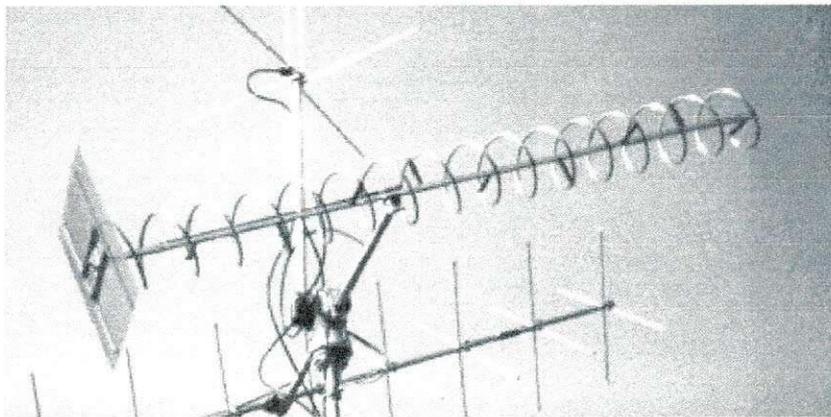


Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciência e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Projeto de Engenharia Elétrica

**Concepção e Implementação de um Sistema de
Medição de Polarização de Antenas**



Orientador: Prof. Rômulo Raimundo Maranhão do Valle

Aluno: Ribamiltom Bezerra de Lima

Mat. 29721138



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Dedicatória:

Aos meus pais e irmãos que tanto me apoiaram nesta parte do caminho. Seus conselhos e exemplos foram guia e força para meus pés.

À minha esposa.

À todos que buscam a verdadeira riqueza do homem: a sabedoria.

Agradecimentos:

Ao Querido Pai maior, soberano em tudo e servidor de todos - ricos e pobres, bons e ignorantes - Engenheiro perfeito.

Ao mestre Jesus, pelo seu exemplo de verdadeira sabedoria e humildade. Servindo sempre sem olhar a quem. Vencendo a si mesmo, por amor ao próximo.

À minha família: mãe, pai, queridos irmãos; por tudo e por tanto que me dispensam, a cada minuto em que aqui estou..

À minha esposa, pelo seu carinho e amor. Companheira eterna. Luz que anda: Luciana.

Aos amigos e companheiros de jornada pelas boas gargalhadas, adoçando nossos dissabores e aliviando as dores. Pelo cultivo de primorosas flores no jardim de nossas amizades.

À todos que contribuíram para o meu aprendizado, professores e funcionários. Cada minuto de atenção seja na entrega de um livro, no abrir de uma porta, na saudação de um bom dia, no esclarecimento de uma dúvida. Tudo e todos foram extremamente importantes para este momento.

Ao meu professor orientador Prof. Rômulo e a Galba pelas orientações e ajuda nas montagens de laboratório.

À todos, mencionados aqui e àqueles que só o meu amor pode abarcar.

Muito Obrigado.

Índice

Introdução.....	4
Capítulo 1 - Entendendo as ondas eletromagnéticas.....	5
Capítulo 2 - Descrição Analítica da Polarização.....	10
Capítulo 3 - Métodos de Medição e Trabalho Experimental.....	20
Capítulo 4 - Análise dos Resultados Obtidos.....	25
Capítulo 5 – Conclusão e Sugestões.....	27
Bibliografia.....	28
Anexo A – Carta de Polarização	
Anexo B – Medidas e Diagramas de Irradiação dos Dipolos Receptores	

Introdução:

Espalhadas por toda a parte, com diferentes formas e para diferentes fins, as antenas já são parte integrante de nosso ambiente. Assistir ao jogo que está acontecendo lá na Alemanha, controlar o tráfego aéreo em um aeroporto, falar ao celular, acessar a internet via rádio, são atividades cotidianas, dentre muitas outras, que envolvem o uso de antenas. Para o olhar curioso, a presença de tais elementos levanta muitas perguntas sobre o seu funcionamento e o que define a necessidade de diferentes tipos de antenas.

As antenas possuem parâmetros tais como: diretividade, ganho, impedância, resistência de radiação, largura de feixe, polarização, etc; que devem ser levados em consideração para um melhor desempenho em determinada aplicação.

Dentre eles, a polarização tem sua importância no tocante à transmissão e recepção de sinais, uma vez que, através de suas variações (linear, circular, elíptica), podemos ter uma melhor qualidade no sistema sob implementação. Transmissão via satélite, recepção de sinal de rádio, uso de telefonia móvel, implicam diferentes tipos de polarização de antenas.

Em nosso estudo, desenvolveremos a teoria necessária à compreensão da polarização de ondas eletromagnéticas. Com uma breve análise matemática, comprovaremos as polarizações elíptica, circular e linear. Em seguida, iniciaremos em laboratório um dos métodos descritos na literatura para medição de polarização de antenas: *método das componentes lineares*. O objetivo deste trabalho é tornar o estudo da polarização algo prático e realizável, desenvolvendo a parte experimental, a ponto de aplicá-la de forma abrangente, enriquecendo o estudo sobre antenas bem como sua pesquisa em laboratório.

Capítulo 1 - Entendendo as ondas eletromagnéticas

1.1-Introdução

Neste capítulo, revisaremos noções básicas sobre a temática da radiação eletromagnética, tais como: as fontes que a produzem, a onda eletromagnética e sua descrição matemática, características, etc.

Assim, será dado o embasamento teórico para a compreensão da polarização e as atividades desenvolvidas em laboratório.

1.2-A radiação eletromagnética: fontes naturais e fontes artificiais

A radiação eletromagnética ocorre naturalmente no Universo e, como tal, sempre esteve presente na Terra. O Sol, por exemplo, é a fonte (natural) de radiação eletromagnética mais intensa, a qual estamos expostos. Por outro lado, o crescimento tecnológico, as mudanças no comportamento social e nos hábitos de trabalho - próprios de uma sociedade em evolução - criaram um ambiente, crescentemente, exposto as outras fontes de radiação eletromagnética. Estas fontes foram criadas artificialmente pelo homem e são, por exemplo, as antenas dos sistemas de telecomunicações, as linhas de alta tensão, os aparelhos elétricos, etc.

Assim, a luz visível, os raios X, as vulgarmente chamadas “ondas de rádio” e as microondas são formas possíveis de radiação eletromagnética, correspondendo à propagação de energia pelo espaço à velocidades da ordem de 300 000 km/s, sem necessidade de suporte físico.

1.3-As ondas eletromagnéticas

A propagação da energia eletromagnética faz-se através de ondas eletromagnéticas. Estas são constituídas por duas entidades interdependentes: o campo elétrico, **E**, e o campo magnético, **H**. Não é possível observar diretamente o campo elétrico e o campo magnético, a não ser através de uma representação artificial, como a indicada na Figura 1: o campo elétrico está representado pela cor azul, e o campo magnético, pela cor vermelha. Estes campos evoluem no espaço como uma onda, daí a designação de “onda eletromagnética”. O produto destes dois campos resulta na densidade de potência, *S*. Uma onda eletromagnética pode ser criada por uma corrente elétrica variável no tempo.

