chaves de oscilação e modulação de frequência.
11. Ligar o controlador.
12. Ligar as chaves de oscilação de  $10GHz$  e a chave de modulação (*Mod*).
13. Adquirir o padrão de irradiação da Antena Corneta.

É esperado teoricamente que o padrão de irradiação da antena corneta apresente alta diretividade. A Fig. 6.9 mostra o diagrama adquirido no Plano de Elevação.

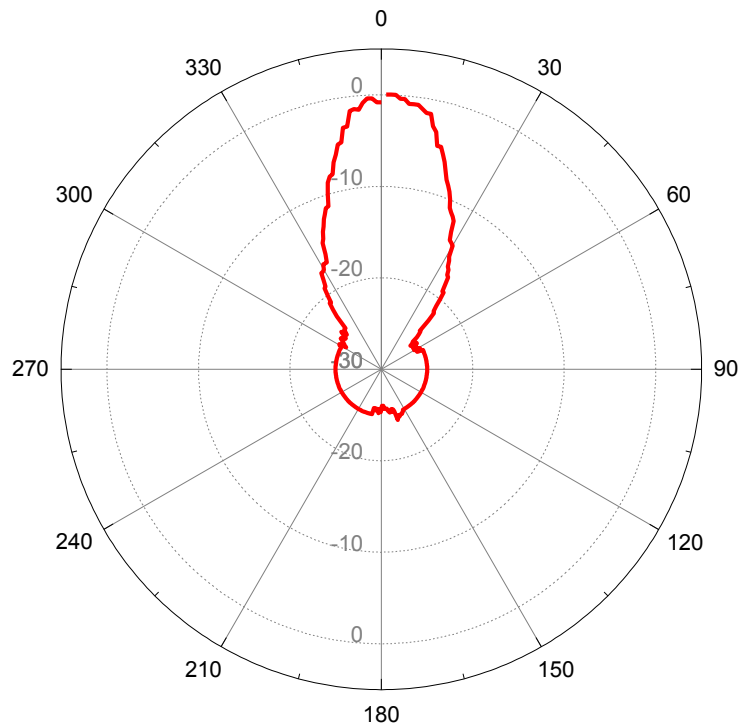


Figura 6.9. Diagrama de irradiação da Antena Corneta no plano de Elevação.

O diagrama, conforme esperado, apresenta alta diretividade. Em todos os padrões de irradiação apresentados por Rhodes na Fig. 6.5, a parte central do gráfico deveria estar concentrada em um único ponto, neste caso  $-30dB$ , mas como o nível de sinal saturou em  $-25dB$ , por causa do fundo de escala ser de  $-50dB$ , o diagrama sofreu alterações. O gráfico na Fig. 6.10 foi construído no intuito de corrigir este problema de escala para melhor apresentar o diagrama de irradiação da Antena Corneta no Plano de Elevação.

A faixa de escala foi modificada de  $5dB$  a  $-30dB$  para  $5dB$  a  $-25dB$  utilizando o software Origin [7] com os valores adquiridos pelo programa.

