



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RODRIGO DANTAS DOS SANTOS

**DETERMINAÇÃO DO GANHO DE ANTENAS PELO
MÉTODO DA COMPARAÇÃO UTILIZANDO
SISTEMA MÓVEL**

Campina Grande, Paraíba

Fevereiro de 2014

RODRIGO DANTAS DOS SANTOS

DETERMINAÇÃO DO GANHO DE ANTENAS PELO
MÉTODO DA COMPARAÇÃO UTILIZANDO
SISTEMA MÓVEL

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Unidade Acadêmica de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Antenas e Propagação de Ondas

Orientador

Glauco Fontgalland, Dr. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Fevereiro de 2014

RODRIGO DANTAS DOS SANTOS

DETERMINAÇÃO DO GANHO DE ANTENAS PELO
MÉTODO DA COMPARAÇÃO UTILIZANDO
SISTEMA MÓVEL

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Unidade Acadêmica de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Antenas e Propagação de Ondas

Aprovado em ___/___/___

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande

Glauco Fontgalland, D. Sc.
Professor Orientador
Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2014

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao Deus Pai Todo Poderoso por ter me permitido chegar ao final deste curso tão difícil, transpondo barreiras e superando enormes obstáculos. Agradeço à minha mãe Amélia e ao meu pai Narcizo pela paciência e pelo apoio dado ao longo destes sete anos de vida acadêmica e por nunca terem deixado de acreditar em mim. Agradeço às minhas irmãs pela confiança e pelo apoio sempre presente. Agradeço a Roberta, minha namorada de longa data, pela compreensão em tempos difíceis. Agradeço a todos os meus amigos e colegas de curso pelas parcerias que fizemos, pelas angústias e alegrias partilhadas e pelas palavras de incentivo.

Agradeço aos meus professores do Departamento de Engenharia Elétrica, que não mediram esforços na transmissão do bem mais precioso que irei possuir pelo resto da vida, o conhecimento. Por fim, agradeço especialmente ao professor Glauco Fontgalland pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e pela oportunidade de aprendizado e agradeço profundamente ao professor Rômulo Valle pela ajuda, pela boa vontade e pelo ótimo exemplo de profissional. Também agradeço ao aluno Paulo e ao Professor Helder pelo apoio.

RESUMO

Tratando-se de uma estrutura passiva, uma antena opera a energia contida nas ondas eletromagnéticas atuando simplesmente como um transdutor, por este motivo, quando for concebido o seu projeto, este deve ser executado de modo a otimizar a recepção e a transmissão visando a redução de perdas. Sabendo que uma antena real apresenta uma capacidade de direcionar ou concentrar energia em uma dada direção do espaço (quando comparada com uma antena de referência ideal), o seu posicionamento deve ser selecionado com bastante cautela, para que esta não seja sujeita a interferências do meio externo. Este trabalho terá como base o estudo da determinação do ganho de antenas por meio do método da comparação. Por sua vez, estas antenas poderão ser acopladas a um sistema móvel controlado por computador, o que irá otimizar os resultados.

Palavras-chave: Antena, Determinação do Ganho, Energia, Método da Comparação, Ondas Eletromagnéticas.

ABSTRACT

Treating of a passive structure, the antenna operates the energy contained in electromagnetic waves simply acting as a transducer, for this reason, when the project is designed, this should be implemented in order to optimize the reception and transmission aimed at reducing losses. Knowing that a real antenna has an ability to direct or focus the energy in a given direction in space (compared with an ideal antenna as reference), its position should be selected carefully, so that it is not subject to interference from the middle external. This paper will be based on the study of determination of the gain of antennas using the comparative method. In turn, these antennas may be coupled to a computer-controlled mobile system which will optimize the results.

Keywords: Antenna, Comparative Method, Determination of Gain, Electromagnetic Waves, Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Projeto para pedido de patente de Thomas Edison, para sinalização à distância usando indução, 1885.....	3
Figura 2.2 – Diagrama esquemático do experimento realizado por Hertz.....	4
Figura 2.3 – Antena “leque” vertical, utilizada no ano de 1901.....	5
Figura 2.4 – Refletor parabólico de Marconi.....	6
Figura 2.5 – Antena Yagi-Uda.....	7
Figura 2.6 – Antena corneta.....	8
Figura 2.7 – Fendas em um guia de ondas retangular.....	8
Figura 2.8 – Antena log-periódica.....	9
Figura 2.9 – Antena de microfita.....	10
Figura 2.10 – Antena conectada a uma fonte através de uma LT.....	11
Figura 2.11 - Linhas de campo elétrico no espaço livre produzidas por uma antena bicônica.....	13
Figura 2.12 – Sequência de formação e liberação das linhas de campo elétrico pelo dipolo curto.....	14
Figura 2.13 – Diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional.....	16
Figura 2.14 – Relação frente-costas de uma antena.....	20
Figura 4.1 – Sistema de controle de posicionamento da antena.....	28
Figura 4.2 – Base para suporte do mastro.....	29
Figura 4.3 – Elevador de suporte da antena.....	29
Figura 4.4 – Conjunto base suporte/elevador.....	31
Figura 4.5 – Esquema representativo do conjunto base suporte /elevador.....	32
Figura 4.6 – Esquema representativo do mastro.....	33
Figura 4.7 – Unidade de Controle.....	34
Figura 4.8 – Esquema da Unidade de controle.....	35
Figura 4.9 – Representação esquemática do sistema completo mastro antena móvel....	36
Figura 4.10 – Porta paralela na entrada da UC.....	38

Figura 4 .11 – Antena de referência.....	39
Figura 4.12 – Antena sob teste.....	40
Figura 4.13 – Antena fonte.....	41
Figura 4.14 – Gerador de sinais.....	42
Figura 4.15 – Analisador de espectro.....	42
Figura 4.16 – Computador instalado no laboratório do bloco CK.....	43
Figura 4.17 – Instalação do ponto de acesso à rede no laboratório.....	44
Figura 4.18 – Laboratório com equipamentos montados.....	45
Figura 4.19 – Circuito para sinalização da UC.....	46
Figura 4.20 – Diagrama da unidade de controle com LED's de sinalização.....	47
Figura 4.21 – Unidade de controle sinalizada.....	47
Figura 4.22 – Esquema do circuito elétrico usado na simulação do programa.....	49
Figura 4.23 – Circuito elétrico montado para simulação.....	49
Figura 4.24 – Sistema utilizado para medição de ângulo executado pelo motor.....	51
Figura 4.25 – Tela do menu inicial do programa.....	51
Figura 4.26 – Tela da opção subir a antena.....	52
Figura 4.27 – Tela da opção descer a antena.....	52
Figura 4.28 – Tela da opção girar a antena no sentido horário.....	53
Figura 4.29 – Tela da opção girar a antena no sentido anti-horário.....	53
Figura 4.30 – Tela da opção sair.....	54
Figura 4.31 – Disposição física dos equipamentos usados na medição.....	55
Figura 4.32 – Antena fonte e gerador de sinais.....	56
Figura 4.33 – Antena de referência acoplada ao conjunto móvel.....	57
Figura 4.34 – Antena sob teste acoplada ao conjunto móvel.....	57
Figura 5.1 – Diagrama de irradiação da antena sob teste horizontalmente posicionada.....	62
Figura 5.2 – Diagrama de irradiação da antena sob teste verticalmente posicionada.....	62
Figura 5.3 – Disposição física do conjunto de medição antena fonte/antena de referência.....	63
Figura 5.4 – Gráfico potência recebida na antena de referência <i>versus</i> altura.....	65
Figura 5.5 – Sentido de rotação adotado na medição da antena de referência.....	66
Figura 5.6 – Gráfico potência recebida na antena de referência <i>versus</i> ângulo.....	67
Figura 5.7 – Localização dos pontos utilizados nas medições.....	68

Figura 5.8 – Vistas lateral, frontal e sentido de rotação adotado na medição da antena desconhecida.....	69
Figura 5.9 – Disposição física do conjunto de medição antena fonte/antena sob teste.....	69
Figura 5.10 – Gráfico potência recebida na antena desconhecida <i>versus</i> ângulo na posição 1.....	72
Figura 5.11 – Gráfico potência recebida na antena desconhecida <i>versus</i> ângulo na posição 2.....	73
Figura 5.12 – Gráfico potência recebida na antena desconhecida <i>versus</i> ângulo na posição 3.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Valores de potência recebida em função da variação do posicionamento (angular) da antena sob teste na posição horizontal.....	60
Tabela 5.2 – Valores de potência recebida em função da variação do posicionamento (angular) da antena sob teste na posição vertical.....	61
Tabela 5.3 – Potência recebida em função da altura da antena de referência.....	64
Tabela 5.4 – Potência recebida em função do ângulo da antena de referência.....	66
Tabela 5.5 - Potência recebida <i>versus</i> ângulo da antena sob teste na posição 1.....	70
Tabela 5.6 - Potência recebida <i>versus</i> ângulo da antena sob teste na posição 2.....	71
Tabela 5.7 - Potência recebida <i>versus</i> ângulo da antena sob teste na posição 3.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado
EM	Eletromagnética/Eletromagnetismo
FM	Frequência Modulada
LED	Ligth Emitting Diode
VLF	Very Low Frequency – Frequência Muito Baixa
LT	Linha de Transmissão
LEMA	Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicado
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SHF	Super High Frequency – Frequência Super Alta
TV	Tele Vision – Televisão
UC	Unidade de Controle
UHF	Ultra High Frequency – Frequência Ultra Alta
VHF	Very High Frequency – Frequência Muito Alta

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
SUMÁRIO.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 METODOLOGIA.....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
2. ANTENAS E PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	3
2.1 RETROSPECTO HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DAS ANTENAS.....	3
2.2 MECANISMOS DE RADIAÇÃO.....	11
2.3 PARÂMETROS PRINCIPAIS DE ANTENAS.....	15
2.3.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO.....	15
2.3.2 POLARIAÇÃO	16
2.3.3 ÁREA EFETIVA DE UMA ANTENA.....	17
2.3.4 DIRETIVIDADE.....	18
2.3.5 RELAÇÃO FRENTE-COSTAS.....	20
2.3.6 IMPEDÂNCIA.....	20
2.3.7 LARGURA DE BANDA.....	21
2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO ESPAÇO LIVRE.....	21
3. GANHO DE UMA ANTENA.....	24
3.1 MEDIÇÃO DE GANHO DE UMA ANTENA POR COMPARAÇÃO.....	25
4. RECURSOS UTILIZADOS E ATIVIDADES LABORATORIAIS.....	27

4.1 SISTEMA DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO.....	27
4.1.1 BASE PARA SUPORTE DO MASTRO E ELEVADOR.....	28
4.1.2 UNIDADE DE CONTROLE.....	33
4.2 PROGRAMA PARA O CONTROLE DO POSICIONAMENTO DA ANTENA.....	37
4.3 EQUIPAMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DO GANHO.....	38
4.4 AMBIENTIZAÇÃO DO LABORATÓRIO.....	43
4.5 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SINALIZAÇÃO DA UNIDADE DE CONTROLE.....	45
4.6 SIMULAÇÃO, AJUSTES E SINCRONIZAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COM O POSICIONAMENTO DA ANTENA.....	48
4.7 MONTAGEM DO CONJUNTO PARA MEDIÇÕES.....	54
5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS OBTIDOS.....	59
5.1 LEVANTAMENTO DO DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO DA ANTENA SOB TESTE.....	59
5.2 MEDIÇÕES.....	63
5.2.1 ANTENA DE REFERÊNCIA.....	63
5.2.2 ANTENA SOB TESTE.....	67
5.3 DETERMINAÇÃO DO GANHO DA ANTENA SOB TESTE.....	74
6. CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS.....	78
ANEXO I.....	79

1. INTRODUÇÃO

Uma antena é um dispositivo cuja função é transformar energia eletromagnética guiada por uma linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada. Pode-se também dizer que este processo funciona no sentido inverso, ou seja, transformar energia eletromagnética irradiada em energia eletromagnética guiada para uma linha de transmissão. Portanto, sua função é de extrema importância em qualquer comunicação onde exista radiofrequência.

Por sua natureza, na transmissão de ondas eletromagnéticas, a antena representa o último elemento no sistema de transmissão e o primeiro elemento durante a recepção de sinais. No seu estudo e projeto, não importando em que frequência do espectro seja considerada, as antenas terão sempre um lugar de destaque em sistemas de curta e longa distância obedecendo os mesmos princípios físicos da Teoria Eletromagnética, passando pelos conceitos de propagação, reflexão, espalhamento, difração e absorção.

1.1 MOTIVAÇÃO

A ausência de informações sobre uma determinada antena pode comprometer o sistema de comunicações no qual está inserida. Sendo assim, um dos parâmetros que é de grande importância conhecer é o ganho da antena, pois este irá ditar a sua capacidade de concentrar o sinal eletromagnético em uma determinada direção. Um procedimento aplicado para determinação do ganho é o método da medição por comparação, que consiste em um método relativamente simples e rápido. Conhecendo este parâmetro, podemos afirmar se uma antena tem a habilidade de emitir ou receber energia de forma satisfatória em uma direção particular.

1.2 OBJETIVOS

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar o desempenho de uma antena por um método que é baseado em sua comparação com outra, sendo esta a de referência. Analisando um de seus parâmetros, conhecido como ganho, podemos afirmar ou não se esta antena sob teste irá funcionar de forma satisfatória.

Ao final deste trabalho espera-se que o leitor assimile de maneira eficaz o método estudado e realizado na prática, assim como os procedimentos tomados, e que possa se basear nele para estudos futuros.

1.3 METODOLOGIA

Para realizar os experimentos aqui descritos, inicialmente foi feita uma revisão sobre toda a teoria que envolve o funcionamento das antenas e propagação de ondas, para finalmente poder aplicá-las na prática.

Os experimentos propostos foram realizados utilizando os equipamentos disponíveis no laboratório, e que serão descritos ao longo deste texto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

As atividades descritas neste trabalho estão divididos basicamente em quatro capítulos, inicialmente, no Capítulo 2 é feito um pequeno retrospecto histórico sobre antenas e seu princípio básico de funcionamento. Em seguida, é exposto um pouco da teoria que rege o mecanismo de propagação e também é apresentada uma visão geral acerca do método de determinação do ganho utilizando três antenas. Após, no Capítulo 3, são feitas algumas considerações acerca do tema abordado neste trabalho e em sequência, no Capítulo 4, são descritos os materiais utilizados, os procedimentos experimentais e os resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. ANTENAS E PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Este capítulo é dedicado ao estudo mais detalhado sobre a teoria utilizada como ferramenta neste trabalho. Informações relevantes sobre antenas, mecanismo de irradiação e propagação de ondas no espaço livre são aqui abordados de forma introdutória de modo a fornecer uma base para o entendimento dos experimentos realizados.

2.1 RETROSPECTO HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DAS ANTENAS

As primeiras antenas foram concebidas e utilizadas no ano de 1842 pelo cientista Joseph Henry (1797-1878) em estudos ligados à magnetização de agulhas metálicas, produzidas a distância por descargas elétricas. Em 1875, Thomas Alva Edison (1847-1931) constatou que sinais produzidos por chaveamento podiam ser recebidos a distâncias consideráveis da fonte. Porém foi só no ano de 1885 que ele patenteou um sistema de comunicações utilizando antenas verticais com cargas de topo, Figura 2.1.

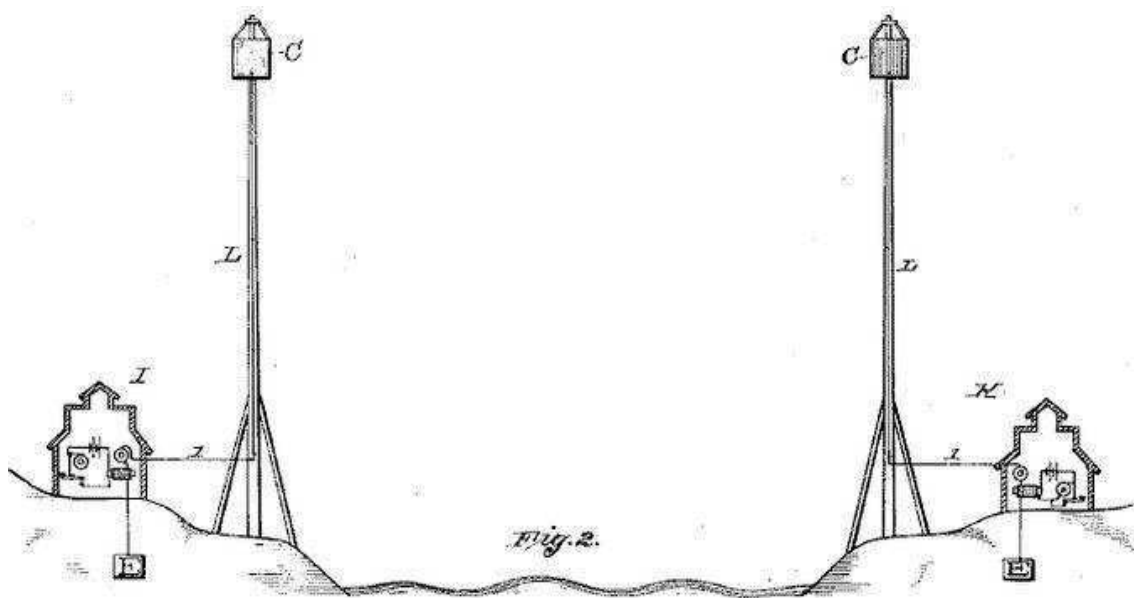


Figura 2.1 – Projeto para pedido de patente de Thomas Edison, para sinalização à distância usando indução, 1885.

No ano de 1887, Heinrich Hertz (1857-1894) transmitiu e recebeu ondas de rádio durante uma demonstração clássica de existência de ondas eletromagnéticas. Assim sendo, no seu experimento, ele utilizou uma antena dipolo como transmissora e uma antena "loop" como receptora. O dipolo consistiu de dois fios retilíneos de 30 cm cada, possuindo nos extremos duas placas metálicas planas de 40 cm² e um gap de 7 mm que separava duas esferas metálicas polidas localizadas nos outros extremos, como mostra a Figura 2.2.

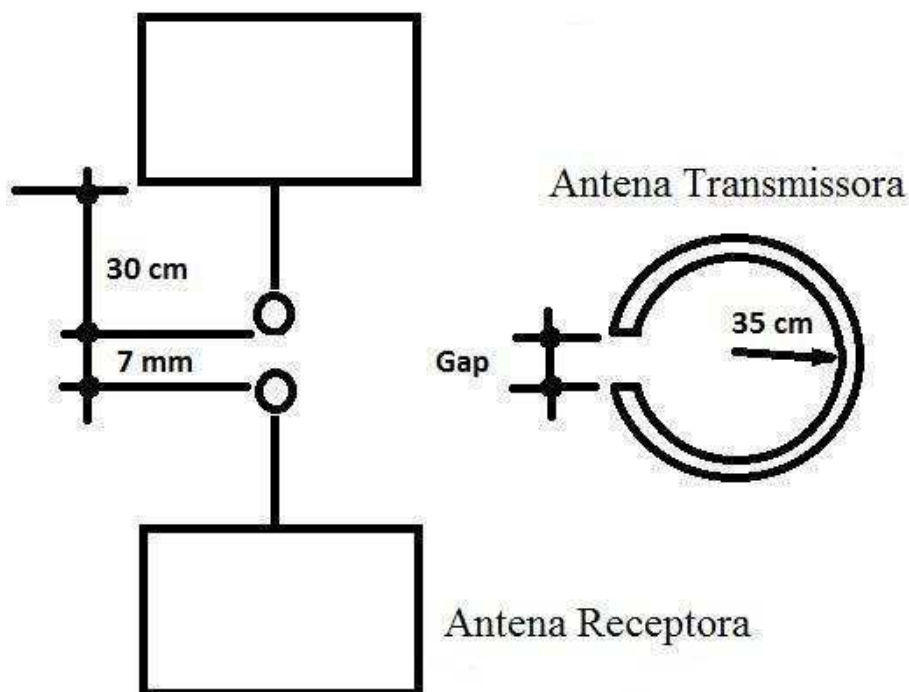


Figura 2.2 – Diagrama esquemático do experimento realizado por Hertz.

O raio da antena receptora foi de 35 cm e apresentava um gap microscópico. Após este experimento, Hertz colocou o dipolo no foco de um refletor cilíndrico metálico, visando reforçar o sinal transmitido.

No ano de 1897, Guglielmo Marconi (1874-1937) descreveu um sistema completo de telegrafia sem fios. Neste sistema, um dos terminais do centelhador que funcionava como transmissor foi conectado à antena, que consistia em um fio elevado, enquanto o outro terminal fora aterrado.

Um fato que ocasionou um forte impulso nas comunicações ocorreu no início do século XX, em 1901, com o advento da primeira comunicação transatlântica sem fios. Um sinal de 820 kHz e 15 kW de potência foi transmitido por uma antena "leque"

vertical, cuja sustentação foi feita por meio de mastros de 48 m de comprimento separados de 60 m, conforme ilustra a Figura 2.3. A comunicação foi estabelecida entre as localidades de Cornwall e Newfoundland na Inglaterra e, nesta última cidade, os primeiros sinais foram recebidos por uma antena suportada por altas estruturas.

O final desta década foi marcado pelo aparecimento de sistemas com aterramento, formados por fios dispostos radialmente com relação à antena e associados a partes metálicas de modo a se obter uma redução na resistência de perdas da antena. A Teoria da Propagação Superficial da Onda EM foi introduzida em 1907 por Zenneck (1871-1959).