1.4-Propagação de ondas planas uniforme no espaço livre

Para a descrição matemática de ondas eletromagnéticas no espaço livre usamos as equações de Maxwell, escrita em termos de campo elétrico (**E**) e campo magnético (**H**) somente, onde

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.4)$$

A Equação 1.1 estabelece que se o campo elétrico estiver variando com o tempo em um ponto, então \mathbf{H} tem rotacional neste ponto e, portanto, pode ser considerado como formando um pequeno anel fechado que envolve este campo \mathbf{E} variável. Por outro lado, se \mathbf{E} estiver variando com o tempo, então \mathbf{H} também irá variar com o tempo, embora não necessariamente do mesmo modo.

Da Equação 1.2 observamos que a variação de \mathbf{H} produz um campo elétrico que forma pequenos anéis fechados em torno das linhas do campo magnético.

Reescrevendo as equações de Maxwell para o caso de uma variação senoidal com o tempo (co-senoidal) e tomando a parte real, depois de manipulações matemáticas, temos a forma fasorial dada por:

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = j\omega \epsilon_0 \mathbf{E}_s \quad (1.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_s = -j\omega \mu_0 \mathbf{H}_s \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_s = 0 \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H}_s = 0 \quad (1.8)$$

onde, estas são as quatro equações de Maxwell em notação fasorial para variações senoidais com o tempo, no vácuo.

Para obter a equação da onda, em regime estacionário senoidal, aplicamos identidades vetoriais à Equação 1.6, e obtemos a Equação Vetorial de Helmholtz.

$$\nabla^2 \mathbf{E}_s = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{E}_s \quad (1.9)$$

A componente x da Equação 1.9, usando-se a notação do operador nabla, torna-se

$$\nabla^2 \mathbf{E}_{xs} = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{E}_{xs} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_{xs}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}_{xs}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}_{xs}}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{E}_{xs} \quad (1.11)$$

Supondo que só haja variação na direção z e, tomando a parte real da solução da equação, temos:

$$\mathbf{E}_x = A \cos \left[\omega \left(t - z \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \right) \right] \quad (1.12)$$

Inspeccionando o campo em toda a parte no instante $t=0$,

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{E}_{x0} \cos(-\omega z \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}) = \mathbf{E}_{x0} \cos\left(\frac{\omega z}{c}\right) \quad (1.13)$$

A Equação 1.13 apresenta uma variação periódica com a distância.

O campo magnético é dado por

$$\mathbf{H}_y = \mathbf{E}_{x0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \left[\omega \left(t - \frac{z}{c} \right) \right] \quad (1.14)$$

Esta onda é chamada onda plana uniforme porque o seu valor é uniforme ao longo do plano $z = \text{cte}$. Ela representa um fluxo de energia na direção positiva do eixo z . Os campos elétrico e magnético são perpendiculares à direção de propagação, ou ambos pertencem a um plano que é transversal à direção de propagação; a onda plana uniforme é uma onda transversal eletromagnética (onda TEM).

Em nosso estudo de polarização abordaremos este tipo de onda como modelo para fins de melhor compreensão.

1.5- Características das ondas eletromagnéticas

Existem características particulares das ondas eletromagnéticas que determinam as suas propriedades e aplicações. Algumas destas características essenciais são:

- Comprimento de onda, λ , e frequência, f ;
- Amplitude;
- Direção e velocidade de propagação;
- Polarização, etc.

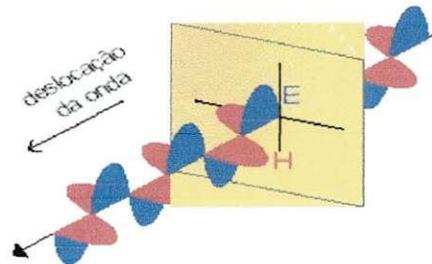


Figura 1 - A onda eletromagnética.

Como se pode ver na Figura 1, a onda eletromagnética apresenta um padrão que se repete enquanto se propaga. O comprimento desse padrão de repetição no espaço designa-se por comprimento de onda, λ , medindo-se em metros [m]. A frequência, f , representa o número de ciclos da onda num ponto do espaço em cada segundo, medindo-se em Hertz [Hz]. O comprimento de onda e a frequência estão interligados entre si, através da velocidade de propagação da luz, c : $\lambda * f = c$. Este conceito está ilustrado na Figura 2.

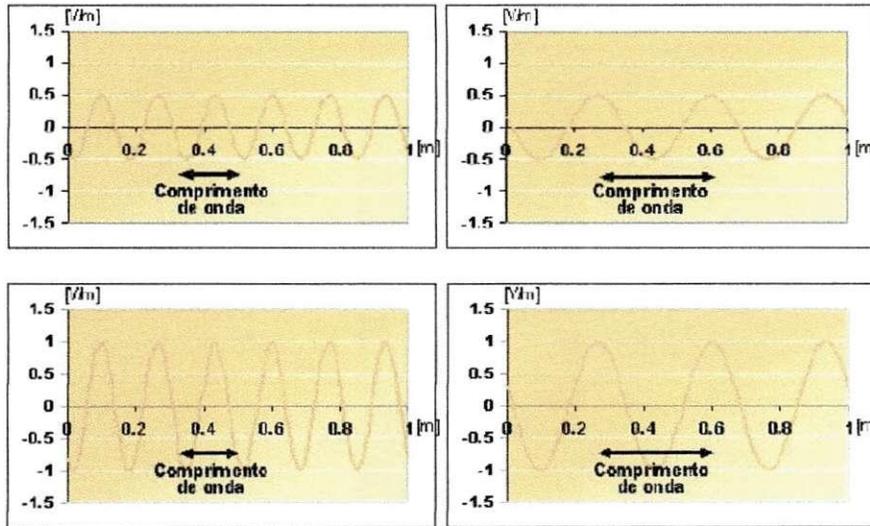


Figura 2 – Relação entre comprimento de onda e frequência.
 (a frequência diminui da figura esquerda para a figura direita e o comprimento de onda aumenta da figura esquerda para a figura direita)

A amplitude dá uma medida da intensidade dos campos, medindo-se, no caso do campo elétrico, em Volt por metro [V/m], e do campo magnético em Ampère por metro [A/m]. A ilustração desta característica está também contemplada na Fig.2. A densidade de potência vem expressa em Watt por metro quadrado [W/m^2], medindo a potência transportada pela onda por unidade de área.

Em espaço aberto, as ondas eletromagnéticas propagam-se em linha reta com velocidade c próxima de 300 000 km/s. Na vizinhança de obstáculos, como o relevo do terreno, espelhos de água, construções, etc., a direção de propagação pode ser alterada por reflexão, ou por difração.

A reflexão ou a difração sofrida por uma onda eletromagnética, em geral modificam também a sua amplitude, mas não alteram a frequência. Modificam ainda a polarização da onda (assunto que é tratado a seguir). A Figura 3 retrata os fenômenos da reflexão e da difração de uma onda eletromagnética.