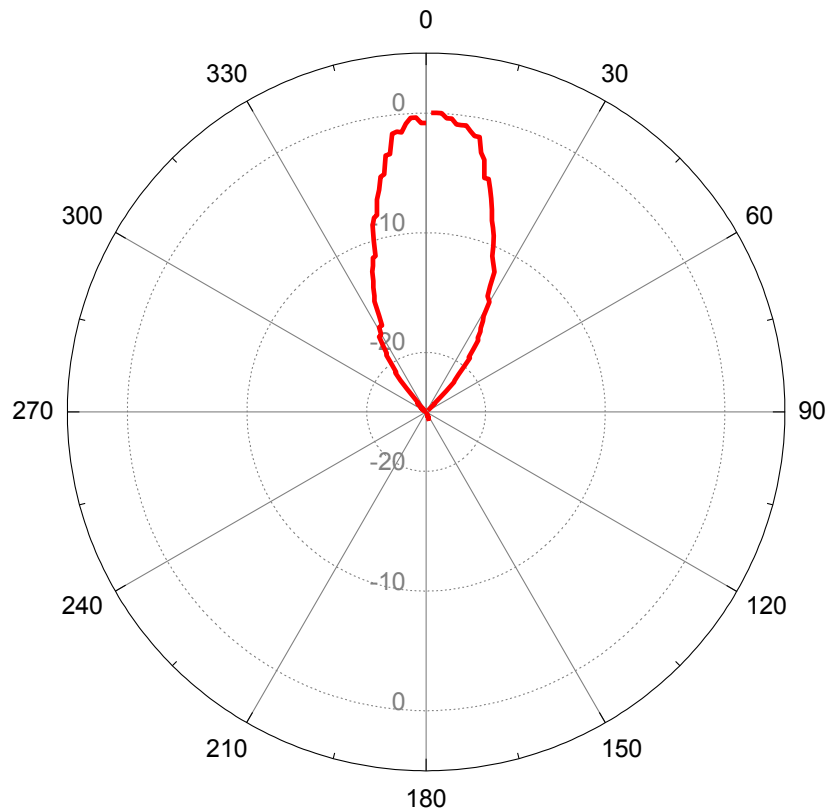


Figura 6.10. Diagrama de irradiação da Antena Corneta no plano de Elevação com a escala corrigida.

14. Após salvar o diagrama de irradiação adquirido em um arquivo, polarizar verticalmente ambas as antenas Corneta, girando-as  $90^\circ$ , conforme mostra a Fig 6.11. A polarização vertical das antenas tem como objetivo medir o Plano Horizontal (Plano H) da antena receptora, conforme visto detalhadamente na seção 2.2 do presente trabalho.



Figura 6.11. Antena Corneta em polarização vertical.

Para esta configuração, o diagrama de irradiação também deve possuir alta diretividade. A Fig. 6.12 mostra o diagrama de irradiação medido da Antena Corneta no Plano Horizontal.

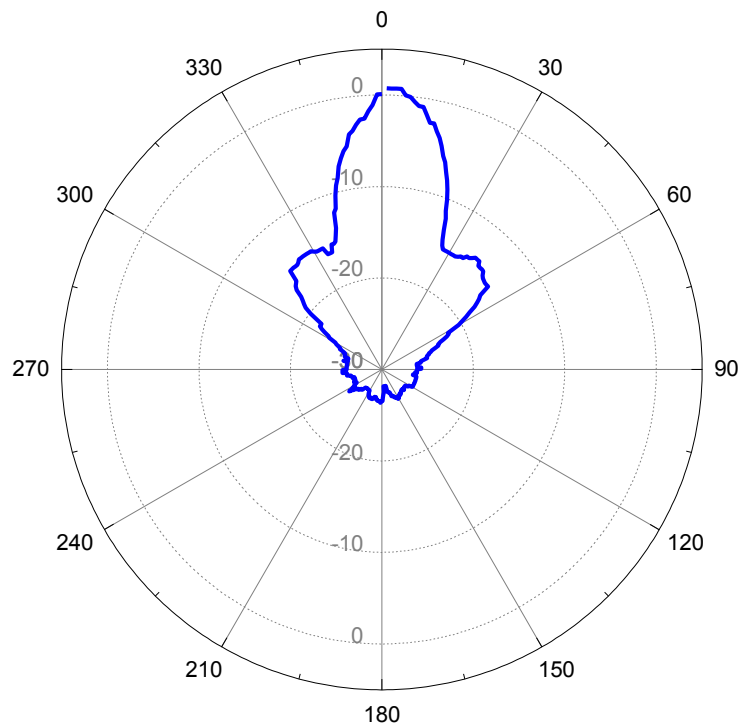


Figura 6.12. Diagrama de irradiação da Antena Corneta no plano Horizontal.

15. Determinar o ângulo de meia potência através da utilização dos cursores. A Fig. 6.13 apresenta o procedimento efetuado na determinação do ângulo de meia potência para os padrões de irradiação no Plano E e no Plano H, respectivamente. Da mesma maneira que para a antena Yagi, o programa não consegue mostrar automaticamente os ângulos de meia potência, sendo assim, o uso dos cursores é imprescindível.