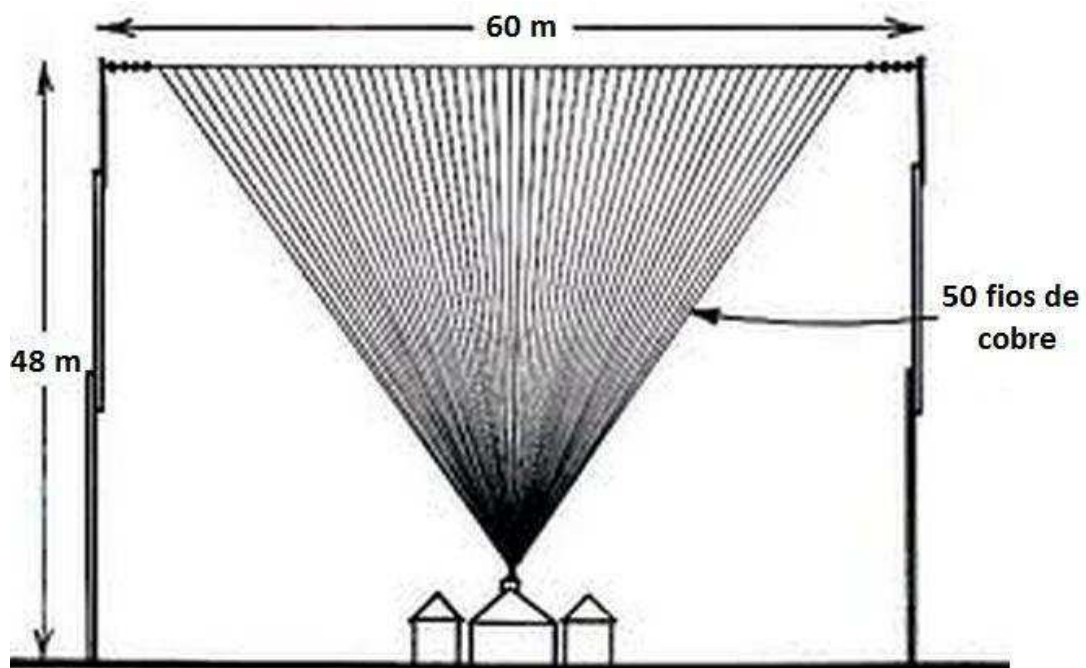


Figura 2.3 – Antena “leque” vertical, utilizada no ano de 1901.

Na década de 1920, foram construídas grandes antenas, transmissoras de alta potência e baixas frequências, listadas abaixo:

- Antena para a Rádio de Virgínia (Arlington, 1911);
- Antena da Estação Marconi (New Brunswick, 1917);
- Antena em Monroe (Monroe, 1918);
- Antena direcional em Carnavon (Wales, UK, 1918);

Durante esse período, os Estados Unidos e o Reino Unido tinham como objetivo estabelecer uma malha de comunicação para cobrir todo o mundo a partir de sistemas de comunicação em VLF, todavia, esse projeto foi inviabilizado por conta da deflagração da 1ª Guerra Mundial. Marconi, na Itália, iniciou experimentos com ondas curtas e utilizou centelhadores em ar comprimido combinados com refletores para emissão de ondas de 2 e 3 m de comprimento. O refletor parabólico de Marconi é apresentado a seguir, na Figura 2.4.

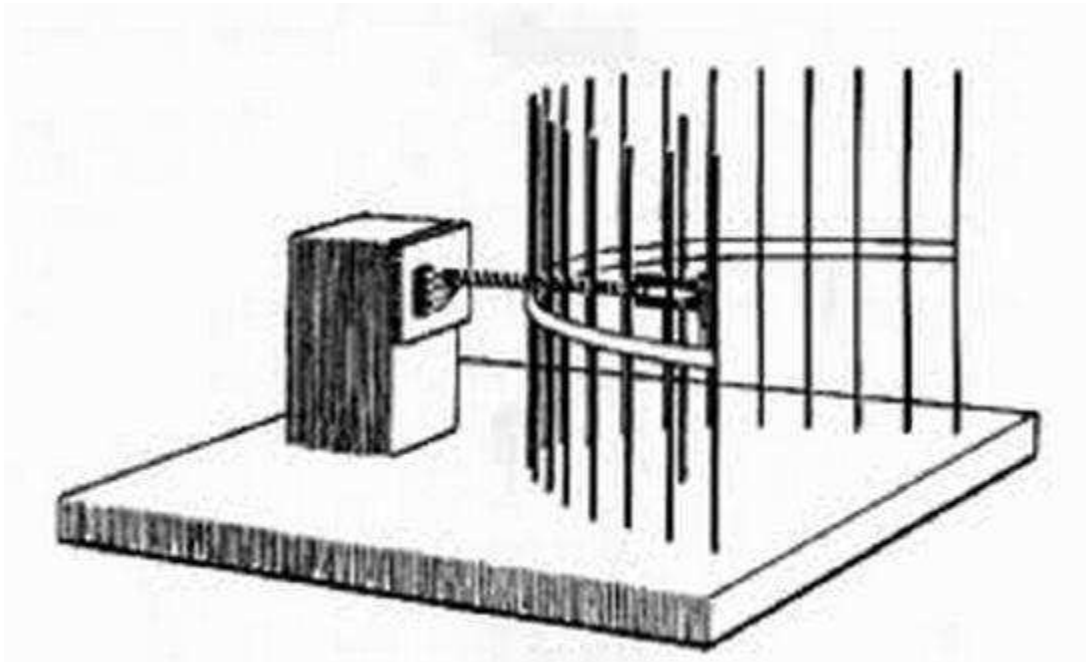


Figura 2.4 – Refletor parabólico de Marconi.

Importantes trabalhos foram desenvolvidos nesta época, são eles:

- Radiogoniometria (busca via rádio) e comunicação aeronáutica.
- Rádio-controle de navios, torpedos e aviões teleguiados.
- Radiodifusão. As primeiras antenas para este fim derivam das estruturas utilizadas nas comunicações ponto a ponto (telegrafia). Posteriormente, em virtude das vantagens de cobertura de área apresentada pelos mastros irradiantes de $\frac{\lambda}{4}$, estas passaram a ser utilizadas.
- Utilização dos arranjos direcionais.

Em 1927, Hidetsu Yagi (1886-1976) e Shintaro Uda (1896-1976) propuseram um arranjo “End Fire” com elementos parasitas de grande diretividade. Esta antena passou a ser conhecida como Yagi-Uda (Figura 2.5).

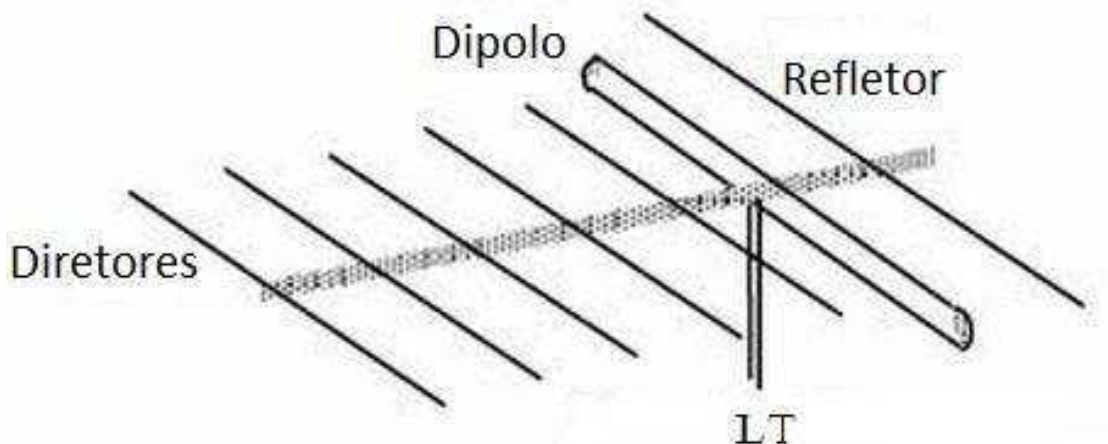


Figura 2.5 – Antena Yagi-Uda.

Os anos 30 mostraram uma tendência ao uso de frequências em UHF e trabalhos com micro-ondas. Em 1931 foi montado um enlace de micro-ondas entre a França e a Inglaterra com antenas refletoras. Em 1932, Marconi projetou e realizou com sucesso, comunicações via espalhamento troposférico. A radiodifusão FM teve sua visibilidade demonstrada neste ano por E. H. Armstrong (1890 – 1954), utilizando a frequência de 100 MHz. Em 1936 o serviço de radiodifusão de TV usou arranjos de dipolos em 45 MHz. Neste mesmo ano, a Bell System estava desenvolvendo um programa de investigação sobre propagação em guias de onda usando ondas centimétricas.

Os desenvolvimentos ocorridos nos anos 30 formaram os fundamentos dos atuais sistemas para radiodifusão em TV e FM, para comunicações por espalhamento troposférico, para radar em VHF e SHF, para radioastronomia e para apoio à navegação.

Durante a década de 40 ocorreram desenvolvimentos significantes, dentre eles podem ser destacados por temas:

- Guias de onda e antenas corneta: adotou-se o guia de onda regular como linha de transmissão para ondas de comprimento centimétrico em virtude de suas baixas perdas e alta capacidade de potência. A extremidade aberta foi

reformada, resultando na corneta piramidal (Figura 2.6) a qual gerou feixes convenientes para a alimentação de lentes e refletores.



Figura 2.6 – Antena corneta.

- Arranjos lineares e fendas: as propriedades das fendas irradiantes foram estabelecidas nesse período. Fendas nos lados dos guias retangulares foram abertas e utilizadas para a alimentação de refletores (Figura 2.7).

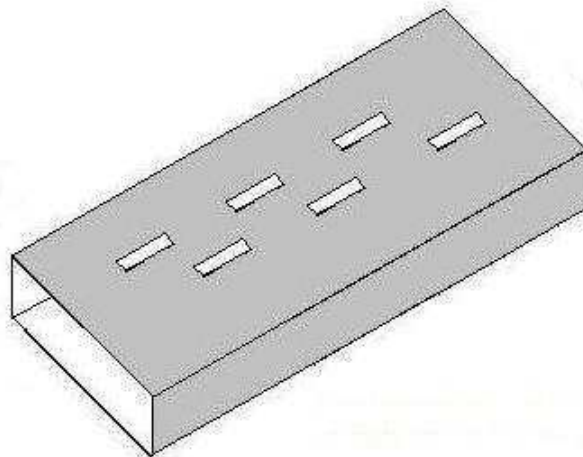


Figura 2.7 – Fendas em um guia de ondas retangular.

- Lentes: A correção de fase em lentes foi conseguida na Inglaterra, com o uso de placas metálicas com espessuras ou espaçamentos variados em seu interior.
- Antenas dielétricas: trabalhos sobre guias de onda dielétricos levaram ao desenvolvimento nos EUA, Inglaterra e Alemanha, das antenas dielétricas e seus arranjos.

Nos anos 50, o trabalho com refletores esféricos e com arranjos faseados com defasadores mecânicos foi intensificado, levando a melhoramentos tanto nos refletores e nos movimentos da estrutura, bem como na varredura de feixes de antenas.

Foram ainda objetos de pesquisa e desenvolvimento nesta década

- Lentes dielétricas de diversos tipos.
- Defasador de ferrite para guias de ondas.
- Antenas de faixa larga como a fenda espiral, espiral equiangular, espiral cônica e as log-periódicas em “V” (Figura 2.8)
- Arranjo de antenas



Figura 2.8 – Antena log-periódica.

A partir dos anos 60, P&D foram impulsionados pela exigência dos avanços da tecnologia espacial, tendo também se constituído pressões motivadoras, as pesquisas ópticas, os avanços computacionais e a expansão do espectro. Os avanços neste período levaram a grandes larguras de faixa, feixes ultra estreitos, densidades de potências elevadas, baixíssimas perdas de radiação e largos ângulos de varredura.

Nas décadas subsequentes, uma das características dos trabalhos com antenas foi o fato de que eles se tornaram fortemente ligados aos computadores. Um exemplo disso é o da antena para navegação, seja ela espacial, aeronáutica ou terrestre. O fato é que as novas necessidades tornaram o computador essencial.

A utilização de antenas tem sido relevante em distintas áreas do conhecimento, por exemplo, podemos citar a medicina, indústria e geologia. Com elas são desenvolvidas investigações sobre características elétricas de diversos meios. Nos últimos anos até a agricultura passou a se beneficiar da radiação EM das antenas em virtude do seu uso na aceleração do crescimento das plantas.

Muitas dessas aplicações citadas acima utilizam, atualmente, antenas miniaturizadas – as de microfita (Figura 2.9), por exemplo – associadas a CIs de micro-ondas e arranjos faseados a lentes.

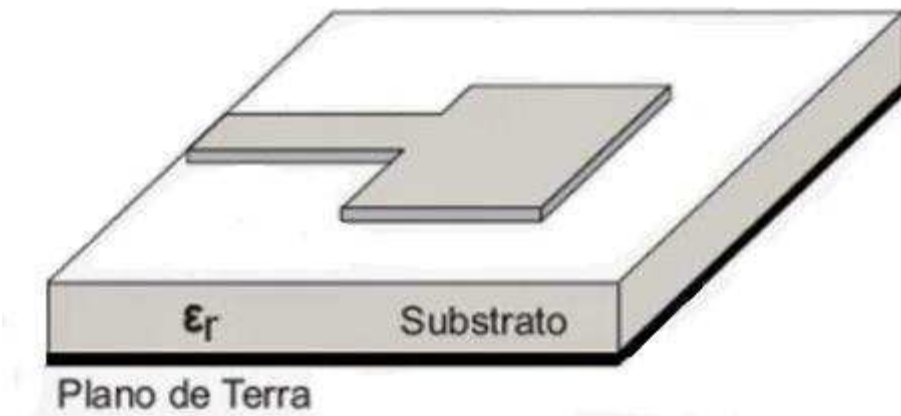


Figura 2.9 – Antena de microfita.

2.2 MECANISMOS DE IRRADIAÇÃO

Considerando uma fonte conectada a uma antena por meio de uma LT de dois condutores, aplicando uma tensão na entrada da linha é criado um campo elétrico entre os seus condutores, cujas linhas de são mostradas na Figura 2.10. As linhas de fluxo forçam os elétrons livres dos condutores a se deslocarem. O movimento de cargas origina uma corrente que, por sua vez, cria um campo magnético com suas respectivas linhas de fluxo.

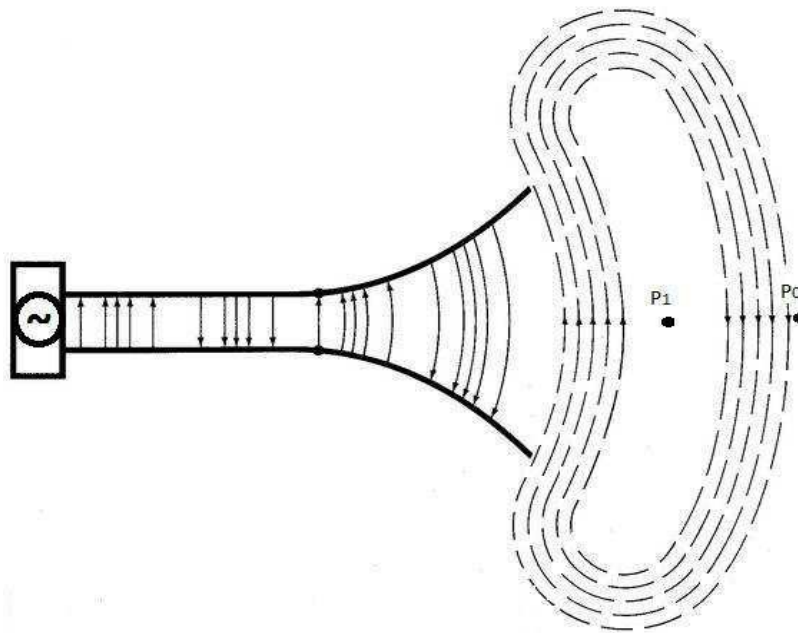


Figura 2.10 – Antena conectada a uma fonte através de uma LT.

As linhas de campo elétrico iniciam em cargas positivas e terminam em cargas negativas. Elas também podem iniciar em cargas positivas e terminar no infinito, iniciar no infinito e terminar em cargas negativas, ou formar caminhos fechados não iniciando nem terminando em cargas. As linhas de campo magnético sempre formam percursos fechados envolvendo condutores carregando correntes porque não existem cargas magnéticas.

As linhas de campo elétrico, mostradas na Figura 2.10, entre os dois condutores, auxiliam a visualização das distribuições de cargas. Assumindo que a fonte de tensão é senoidal, logo o campo elétrico entre os condutores também o é, com um período igual ao da fonte. A amplitude relativa da intensidade de campo elétrico é indicada pela densidade de linhas de força, com as setas mostrando o sentido positivo ou negativo. Os campos elétrico e magnético variando no tempo entre os condutores formam ondas eletromagnéticas que caminham ao longo da LT. As ondas eletromagnéticas entram na antena e tem, associadas com elas, cargas elétricas e a corrente correspondente. Removendo-se parte da estrutura da antena, as ondas no espaço livre podem ser formadas fechando-se as extremidades das linhas de campo elétrico (linhas pontilhadas). Essas ondas são também periódicas, mas um ponto de fase constante P_0 move-se externamente com a velocidade da luz e caminha uma distância $\frac{\lambda}{2}$ (para P_1) no intervalo de tempo de meio período.

Para entender como as ondas guiadas são liberadas da antena dando origem a ondas no espaço livre, conforme indicado pelas linhas fechadas na Figura 2.10, pode-se fazer uma analogia entre as ondas no espaço livre e as ondas criadas ao se atirar uma pedra em um lago. Quando a perturbação na água inicia, as ondas criadas se deslocam afastando-se do ponto onde a pedra caiu. Se a perturbação persistir, novas ondas são criadas, porém atrasadas em suas propagações com relação às iniciais.

Um processo semelhante acontece com as ondas eletromagnéticas criadas por uma perturbação elétrica. Se a perturbação elétrica inicial produzida pela fonte é de curta duração, as ondas eletromagnéticas criadas caminham dentro da linha de transmissão, em seguida pela antena e finalmente serão radiadas como ondas no espaço livre, mesmo se a fonte elétrica não mais existir. Se a perturbação elétrica é de natureza contínua, as ondas eletromagnéticas se deslocam continuamente uma após a outra, como mostrado na Fig. 2.11, para uma antena do tipo bicônica.

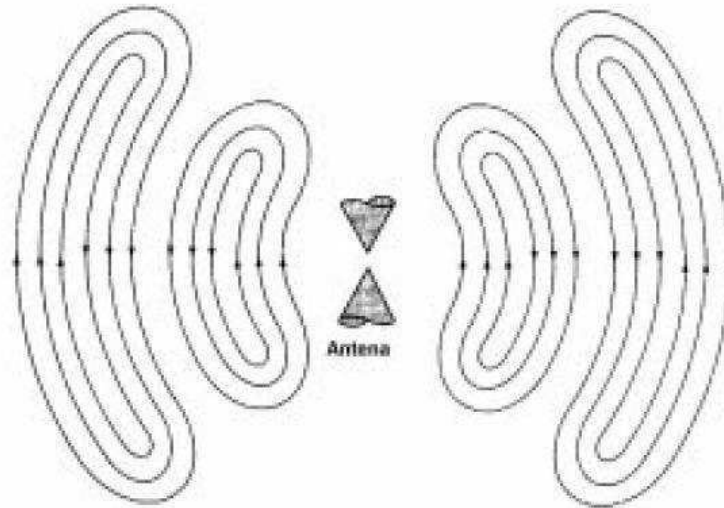


Figura 2.11 - Linhas de campo elétrico no espaço livre produzidas por uma antena bicônica.

As ondas eletromagnéticas no interior da linha de transmissão e da antena estão associadas com as cargas presentes nos condutores. No entanto, quando as ondas são radiadas, elas formam caminhos fechados sem cargas associadas. Com isso se conclui que cargas elétricas são necessárias para excitar, mas não para manter os campos, que podem existir na sua ausência. Essa é uma analogia direta com as ondas na água.

O mecanismo pelo qual as linhas de força de campo elétrico se libertam da antena, para formar ondas no espaço livre, pode ser ilustrado pelo exemplo de uma antena curta com relação ao comprimento de onda. Nessa antena, o tempo de deslocamento é desprezível, o que permite uma melhor interpretação física do desprendimento das linhas de força. Embora seja um mecanismo simplificado, ele permite a visualização da criação das ondas no espaço livre.

A Figura 2.12 mostra as linhas de força criadas entre os braços de um dipolo eletricamente curto alimentado pelo seu centro. No primeiro quarto do período, tempo durante o qual as cargas atingem seu valor máximo (nota-se que aqui estamos assumindo uma variação senoidal no tempo) e as linhas caminham a partir do centro de

uma distância radial igual a $\frac{\lambda}{4}$. Neste exemplo, é assumido que o número de linhas

formadas são três (Figura 2.12a). Durante o próximo quarto do período, as três linhas

originais caminham uma distância adicional de $\frac{\lambda}{4}$ (percorrendo assim um total de $\frac{\lambda}{2}$ do

ponto inicial) e a densidade de cargas nos condutores começa a diminuir. Isso pode ser entendido como sendo acompanhado pela introdução de cargas opostas que no final da primeira metade do período neutralizam as cargas nos condutores.

As três linhas de força criadas pelas cargas opostas caminham a uma distância de $\frac{\lambda}{4}$ durante o segundo quarto da primeira metade do período. Elas são mostradas pontilhadas na Figura 2.12b. O resultado final é que existem três linhas de força apontando num sentido na primeira distância de $\frac{\lambda}{4}$ e o mesmo número de linhas apontando no sentido contrário na segunda distância de $\frac{\lambda}{2}$. Como não existem cargas líquidas na antena, as linhas de força devem ser forçadas a se desprender dos condutores e se unir para formar caminhos fechados, Figura 2.12c. Na segunda metade do período, o mesmo fenômeno ocorre, mas em sentido oposto. A seguir, o processo se repete e continua indefinidamente.