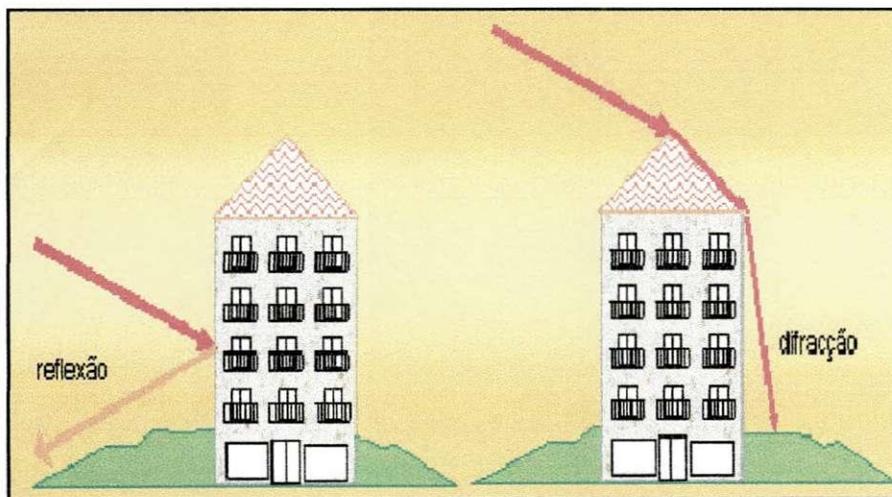
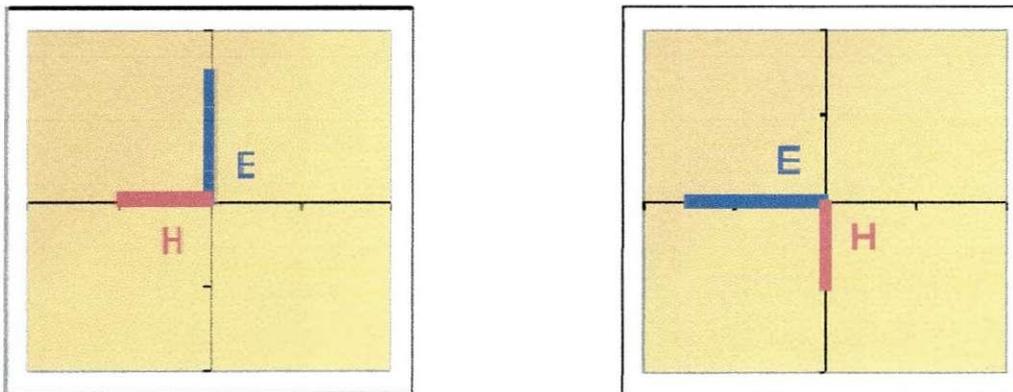


Figura 3 – reflexão e difração de uma onda por um obstáculo à propagação

1.6-Polarização:

Visualizando a Figura 1, de maneira que a direção de propagação da onda fique perpendicular à folha (onda “saindo” da folha na direção do observador), obtemos a Figura 4.a. Nela, o ponto extremo da flecha que representa o vetor campo elétrico E oscila sobre uma direção vertical, designada por polarização vertical (PV); como alternativa, é possível escolher, convenientemente, a orientação da fonte, de forma a ter o ponto extremo da flecha que representa o vetor campo elétrico E oscilando sobre uma direção horizontal, Figura 4.b, designada por polarização horizontal (PH).

A curva traçada pelo ponto extremo da flecha que representa o vetor campo elétrico E instantâneo quando da propagação da onda eletromagnética dá-se o nome de polarização.



a) Polarização vertical

b) Polarização horizontal

Figura 4 - Ilustração da polarização do campo elétrico

1.7- Aplicações da Polarização:

A polarização é um fator muito importante na escolha e instalação de uma antena, para um determinado sistema ou aplicação, ela pode ser classificada como *linear*, *circular* e *elíptica*. Na verdade as duas primeiras podem ser vistas como casos particulares do caso mais geral: polarização elíptica.

Para diferentes sistemas de comunicação, teremos diferentes tipos de polarização a serem utilizados; sujeitos à fatores, tais como: faixa de frequência, condições e meio de propagação, etc.

A polarização vertical é mais utilizada quando se deseja irradiar o sinal em todas as direções, tais como unidades de telefonia móveis. Este tipo de polarização também se adequa bem em áreas suburbanas ou no campo, especialmente quando se tem a presença de montes no espaço geográfico.

Na transmissão de TV, a polarização horizontal é bastante utilizada, uma vez que, desta forma, as interferências causadas por estações móveis de rádio (polarizadas verticalmente) são menores, obtendo-se desta forma uma melhor recepção.

Para comunicações via satélite, a polarização circular é preferida. Isto porque ao se utilizar polarização linear a onda transmitida poderá ser rotacionada quando o sinal passar por qualquer anomalia (tal como a rotação de Faraday) na ionosfera. A polarização circular manterá o sinal constante apesar de tais efeitos inerentes a esta passagem, bem como às posições, variantes, entre emissor e receptor.

Capítulo 2 - Descrição analítica da polarização

2.1-Introdução

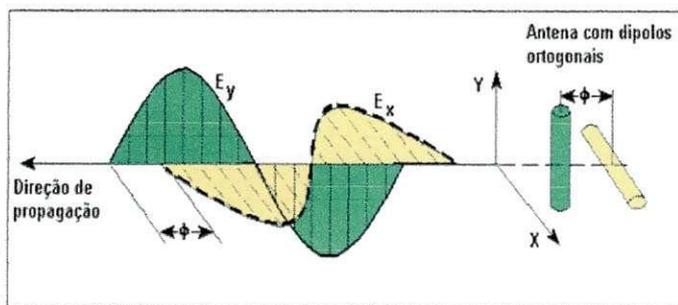
Como mencionado, anteriormente, a polarização de uma onda eletromagnética se dá quando a extremidade da seta que representa o vetor campo elétrico descreve um lugar geométrico fixo no plano perpendicular ao eixo de propagação.

São três os tipos de polarização: linear (horizontal ou vertical), circular (horária ou anti-horária) e elíptica. Em geral, consideramos os dois primeiros tipos como casos particulares da polarização elíptica.

Da mesma forma, a combinação de ondas com polarização linear de mesma frequência, ou circular com mesma frequência e direção de rotação opostas, resultam em polarização elíptica [Kraus, 1983]. Em seguida teceremos, de forma analítica, as considerações acerca do campo elétrico que resulta na polarização da onda, bem como, os casos particulares de polarização.

2.2-Polarização elíptica produzida por duas ondas com polarização linear

Consideremos duas ondas com polarização linear, com propagação sobre o eixo z positivo e com planos de polarização de ondas em x e y Figura 5. Portanto, uma onda com polarização horizontal e a outra vertical.



Combinação de duas ondas linearmente polarizadas

Figura 5

Sendo E_x e E_y os campos elétricos instantâneos das ondas em estudo, na forma:

$$E_x = E_1 \cdot \text{sen}(wt - \beta z) \quad (2-1)$$

$$E_y = E_2 \cdot \text{sen}(wt - \beta + \delta) \quad (2-2)$$

Onde,

E_1 = Amplitude da onda polarizada horizontalmente

E_2 = Amplitude da onda polarizada verticalmente

δ = Ângulo de fase no qual E_y avança em relação à E_x (tomado como referência)

A componente do campo elétrico em z é zero ($E_z = 0$).

O valor instantâneo para o campo total \mathbf{E} expresso por cada uma de suas componentes é:

$$\mathbf{E} = E_x + E_y \quad (2-3)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{i} E_1 . \text{sen}(wt - \beta z) + \mathbf{j} E_2 . \text{sen}(wt - \beta z + \delta) \quad (2-4)$$

Em $z = 0$, a equação se reduz a

$$\mathbf{E} = \mathbf{i} E_1 . \text{sen}(wt) + \mathbf{j} E_2 . \text{sen}(wt + \delta) \quad (2-5)$$

Analisando a equação como função no tempo t e plotando os valores do campo total \mathbf{E} , a variação de \mathbf{E} , no tempo em um plano x-y, é obtida. Em geral, a ponta do vetor \mathbf{E} descreve um lugar geométrico de uma elipse. Se $E_1 = E_2$ e $\delta = 90^\circ$, a elipse se torna um círculo.