Os cursores azul e branco, referentes ao Plano E, devem ser posicionados no ponto onde a potência decresce  $3dB$  em relação ao seu valor máximo. Os valores mostrados na aba “Position” são, de cima para baixo, ângulo de posicionamento do cursor azul, ângulo de posicionamento do cursor branco e a diferença entre eles ( $\Delta_{Dif}$ ). Esta diferença apresentada pelo programa não é o ângulo de meia potência e sim uma subtração de valores. Como os cursores estão cruzando o eixo de  $0^\circ$  é necessário realizar a seguinte operação:

$$HPBW = 360^\circ - \Delta_{Dif} \quad (6.10)$$

A determinação do ângulo de meia potência para o plano H é análoga ao Plano E, os cursores amarelo e verde devem ser posicionados no ângulo em que o sinal decresce  $3dB$  e a Eq. 6.10 deve ser utilizada igualmente.

Sendo assim, os ângulos de meia potência para o Plano E e o Plano H são, respectivamente,  $20^\circ$  e  $15^\circ$ .

Conforme as medidas adquiridas por Rhodes mostradas na Fig. 6.6, é de se esperar um ângulo de meia potência ligeiramente maior no plano Horizontal em função do maior ângulo de abertura. Isso não ocorreu experimentalmente em função do ambiente inadequado para as medições.

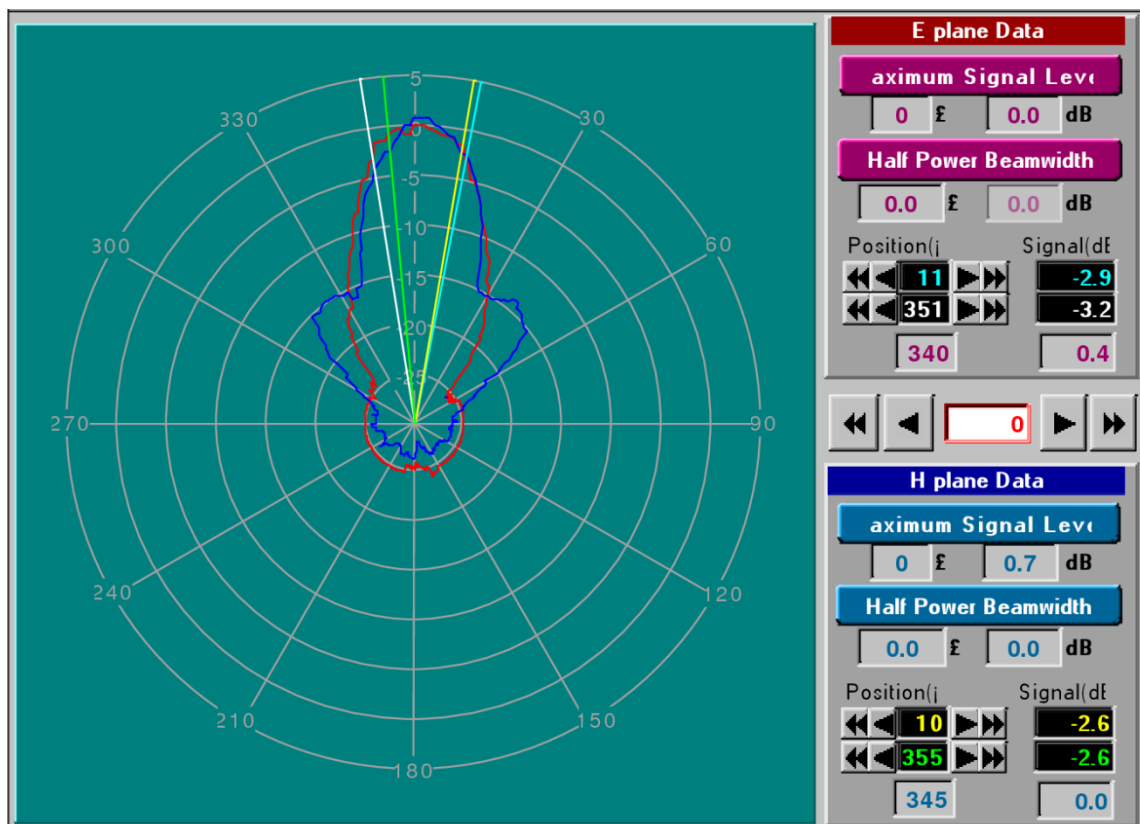


Figura 6.13. Determinação do ângulo de meia potência nos Planos E e H da Antena Corneta.