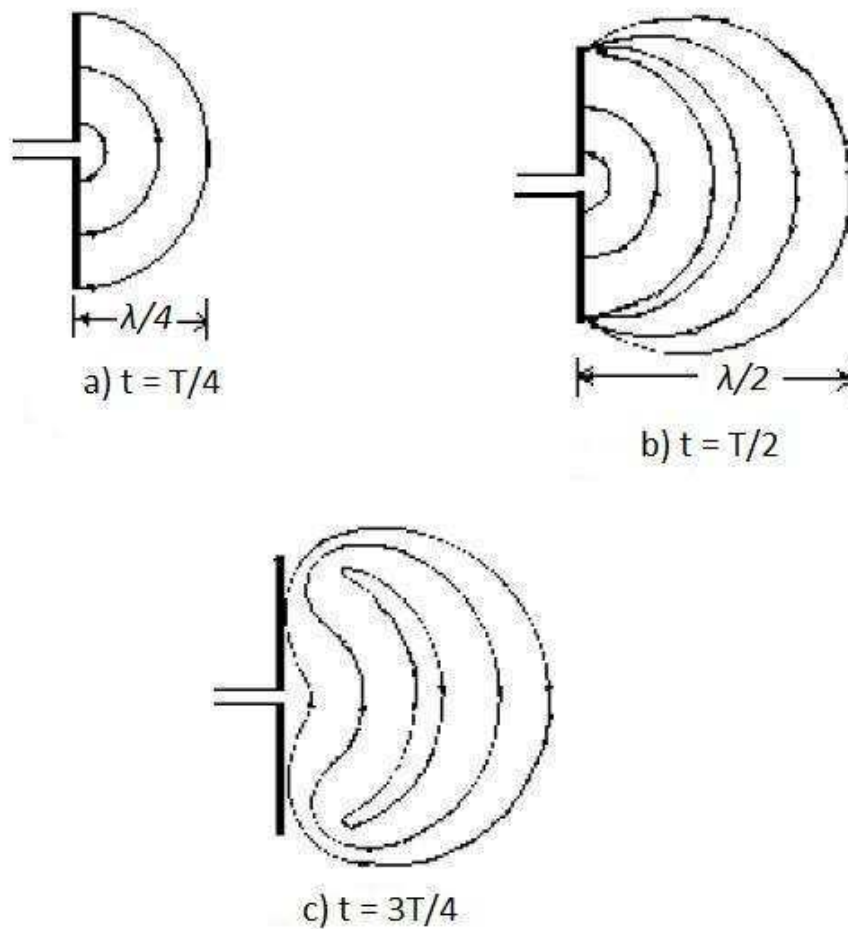


Figura 2.12 – Sequência de formação e liberação das linhas de campo elétrico pelo dipolo curto.

2.3 PARÂMETROS PRINCIPAIS DE ANTENAS

Para o funcionamento eficaz, as antenas devem satisfazer certos requisitos. Entre eles cabe destacar em primeiro lugar duas condições:

1. A antena deve distribuir a energia eletromagnética no espaço (ou reaproveitar a energia incidente) de acordo com uma lei determinada, ou seja, deve ter uma característica de emissão (ou recepção) conhecida. Em determinada situação convém que a energia seja emitida (ou recebida) uniformemente em todas as direções; em outra se necessita o efeito diretivo, ou seja, a concentração do campo radiado em um feixe suficientemente estreito.

2. A emissão ou a recepção das ondas eletromagnéticas não deve ser acompanhada por um consumo inútil de energia em perdas ôhmicas na estrutura da antena. Em outras palavras, a antena deve ter o mais alto rendimento possível.

As antenas se caracterizam por um grande número de parâmetros que se permitem fazer estimativas e comparações entre elas. Assim sendo, os parâmetros das antenas podem ser divididos em duas categorias: primários e secundários. Nos primários, pode-se incluir, por exemplo, o diagrama de radiação, a resistência de radiação, a eficiência e o coeficiente de reflexão (ou impedância de entrada). Os parâmetros secundários são obtidos a partir dos primários. Entre eles se encontram, por exemplo, o ganho, a largura de feixe do lobo principal, o nível de lóbulos secundários (laterais) e a faixa de frequências de operação (largura de banda). A seguir veremos alguns dos principais parâmetros.

2.3.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

O diagrama de irradiação nada mais é do que o mapeamento da distribuição de energia irradiada, levando em conta o campo tridimensional. Para levantar-se o diagrama de irradiação, deve-se tomá-lo a partir de uma distância e localização onde não seja possível a interferência de elementos estranhos ao meio onde se encontram a antena de prova e a antena de teste.

Elementos estranhos que interferem podem ser desde árvores, calhas, rufos, arames, linhas de transmissão de energia ou telefônicas. Estruturas de concreto armado também interferem no resultado de um diagrama de irradiação pelo fato de existir ferro em seu interior. Portanto, para executar experiências de aferição de antenas, estas devem ser em campo aberto.

Dois diagramas de irradiação de uma antena omnidirecional são apresentados na Figura 2.13.

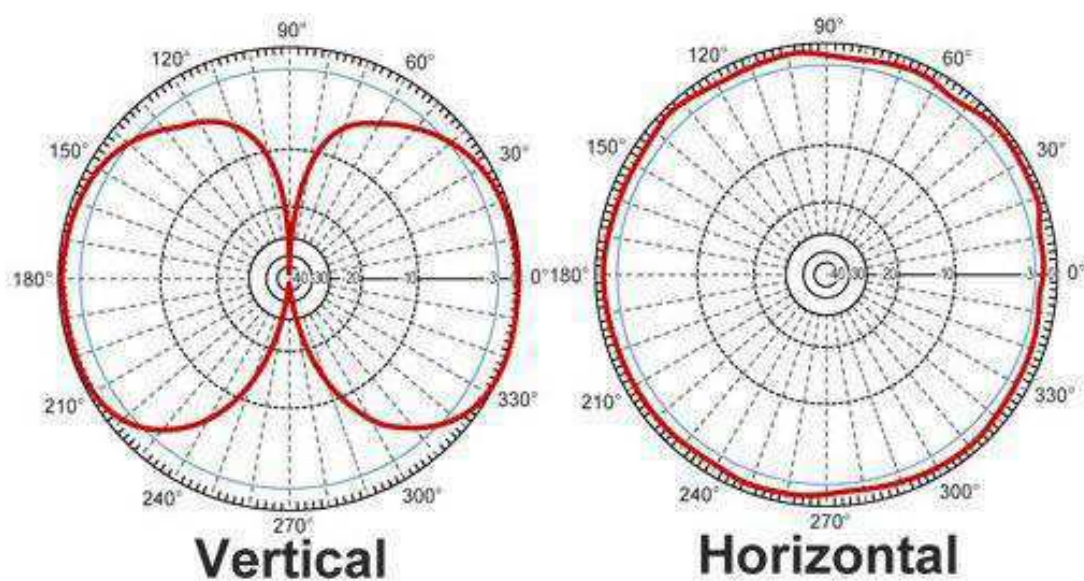


Figura 2.13 – Diagrama de irradiação de uma antena omnidirecional.

2.3.2 POLARIZAÇÃO

A polarização de uma antena é definida em termos da orientação do vetor campo eléctrico na direcção da máxima radiação. Para os casos de interpretação mais simples, o campo eléctrico tem a mesma direcção do condutor eléctrico da antena, podendo ser horizontal, vertical ou circular. Por exemplo, um dipolo vertical, acima do solo radiará com uma polarização vertical, um dipolo horizontal, acima do solo radiará com uma polarização horizontal. Já a polarização circular pode ser produzida por dois campos polarizados linearmente e perpendiculares, com uma diferença de fase de 90°. Pode ser direita ou esquerda, consoante o sentido de rotação.

A polarização pode ser de dois tipos:

– Polarização de uma antena de emissão: é a polarização da onda emitida pela antena antes de sofrer qualquer modificação devida a fatores externos à antena (influência do ambiente de propagação).

– Polarização de uma antena de recepção: é a polarização da onda incidente que induz um sinal máximo na antena de recepção (para a mesma densidade de potência).

Uma onda eletromagnética, ao incidir numa antena segundo uma dada direção, dá origem a uma tensão máxima aos terminais da antena receptora quando houver adaptação de polarizações.

2.3.3 ÁREA EFETIVA DE UMA ANTENA

Considerando uma antena qualquer, admitamos que exista uma densidade de potência P na antena. Quando esta é exposta a um campo eletromagnético incidente, responsável por esta densidade de potência, será desenvolvida uma tensão induzida V a qual produzirá uma corrente I ao longo de sua estrutura. V e I representam potência de radiofrequência nos seus terminais, potência esta que será liberada ao receptor. Portanto, podemos dizer, de forma simplificada, que a antena "extrai" energia da onda eletromagnética passante. É natural, desta forma, imaginarmos o que ela faz, através de uma área de captação de potência. Esta área fictícia é chamada de Área Efetiva. Aqui, área efetiva em uma dada direção é definida como a razão entre a potência disponível W nos terminais da antena (liberada para a carga receptora) e a densidade de potência da onda plana incidente na antena P . Quando a direção não é especificada, é aceitável que esta corresponde à direção de máxima intensidade de radiação. Desta forma, a área efetiva de uma antena é dada por:

$$A_e = \frac{W}{P} \quad (2.1)$$

Onde: A_e é a área efetiva (m^2).

P é a densidade de potência da onda incidente na antena (W/m^2).

W é a potência liberada para a carga receptora (W).

A área efetiva pode também ser relacionada com a área física da antena. Isto é particularmente significativo para as antenas as quais têm uma área de coleta de potência bem definida. Esta relação é denominada de eficiência de abertura \mathcal{E}_a :

$$\mathcal{E}_a = \frac{\text{Área Efetiva Máxima}}{\text{Área Física}} = \frac{A_{ef,max}}{A_f} \quad (2.2)$$

A eficiência de abertura \mathcal{E}_a , é uma medida da eficiência da área física na captação de potência. Como exemplo, podemos citar a eficiência de abertura de uma antena refletora tipo Cassegrain pode valer em torno de 90% embora um valor típico para antenas refletoras se situe em torno de 50% a 70%. As cornetas piramidais apresentam um \mathcal{E}_a entre 50% e 80% dependendo da otimização do projeto.

2.3.4 DIRETIVIDADE

Uma antena isotrópica é aquela que irradia energia eletromagnética igualmente em todas as direções. São elementos hipotéticos, sem perdas e que são largamente usadas como antenas de referência na comparação das propriedades diretivas das antenas reais.

Desta forma, à exceção do irradiador isotrópico, qualquer outra antena irradia a energia em direções preferenciais, e é de grande interesse dispor de um parâmetro que forneça informações sobre esta característica. Sabendo que a densidade de potência corresponde a uma potência total irradiada W uniformemente distribuída sobre uma superfície, a diretividade de um radiador, em uma direção particular, é definida como:

$$DIRETIVIDADE (D) = \frac{\text{Densidade de Potência da Antena Direcional}}{\text{Densidade de Potência da Antena Isotrópica}}$$

É importante saber que ambas as antenas devem estar situadas a uma mesma distância da origem do sistema de coordenadas e irradiando a mesma potência total.

O parâmetro D está intimamente relacionado com o efeito da concentração da radiação em determinada direção. Quanto mais concentrada a radiação, maior será a intensidade de campo produzida naquela direção, para a mesma potência irradiada. Portanto, o emprego de uma antena direcional produz o mesmo resultado, naquela direção, que o aumento da potência do transmissor.

Quando se trata de diretividade de uma antena, a hipótese fundamental foi a de que as duas antenas consideradas (a diretiva e a isotrópica) irradiavam a mesma potência total W_{irr} . Não se fez referência a nenhum aspecto relativo ao desempenho do sistema irradiante.

A antena isotrópica, por ser uma antena ideal, supostamente irradia toda a potência de alimentação. Por outro lado, uma antena real não irradiará toda a potência que recebe nos seus terminais, já que alguma potência será dissipada na resistência ôhmica, sob forma de calor. A resistência ôhmica é uma característica elétrica do material com o qual é feita a antena.

2.3.5 RELAÇÃO FRENTE-COSTAS

A relação frente-costas é uma comparação entre o nível do feixe principal da antena com relação ao nível do lóbulo traseiro. Quanto maior o valor medido da relação frente-costas melhor a isolamento na parte posterior da antena, Figura 2.14. Esse parâmetro é importante no estudo da interferência de sinais provenientes de outras antenas.

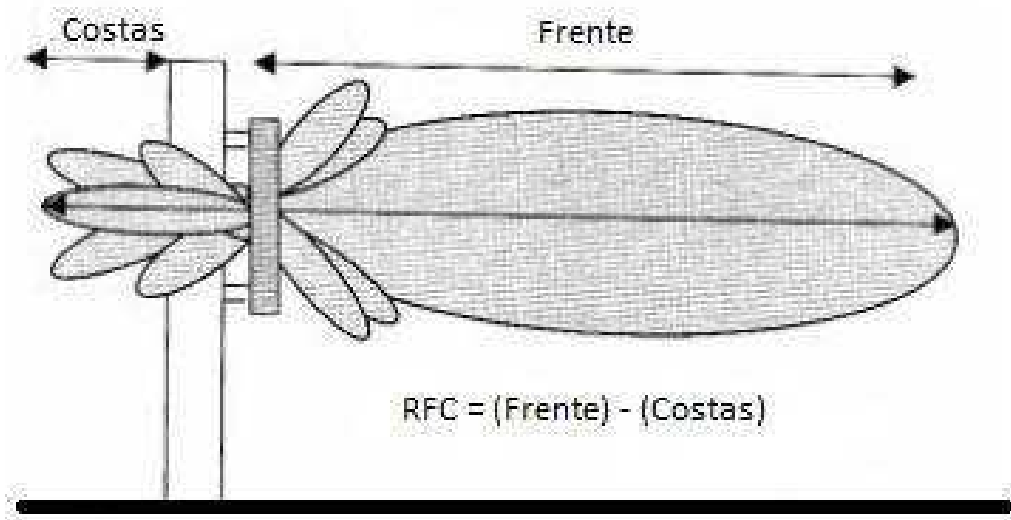


Figura 2.14 – Relação frente-costas de uma antena.

2.3.6 IMPEDÂNCIA

A impedância de entrada de uma antena é uma função da frequência e não pode ser descrita por uma expressão analítica simples. No entanto, para uma dada frequência, a impedância da antena pode ser representada por uma resistência em série com uma reatância. Em uma banda estreita de frequências, essa representação ainda pode ser utilizada, mas somente de forma aproximada. Quando a banda de frequências é centrada na frequência de ressonância da antena, uma melhor aproximação é obtida representando-se a antena como um circuito *RLC* série. Quando a faixa de operação estende-se sobre uma grande banda de frequências, esta representação não é adequada.

2.3.7 LARGURA DE BANDA

Os parâmetros das antenas caracterizam o funcionamento das mesmas em uma única frequência. Como em um sistema de comunicações se utilizam sinais com determinada largura de banda, um parâmetro importante das antenas é a sua largura de banda de frequências de operação, em cujos limites os outros parâmetros da antena não excedem valores permitidos, estabelecidos por requisitos técnicos.

Os limites da banda de frequências de operação são determinados por qualquer um dos parâmetros dependentes da frequência. A largura de banda se define, por exemplo, pelo comportamento da impedância de entrada da antena, isto é, o coeficiente de onda estacionária na linha de alimentação deve se limitar abaixo de um determinado valor ao se variar a frequência. A definição de banda também pode ser em função da variação da direção de máximo do diagrama de irradiação, da variação da largura de feixe, da diminuição da diretividade, do aumento dos níveis de lóbulos laterais, entre outros.

Convencionalmente consideram-se de banda estreita as antenas com banda de frequências de operação menor do que 10% da frequência nominal. As antenas de banda larga podem ter uma largura de banda desde 10% até 50%. As antenas com bandas maiores, da ordem de uma ou várias oitavas, se denominam de multibandas. E, finalmente, se a relação dos limites superior e inferior chega a 5:1 ou maior, a antena pode ser considerada como independente da frequência.

2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO ESPAÇO LIVRE

A onda eletromagnética radiada por uma antena tende, em geral, a se propagar para todas as direções a partir dela, a menos que isso seja alterado elétrica ou mecanicamente. A energia radiada por uma antena transmissora pode alcançar a antena receptora por diferentes caminhos de propagação. A onda pode, por exemplo, caminhar nas proximidades e paralela à superfície da terra. Nesse caso, ela é afetada por absorção em prédios e árvores, pela densidade de gases da atmosfera e por objetos no seu caminho de propagação. Elas também podem ser espalhadas por objetos refletores de radiofrequência. Esse tipo de sinal é denominado de onda terrestre e é a principal fonte de energia na área de cobertura primária de uma estação.

As ondas terrestres podem ser convenientemente divididas em onda de superfície e onda espacial, que por sua vez pode ser subdividida em onda direta e onda refletida. Quando a antena está localizada no espaço livre, isto é, remota da terra e de qualquer obstrução, a densidade de potência (a potência por unidade de área) é igual a:

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (2.3)$$

em que P_t é a potência total irradiada, G_t é o ganho da antena transmissora na direção da antena receptora e d é o ponto de observação (considerado na região de campos distantes).

A potência disponível na antena receptora é:

$$P_r = S A_{ef} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} A_{ef} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (2.4)$$

em que G_r e A_{ef} são, respectivamente, o ganho e a área efetiva da antena receptora. Da relação (2.4), obtém-se:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.5)$$

que é uma relação fundamental, conhecida como Equação de Friis.

A Equação ou Fórmula de Friis relaciona a potência transmitida de uma antena para outra em determinadas condições ideais. Foi desenvolvida por Harald Trap Friis (1893-1976). Dadas duas antenas, a razão da potência recebida pela antena de recepção, P_r , sobre a potência transmitida à antena de transmissão, P_t , é dada pela equação (2.5), onde G_t e G_r são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, λ é o comprimento de onda e d é a distância entre elas.

Os ganhos das antenas são medidos com respeito a antenas isotrópicas (em unidades lineares e não em decibéis), com o comprimento de onda e a distância nas mesmas unidades.

Esta fórmula postula que a quantidade de potência transferida entre duas antenas é proporcional ao produto dos ganhos das antenas. De acordo com isto, deficiências de baixo ganho em antenas de transmissão podem ser compensadas com um ganho alto em antenas de recepção e vice-versa. Isto é muito importante em várias aplicações práticas, dado que é por vezes necessário uma antena ter baixo ganho devido a restrições de tamanho, peso ou potência disponível, como acontece com as antenas situadas em satélites ou naves espaciais.

Deve-se aplicar esta relação apenas sobre as seguintes condições, consideradas ideais:

- As antenas estão em espaço aberto não obstruído.
- P_r é tida como a potência disponível nos terminais da antena de recepção. Não será totalmente entregue ao receptor a não ser que haja adaptação de impedância com a antena.
- P_t é tida como a potência disponível nos terminais da antena de transmissão. Não será totalmente entregue à potência de transmissão a não ser que haja adaptação de impedância com a antena.
- As antenas estão alinhadas sobre a mesma polarização e orientadas de maneira a que cada antena radie na direção de máxima radiação da outra.

As condições ideais quase nunca são alcançadas em condições terrestres ordinárias, devido a obstruções, reflexões em edificações, e ainda mais importante, devido a reflexões na terra. Uma situação onde a fórmula é razoavelmente eficiente é em comunicações por satélite, onde a absorção atmosférica é desprezável; outra situação ocorre em salas anecóicas, ambientes projetados para minimizar as reflexões.

3. GANHO DE UMA ANTENA

Na prática, não é comum nem imediato medir a eficiência de uma antena isoladamente de sua diretividade para só então determinar-se o ganho. O que habitualmente se mede é o parâmetro ganho, que nada mais é do que a relação entre a potência radiada pela antena em análise e a potência radiada pela antena de referência, ambas com a mesma potência aplicada aos seus terminais de entrada.

Para complementar a definição de ganho é necessária a introdução do conceito de eficiência de radiação de uma antena. O princípio da conservação da energia deve balizar o nosso raciocínio e permitir entender que, dada à natureza não ideal de qualquer antena que seja utilizada na prática, parte da energia de radiofrequência aplicada aos seus terminais irá se transformar em calor, representando, portanto, uma perda, e irá ser transformada em ondas eletromagnéticas e será adaptada ao espaço livre por ação das propriedades físicas de radiação (ou transformação de energia) operadas pela antena.

O parâmetro ganho G , leva em consideração a relação entre a potência irradiada e aquela cedida à antena. Esta relação define o fator de eficiência de radiação da antena kl , o qual é um número entre 0 e 1, que indica que apenas parte da potência de entrada W_a foi irradiada.

Assim sendo, o produto entre o Fator de Eficiência de Radiação e a Diretividade é denominado de Ganho:

$$G = kl D \quad (3.1)$$

É importante saber que o ganho não contabiliza as perdas originárias de descasamentos, quer de impedâncias, quer de polarização.

3.1 MEDIÇÃO DE GANHO DE UMA ANTENA POR COMPARAÇÃO

Um método alternativo para avaliação do ganho utiliza o princípio da comparação dos desempenhos de duas antenas distintas: uma de referência – padrão, de ganho previamente conhecido e uma antena chamada de antena sob teste – cujo desempenho é uma incógnita. Através da avaliação dos desempenhos destas duas antenas, a de referência e a sob teste, é possível a determinação do ganho desta última.