O fato, de que, em geral, o lugar geométrico será uma elipse pode ser demonstrado provando que as Equações 2-1 e 2-2 com $z = 0$, são equações paramétricas de uma elipse. Desta forma, temos:

$$E_x = E_1 . \text{sen } wt \quad (2-6)$$

$$E_y = E_2 . \text{sen}(wt + \delta) \quad (2-7)$$

onde wt é a variável independente. O procedimento a ser tomado é eliminar wt e rearranjar a expressão resultante na forma da equação de uma elipse.

Primeiro, expandimos a Equação 2-7 na forma,

$$E_y = E_2 . (\text{sen}(wt) . \cos(\delta) + \cos(wt) . \text{sen}(\delta)) \quad (2-8)$$

da Equação 2-6, obtemos

$$\text{sen } wt = \frac{E_x}{E_1} \quad (2-9)$$

da mesma forma, podemos escrever

$$\cos wt = \sqrt{1 - \text{sen}^2 wt} = \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{E_1}\right)^2} \quad (2-10)$$

substituindo (2-10) e (2-9) em (2-8), temos,

$$E_y = E_2 . \left(\left(\frac{E_x}{E_1}\right) . \cos \delta + \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{E_1}\right)^2} . \text{sen} \delta \right) \quad (2-11)$$

$$\frac{E_y}{E_2} = \left(\left(\frac{E_x}{E_1} \right) \cos \delta + \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{E_1} \right)^2} \cdot \text{sen} \delta \right) \quad (2-12)$$

rearranjando e elevando ao quadrado, obtemos

$$\left(\frac{E_y}{E_2} - \left(\frac{E_x}{E_1} \right) \cos \delta \right)^2 = \left(\sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{E_1} \right)^2} \cdot \text{sen} \delta \right)^2 \quad (2-13)$$

$$\left(\frac{E_y}{E_2} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{E_y E_x}{E_1 E_2} \right) \cos \delta + \left(\frac{E_x}{E_1} \right)^2 \cos^2 \delta = \text{sen}^2 \delta - \left(\frac{E_x}{E_1} \right)^2 \text{sen}^2 \delta$$

$$\left(\frac{E_y}{E_2} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{E_y E_x}{E_1 E_2} \right) \cos \delta + \left(\frac{E_x}{E_1} \right)^2 = \text{sen}^2 \delta \quad (2.14)$$

dividindo ambos os membros por $\text{sen}^2 \delta$, obtemos, de forma simplificada:

$$a E_x^2 - b E_x E_y + c E_y^2 = 1 \quad (2-15)$$

onde,

$$a = \frac{1}{E_1^2 \cdot \text{sen}^2 \delta}$$

$$b = \frac{2 \cdot \cos \delta}{E_1 E_2 \cdot \text{sen}^2 \delta}$$

e

$$c = \frac{1}{\text{sen}^2 \delta \cdot E_2^2}$$

A Equação 2-15 é a de uma elipse em sua forma geral. Nota-se que o eixo da elipse acima não coincide com o eixo dos x e y . Este é o caso geral, da polarização elíptica, ilustrado na Figura 6.

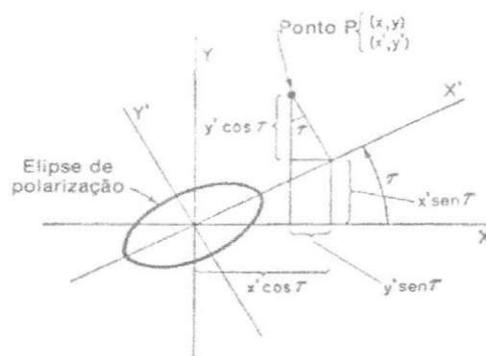


Figura 6 - Polarização Elíptica

2.3 - Tipos de Polarização:

É possível analisarmos três casos da equação geral obtida.

Caso 1: Polarização Linear

E_y está em fase ou defasado de 180° em relação a E_x . Assim, $\delta = k\pi$, onde $k = 0, 1, \dots$

$$\text{sen}(k\pi) = 0 \text{ e } \text{cos}(k\pi) = \pm 1$$

que na equação resulta,

$$\left(\frac{E_y}{E_2}\right)^2 \pm 2\left(\frac{E_y E_x}{E_1 E_2}\right) + \left(\frac{E_x}{E_1}\right)^2 = 0 \quad (2.16)$$

Reescrevendo a equação

$$\left(\frac{E_y}{E_2} \pm \frac{E_x}{E_1}\right)^2 = 0 \quad (2.17)$$

Desta forma temos a equação de uma reta na forma,

$$E_y = \pm m \cdot E_x$$

onde $m = (E_2/E_1)$, nos fornece a inclinação da reta se para cima (positivo, quando k for par ($\delta = 0, 2\pi, 4\pi$, etc.)) ou para baixo (negativo, quando k for ímpar ($\delta = \pi, 3\pi, 5\pi$ etc.)).

Portanto, quando duas ondas componentes polarizadas linearmente estão em fase ou defasadas de 180° , a onda resultante é polarizada de forma linear, com \mathbf{E} , em geral, sem estar nas direções x ou y . Entretanto se $E_2 = 0$, \mathbf{E} estará na direção dos x e a onda resultante polarizada horizontalmente. Se $E_1 = 0$, \mathbf{E} estará na direção y e a onda resultante será polarizada verticalmente. Para $E_1 = E_2$ então $m = +1$ e \mathbf{E} está a um ângulo de 45° com o eixo x positivo. Se $E_1 = E_2$ e $\delta = \pi$, então $m = -1$ e \mathbf{E} está a um ângulo negativo de 45° em relação ao eixo x positivo. O ângulo τ , formado neste caso relaciona-se com a inclinação m da seguinte forma

$$\tau = \text{arctang } m \quad (2.18)$$

Caso 2: polarização elíptica

Ao considerarmos que E_x e E_y estão em quadratura no tempo. Ou seja,

$$\delta = \frac{1 + 2k}{2} \cdot \pi \quad \text{onde } k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.19)$$

Então o produto cruzado em (2-15) é igual a zero e a equação fica na seguinte forma,

$$\left(\frac{E_y}{E_2}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_1}\right)^2 = 1 \quad (2.20)$$

Desta forma, temos a equação de uma elipse onde seus eixos coincidem com os eixos x e y . Este é um caso especial da polarização elíptica. Por exemplo, se $(E_2=1/2.E_1)$, a elipse de polarização terá o seu eixo maior disposto ao longo do eixo x .

Caso 3: polarização circular

Considerando a condição $E_1=E_2$, então a equação (2.15) resultará na seguinte forma

$$(Ex^2/E_1^2) + (Ey^2/E_1^2) = 1$$

ou ainda

$$Ex^2 + Ey^2 = E_1^2 \quad (2.21)$$

Desta forma, temos a equação de uma circunferência. Quando duas ondas componentes polarizadas linearmente estão em quadratura e também com amplitude iguais, a onda resultante é polarizada de forma circular.