### 6.3 CONCLUSÕES

A antena Corneta é altamente eficiente. Isso pode ser comprovado pelo fato de seu ângulo de meia potência ser o menor em relação a todas as antenas estudadas neste trabalho, ou seja, a antena Corneta é a que apresenta um maior ganho de diretividade.

Conforme mostrado na seção 6.2, alterar as dimensões da antena pode melhorar muito o diagrama de irradiação, tornando a antena mais diretiva. Porém, aumentar muito o ângulo de abertura acaba por distorcer o diagrama de irradiação e por consequência reduzir a eficiência.

O problema de saturação enfrentado é provavelmente uma consequência de se trabalhar em um ambiente inadequado, ainda assim foi possível comprovar a coerência entre resultados teóricos e medidos.

## 7 CONCLUSÃO

O Kit de Antenas comportou-se de maneira satisfatória com relação ao propósito que foi construído. Foi possível analisar com uma boa precisão os diagramas de irradiação adquiridos.

O Dipolo de Meia Onda apresenta irradiação omnidirecional no plano Horizontal. Conforme demonstrado na prática, possui um ângulo de meia potência de  $84^\circ$  no plano de Elevação, que é bem próximo do padrão teórico calculado de  $78^\circ$ . Sua impedância é de aproximadamente  $73\Omega$ .

O Dipolo Dobrado mostrou-se uma ótima alternativa para conexões com linhas de transmissão de maior impedância. Foi possível analisar o funcionamento do Balun bem como suas funcionalidades. O Dipolo Dobrado apresentou diagramas de irradiação semelhantes ao Dipolo de Meia Onda. Sua impedância é de aproximadamente  $292\Omega$ .

A antena Yagi é um arranjo de elementos com o objetivo de aumentar a diretividade do Dipolo de Meia Onda. Este fato comprovou-se nos experimentos. Por apresentar um ganho maior que o dipolo no eixo de máxima irradiação, apresenta um ângulo de meia potência menor, comprovando a sua alta diretividade. A manipulação de seus elementos mostrou como pequenas mudanças nas dimensões da antena podem prejudicar a diretividade.

A antena Corneta foi a que apresentou o menor ângulo de meia potência, por consequência apresentou também o mais alto ganho das quatro antenas.



## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para análises mais minuciosas o equipamento mostrou-se limitado. A principal limitação do equipamento é quanto ao fundo de escala. O valor de  $-50\text{dBi}$  impossibilita medições mais precisas do desempenho da antena em zonas de baixa recepção.

Equipamentos com fundo de escala adequado para análises mais precisas (em torno de  $-100\text{dBi}$ ) são mais caros. Em função desta dificuldade de se projetar um equipamento relativamente barato e com um fundo de escala maior, algumas empresas fabricam apenas as antenas e o suporte para elas. Um exemplo é o equipamento ME1300 da empresa “*Dream Catcher*”, que contém apenas as antenas e os suportes, os equipamentos de transmissão e recepção são sugeridos pela empresa, mas não vendidos em conjunto [5].

Com base nestas informações pode-se sugerir a utilização do equipamento como um suporte mecânico apenas. Utilizar o controlador principal para rotacionar a antena, mas não para transmitir ou receber, para estas funções, utilizar um equipamento externo e mais eficiente (maior fundo de escala).

Estas considerações acerca do fundo de escala são levadas em conta supondo-se um ambiente propício para o trabalho, o que não ocorreu.

A sugestão mais forte para dar continuidade a utilização do equipamento é que se tenha um ambiente adequado. Paredes e objetos deve estar localizados a pelo menos  $3\text{m}$  de distância. Além disso, um computador dedicado à utilização do equipamento, com Windows 98 instalado e posicionado de maneira a não interferir com o experimento.

Um dos experimentos realizados apresentou diversos problemas na aquisição do padrão de irradiação no plano de Elevação. A antena Monopolo, apresentada no Anexo B deste trabalho, não teve um comportamento satisfatório, impossibilitando uma análise coerente do seu diagrama de irradiação. Com uma melhor adequação do ambiente, esse experimento se tornará viável.