Supondo um enlace de rádio onde a fonte de potência alimenta uma antena, com potência P_f constante e que possui ganho G_f . A antena receptora, separada de uma distância d da transmissora, será inicialmente uma antena padrão de ganho conhecido G_s . Aqui, se fará uso da Equação de Friss (2.5), que neste caso será da forma:

$$\frac{P_s}{P_f} = G_s G_f \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.2)$$

Depois de registrado o valor de P_s , a antena receptora padrão é substituída pela antena receptora sob teste, de ganho desconhecido G_t . A potência recebida por esta antena desconhecida, será denotada por P_t . Neste caso, aplicada a Equação de Friss, poderá ser observada a seguinte equação:

$$\frac{P_t}{P_f} = G_t G_f \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.3)$$

Dividindo a equação (3.3) pela (3.2), chega-se a:

$$\frac{P_t}{P_s} = \frac{G_t}{G_s} \quad (3.4)$$

Ou ainda,

$$G_t = G_s \frac{P_t}{P_s} \quad (3.5)$$

Desta forma, pode-se determinar o ganho de uma antena incógnita se for conhecido o ganho de uma antena padrão e se se dispuser de meios para determinação das potências recebidas P_s e P_t . Porém uma observação a ser feita é o fato da disposição geométrica do sistema permanecer inalterada assim como a potência de alimentação, P_f .

4. RECURSOS UTILIZADOS E ATIVIDADES LABORATORIAIS

Neste capítulo serão descritos de forma detalhada todos os recursos que foram utilizados na implementação do sistema de controle de altura e rotação da antena no mastro, assim como o programa desenvolvido para tal controle e os equipamentos utilizados nas medições.

Este capítulo também irá abordar e descrever todas as atividades realizadas no Laboratório do Bloco CK do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, além de descrições acerca das montagens e procedimentos experimentais postos em prática no decorrer deste trabalho.

Estas atividades foram compreendidas entre o período de novembro de 2013 a fevereiro de 2014 e contaram com a participação de alunos, professores e de técnicos do laboratório.

4.1 SISTEMA DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO

O conjunto de unidades que realizam o controle do posicionamento da antena é o principal equipamento do sistema utilizado no experimento, e tem extrema importância na sua implementação, pois ele tanto serve de suporte mecânico para a antena como para definir a sua posição na medição do sinal de recepção na antena.

O equipamento utilizado é conhecido como Breitbanddipol 300...900 MHz, que em tradução livre significa “dipolo de banda larga”. Foi fabricado pela RFT, na Alemanha. Segundo seu catálogo, este modelo tem data de novembro de 1965 e nos é apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Sistema de controle de posicionamento da antena.

Ele é composto basicamente dos seguintes componentes:

4.1.1 BASE PARA SUPORTE DO MASTRO E ELEVADOR

A base para suporte fica na parte inferior do arranjo, em contato com o solo, e oferece o suporte para a montagem do mastro, onde fica localizado o elevador, onde a antena é fixada. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram esses equipamentos.



Figura 4.2 – Base para suporte do mastro.



Figura 4.3 – Elevador de suporte da antena.

Podemos observar que na base há a presença de um tubo de fita em uma polia conectada a um motor. Este motor elétrico é o responsável pela movimentação vertical do elevador por meio de uma polia instalada na extremidade superior do mastro e conectada a ele por meio de uma fita, e conseqüentemente da antena, que tem sua movimentação complementada através de outro motor, sendo este localizado no elevador, o que garante a sua movimentação nos sentidos horário e anti-horário. Assim sendo, há uma composição de dois movimentos que podem ser explorados. Além do motor que controla a altura, deve-se destacar a presença de um sistema de frenagem mecânica presente no elevador, que entra em ação quando o motor inferior deixa de funcionar e regula de forma bastante eficiente a posição deste.

O mastro, nada mais é do que uma composição de segmentos de madeira quadriculados de um metro de comprimento que se encaixam verticalmente para assegurar o movimento ascendente e descendente do elevador. Ele pode ter sua altura variada, de acordo com a quantidade de segmentos utilizados. Quando muitos, se torna necessária a presença de estais, que nada mais são do que cordas fixadas do mastro para o solo, de modo a garantir que o seu peso por ventura venha a causar desequilíbrio.

O conjunto montado pode ser visualizado na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Conjunto base suporte/elevador.

As Figuras 4.5 e 4.6, a seguir mostram a representação esquemática dos componentes descritos anteriormente e suas partes constituintes.

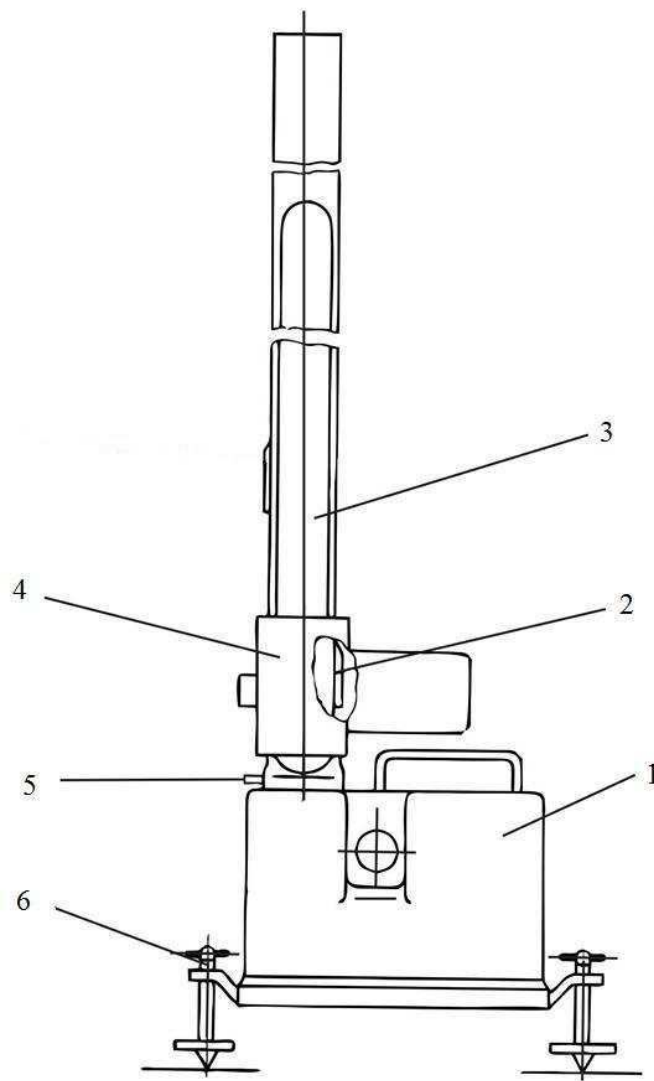


Figura 4.5 – Esquema representativo do conjunto base suporte /elevador.

- 1 – Base
- 2 – Segmento de 1m de comprimento
- 3 – Mastro
- 4 – Elevador
- 5 – Parafuso pino
- 6 – Parafuso para ajuste de altura

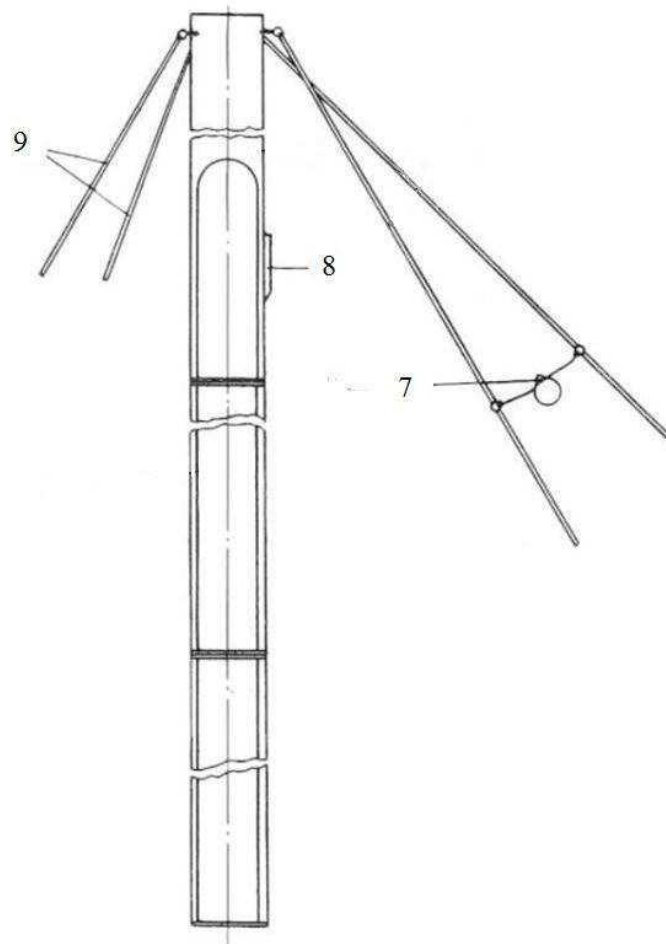


Figura 4.6 – Esquema representativo do mastro.

- 7 – Suporte do cabo
- 8 – Segmento superior
- 9 – Cordas

4.1.2 UNIDADE DE CONTROLE

A Unidade de Controle, UC, Figura 4.7, é a responsável pelo controle do posicionamento da antena no mastro, ou seja, é ela quem envia o comando (sinal elétrico) para os motores que executam os movimentos subir/descer e horário/anti-horário.



Figura 4.7 – Unidade de Controle.

Todos os comandos provenientes da unidade de controle são transmitidos para a base e o elevador por meio de conexões dispostas na parte de trás deste equipamento, que realizam a conexão elétrica.

Um diagrama esquemático, que mostra os seus componentes de maneira mais detalhada nos é apresentado na Figura 4.8.

Inicialmente, esta unidade foi concebida para controlar a posição da antena de forma manual, ou seja, por meio das quatro chaves de comandos presentes na sua parte frontal (conforme indicado na Figura 4.8). Porém esse sistema antigo passou por um processo de modernização, onde foi implementada uma entrada paralela na sua parte posterior, permitindo desta forma este controle passasse também a ser feito via comandos de computador, o que veio a contribuir para um sistema mais eficiente e preciso.

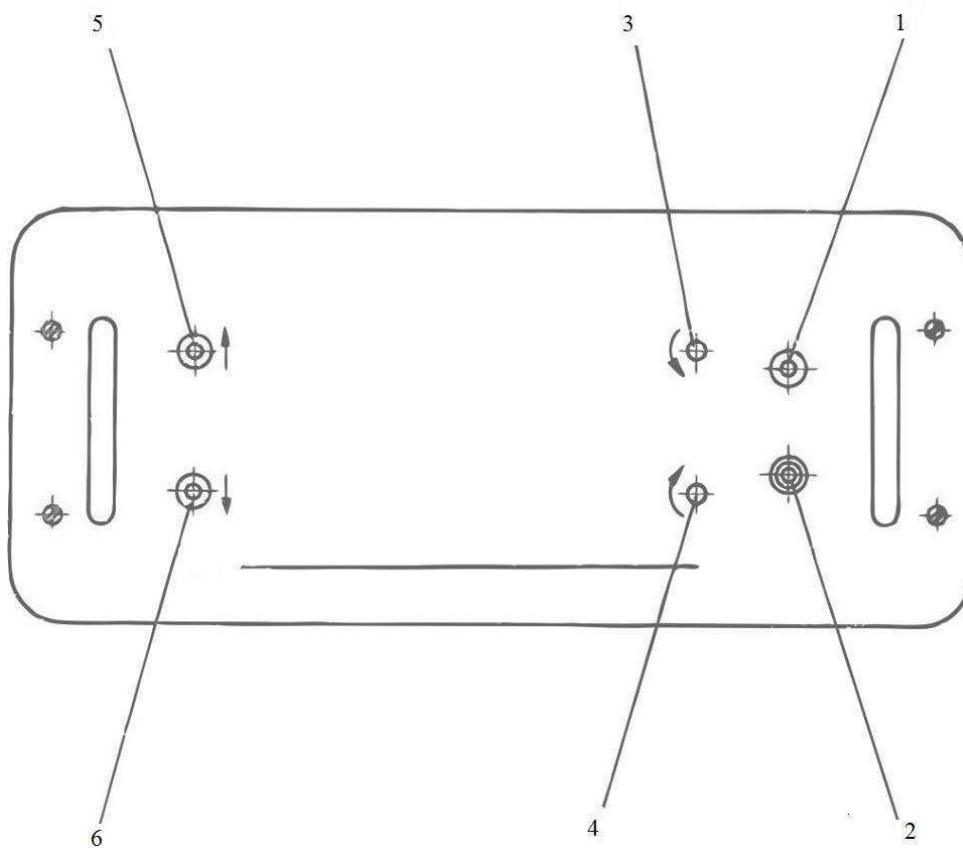


Figura 4.8 – Esquema da Unidade de controle.

- 1 – Chave liga/desliga
- 2 – Led de indicação de funcionamento
- 3 – Chave de comando giro anti-horário
- 4 – Chave de comando giro horário
- 5 – Chave de comando subir
- 6 – Chave de comando descer

Originalmente, o sistema completo com os seus componentes é ilustrado na Figura 4.9.

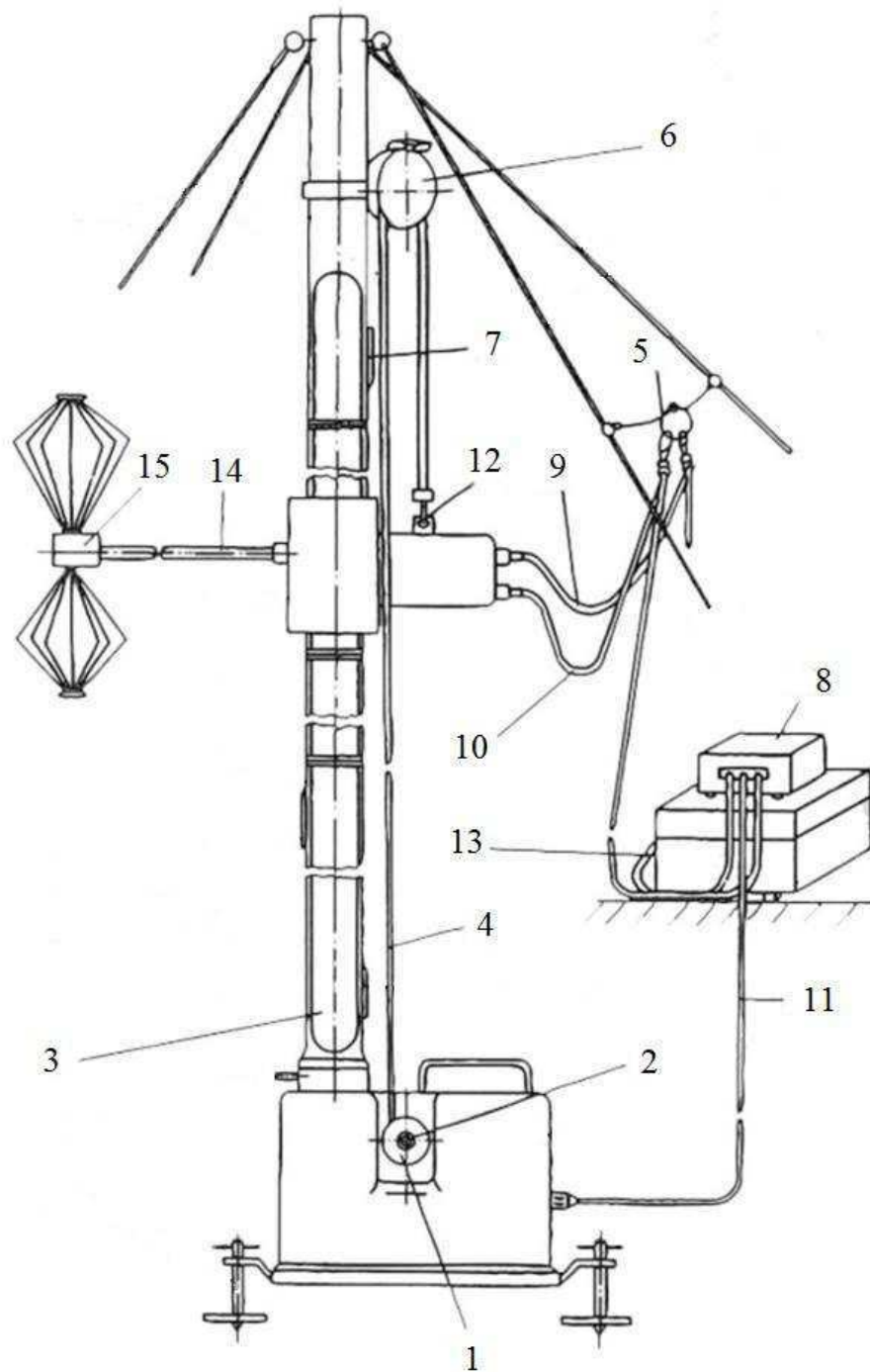


Figura 4.9 – Representação esquemática do sistema completo mastro antena móvel.

- 1 – Tubo de fita
- 2 – Parafuso de cabeça escareada
- 3 – Segmento inferior do mastro
- 4 – Fita

- 5 – Suporte do cabo
- 6 – Polia superior
- 7 – Segmento superior do mastro
- 8 – Unidade de controle
- 9 – Cabo de conexão para o dispositivo receptor
- 10 – Cabo de conexão elevador/unidade de controle
- 11 – Cabo de conexão base/unidade de controle
- 12 – Gancho de suspensão
- 13 – Cabo de alimentação da unidade de controle
- 14 – Haste para conexão da antena
- 15 – Antena dipolo bicônica de banda larga 300...900 MHz

4.2 PROGRAMA PARA O CONTROLE DO POSICIONAMENTO DA ANTENA

Para efetuar o controle da posição da antena no mastro, foi desenvolvido um programa em linguagem C++, utilizando o software DevC++, disponível e facilmente encontrado, outrora utilizado em trabalhos acadêmicos.

A parte de programação é bastante simples, consiste apenas em mandar um sinal de ativação (nível alto) para determinadas saídas da porta paralela do computador, conseqüentemente entrada da porta da unidade de controle. Este sinal de ativação corresponde a um valor de tensão de 5V que, por sua vez, irá acionar os comandos da unidade, o que ocasionará o funcionamento do motor da base nos dois sentidos (sobe/desce) e do motor do elevador também nos dois sentidos (horário/anti-horário).

A Figura 4.10, a seguir, mostra o esquema da porta paralela na entrada da unidade de controle do sistema móvel com as devidas numerações.

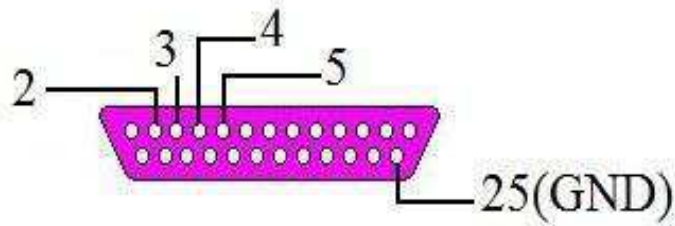


Figura 4.10 – Porta paralela na entrada da UC.

Pino 2 – Entrada D0, giro anti-horário

Pino 3 – Entrada D1, giro horário

Pino 4 – Entrada D2, sobe

Pino 5 – Entrada D3, desce

Pino 25 – Terra

Por conta da simplicidade das funções realizadas pela unidade, os pinos restantes não foram utilizados, de modo que não devemos levá-los em consideração todavia.

A programação foi realizada de maneira a existir uma proporcionalidade entre os valores das variáveis de entrada (comprimento de subida/descida e ângulo horário/anti-horário) e o tempo de ativação das portas que realizam esse comando, ou seja, o tempo de funcionamento dos motores. Antes da implementação de fato, foi realizada uma simulação para testar o programa e entender melhor este processo. Esta simulação é tema de uma seção do próximo capítulo, e o programa utilizado encontra-se totalmente comentado anexo a este trabalho.

4.3 EQUIPAMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DO GANHO

No experimento de determinação do ganho, foram utilizados os equipamentos descritos a seguir.

- Antena padrão: A antena padrão conhecida, Figura 4.11, é um modelo SAS-510-7 log-periódica de banda larga que opera nas frequências de 270 MHz a 7 GHz. É fabricada pela A. H. Systems, Inc. Todos os seus parâmetros são conhecidos.



Figura 4 .11 – Antena de referência.

- Antena sob teste: Do tipo dipolo, Figura 4.12, é a antena desconhecida, a qual se deseja determinar o ganho. Foi construída no LEMA e lá se encontrava disponível. Ela opera em uma frequência de 1,6 GHz.



Figura 4.12 – Antena sob teste.

- Antena fonte: A antena fonte, cuja referência é HL040, fabricada pela Rohde & Schwarz, também é do tipo log-periódica de banda larga e opera na banda de frequência que vai de 400 MHz a 3,6 GHz. Ela é suportada por um tripé de madeira que é responsável pelo seu posicionamento. Esta antena é mostrada na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Antena fonte.

- Gerador de sinais: Acoplado à antena fonte, o gerador de sinais, Figura 4.14, gera sinais senoidais de altas frequências que são transmitidos por ela. O gerador de sinais utilizado neste experimento é fabricado pela Rohde & Schwarz e possui referência SMBV100A. Opera de 9 kHz a 6 GHz.



Figura 4.14 – Gerador de sinais.

- Analisador de espectro: É o equipamento que, conectado a antena receptora, é responsável por mensurar a intensidade do sinal recebido. Assim como o gerador de sinais, este opera entre 9 kHz e 6 GHz e é fabricado pela Rohde & Schwarz. É apresentado na Figura 4.15, a seguir.



Figura 4.15 – Analisador de espectro.