2.3.1 - Polarização Circular horária e anti-horária

Vejam os casos da polarização circular com maiores detalhes. De acordo com a Equação 2.21, o lugar geométrico que a ponta do vetor \mathbf{E} descreve no plano normal ao eixo de propagação (eixo z) é um círculo. Nesta situação o vetor \mathbf{E} resultante é constante, em módulo, e gira uniformemente com o tempo no plano x - y completando uma revolução a cada ciclo. Contudo, a Equação 2.21 não fornece nenhuma informação sobre o sentido em que \mathbf{E} gira, isto é, horário ou anti-horário.

Para determinar o sentido de rotação, reescrevamos as Equações 2.6 e 2.7, para o caso especial que estamos considerando, ou seja,

$$\delta = \frac{1 + 2k}{2} \cdot \pi \quad \text{e} \quad E_1 = E_2$$

onde $k = 0, 1, 2, \dots$

Então, quando k for par

$$E_x = E_1 \cdot \sin wt$$

$$E_y = E_1 \cdot \cos wt$$

e quando k for ímpar E_x é o mesmo mas

$$E_y = -E_1 \cdot \cos wt$$

Considerando o primeiro caso onde k é par ($\delta = \pi/2, 5\pi/2, \dots$). Quando $t=0$, $E_x = 0$ e $E_y = +E_1$ de modo que \mathbf{E} está na direção de y positivo. Um quarto de ciclo mais tarde

$E_x=+E_1$ e $E_y=0$ de modo que \mathbf{E} esta na direção de x positivo sobre o eixo z o vetor do campo elétrico \mathbf{E} . Daí numa posição fixa sobre o eixo z o vetor do campo elétrico \mathbf{E} , resultante, gira num sentido anti-horário como ilustrado na Figura 7

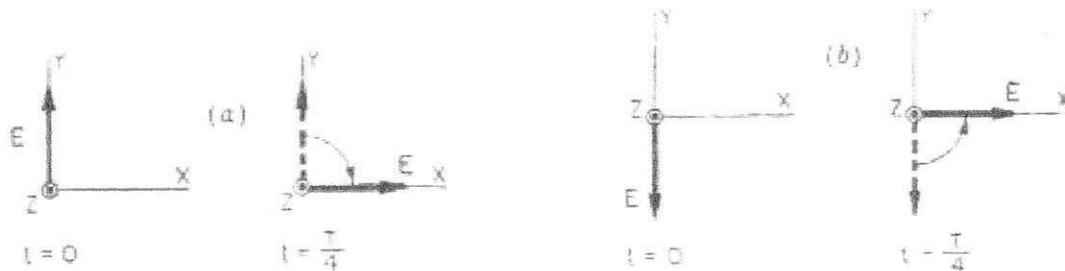


Figura.7. Exemplos de Rotação de \mathbf{E} no sentido horário (a) e sentido anti-horário (b).

Considere em seguida o caso para k ímpar ($\delta = 3\pi/2, 7\pi/2$ etc.). Quando $t=0$, $E_x=0$ e $E_y=-E_1$ de modo que \mathbf{E} esta na direção de y negativo. Um quarto de ciclo mais tarde $E_x=+E_1$ e $E_y=0$ de modo que \mathbf{E} está na direção de x positivo. Daí, numa posição fixa sobre o eixo z o vetor de campo elétrico \mathbf{E} resultante gira num sentido anti-horário como ilustrado na figura 7(b). A onda está progredindo na direção de z positivo (fora da página) tanto neste caso como no outro ilustrado pela Figura.7(a). Para evitar qualquer incerteza quanto ao sentido da onda, podemos chamar o primeiro caso de “onda aproximando com polarização horária” e o segundo caso de “onda aproximando com polarização circular anti-horária”.

2.3.2-Polarização elíptica horária e anti-horária

De maneira geral, quando a onda resultante é polarizada elipticamente, é também de interesse conhecer o sentido de rotação de \mathbf{E} . Podemos alocar em um gráfico os valores de \mathbf{E} para cada instante de tempo, como calculando de E_x e E_y na Equação 2.6 e na Equação 2.7, ou ainda da seguinte maneira: dividindo as equações que representam os valores instantâneos dos campos E_x e E_y

$$\frac{E_y}{E_x} = \frac{E_2 \operatorname{Im} e^{j(\omega t - \beta z + \delta)}}{E_1 \operatorname{Im} e^{j(\omega t - \beta z)}} = \frac{E_2}{E_1} e^{j\delta} \quad (2.22)$$

Para ilustrar apliquemos a Equação 2.22 à vários casos, tais como:

Caso 1. Quando E_y e E_x estiverem em fase, $\delta=0$. Então a Equação 2.22 reduz-se a

$$\frac{E_y}{E_x} = +\frac{E_2}{E_1} \quad \text{ou} \quad E_y = E_x + \frac{E_2}{E_1} \quad (2.23)$$

Quando E_y e E_x estiverem 180° fora de fase, $\delta = \pi$. Então a Equação 2.22 torna-se

$$\frac{\mathbf{E}_y}{\mathbf{E}_x} = -\frac{E_2}{E_1} \quad \text{ou} \quad \mathbf{E}_y = -\frac{E_2}{E_1} \mathbf{E}_x \quad (2.24)$$

Tanto a Equação 2.23 como a Equação 2.24 são equações de linhas retas, sendo a onda resultante polarizada linearmente.

Caso 2. Considerando em seguida a situação onde \mathbf{E}_y adianta-se a \mathbf{E}_x por 90° ou $\delta = \pi/2$. então a Equação 2.22 reduz-se a

$$\frac{\mathbf{E}_y}{\mathbf{E}_x} = +\frac{E_2}{E_1} \quad (2.25)$$

Este é o caso de *polarização elíptica horária* (onda aproximando). A relação axial da elipse de polarização é neste exemplo E_2/E_1 . Se a relação axial for unitária ($E_2 = E_1$) então

$$\frac{\mathbf{E}_y}{\mathbf{E}_x} = +j \quad (2.26)$$

Este é o caso de *polarização circular horária* (onda aproximando). Devemos notar que a relação E_2/E_1 é igual a relação axial somente quando $\delta = \pm\pi/2$

Caso 3. Finalmente, considerando a situação onde \mathbf{E}_y está atrasado de \mathbf{E}_x por 90° ou $\delta = -\pi/2$. então a Equação 2.22 torna-se

$$\frac{\mathbf{E}_y}{\mathbf{E}_x} = -j\frac{E_2}{E_1} \quad (2.27)$$

Este é o caso da *polarização elíptica anti-horária* (onda aproximando). quando $E_2 = E_1$ a Equação 2.27 reduz-se a

$$\frac{\mathbf{E}_y}{\mathbf{E}_x} = -j \quad (2.28)$$

Este é o caso da polarização circular anti-horária (onda aproximando). Concluimos que dos casos 2 e 3 um $+j$ indica rotação horária, enquanto que um $-j$ indica rotação anti-horária de \mathbf{E} (onda aproximando).

2.4-A polarização como uma função de E_2/E_1 e δ

Nas seções anteriores vimos que a relação E_2/E_1 e o ângulo de fase δ determinam o tipo de polarização da onda resultante produzida por duas ondas componentes polarizadas linearmente (com seus planos de polarização em ângulo reto). As elipses polarizadas para \mathbf{E} da onda resultante como uma função de E_2/E_1 e δ estão apresentadas na Figura 8, para valores de E_2/E_1 de ∞ , 2, 1, 0,5 e 0 e valores de δ de 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$,

$\pm 135^\circ$ e $\pm 180^\circ$. O sentido de rotação de E está indicado. Ele é horário para valores positivos de δ e anti-horário para valores negativos de δ (onda aproximando).