O Kit possui ainda outras antenas. A antena Drooping, exposta no Anexo C deste trabalho, apresenta um plano de terra ajustável e possui diversas aplicações. Sugere-se dar continuidade aos experimentos com outras antenas, ou ainda realizar estudos mais aprofundados com relação às antenas já estudadas neste trabalho, por exemplo a antena Yagi.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] KRAUS, John D. **Antennas**. Second Edition: McGraw-Hill International Editions, 1998. ISBN 0-07-035422-7.

[2] Blog Sobre Antenas. Disponível em: < [http://blog.stanisce.info/?page\\_id=13](http://blog.stanisce.info/?page_id=13)>. Acesso em: 18/05/2011.

[3] ED R&D Center. **Antenna Trainer: Operation Manual**. Fifth Edition: ED Corporation, 2010.

[4] Esteves, Luís Cláudio. **Antenas - Teoria Básica e Aplicações**. McGraw-Hill, 1980.

[5] Site da empresa “*Dream Catcher*”. Disponível em: <<http://www.dreamcatcher.asia/cw/cwdetail.php?id=ME1300>>. Acesso em: 28/06/2011.

[6] Sistema Horizontal ou Altazimutal de coordenadas. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_horizontal\\_de\\_coordenadas](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_horizontal_de_coordenadas)>. Acesso em: 29/06/2011.

[7] Site da Empresa “*Origin Lab*”. Disponível em: <<http://www.originlab.com/>>. Acesso em: 03/07/2011.

## ANEXO A – PROGRAMA EM MATLAB PARA OBTENÇÃO DO DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO DO DIPOLO DE MEIA ONDA

```
clear all                %Limpa todas as variáveis.
lambda=0.6;             %Comprimento de onda em metros.
l=0.28;                 %Comprimento real da antena em metros.
k=(l/lambda);
theta=( 0:pi/360:2*pi); %Vetor theta variando de 0 à 2*pi.
a1=cos(k*pi.*cos(theta)); %Calcula a primeira parte da equação da diretividade.
a2=cos(k*pi);           %Calcula a segunda parte da equação da diretividade.
a3=sin(theta);          %Calcula a terceira parte da equação da diretividade.
E=(a1-a2)./a3;          %Calcula a diretividade.
En=abs(E);              %Calcula o módulo da diretividade.
En_max=max(En);         %Seleciona o valor máximo para normalizar a plotagem.
En_abso=En./En_max;     %Normaliza o cálculo da diretividade.
polar(theta,En_abso);   %Plota o diagrama de irradiação da antena na forma polar.
```

## ANEXO B – ANÁLISE DA INADEQUAÇÃO DO AMBIENTE DE TRABALHO CITANDO COMO EXEMPLO O EXPERIMENTO REALIZADO COM A ANTENA MONOPOLO

A antena Monopolo ( $\lambda/4$ ) é uma haste vertical fixada ao solo com alimentação entre o plano de terra e o condutor da antena. Supondo a terra como um condutor plano infinito e baseando-se no método das imagens [1, p. 461-467], representa-se o plano de terra como uma imagem da antena Monopolo, com mesmo comprimento e mesma distribuição de corrente conforme mostra a Fig. B.1. Devido a esta “antena imagem” é possível associar o comportamento do Monopolo ( $\lambda/4$ ) com comportamento do Dipolo de Meia Onda.