4.4 AMBIENTIZAÇÃO DO LABORATÓRIO

Como a parte experimental deste trabalho iria ser totalmente realizada no laboratório, a parte inicial das atividades consistiu na arrumação do mesmo, pois este encontrava-se de forma totalmente desorganizada.

Primeiramente, foram retirados todos os materiais que não seriam utilizados dando a estes outros destinos, foi enfatizada também a retirada dos armários e outros elementos metálicos do recinto, pois estes viriam a causar interferências devido a reflexões nas medições a serem realizadas futuramente. Após esta parte, o procedimento que foi tomado em seguida, consistiu na limpeza e relocação das bancadas e armários no ambiente.

Como o laboratório não contava com nenhum equipamento de informática, neste foi instalado um computador, conforme mostra a Figura 4.16, mais adiante, foi dado auxílio na instalação de um ponto de acesso a rede de internet do prédio, Figura 4.17.



Figura 4.16 – Computador instalado no laboratório do bloco CK.



Figura 4.17 – Instalação do ponto de acesso à rede no laboratório.

Passada esta etapa, o que se seguiu foi a instalação dos equipamentos para a realização dos testes. Foram instalados primeiramente o conjunto de controle de posicionamento da antena, descrito no capítulo anterior, em seguida os demais equipamentos, o gerador de sinais com a antena irradiante; e o sistema de recepção, as antenas juntamente com o analisador de espectro.

A Figura 4.18, a seguir ilustra como se encontrava o laboratório após todo o processo de organização e montagem dos equipamentos.



Figura 4.18 – Laboratório com equipamentos montados.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SINALIZAÇÃO DA UNIDADE DE CONTROLE

Além da instalação entrada paralela na unidade de controle, instalada anteriormente, antes de iniciar as atividades com o sistema de controle de posicionamento da antena, foi instalado na UC um circuito para sinalização dos movimentos realizados através dos comandos. Este circuito é bastante simples e tem como finalidade indicar quando ocorrem comandos automáticos.

Conhecendo-se as conexões usadas na entrada da porta paralela (Seção 4.2) da UC, foi implementado um circuito elétrico no interior desta, de modo a realizar a sinalização luminosa através de quatro LED's. O circuito utilizado é apresentado na Figura 4.19.

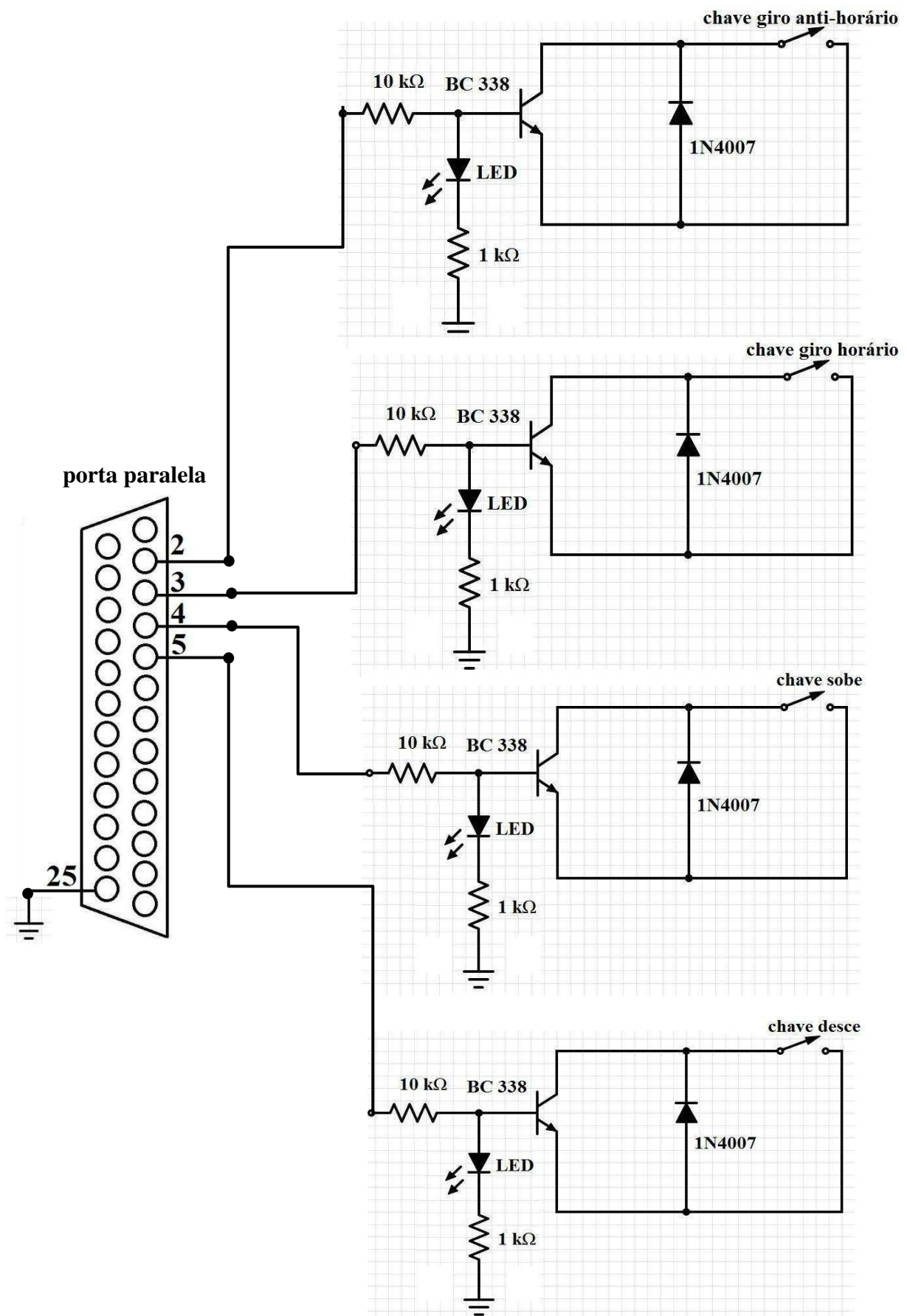


Figura 4.19 – Circuito para sinalização da UC.

O funcionamento deste circuito ocorre da seguinte forma. Ao ativar uma das quatro saídas da porta, uma tensão é aplicada na base do transistor, no qual o LED está conectado. Esta tensão ativa o transistor de modo que sua corrente de coletor seja praticamente a corrente do emissor. Desta maneira, toda a corrente devido a tensão na entrada do circuito circulará pelo LED (que se encontra diretamente polarizado), e este quando em condução, emitirá luz sinalizando a execução de algum comando.

A Figura 4.20 e 4.21 a seguir, apresentam o diagrama esquemático e a implementação de fato do sistema de sinalização na parte frontal da unidade de controle.

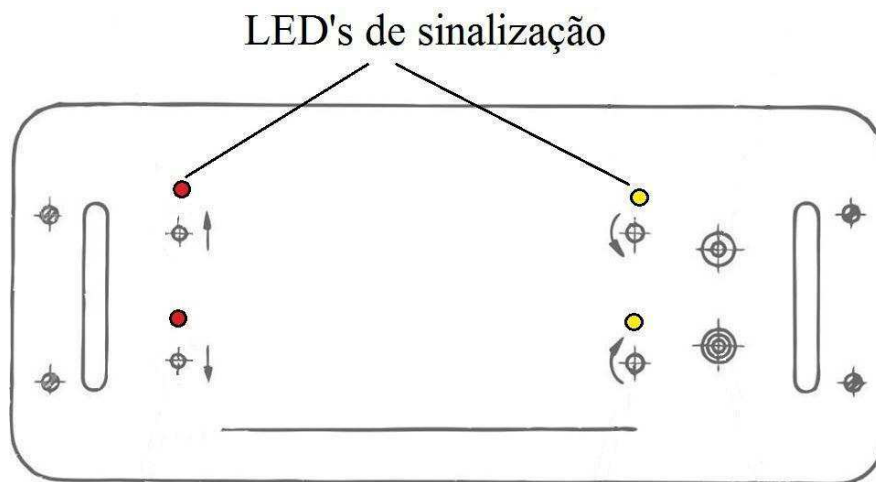


Figura 4.20 – Diagrama da unidade de controle com LED's de sinalização.



Figura 4.21 – Unidade de controle sinalizada.

Este trabalho, realizado pelo técnico do Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicado (LEMA), foi acompanhado no período que antecedeu o início das atividades.

4.6 SIMULAÇÃO, AJUSTES E SINCRONIZAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COM O POSICIONAMENTO DA ANTENA

Após o término do programa, a fase que se seguiu foi a de implementação deste juntamente com os equipamentos responsáveis pelo posicionamento espacial da antena.

Como descrito em outra oportunidade, o programa nada mais faz do que ativar certos pinos da saída da porta paralela do computador. Por sua vez, esta saída do computador está conectada a unidade de controle do sistema móvel. Assim sendo, a porta atua como interface entre o computador e o sistema de posicionamento.

Antes de implementar de fato, foram realizados alguns testes para verificar o funcionamento apenas do programa. Para isto, foi montado um pequeno circuito elétrico que simulava o tempo de ativação de determinados pinos, de acordo com os comandos passados pelo usuário para o computador. A Figura 4.22 mostra este circuito, que utilizou apenas quatro LED's e quatro resistores, além de uma entrada de porta paralela. A Figura 4.23 exhibe como ficou este circuito após sua montagem no protoboard.

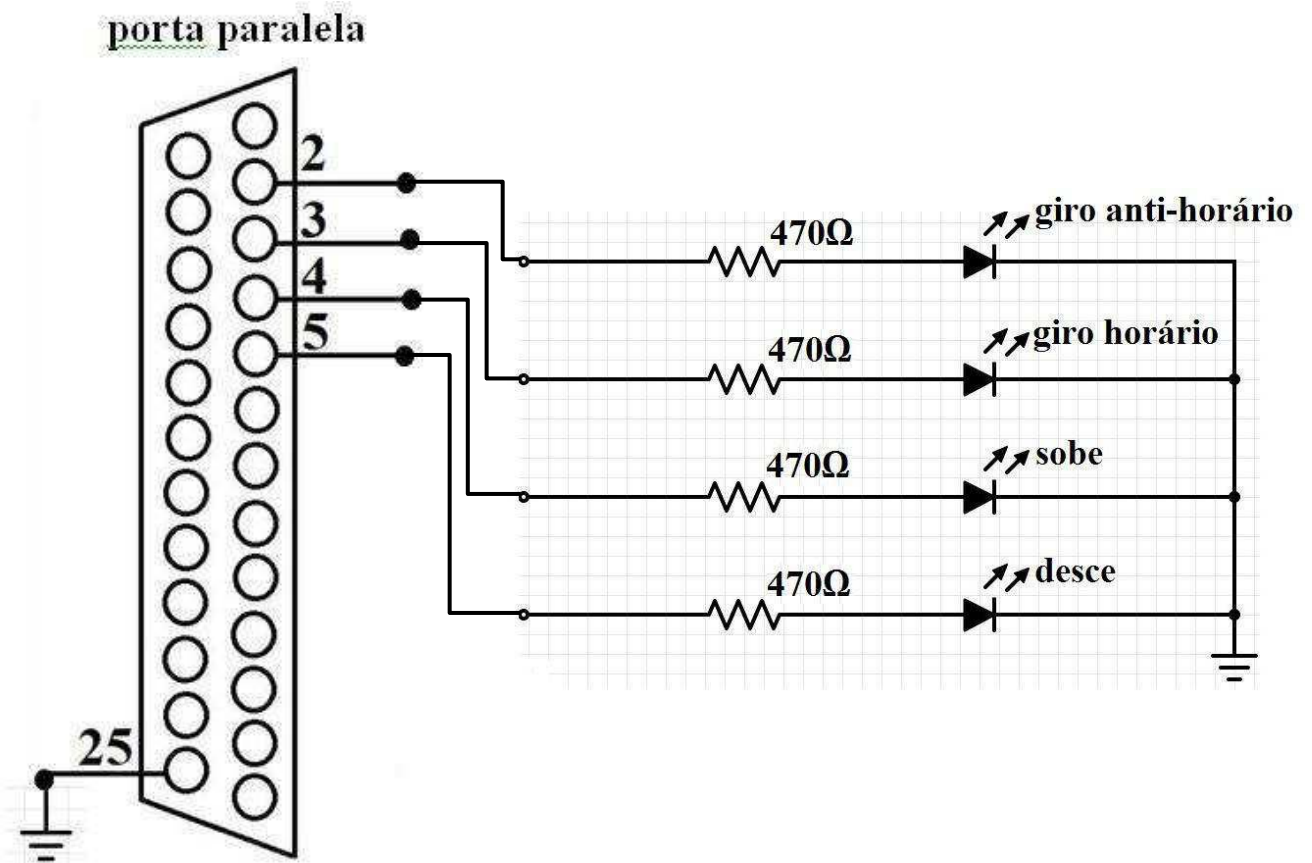


Figura 4.22 – Esquema do circuito elétrico usado na simulação do programa.

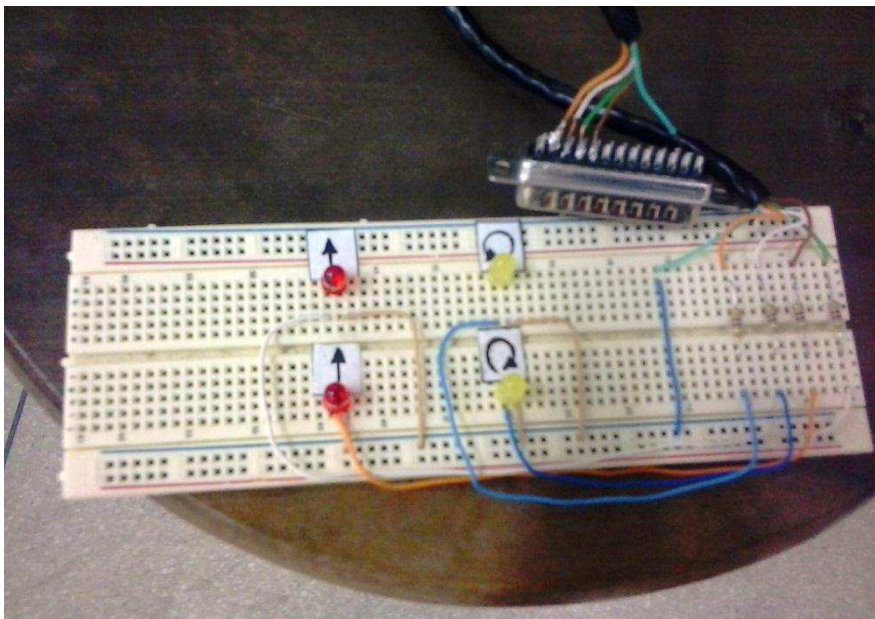


Figura 4.23 – Circuito elétrico montado para simulação.

Após o ensaio do circuito com o programa, foi constatado realmente o funcionamento deste, de modo que em sequência, finalmente o sistema de posicionamento da antena foi “conectado” para receber os comando via computador.

Ao realizar as devidas conexões e comandos, ocorreu um grave problema. Foi observado o não funcionamento do motor localizado na base que suporta o mastro, motor este que é responsável pelo movimento de subida e descida do elevador. Desta forma, os ensaios de ganho, que seriam realizados posteriormente estariam comprometidos.

A seguir, o procedimento tomado foi o de “calibrar” o comando de rotação horária e anti-horária do programa com o motor existente no elevador. O que foi feito nada mais foi do que o ajuste entre o tempo de ativação das saídas responsáveis pela rotação (pinos 2 e 3) com a quantidade de movimento em graus executada pelo motor. Através de manipulações em valores de algumas variáveis do programa e com o auxílio de um instrumento medidor de ângulo acoplado a um ponto na extremidade do eixo do motor (Figura 4.24), a sincronização foi feita de forma satisfatória. Desta maneira, a partir de valores (em ângulo) inseridos na entrada pelo usuário do programa, o movimento descrito pelo motor de fato correspondeu a estes.

Durante esse experimento, foi verificado que valores de ângulos muito pequenos não eram executados pelo motor, isto ocorreu devido ao tempo de ativação da porta paralela e conseqüentemente do comando da unidade de controle, que é muito pequeno para fazer com que o motor saísse do estado de inércia, não realizando o movimento. Ângulos menores que três graus não são possíveis de serem executados pelo motor. É possível que este problema não exista em equipamentos mais novos e precisos, cujo tempo de resposta é imediato.



Figura 4.24 – Sistema utilizado para medição de ângulo executado pelo motor.

Por fim, nas Figuras a seguir, estão ilustrados todos os prompts de comando do Windows disponíveis para o usuário, quando este está utilizando o programa.

```
Este programa e responsavel pelo controle do posicionamento da antena
acoplada ao elevador no mastro
=====
== POR FAVOR, CONECTE O EQUIPAMENTO AO COMPUTADOR ATRAVES DA PORTA PARALELA ==
=====

Escolha a opcao desejada:

1)Subir a antena
2)Descer a antena
3)Girar a antena no sentido horario
4)Girar a antena no sentido anti-horario
5)Sair
```

Figura 4.25 – Tela do menu inicial do programa.



Figura 4.26 – Tela da opção subir a antena.

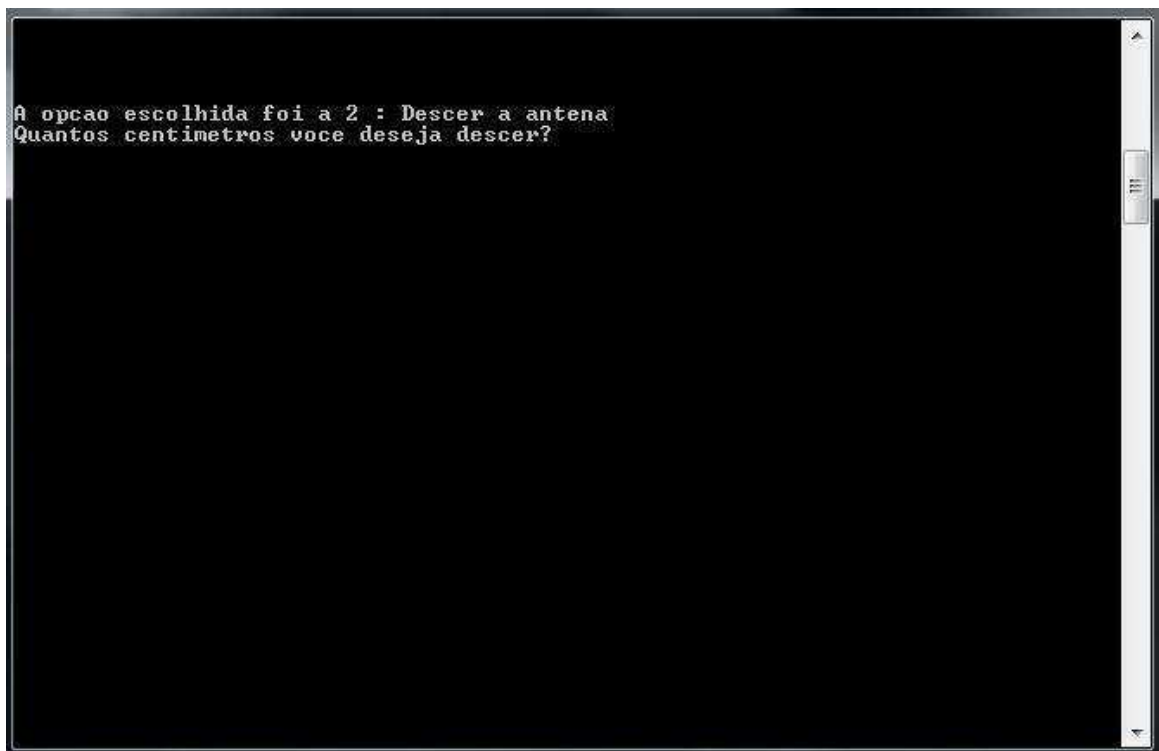


Figura 4.27 – Tela da opção descer a antena.



Figura 4.28 – Tela da opção girar a antena no sentido horário.

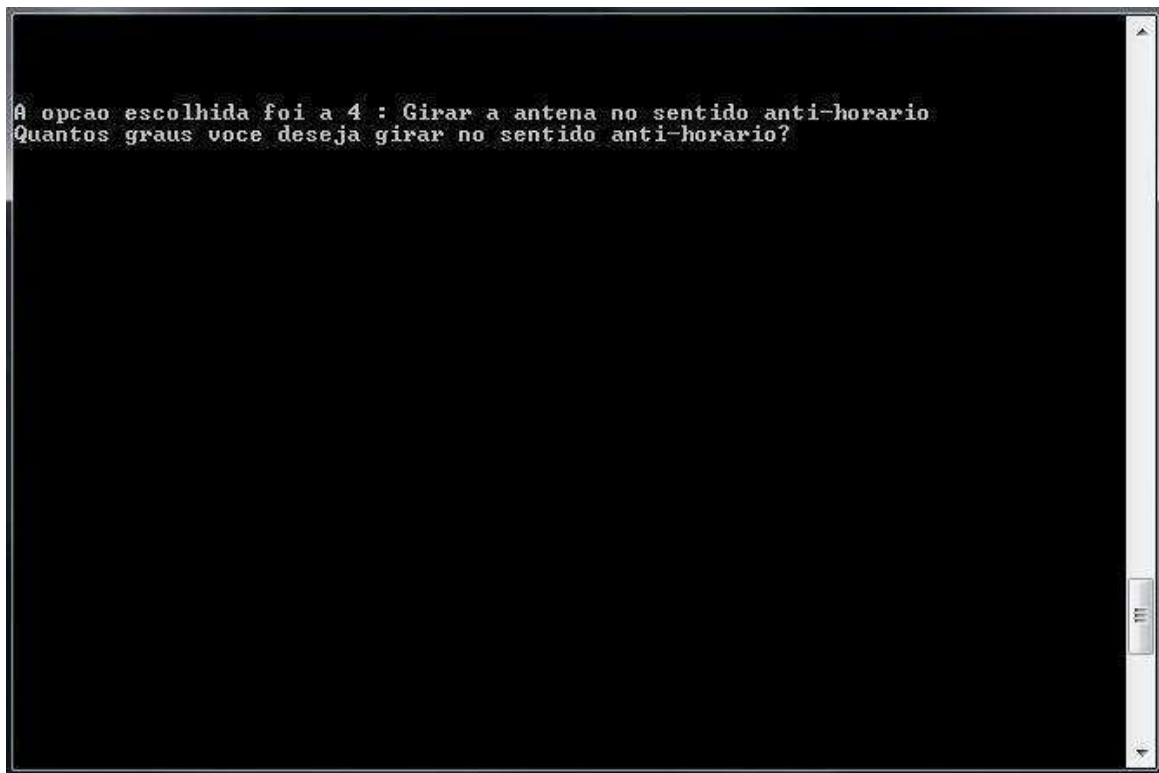


Figura 4.29 – Tela da opção girar a antena no sentido anti-horário.