Referindo-se a Figura 8, a onda resultante é polarizada linearmente e vertical para todos os valores de δ quando $E_2/E_1 = \infty$, isto é Quando $E_1 = 0$. Quando $E_2/E_1 = 0$ isto é, quando $E_2 = 0$, a onda é polarizada linearmente e horizontal para todos os valores de δ .

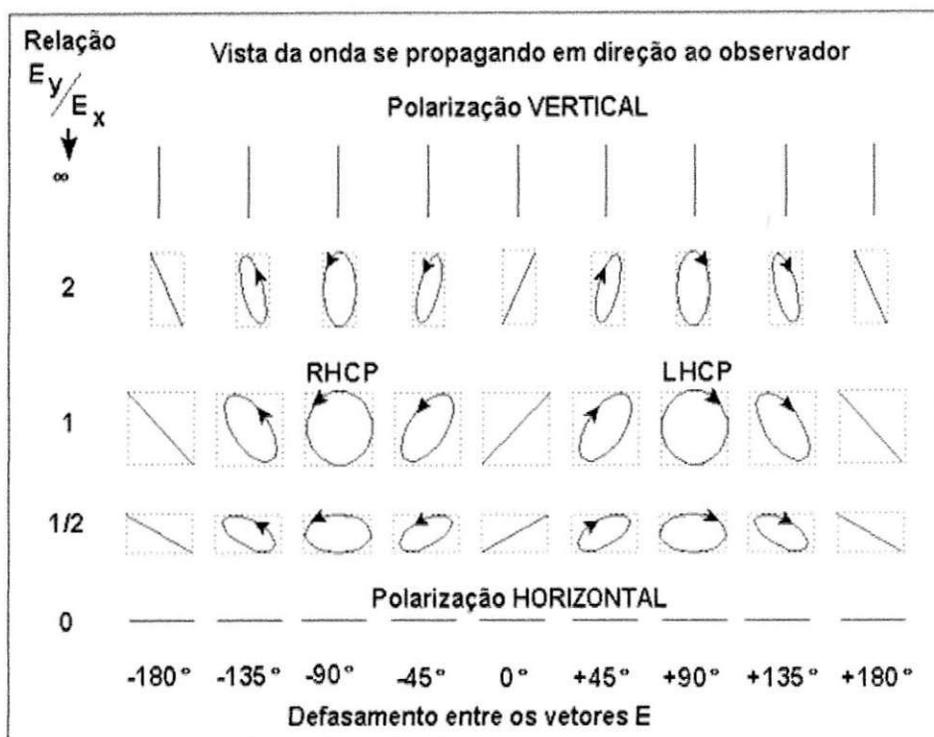


Figura 8 - Polarização da onda resultante em função de E_y/E_x e do defasamento

A onda é também polarizada linearmente quando $\delta = 0$ ou $\pm 180^\circ$, o plano de polarização (horizontal, inclinado ou vertical) dependendo da relação E_2/E_1 . A polarização Circular ocorre somente para o caso onde $E_2 / E_1 = 1$ e $\delta = \pm 90^\circ$. Ressaltando que quando $\delta = 90^\circ$ o sentido de rotação é horário (onda aproximando), e quando $\delta = -90^\circ$, o sentido de rotação é anti-horário (onda aproximando). Todas estas situações são casos limites, especiais da situação geral na qual a onda é polarizada elípticamente. Na Figura 8 há 16 casos de polarização elíptica, nela notamos que para um dado valor de E_2/E_1 todas as elipses de polarização estão contidas dentro de um retângulo (linhas interrompidas) de relação altura por largura igual a E_2/E_1 . Para $E_2/E_1 = 0$ ou ∞ o retângulo degenera-se a uma linha.

Duas antenas polarizadas linearmente orientadas em ângulo reto e energizadas com tensões iguais em quadratura de fase são algumas vezes empregadas para produzir polarização linear. Se as tensões forem desiguais ou a relação de fase não for 90° , a polarização torna-se elíptica. Por meio de medidas de polarização da onda irradiada é possível determinar que ajustes deveriam ser feitos na antena pra obter polarização circular. Dado que uma das antenas polarizadas linearmente seja vertical e a outra seja horizontal. Então, se a polarização for elíptica, com o eixo maior da elipse de polarização ou vertical ou horizontal, a diferença da fase é $\pm 90^\circ$, mas as duas antenas estão irradiando potências desiguais. Se o eixo da elipse de polarização estiver em $\tau = \pm 45^\circ$, ele indica que as duas antenas estão irradiadas a mesma potência mas a fase não é

$\pm 90^\circ$. Para outras elipses, e a divisão de potência e a diferença de fase podem ser estimadas com ajuda da Figura 8.

Para os dados presentes da polarização de onda, é comum a carta com coordenadas semelhantes àsquelas na Figura 8. Uma carta deste tipo é apresentada em anexo. A ordenada é a relação E_2/E_1 e a abscissa é o ângulo da fase δ . Um ponto sobre a carta define a polarização univocamente. Assim o ponto $E_2/E_1 = 1$ e $\delta = +90^\circ$ corresponde a polarização circular horária (onda aproximando). Se a polarização da antena observada variar como uma função de frequência, pode-se colocar esta variação em gráfico como uma linha sobre a carta de polarização de ondas.

2.5. A polarização elíptica como produzida por duas ondas polarizadas circularmente.

Nesta seção uma onda polarizada elipticamente será considerada do ponto de vista de que ela é resultante de duas ondas polarizadas circularmente, de sentidos de rotação opostos e, em geral, de amplitudes desiguais.

Quando as amplitudes forem iguais, a onda resultante será polarizada linearmente (Figura 9a). O plano de polarização depende da relação de fase entre as duas ondas polarizadas circularmente. No exemplo da Figura 9a os vetores \mathbf{E} para as duas ondas componentes estão na direção y positiva no mesmo instante. Daí, a onda resultante é polarizada verticalmente.

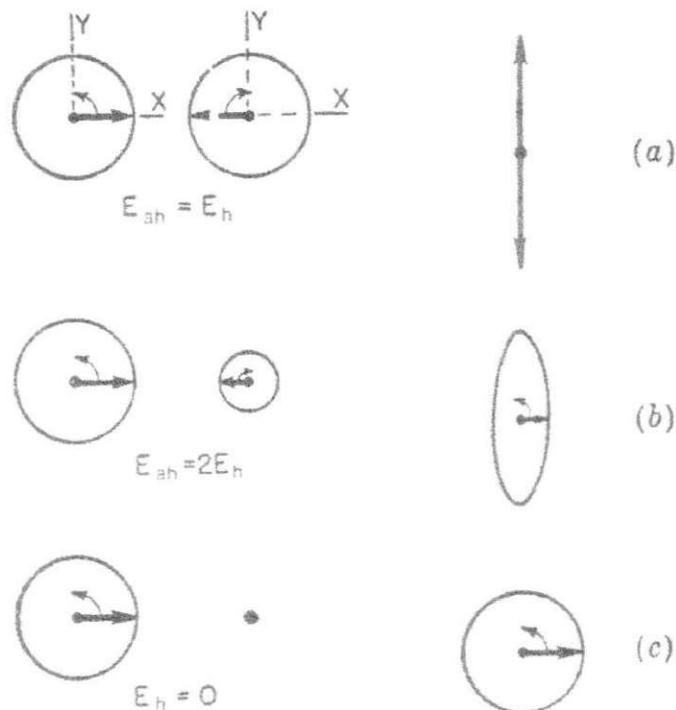


Figura 9 - Componentes polarizadas circularmente de ondas polarizadas linearmente, elipticamente e circularmente.