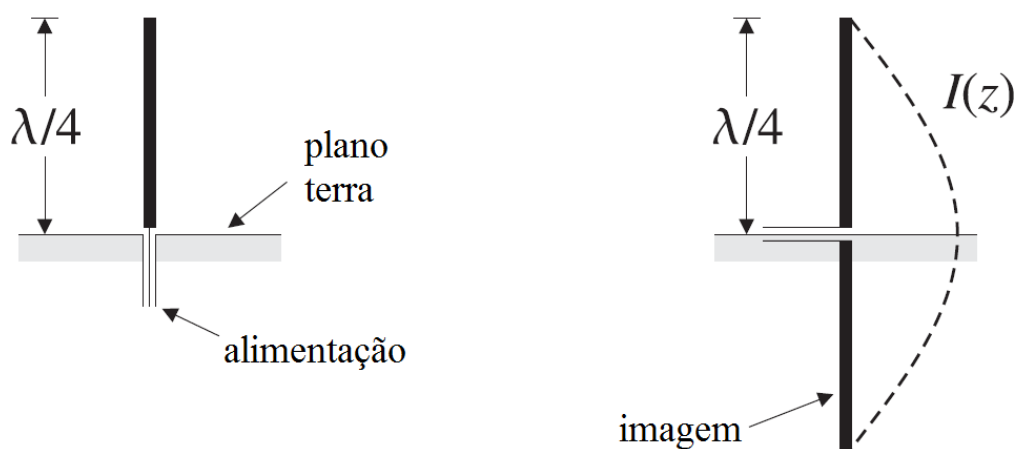


Figura B.1. Monopolo ( $\lambda/4$ ) e a “antena imagem”.

Sendo assim, a magnitude do campo de terra é metade do campo radial da antena, representado pela linha pontilhada na Fig. B.1. Seguindo a mesma proporção, a impedância da antena também é metade do Dipolo de Meia Onda, ou seja, aproximadamente  $36,5\Omega$ .

Sabendo que esta antena comporta-se semelhantemente ao dipolo de meia onda, é de se esperar que o seu diagrama de irradiação seja omnidirecional no plano horizontal. Quanto ao plano de elevação, é esperado teoricamente que se comporte conforme mostra a Fig. B.2.

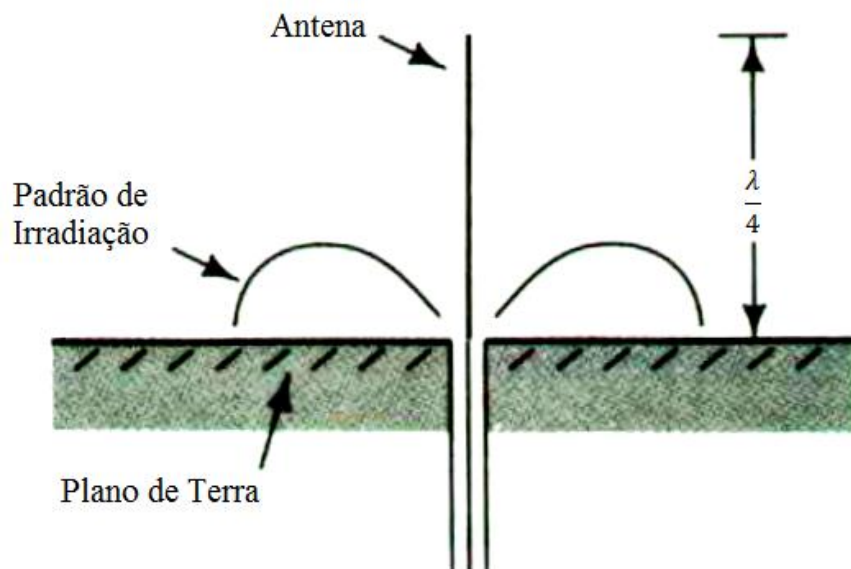


Figura B.2. Padrão de irradiação do Monopolo ( $\lambda/4$ ) no plano de Elevação.

No plano horizontal a antena apresentou um ótimo comportamento experimental, conforme pode ser observado na Fig. B.3. Em todas as direções a antena manteve a mesma intensidade de sinal.