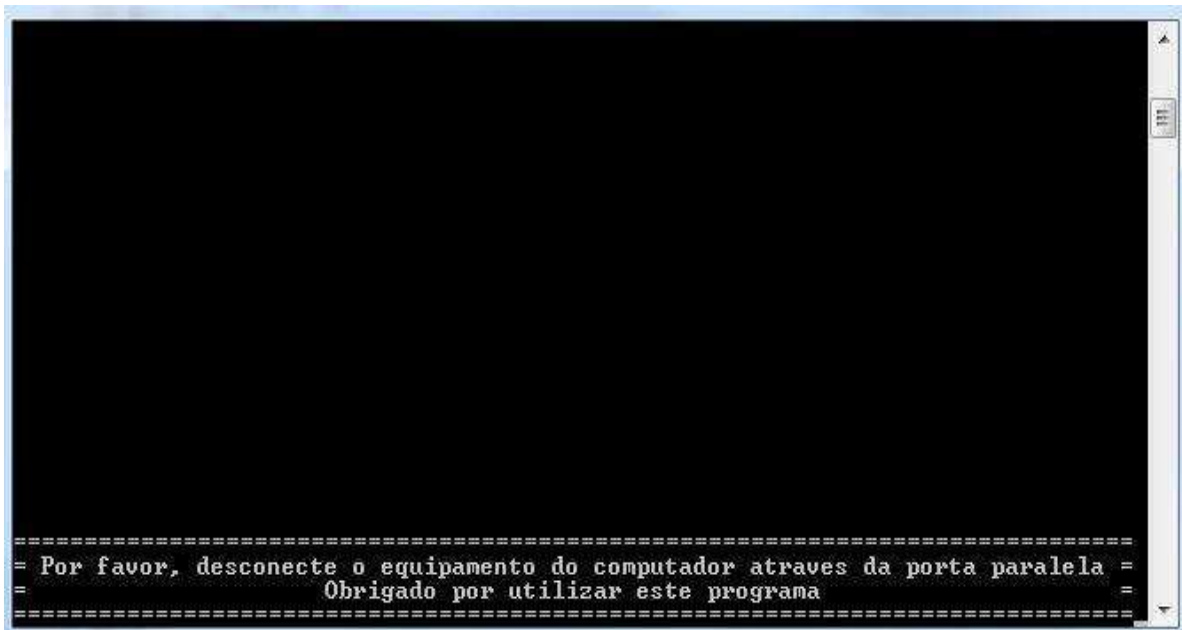


Figura 4.30 – Tela da opção sair.

4.7 MONTAGEM DO CONJUNTO PARA MEDIÇÕES

Para realizar o experimento de determinação do ganho da antena desconhecida, o procedimento tomado foi o de montagem de todos os equipamentos descritos anteriormente. Assim sendo, após esta montagem, a disposição física dos elementos utilizados está ilustrada conforme o esquema da Figura 4.31. Todos esses elementos foram enumerados e são descritos em seguida.

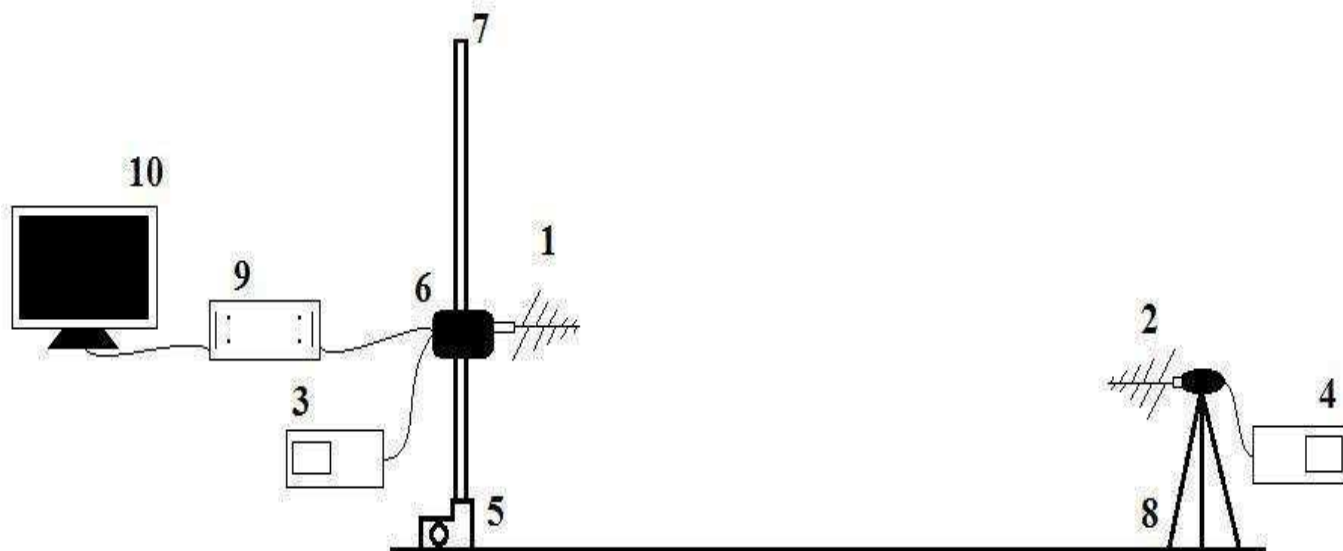


Figura 4.31 – Disposição física dos equipamentos usados na medição.

- 1 – Antena conhecida ou antena sob teste
- 2 – Antena fonte
- 3 – Analisador de espectro
- 4 – Gerador de sinais
- 5 – Base suporte do mastro
- 6 – Elevador
- 7 – Mastro
- 8 – Tripé para suporte da antena fonte
- 9 – Unidade de controle
- 10 – Computador

O sistema que irradia é formado pelo gerador de sinais conectado a antena fonte, Figura 4.32, situado em uma extremidade do recinto de modo que esta antena se encontre alinhada com a antena de recepção do sinal.



Figura 4.32 – Antena fonte e gerador de sinais.

O sistema de recepção é formado pela antena de referência e após a antena sob teste, estas em conjunto com o sistema de posicionamento, sendo este último controlado pelo computador conectado à unidade de controle. O analisador de espectro, conectado as antenas, seria necessário para medir o sinal de recepção. Ambas antenas foram acopladas mecanicamente ao eixo do motor do elevador, de modo a obter o movimento de rotação. Este movimento foi minuciosamente observado de forma a não haver irregularidades. As Figuras 4.33 e 4.32, a seguir mostram as duas antenas acopladas ao eixo do motor do elevador do conjunto móvel.



Figura 4.33 – Antena de referência acoplada ao conjunto móvel.



Figura 4.34 – Antena sob teste acoplada ao conjunto móvel.

No momento da realização das medições, o recinto estava totalmente isento de objetos metálicos que poderiam vir a ser responsáveis por reflexões. Também não havia presença de quaisquer corpos entre as duas antenas, pois estes poderiam causar interferências ou obstruir o sinal emitido, causando erros nos resultados.

5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo é dedicado à descrição de forma detalhada de todos os experimentos realizados no laboratório e os procedimentos adotados para realizá-los. Também estão presentes comentários acerca dos valores obtidos e um apanhado geral em relação aos resultados, o que pode levar à validade ou não das implementações descritas.

5.1 LEVANTAMENTO DO DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO DA ANTENA SOB TESTE

Antes de iniciar as medições de ganho, primeiramente foi necessário determinar o diagrama de irradiação da antena desconhecida, pois se deve conhecer a energia irradiada por esta, levando em conta sua distribuição espacial.

Nesse procedimento, é importante que se tenha um ambiente ausente de elementos estranhos que possam vir causar algum tipo de interferência, como armários e mesas metálicos. Para levantar o diagrama de irradiação da referida antena foram usados os procedimentos básicos descritos a seguir.

A antena sob teste foi deixada a uma distância de aproximadamente 4 metros, que para a frequência de operação corresponde a mais de 21 comprimentos de onda. O que garante seu posicionamento na região de campos distantes. Isso assegura que a propagação do sinal da antena irradiadora (fonte) possa ser considerada a mesma de uma onda plana. Sempre que possível foi retirada das proximidades das antenas sob teste e receptora mobilias e outros possíveis de forma a termos um ambiente próximo de um espaço livre (OATS – *open area test site*). Tomadas essas precauções, em seguida a antena sob teste foi fixada ao sistema móvel para posteriormente ter o seu sinal de potência mensurado. Nesse procedimento, a antena utilizada como fonte foi a antena log-periódica HL040 acoplada ao gerador de sinais SMBV100A da R&S. Na recepção foi utilizado o analisador de espectro FSL3 da da R&S. Todos esses equipamentos são descritos na seção 4.3. A frequência utilizada foi de 1,6 GHz.

Uma vez que o sistema esteja conectado e energizado deu-se inicio ao procedimento propriamente dito de medição. Inicialmente foi rotacionada a antena sob

teste entorno de seu eixo para a obtenção das duas polarizações principais: polarização horizontal e polarização vertical. A intervalos regulares de 5° (cinco graus), variando de -90° à 90°, foram registrados os valores de potência recebida. Esses valores estão presentes na Tabela 5.1 e 5.2 e são apresentados graficamente na forma de diagrama de irradiação horizontal e vertical, conforme ilustram as Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1 – Valores de potência recebida em função da variação do posicionamento (angular) da antena sob teste na posição horizontal.

Ângulo (°)	Potência (dBm)	Ângulo (°)	Potência (dBm)
0°	-37,5	0	-37,5
5°	-38,7	-5	-38,8
10°	-39,0	-10	-38,1
15°	-39,9	-15	-38,2
20°	-40,7	-20	-39,0
25°	-41,0	-25	-38,9
30°	-41,2	-30	-39,1
35°	-40,8	-35	-40,0
40°	-42,1	-40	-39,8
45°	-42,6	-45	-40,5
50°	-43,4	-50	-42,4
55°	-43,9	-55	-44,3
60°	-46,8	-60	-46,3
65°	-49,0	-65	-49,7
70°	-50,7	-70	-56,1
75°	-55,1	-75	-59,0
80°	-59,0	-80	-61,9
85°	-63,4	-85	-61,0
90°	-63,5	-90	-65,0

Tabela 5.2 – Valores de potência recebida em função da variação do posicionamento (angular) da antena sob teste na posição vertical.

Ângulo (°)	Potência (dBm)	Ângulo (°)	Potência (dBm)
0	-55,1	0	-55,1
5	-54,8	-5	-57,3
10	-54,7	-10	-57,6
15	-53,5	-15	-59,1
20	-53,8	-20	-62,0
25	-51,6	-25	-63,1
30	-53,7	-30	-60,0
35	-51,4	-35	-65,0
40	-52,4	-40	-58,1
45	-56,7	-45	-58,4
50	-54,8	-50	-56,9
55	-55,9	-55	-58,5
60	-53,6	-60	-60,1
65	-57,5	-65	-60,4
70	-53,3	-70	-63,8
75	-51,0	-75	-57,9
80	-51,2	-80	-58,7
85	-58,1	-85	-56,4
90	-57,8	-90	-55,8

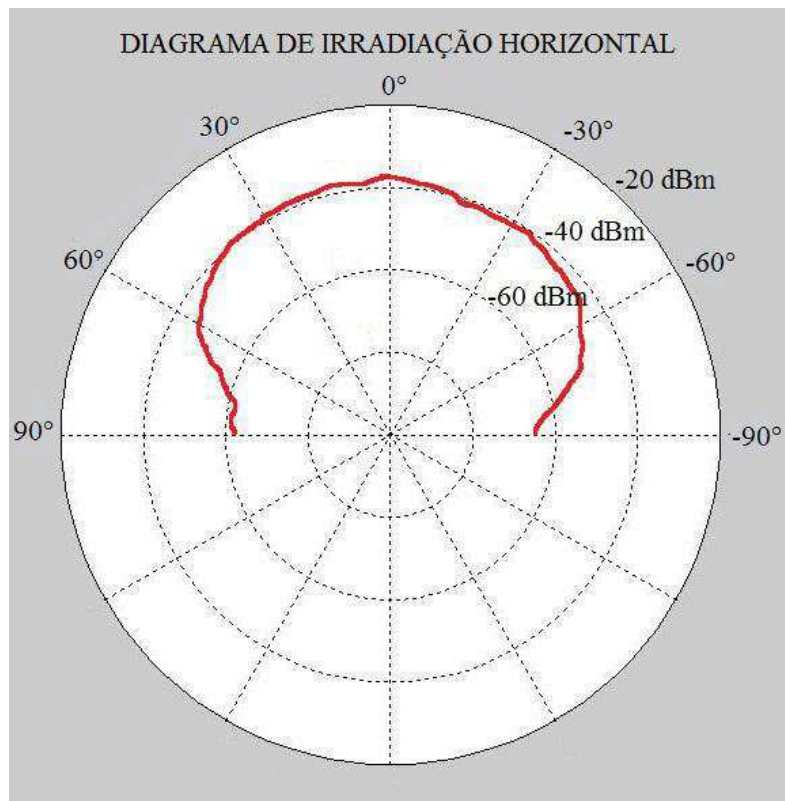


Figura 5.1 – Diagrama de irradiação da antena sob teste horizontalmente posicionada.

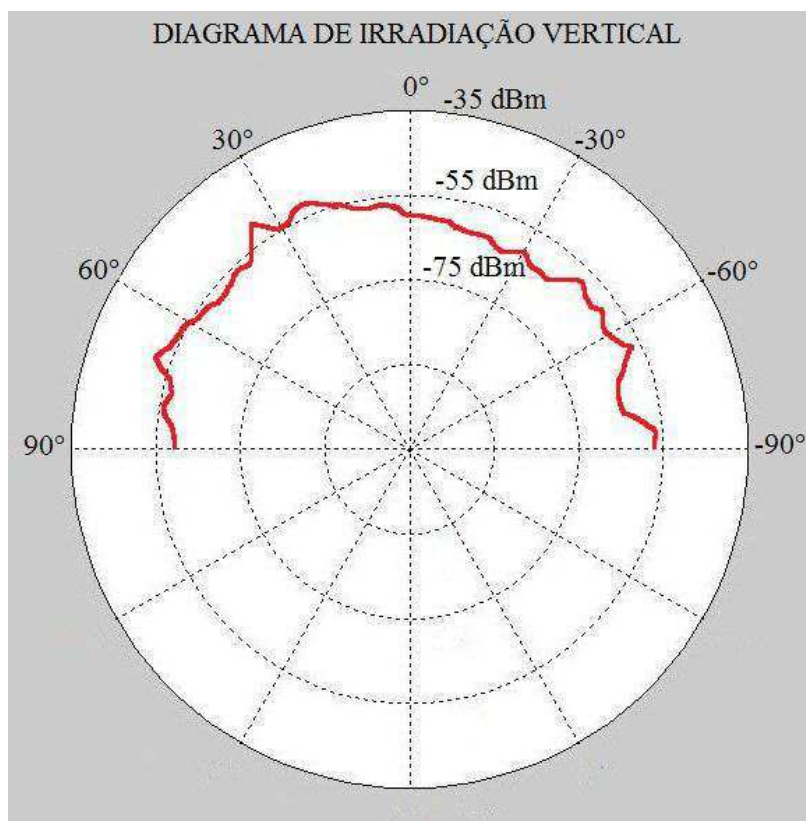


Figura 5.2 – Diagrama de irradiação da antena sob teste verticalmente posicionada.

5.2 MEDIÇÕES

As medições ocorreram em duas partes. Inicialmente foi utilizada a antena de referência para determinar a altura onde se encontrava o valor máximo de potência recebida que, após determinado, serviria como ponto de referência para as medições futuras, tanto da própria antena conhecida, como da antena desconhecida.

Para efetuar essas medidas, foram utilizados o sistema de controle de posicionamento e os equipamentos para medição do ganho, descritos nas seções 4.1 e 4.2, respectivamente. Além dos cabos e conectores.

Deve-se salientar também que o conjunto que irradia o sinal, o gerador R&S e a antena fonte permaneceram inalterados durante todo o procedimento, ou seja, não houve nenhuma modificação na sua posição, frequência e intensidade. Sendo assim, a antena irradiadora estava posicionada a 1,48 m do solo, trabalhando a uma frequência de 1,6 GHz e o nível de potência na saída do gerador foi fixado em 0 dBm.

Essa questão foi de fundamental importância pois ao se trabalhar com a Equação de Friss, propagação em espaço livre, é imposto que o sistema irradiador se mantenha inalterado.

5.2.1 ANTENA DE REFERÊNCIA

O esquema da Figura 5.3 mostra a montagem utilizada para as medições da potência recebida pela antena de referência. Esta foi posicionada horizontalmente e alinhada com a antena fonte, tendo sua altura variada entre 0,40 e 2,00 m com passo de 2 cm.

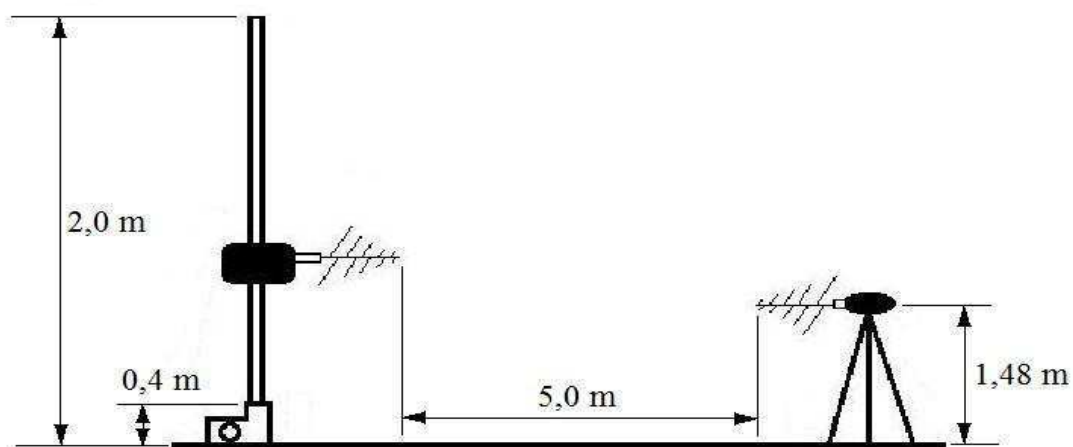


Figura 5.3 – Disposição física do conjunto de medição antena fonte/antena de referência.

Os resultados das medições referentes a esse procedimento estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Potência recebida em função da altura da antena de referência.

Altura (m)	Potência (dBm)	Altura (m)	Potência (dBm)	Altura (m)	Potência (dBm)	Altura (m)	Potência (dBm)
0,40	-35,3	0,78	-35,8	1,20	-36,3	1,60	-48,8
0,42	-33,9	0,80	-36,0	1,22	-38,4	1,62	-51,4
0,44	-33,2	0,82	-36,5	1,24	-40,1	1,66	-60,1
0,46	-33,1	0,86	-37,5	1,26	-41,0	1,68	-56,2
0,48	-33,9	0,88	-38,7	1,28	-41,5	1,70	-45,7
0,50	-35,4	0,90	-40,9	1,30	-42,2	1,72	-42,0
0,52	-37,7	0,92	-45,9	1,32	-44,0	1,74	-39,8
0,54	-41,5	0,96	-48,2	1,34	-46,6	1,76	-38,0
0,56	-45,4	0,98	-42,7	1,36	-48,2	1,78	-36,4
0,58	-46,8	1,00	-40,5	1,38	-46,2	1,80	-35,2
0,60	-49,2	1,02	-39,6	1,40	-41,7	1,82	-34,7
0,62	-55,3	1,04	-39,3	1,42	-38,6	1,84	-34,6
0,64	-60,0	1,06	-39,0	1,44	-36,1	1,86	-35,1
0,66	-46,8	1,08	-37,4	1,46	-34,4	1,88	-36,4
0,68	-41,2	1,10	-35,9	1,48	-33,5	1,90	-38,7
0,70	-38,6	1,12	-34,3	1,50	-32,9	1,92	-43,3
0,72	-36,9	1,14	-33,6	1,52	-34,4	1,94	-50,1
0,74	-36,2	1,16	-33,8	1,54	-36,2	1,96	-57,9
0,76	-35,7	1,18	-34,7	1,56	-39,6	1,98	-49,3
				1,58	-44,2	2,00	-46,5

Analisando esses resultados, notamos a variação da potência recebida com a altura e que o máximo valor de potência encontrado corresponde a -32,9 dBm na altura de 1,50 m. Esses resultados são influenciados por fatores como interferências e reflexões que ocorreram no interior do laboratório onde foram implementados os testes, mesmo com a ausência de corpos estranhos e objetos metálicos, existe a presença do solo, das grades das janelas e fontes operando na faixa próxima a 1,6 GHz. No entanto, esses resultados corroboraram com o que é descrito na teoria, em que existe oscilação da intensidade do campo recebido com a altura.