Quando as amplitudes forem desiguais, a onda resultante será polarizada elipticamente.

Se, por exemplo, a onda girando no sentido anti-horário ($E_{ah} = 2E_h$), a onda resultante será polarizada elipticamente como ilustrado na Figura 9b. Uma vez que o vetor E de ambas as direções está na direção y positiva no mesmo instante, o eixo maior da elipse de polarização é vertical. O sentido de rotação é anti-horário, o mesmo que para a onda componente maior.

Se uma das ondas componentes tornar-se zero, teremos um caso limite e a onda resultante é igual a outra onda componente. Figura 9c.

A dedução analítica deste caso onde a resultante de duas ondas polarizadas circularmente (de sentidos de rotação opostos) leva, em geral, a uma onda polarizada elipticamente é vista a seguir:

Sendo a componente no sentido anti-horário expressa por:

$$E_{ah} = E_a e^{i\omega t}$$

E para a componente horária por

$$E_h = E_4 e^{-i(\omega t + \delta)}$$

As componentes instantâneas x e y da onda resultante são então

$$E_x = \text{Re} (E_{ah} + E_h)$$

e

$$E_y = \text{Im} (E_{ah} + E_h)$$

Portanto,

$$E_x = E_3 \cos \omega t + E_4 \cos (\omega t + \delta') \quad (2.29)$$

e,

$$E_y = E_3 \sin \omega t + E_4 \sin (\omega t + \delta') \quad (2.30)$$

As Equações 2.29 e 2.30 são equações paramétricas de uma elipse, de vez que, eliminando ωt . Elas podem ser reduzidas a uma equação elipse da forma,

$$qE_x^2 + pE_x E_y + rE_y^2 = 1$$

onde q , p , e r são funções de E_3 , E_4 e δ .

O vetor campo elétrico de uma onda polarizada circularmente gira com uma velocidade angular uniforme. Para uma onda polarizada linearmente, E está numa direção fixa para uma metade do ciclo e então está no sentido oposto para a metade do ciclo seguinte. A situação para a polarização elíptica está entre estes extremos.

Capítulo 3 - Métodos de medição e trabalho experimental

3.1-Introdução:

Neste ponto, temos a análise matemática, dos tipos de polarização, sedimentada em nosso estudo. Abordaremos, portanto, os métodos utilizados para medidas de polarização, com destaque para aquele, escolhido para nosso trabalho experimental.

3.2-Métodos de Medição de Polarização.

Três métodos pelos quais podemos obter informação das características de polarização são:

1. Medindo-se o diagrama de polarização com uma antena linear e também, observando-se o sentido de rotação de \mathbf{E} . Este procedimento é chamado de *método de diagrama de polarização*.
2. Medindo-se as amplitudes (E_2, E_1) de duas componentes perpendiculares polarizadas linearmente de uma onda e o ângulo de fase δ entre elas - *método das componentes lineares*.
3. Medindo-se as amplitudes (E_1, E_2) de duas componentes polarizadas circularmente (de sentidos de rotação opostos) da onda e o ângulo de fase δ entre elas - *método das componentes circulares*.

3.3-Fase Experimental

3.3.1-Metodologia Utilizada: método das componentes lineares

A tarefa experimental consiste em duas bases, uma de transmissão e a outra de recepção. A base receptora formada por, duas antenas dispostas, fisicamente, perpendiculares uma à outra. Uma no plano horizontal e outra no plano vertical, conforme figura 12. Conectando um receptor à um dos terminais de uma antena, e depois a outra, afere-se os níveis de amplitude emitidos, na horizontal e na vertical, de uma antena transmissora, cuja polarização é previamente conhecida. Com o conhecimento prévio dos resultados esperados, podemos ter uma idéia da eficiência do método e da montagem na medição das amplitudes, tão importantes para se determinar o tipo de polarização que se quer obter ou medir.

3.3.2 - Material Utilizado:

- Fonte Klystron EE/2
- Gerador TYP – DM 525A
- Antena Log-periódica HL040
- 2 dipolos de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda para f : 2.4GHz
- Detector PM7105X
- Medidor de SWR HP415B
- Cabos coaxiais
- Hastes fixadoras
- Suporte em tripé ajustável

3.3.3 - Antena Transmissora

Utilizamos como antena transmissora uma antena log- periódica com polarização linear. O nome se deve à variação periódica de seus parâmetros característicos com o logaritmo da frequência. A Figura 10 dá a disposição de uma com 5 elementos. São dipolos de comprimentos diferentes e com espaçamentos diferentes, interligados de forma alternada e com um loop no final.

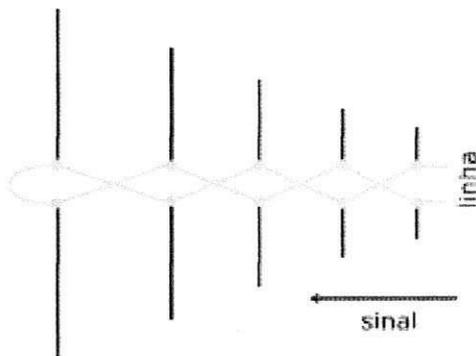


Figura 10- Antena log-periódica

O arranjo confere uma vantagem importante: a ampla faixa de frequências em que pode operar. Se, por exemplo, o receptor sintoniza um sinal de frequência igual ou próxima à de ressonância do segundo dipolo (da esquerda para a direita), o primeiro atua como refletor e os outros como diretores. E de forma análoga para os demais dipolos. Pode-se assim dizer que o elemento excitador varia de acordo com a frequência do sinal.

3.3.4 - Antenas Receptoras

Na recepção, dois dipolos de meio comprimento de onda foram utilizados. Para uma melhor investigação, identificamos as características de cada dipolo conforme experimento que consta como parte programática na disciplina Laboratório de Antenas

[5], onde se utiliza um sistema transmissor e outro receptor conforme o esquema da Figura 11.

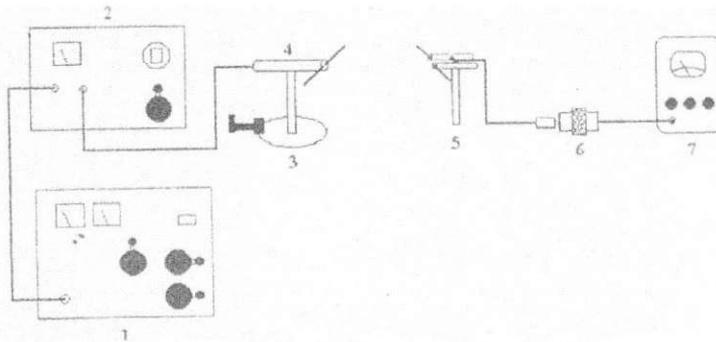


Figura 11- Montagem para medição de diagrama de irradiação

Na parte transmissora (1,2,3 e 4) acoplamos cada dipolo a ser utilizado na recepção e com o movimento circular da estação 3, na figura, coletamos os dados referentes as amplitudes irradiadas em cada plano horizontal e vertical. Em seguida alocamos os dados em tabelas para cada, antena e plano estudado, e configuramos os diagramas de irradiação presentes na seção de anexos deste trabalho. Desta forma, obtemos informação da proximidade na qualidade de recepção entre os dipolos. (Vide Anexo)

3.4 - Descrição do Experimento:

O experimento foi realizado em três etapas. A primeira delas envolveu a caracterização dos dipolos receptores, no que tange aos diagramas de irradiação. Em seguida, realizamos duas montagens da configuração sugerida [2] e esquematizada na Figura 12, para as medições das amplitudes. Ambas tiveram a mesma disposição física proposta, porém sofreram algumas modificações, na segunda, a fim de serem obtidos melhores resultados.