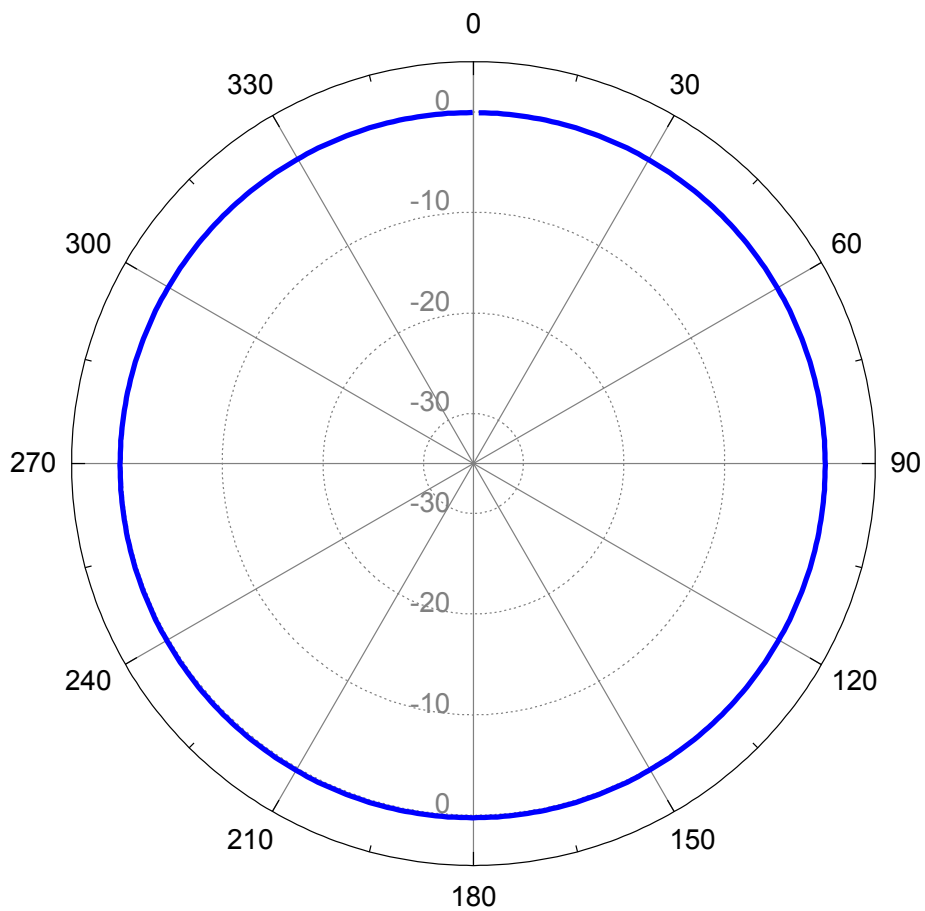


Figura B.3. Diagrama de irradiação do Monopolo ( $\lambda/4$ ) no plano Horizontal (Antena Polarizada Verticalmente).

No caso do plano de Elevação a antena mostrou-se mais suscetível às reflexões causadas pelo ambiente e deste modo foi impossível adquirir um diagrama de irradiação que possa ser devidamente avaliado. A Fig. B.4 mostra o resultado obtido da aquisição do diagrama no plano de Elevação (Polarização Horizontal da Antena).