Para auxiliar a visualização desses resultados, na Figura 5.4 é apresentado um gráfico Altura da antena de referência *versus* Potência recebida. A partir dele, é possível

constatar que em determinadas alturas existe uma pequena uniformidade variando ligeiramente. Também é mostrado o ponto de potência máxima recebida.

Devido a um problema ocorrido no funcionamento do motor da base do mastro, todas essas medidas foram tomadas variando manualmente a altura do elevador que suporta a antena.

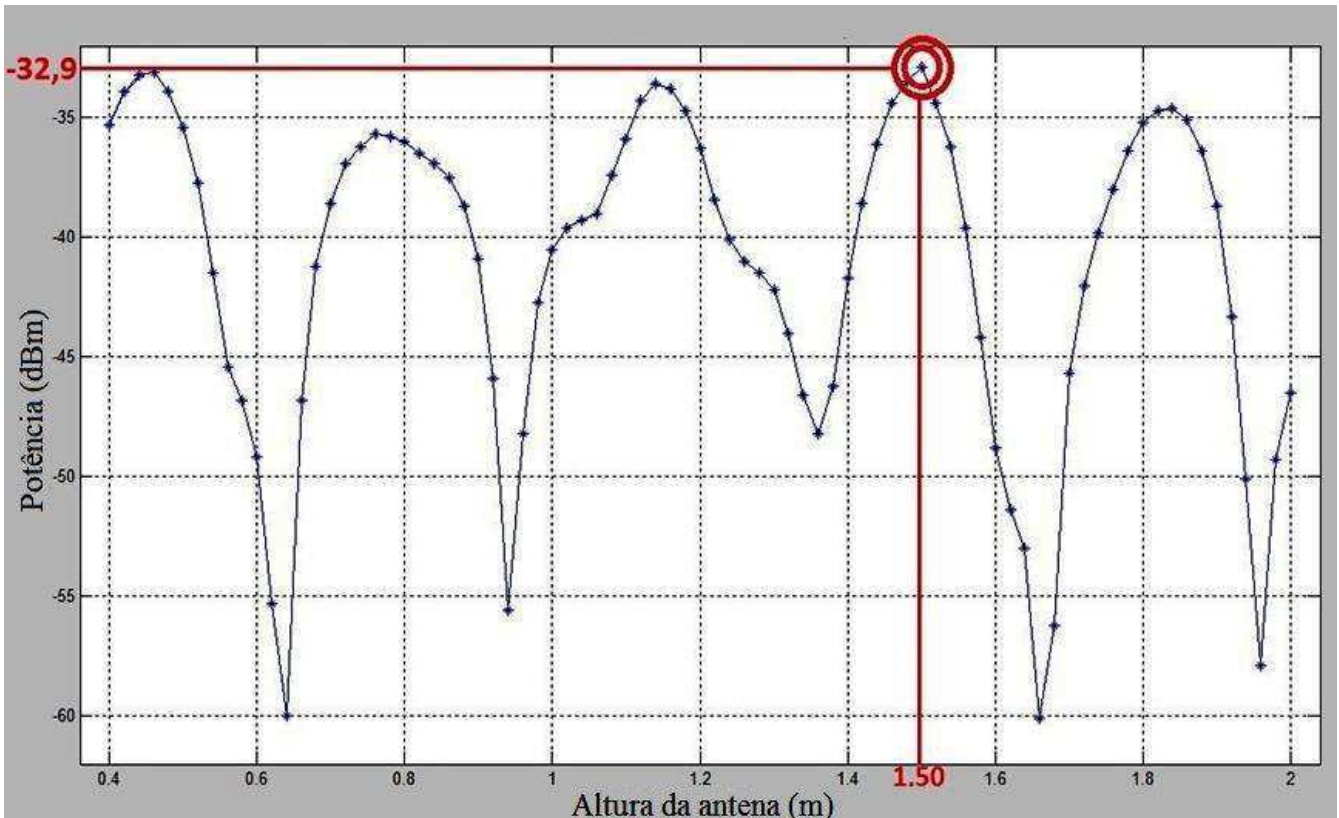


Figura 5.4 – Gráfico potência recebida na antena de referência *versus* altura.

Em um segundo momento, o procedimento tomado foi o de medir a potência de incidência para variações angulares da antena de referência. Nesse caso, os ângulos desejados foram selecionados por meio de comandos via porta paralela do computador para o controle da posição angular desejada. A Figura 5.5 ilustra como essas variações de ângulo foram tomadas, e em seguida, na Tabela 5.4 são apresentados os valores referentes às medições.

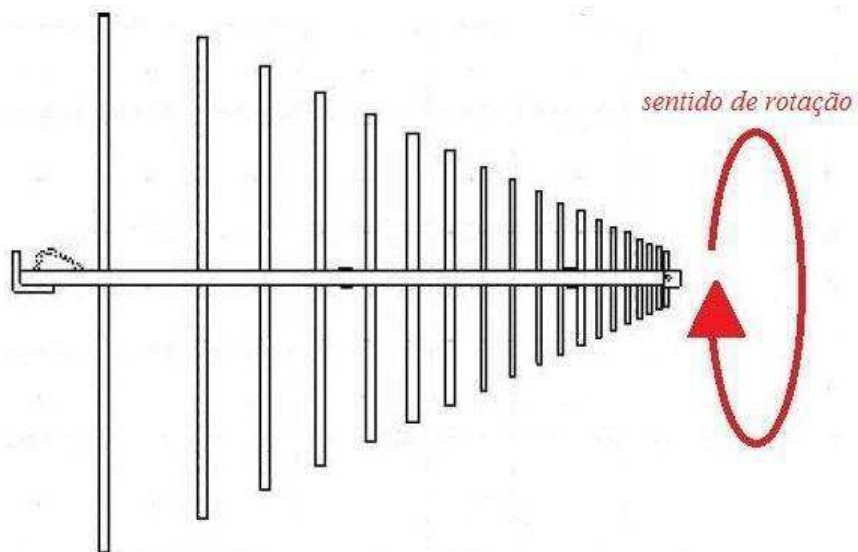


Figura 5.5 – Sentido de rotação adotado na medição da antena de referência.

Tabela 5.4 – Potência recebida em função do ângulo da antena de referência.

Ângulo (°)	Potência (dBm)	Ângulo (°)	Potência (dBm)
0	-32,9	0	-32,9
5	-32,9	-5	-33,0
10	-33,1	-10	-33,1
15	-33,3	-15	-33,7
20	-33,6	-20	-34,1
25	-34,2	-25	-34,5
30	-34,9	-30	-35,1
35	-35,0	-35	-35,9
40	-35,9	-40	-37,0
45	-37,2	-45	-38,3
50	-38,5	-50	-39,7
55	-39,6	-55	-40,3
60	-39,8	-60	-43,8
65	-41,7	-65	-44,4
70	-43,1	-70	-49,7
75	-46,6	-75	-52,2
80	-50,0	-80	-52,3
85	-56,7	-85	-50,8
90	-57,6	-90	-47,9

Transferindo estes valores para um gráfico Ângulo *versus* Potência, Figura 5.6, podemos analisar a distribuição de potência recebida em função da variação espacial da antena. Ao variar o ângulo, é notável a diminuição da potência na recepção. Um dos fatores que explicam este fato é a questão da polarização da antena de recepção, pois como não houve variação angular na antena irradiadora, não houve também variação dos campos eletromagnéticos irradiados, apenas uma variação gradativa do posicionamento da antena na recepção, o que veio a ocasionar perdas neste ponto.

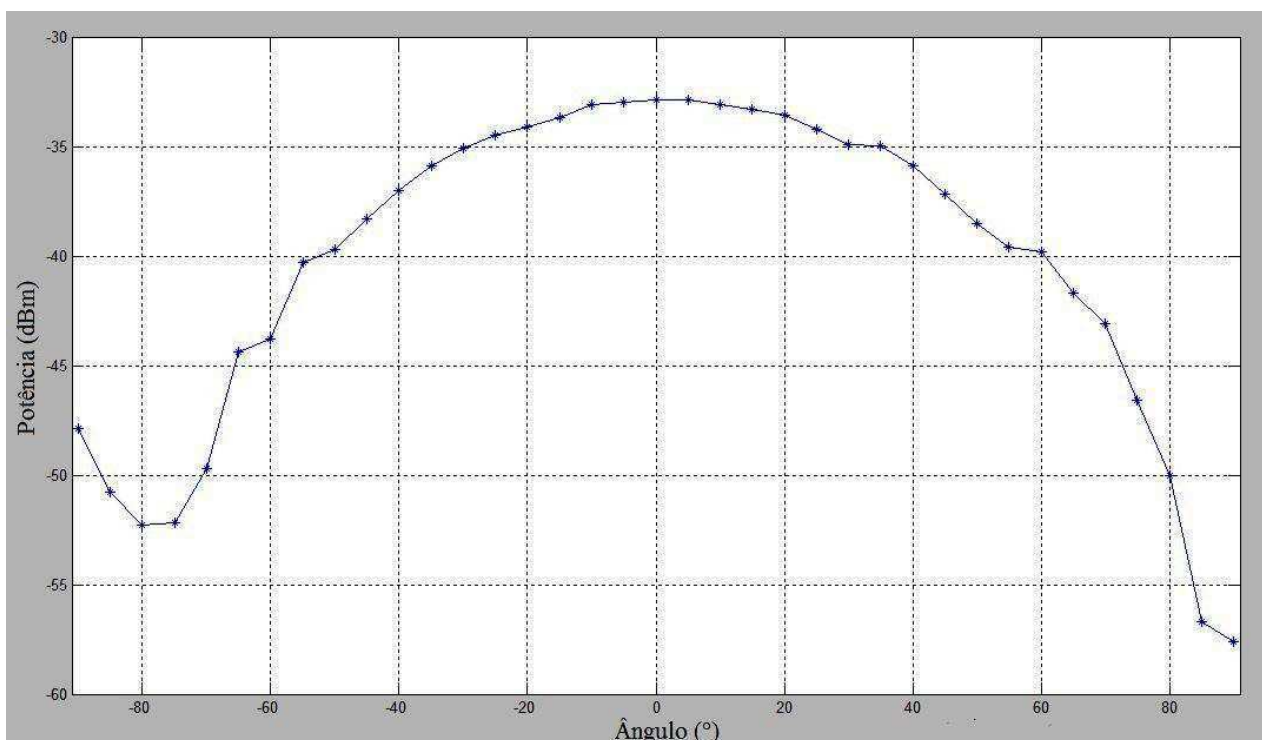


Figura 5.6 – Gráfico potência recebida na antena de referência *versus* ângulo.

5.2.2 ANTENA SOB TESTE

Determinada a altura onde há intensidade máxima de irradiação, que neste caso correspondeu a 1,50 m indicada pela antena conhecida, a etapa seguinte consistiu na medição de potência recebida na antena sob teste. Para isto, deve-se saber a posição exata onde esta está localizada, ou seja, a distância correta entre a antena fonte e a antena dipolo sob teste. Isso se deve ao fato de que uma das condições impostas pela Equação de Friss é que tanto a antena receptora como a antena sob teste devem estar localizadas a distância iguais da antena fonte. Isso não é uma tarefa simples, pois como

De forma semelhante à antena conhecida, essa antena também foi acoplada ao elevador do sistema mastro móvel na posição horizontal e submetida a variação angular de -90° a 90° , mostrada na Figura 5.8.

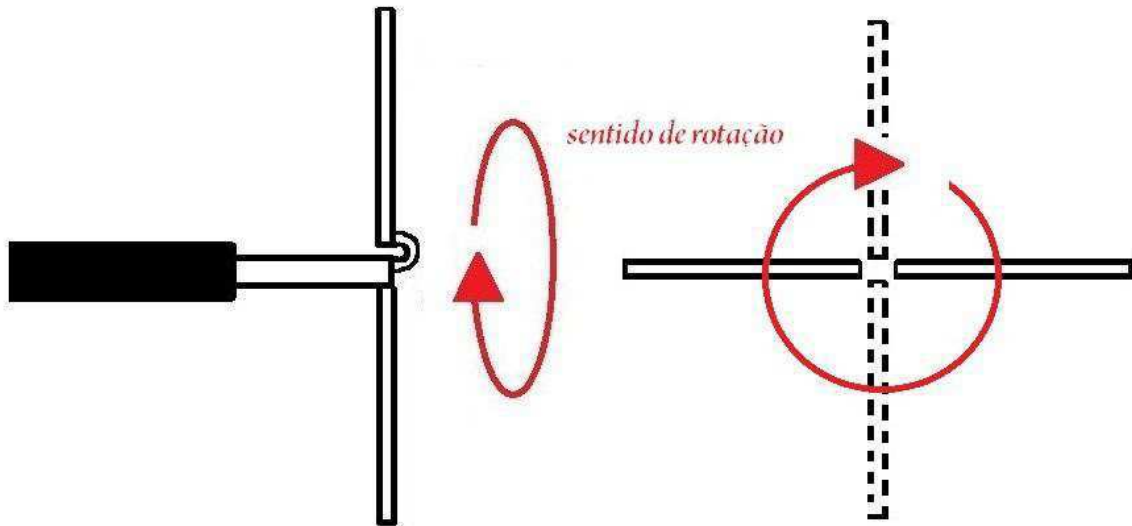


Figura 5.8 – Vistas lateral, frontal e sentido de rotação adotado na medição da antena desconhecida.

Desse modo a montagem para esse procedimento é apresentada a seguir, na Figura 5.9.

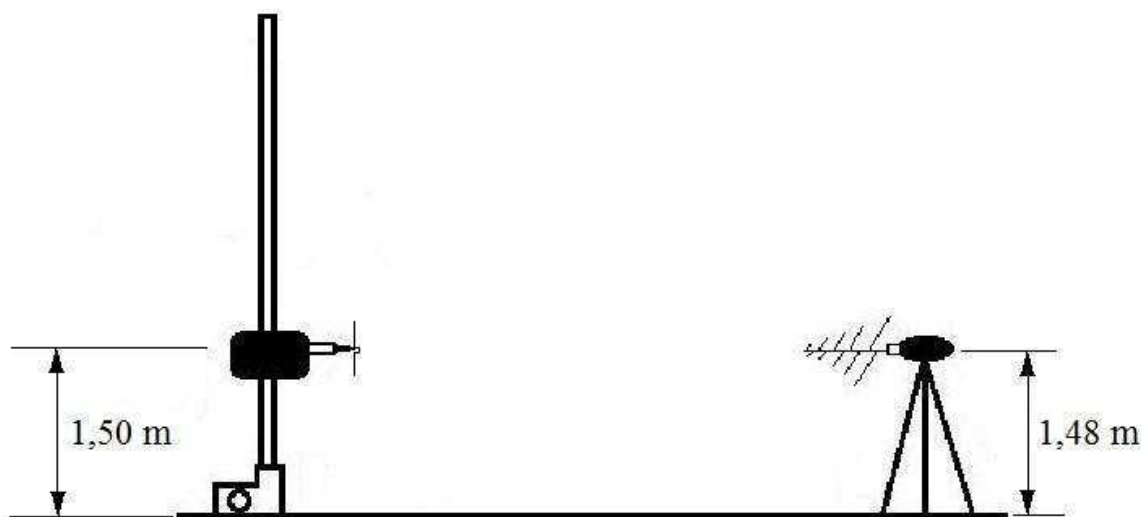


Figura 5.9 – Disposição física do conjunto de medição antena fonte/antena sob teste.

Montados os equipamentos, foram efetuadas as medições. Estas são apresentadas nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, que contêm os valores referentes as posições 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 5.5 - Potência recebida em função do ângulo da antena sob teste na posição 1.

Ângulo (°)	Potência (dBm)	Ângulo (°)	Potência (dBm)
0	-37,8	-0	-37,8
5	-39,0	-5	-38,7
10	-38,4	-10	-40,0
15	-42,5	-15	-40,5
20	-42,9	-20	-42,6
25	-43,0	-25	-43,5
30	-43,3	-30	-43,4
35	-42,9	-35	-44,0
40	-43,1	-40	-44,2
45	-43,5	-45	-44,9
50	-43,8	-50	-45,6
55	-44,1	-55	-46,8
60	-44,6	-60	-47,0
65	-45,3	-65	-48,7
70	-46,2	-70	-49,5
75	-48,0	-75	-51,0
80	-48,3	-80	-51,4
85	-50,3	-85	-57,2
90	-60,1	-90	-59,5

Tabela 5.6 - Potência recebida em função do ângulo da antena sob teste na posição 2.

Ângulo (°)	Potência (dBm)	Ângulo (°)	Potência (dBm)
0	-37,0	0	-37,0
5	-38,8	-5	-40,8
10	-40,2	-10	-41,8
15	-40,9	-15	-43,0
20	-43,0	-20	-43,8
25	-44,1	-25	-43,9
30	-44,6	-30	-44,1
35	-44,7	-35	-45,6
40	-44,7	-40	-46,0
45	-45,4	-45	-47,1
50	-47,0	-50	-51,0
55	-48,7	-55	-52,6
60	-49,3	-60	-52,0
65	-49,9	-65	-50,9
70	-50,6	-70	-53,4
75	-50,5	-75	-55,8
80	-51,5	-80	-57,3
85	-52,0	-85	-59,9
90	-57,7	-90	-62,0

Tabela 5.7 - Potência recebida em função do ângulo da antena sob teste na posição 3.

Ângulo (°)	Potência (dBm)	Ângulo (°)	Potência (dBm)
0	-37,2	0	-37,2
5	-37,5	5	-37,6
10	-40,2	10	-41,0
15	-40,5	15	-40,8
20	-40,7	20	-41,6
25	-40,9	25	-41,7
30	-41,2	30	-42,1
35	-41,8	3	-42,8
40	-42,0	40	-43,0
45	-43,4	45	-43,0
50	-43,2	50	-44,9
55	-44,0	55	-46,8
60	-44,6	60	-46,5
65	-46,1	65	-49,1
70	-46,8	70	-49,2
75	-48,4	75	-51,8
80	-49	80	-52,8
85	-58,6	85	-57,5
90	-59	90	-58,1

Essas informações também podem ser apresentadas em forma de um gráfico Ângulo versus Potência recebida. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam essas informações para os pontos de medição 1, 2 e 3, respectivamente.

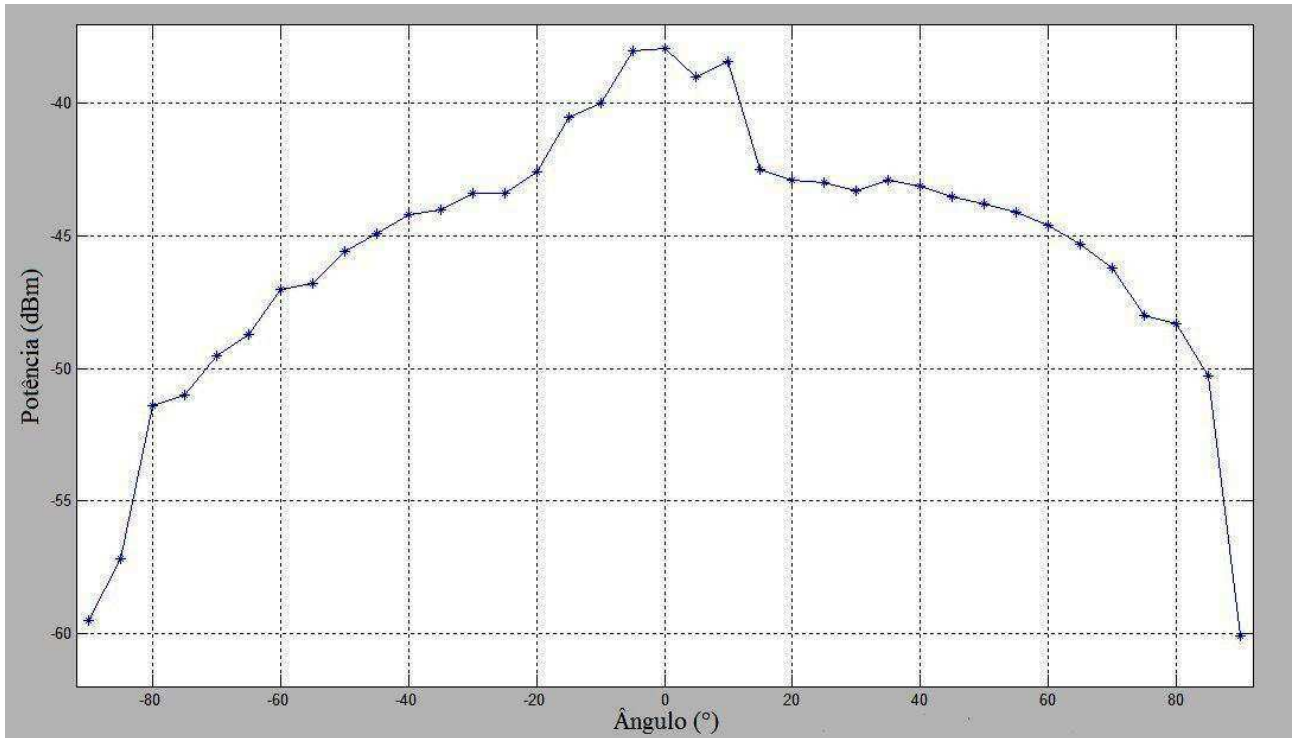


Figura 5.10 – Gráfico potência recebida na antena desconhecida *versus* ângulo na posição 1.