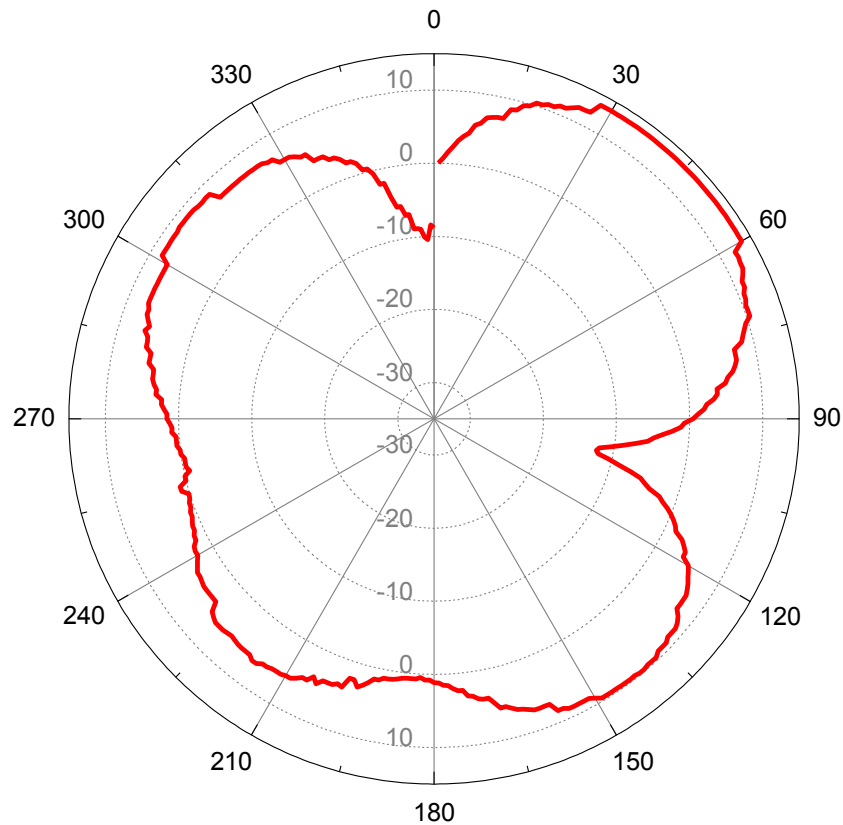


Figura B.4. Diagrama de irradiação do Monopolo ( $\lambda/4$ ) no plano de Elevação (Antena Polarizada Horizontalmente).

Basicamente, o diagrama está distorcido por causa das reflexões das OEM nas paredes do local de trabalho. As OEM provenientes da antena transmissora atingem as paredes localizadas a apenas um metro de distância do local de experimento com uma intensidade ainda muito alta e sofrem a reflexão completa.

A antena em questão capta estas ondas refletidas, somando-as com as OEM diretamente emitidas pela antena transmissora. O resultado então é o verificado na Fig. B.4, um diagrama de irradiação distorcido pela soma de OEM diretas e refletidas.

Pode-se ainda analisar a distorção do diagrama em função do fundo de escala. O equipamento tem um fundo de escala de  $-50\text{dBi}$ . Ao realizar os experimentos realizamos um ajuste de redução para que o diagrama fique ajustado em zero (no software). No caso da



experiência com o Monopolo ( $\lambda/4$ ) o ajuste foi de  $30dBi$  pelo fato de antena ter apresentado um baixo ganho. Deste modo o fundo de escala no software passou a ser  $-20dBi$ , que por consequência limitou a faixa de variação do sinal, distorcendo o padrão de irradiação obtido experimentalmente.

## ANEXO C – ANTENA DROOPING

A antena Drooping possui um elemento vertical de comprimento  $\lambda/4$  a partir do condutor central, como pode ser observado na Fig. C.1. Possui condutores de mesmo comprimento na direção radial e com ângulo opcional ( $\theta$ ) em relação ao plano de terra. Estes condutores simulam um plano de terra e evitam a fuga de corrente para o meio externo conforme ocorre na antena terra.

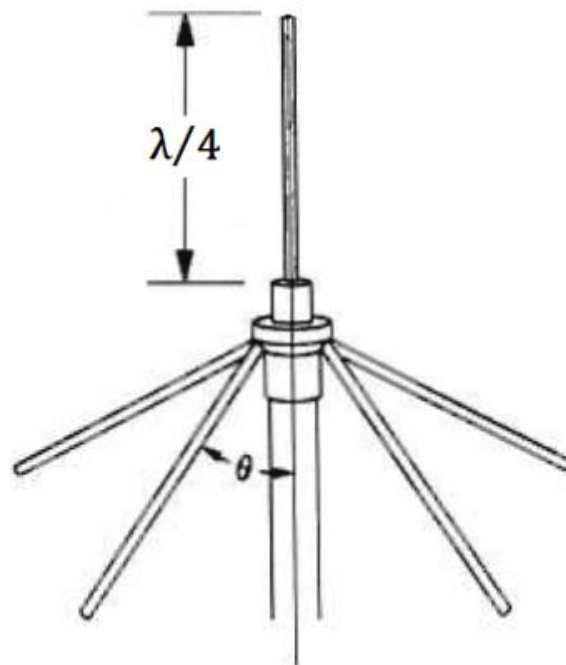


Figura C.1. Esquema representativo da antena Drooping.

A antena Drooping utilizada nos experimentos pode ser observada na Fig. 2.30. É uma antena ideal para aplicações de monitoramento e vigilância, muito utilizada em estações móveis.



Figura C.2. Antena Drooping do Sistema de Treinamento em Antenas.