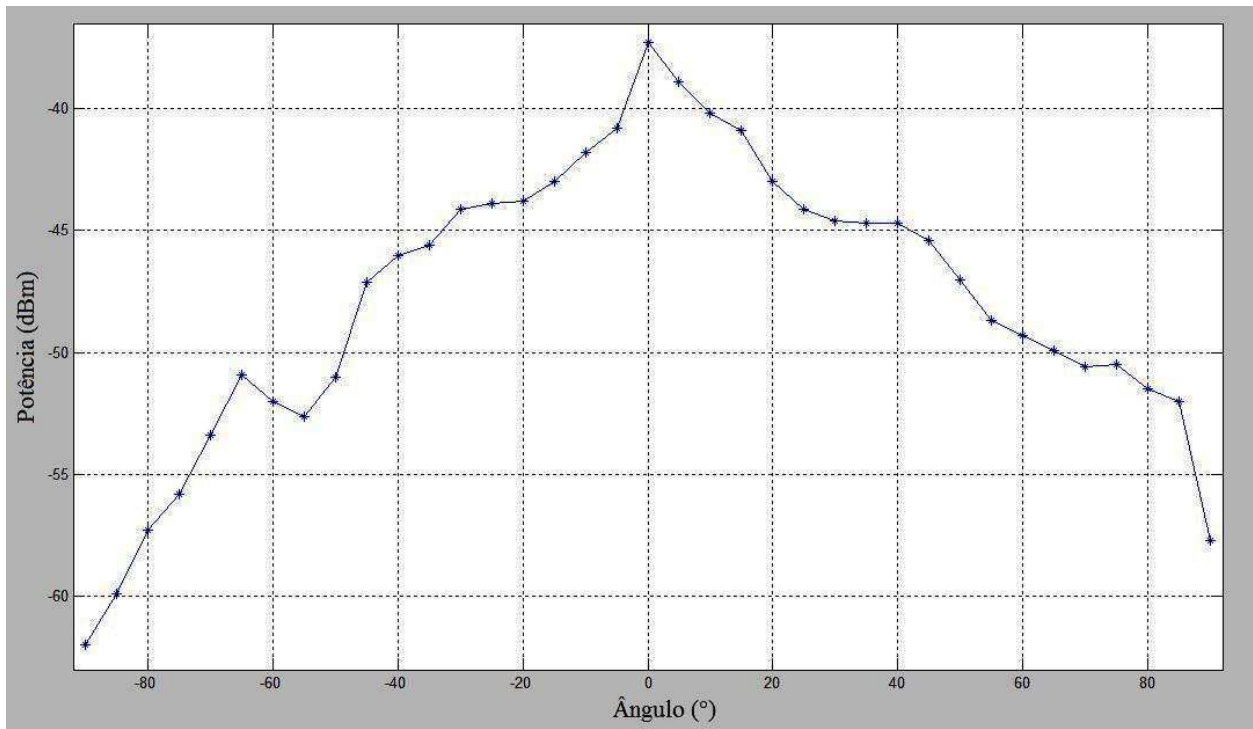


Figura 5.11 – Gráfico potência recebida na antena desconhecida *versus* ângulo na posição 2.

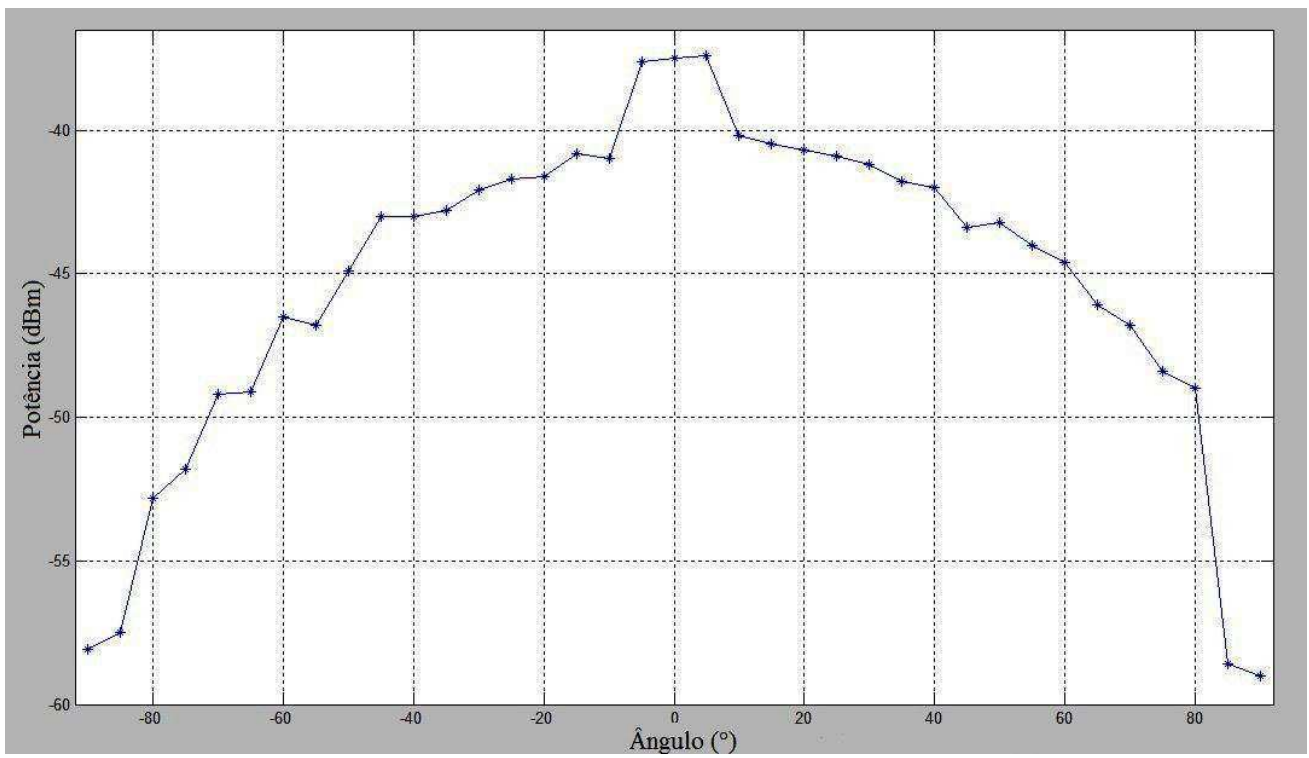


Figura 5.12 – Gráfico potência recebida na antena desconhecida *versus* ângulo na posição 3.

Analisando os resultados obtidos, percebemos certa similaridade entre eles além da questão da polarização da antena, que mais uma vez influencia na recepção do sinal, ou seja, há uma queda considerável da intensidade do sinal recebido com a variação da posição angular da antena, de modo semelhante ao que ocorreu quando a antena de referência era utilizada.

5.3 DETERMINAÇÃO DO GANHO DA ANTENA SOB TESTE

Para determinar o ganho da antena desconhecida, utilizamos a expressão (3.5) proveniente da Equação de Friss, abaixo.

$$G_t = G_s \frac{P_t}{P_s}$$

Aplicando-se o logaritmo em ambos os lados desta igualdade teremos:

$$G_t \text{ (dBi)} = \log\left(G_s \frac{P_t}{P_s}\right) \quad (5.1)$$

Por fim, aplicando as propriedades do logaritmo, temos a seguinte equação:

$$G_t \text{ (dBi)} = G_s \text{ (dBi)} + P_t \text{ (dBm)} - P_s \text{ (dBm)} \quad (5.2)$$

Onde: $G_t \text{ (dBi)}$ é o valor do ganho da antena desconhecida, que se deseja obter.

$G_s \text{ (dBi)}$ é o valor conhecido do ganho da antena de referência.

$P_t \text{ (dBm)}$ é o valor da potência de entrada mensurada na antena desconhecida.

$P_s \text{ (dBm)}$ é o valor da potência de entrada mensurada na antena de referência.

Todos os valores provém das medições realizadas no laboratório excetuando-se o valor do ganho da antena conhecida. Este está presente na folha de dados fornecida pelo fabricante e possui valor de 5,8 dBi.

Por se estar realizado três medições distintas (1, 2 e 3), serão obtidos também três distintos valores para o ganho. A determinação do ganho final será realizada através do cálculo do valor médio dos valores obtidos. Os valores de potência nas antenas na recepção considerados correspondem à posição de 0°, ou seja, quando as antenas estavam alinhadas na horizontal com a antena fonte.

- **Medição 1**

$$G_s = 5,8 \text{ dBi}; P_{t1} = -37,8 \text{ dBm}; P_s = -32,9 \text{ dBm}.$$

$$G_{t1} = G_s + P_{t1} - P_s$$

$$G_{t1} = 5,8 + (-37,8) - (-32,9)$$

$$G_{t1} = 5,8 - 37,8 + 32,9$$

$$G_{t1} = 0,9 \text{ dBi}$$

- **Medição 2**

$$G_s = 5,8 \text{ dBi}; P_{t2} = -37,0 \text{ dBm}; P_s = -32,9 \text{ dBm}.$$

$$G_{t2} = G_s + P_{t2} - P_s$$

$$G_{t2} = 5,8 + (-37,0) - (-32,9)$$

$$G_{t2} = 5,8 - 37,0 + 32,9$$

$$G_{t2} = 1,7 \text{ dBi}$$

- **Medição 3**

$$G_s = 5,8 \text{ dBi}; P_{t3} = -37,2 \text{ dBm}; P_s = -32,9 \text{ dBm}.$$

$$G_{t3} = G_s + P_{t1} - P_s$$

$$G_{t3} = 5,8 + (-37,2) - (-32,9)$$

$$G_{t3} = 5,8 - 37,2 + 32,9$$

$$\mathbf{G_{t3} = 1,5 \text{ dBi}}$$

Como estamos tratando de grandezas logarítmicas, poderíamos ter problemas ao efetuar o cálculo do valor médio diretamente a partir da média aritmética. Porém ao calcular os valores de potência referentes aos três pontos, em seguida calcular a média e voltar ao valor logarítmico, o resultado final será o mesmo obtido na média aritmética dos valores em dBi. Dessa forma, não será introduzido nenhum erro em realizar o cálculo direto da média do modo que se segue.

- **Valor médio**

$$G_t = \frac{G_{t1} + G_{t2} + G_{t3}}{3}$$

$$G_t = \frac{0,9 + 1,7 + 1,5}{3}$$

$$\mathbf{G_t = 1,37 \text{ dBi}}$$

Desta forma, finalmente calculamos o valor prático do ganho da antena de teste utilizada para as medições no laboratório.

Se compararmos o valor obtido com o valor teórico de um dipolo de meia onda no espaço livre, cujo ganho é 2,15 dBi, percebemos que ocorreu uma redução de aproximadamente menos de 0,8 dB. Na realidade o que acontece em algumas atividades práticas é a não conformidade entre os valores encontrados e os teóricos. Nesse caso, esse fato pode ser atribuído a diversas causas, entre as de maior relevância estão as reflexões no solo e/ou paredes do ambiente ou até mesmo em corpos presentes. Além, é claro, das perdas nos cabos e nas conexões que ligam as antenas ao gerador de sinais e o analisador de espectro, perdas estas que podem ser reduzidas, mas não totalmente ausentes.

6. CONCLUSÕES

Antes de mais nada, deve-se dar o devido destaque ao conhecimento adquirido nas atividades desempenhadas diariamente no laboratório, pois estas tiveram um papel muito importante no aprendizado prático de situações vistas em teoria.

Durante o desenvolvimento dos trabalhos, de fato foi possível implementar comandos de controle em um sistema de equipamentos antigos por meio de programas computacionais, o que mostra que, a partir de certas adaptações, se podem conseguir resultados apreciáveis.

No final dessas atividades, foi constatada a possibilidade de determinação do ganho de uma antena desconhecida através do método da comparação, que consiste em um método bastante simples utilizando três antenas, sendo assim possível determinar o valor do ganho de uma delas desde que sejam observadas e respeitadas as condições impostas pela Equação de Friss. Todavia, deve-se ter em mente que, como estamos tratando de procedimentos experimentais, prováveis erros estarão presentes de modo a causar divergências entre os valores encontrados.

REFERÊNCIAS

- [1] BALANIS, C. A. Antenna Theory: analysis and design, 2^a ed. Editora Wiley, 1997.
- [2] COLLIN, R. Antennas and Radiowave propagation. 1^a ed. Editora Mc Grawhill Higher, 1979.
- [3] MESSIAS. A. R. Introdução à Portaria Paralela. Disponível em <<http://rogercom.com/pparalela/introducao.htm>>. (Acessado em 03/02/2014 às 21.30hs).
- [4] SOARES, A. J. M.; SILVA, F. C. Antenas e Propagação. Brasília-DF, 2003.
- [5] VALLE, R. R. M. Fundamentos de Antenas, um curso introdutório. João Pessoa: Editora UFPB, [S. d.].
- [6] WHITE, T. H. Radio at Sea. Disponível em <<http://earlyradiohistory.us/sec005.htm>> (Acessado em 02/02/2014 às 23.50hs).
- [7] <http://www.ahsystems.com/Datasheets/SAS-510-7_Log_Periodic_Antenna_Datasheet.pdf> (Acessado em 15/02/2014 às 11.03hs).

ANEXO I

Programa utilizado no controle do posicionamento da antena.

```
#include <iostream>
#include <conio.h> ///////////////getch().
#include <stdio.h> ///////////////printf() entre outras.
#include <windows.h> ///////////////Necessário para: LoadLibrary(),
GetProcAddress() e HINSTANCE.
#include <time.h> ///////////////necessário para funcao sleep, usada em
alguns loops

////////Declaração dos ponteiros para função.

typedef short _stdcall (*PtrInp) (short EndPorta);
typedef void _stdcall (*PtrOut) (short EndPorta, short valor);
using namespace std;

void reset (void); // função responsável por resetar a porta paralela
void funcao_sobe(void); // função responsável por subir a antena
void funcao_desce(void); // função responsável por descer a antena
void funcao_gira_horario(void) //função responsável por girar a antena
no sentido horário
void funcao_gira_antihorario(void); // função responsável por girar a
antena no sentido anti-horário

////////variáveis globais

HINSTANCE hLib; //Instância para a DLL inpout32.dll.
PtrInp inpportb; //Instância para a função Imp32().
PtrOut outportb; //Instância para a função Out32().

////////variáveis

int sleepGirar = 15;
int sleepSobeDesce = 24;
int main() {

    //////////----- Código inicial de autoria do site rogercom -----

    //////////Carrega a DLL inpout32.dll na memória.

    hLib = LoadLibrary("inpout32.dll");
```

```

        ////Verifica a DLL inpout32.dll, se houve algum erro, ou não
existir escreve a mensagem na tela.

        if(hLib == NULL){

        ////// Mensagem escrita na tela se houver algum erro ou não
existir o arquivo inpout32.dll

        printf("Erro. O arquivo inpout32.dll não foi encontrado.\n");

        getch();

        return -1;

        }

        //////Identifica de o equipamento foi conectado ao computador
//////Obtém o endereço da função Out32 contida na DLL.

        outportb = (PtrOut) GetProcAddress(hLib, "Out32");

        //////Verifica se houve erro.

        if(outportb == NULL){

        ////// Mensagem escrita na tela se houver algum erro

        printf("Erro. A função Out32 não foi encontrada.\n");

        getch();

        return -1;

        }

//Acessa a função reset

        reset();

        //----- Fim do código de autoria do site rogercom -----

        //----- Menu do Programa -----

        //////Variáveis locais da funcao main:

        char opcao_menu = 0;

        int primeiroLoop = 0;

        ////// Escreve Menu do programa

        printf(" Este programa e responsavel pelo controle do
posicionamento da antena\n");

        printf(" acoplada ao elevador no mastro.\n");

```

```

printf("\n=====
=====");

    printf("\n==  POR FAVOR, CONECTE O EQUIPAMENTO AO COMPUTADOR
ATRAVES DA PORTA PARALELA  ==\n");

    printf("=====
=====\\n");

    printf("\n Escolha a opcao desejada:\n\n\n");

printf(" 1)Subir a antena\n\n");
printf(" 2)Descer a antena\n\n");
printf(" 3)Girar a antena no sentido horario\n\n");
printf(" 4)Girar a antena no sentido anti-horario\n\n");
printf(" 5)Sair\n\n");

////// Variável opcao_menu recebe a opção desejada

opcao_menu = getch();

////////Se a opção 5 for escolhida fecha o programa

while (opcao_menu!= '5'){

    //////////If verifica se não é o primeiro loop

    if(primeiroLoop != 0){

        ////////// Imprime o menu depois de 20 linhas

        cout << string(20, '\n');

        //Acessa a função reset

        reset();

        // Escreve Menu do programa

        printf("\n Escolha a opcao desejada:\n\n\n");

        printf(" 1)Subir a antena\n\n");

        printf(" 2)Descer a antena\n\n");

        printf(" 3)Girar a antena no sentido horario\n\n");

        printf(" 4)Girar a antena no sentido anti-horario\n\n");

```

```

printf(" 5)Sair\n\n");
// Variável opcao_menu recebe a opção desejada
    opcao_menu = getch();
}
//É o primeiro loop
else{
    primeiroLoop = 1;
}
    switch(opcao_menu){
// Caso a opção 1 for escolhida
case '1':
        // Acessa a função sobe
            funcao_sobe();
            break;
        // Caso a opção 2 for escolhida
        case '2':
            // Acessa a função desce
                funcao_desce();
                break;
            // Caso a opção 3 for escolhida
        case '3':
            // Acessa a função sobe gira_horário
                funcao_gira_horario();
                break;
            // Caso a opção 4 for escolhida
        case '4':
            // Acessa a função sobe gira_antihorário
                funcao_gira_antihorario();
                break;
            // Caso a opção 5 for escolhida

```

```

        case '5':
            break;
        default:
            printf(" Opcao invalida, tente novamente.
\n");

            getch();

    }
}

//Escreve a mensagem depois de 20 linhas
cout << string(20, '\n');

//Acessa a função reset
reset();

//Escreve a mensagem final

printf("\n=====
=====");

    printf("\n= Por favor, desconecte o equipamento do computador
atraves da porta paralela =");

    printf("\n=                               Obrigado por utilizar este
programa                               =");

    printf("\n=====
=====");

    // Espera 5 segundo e encerra o programa.
Sleep(5000);

    return 0;
}

/////----- funções do programa -----
////----- função reset -----

void reset (void){

    //Desativa os pinos do Registro de Dados da porta paralela.

```



```

        outportb(0x378,0);
    }

////////-----
//////////----- função sobe -----

void funcao_sobe(void) {
    float cm_sobe;
    int count = 0;

    //Escreve a mensagem depois de 25 linhas
    cout << string(25, '\n');

    // Escreve as mensagens na tela
    printf("A opcao escolhida foi a 1 : Subir a antena\n");
    printf("Quantos centimetros voce deseja subir?\n");

    // Recebe o valor digitado na variável cm_sobe
    cin>> cm_sobe;

    //ativa o pino 4 (D2)
    outportb(0x378,4);

    // While repete a condição, até que a variável count seja
    // menor do que a variável cm_sobe
    while (count < cm_sobe) {
        // Espera 1 segundo
        Sleep(sleepSobeDesce);

        // Incrementa a variavel count +1
        count++;
    }
}

```

```

}

/////-----
/////----- função desce -----

void funcao_desce(void) {
    float cm_desce;
    int count = 0;

    //Escreve a mensagem depois de 25 linhas
    cout << string(25, '\n');

    // Escreve as mensagens na tela
    printf("A opcao escolhida foi a 2 : Descer a antena\n");
    printf("Quantos centimetros voce deseja descer?\n");

    // Recebe o valor digitado na variável cm_desce
    cin>> cm_desce;

    //ativa o pino 5 (D3)
    outportb(0x378,8);

    // While repete a condição, até que a variável count seja
    // menor do que a variável cm_desce
    while (count < cm_desce) {
        // Espera 1 segundo
        Sleep(sleepSobeDesce);

        // Incrementa a variavel count +1
        count++;
    }
}

/////-----

```

```

//////////----- Função gira_horario -----

void funcao_gira_horario(void) {
    float graus_horario;
    int count = 0;

    //Escreve a mensagem depois de 25 linhas
    cout << string(25, '\n');

    //Escreve as mensagens na tela
    printf("A opcao escolhida foi a 3 : Girar a antena no sentido
horario\n");
    printf("Quantos graus voce deseja girar no sentido horario?\n");

    //Recebe o valor digitado na variável graus_horario
    cin>> graus_horario;

    //ativa o pino 3 (D1)
    outportb(0x378,2);

    // While repete a condição, até que a variável count seja
// menor do que a variável graus_horario
    while (count < graus_horario) {
        // Espera 1 segundo
        Sleep(sleepGirar);
        // Incrementa a variavel count +1
        count++;
    }
}

//-----

```

```

//////----- Função gira_antihorario -----

void funcao_gira_antihorario(void) {
    float graus_anti;

    int count = 0;

    ////Escreve a mensagem depois de 25 linhas
    cout << string(25, '\n');

    //// Escreve as mensagens na tela

    printf("A opcao escolhida foi a 4 : Girar a antena no sentido
anti-horario\n");

    printf("Quantos graus voce deseja girar no sentido anti-
horario?\n");

    //// Recebe o valor digitado na variável graus_anti

    cin>> graus_anti;

    ////ativa o pino 2 (D0)

    outportb(0x378,1);

    //// While repete a condição, até que a variável count seja
//// menor do que a variável graus_anti

    while (count < graus_anti) {
        //// Espera 1 segundo

        Sleep(sleepGirar);

        //// Incrementa a variável count +1

        count++;
    }
}

//-----

```