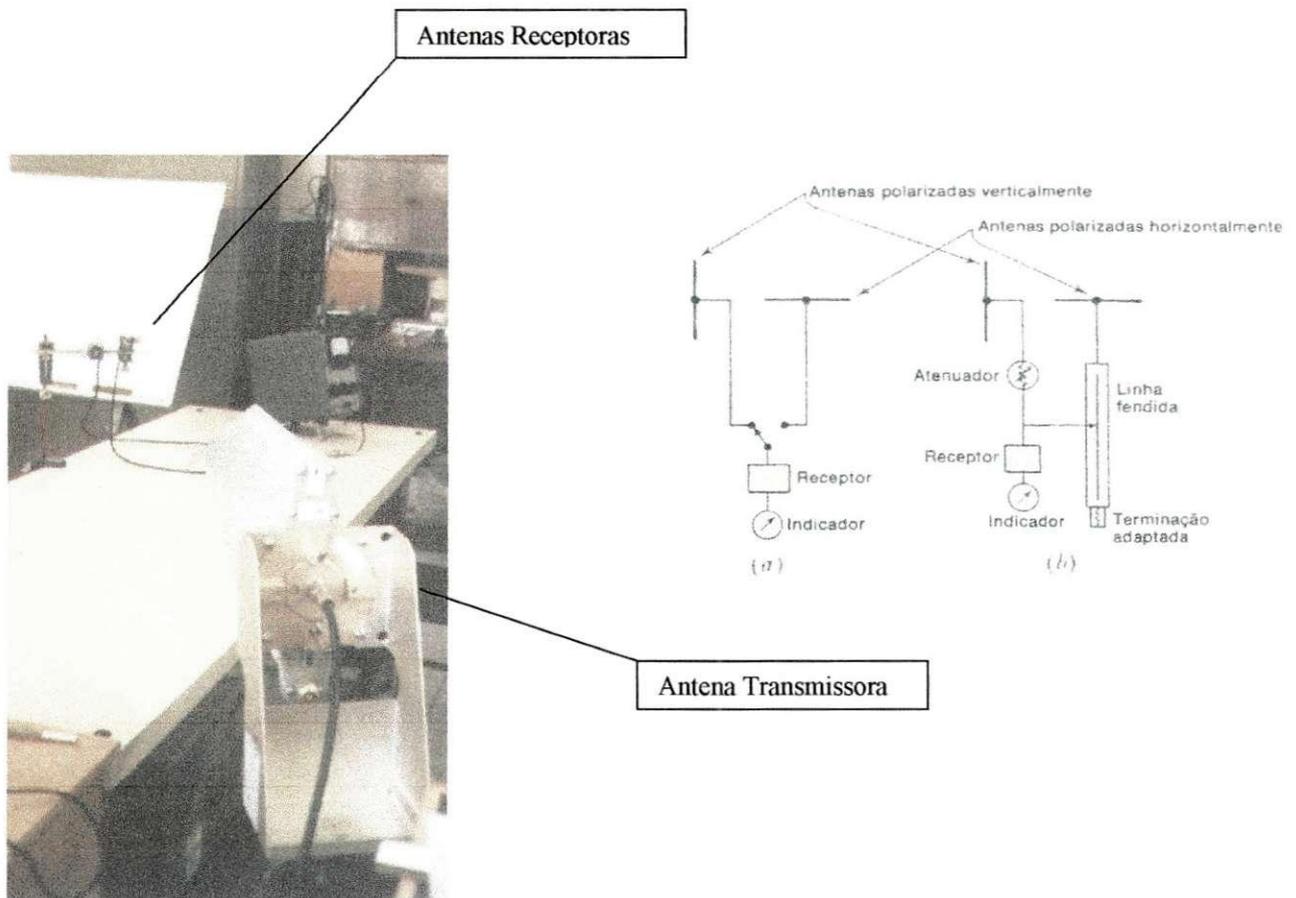


Figura 12- Montagens: laboratório e sugerida no livro Antenas (John D. Kraus)

A configuração essencial consistiu de duas bases, uma transmissora e outra receptora. Sendo a base receptora, formada por duas antenas de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda, dispostas, perpendicularmente, distando 8 cm (entre seus centros), uma em relação a outra como na Figura. 13 (vide foto). A base transmissora foi constituída pelo gerador de freqüência operando à 1.8 GHz, e de uma antena log-periódica conectada ao gerador para o transmissão do sinal, de polarização conhecida (linear). A base transmissora estava à 1.16m do ponto de recepção na primeira etapa e à 0. 75m , na segunda. O sinal enviado foi então estimado através de medições de amplitudes, captadas pelas antenas (na posição vertical e horizontal), através do detector conectado a um medidor de SWR. A posição angular da antena transmissora e os níveis de potência do sinal captado (em dB) foram anotados compondo a Tabela 1, disposta abaixo.

Tabela 1 – Primeira Montagem

Antena Transmissora Ang. Giro(°)	Antenas Receptoras	
	Vertical (dB)	Horizontal (dB)
0	-57	-45,5
45	-33,5	-39
90	-30	-51,2
135	-34	-37
180	-51,5	-46
225	-32,5	-40,5
270	-32	-48
315	-32,8	-35

Na segunda montagem, substituímos a haste de suporte para as antenas receptoras, que era de ferro, por uma de madeira, a fim de serem minimizados as reflexões e interferências indesejáveis. Atentamos para o fato de procedermos a recepção de sinal transmitido á um ângulo intermediário (60°). Repetimos os mesmos procedimentos da montagem 1 e coletamos os seguintes dados abaixo:

Tabela 2 – Segunda Montagem

Antena Transmissora	Antenas Receptoras	
	Vertical (dB)	Horizontal (dB)
Ang. Giro(°)		
0	-59	-30
45	-38.5	-38
60	-38	-37
90	-36	-48
135	-38.5	-39
180	-59.5	-30
225	-38.5	-38
270	-36	-47.5
315	-38.5	-39

Capítulo 4 - Análise dos Resultados Obtidos

4.1-Introdução:

A importância de analisarmos os dados obtidos por dedução analítica, comparando-os com aqueles obtidos em laboratório reside na necessidade de identificarmos pontos de aperfeiçoamento que levem a verificação da teoria sugerida neste trabalho. Neste momento, analisaremos os resultados norteados pela teoria sugerida e a abordagem tomada para o trabalho prático.

4.2-Análise dos Resultados:

Partindo do modo como trabalhamos a transmissão, com a polarização do sinal transmitido, previamente conhecida (polarização linear); podemos, neste ponto, nos remeter a Figura.8 para traçarmos um paralelo entre resultados esperados e obtidos com referência a segunda tabela. Lembramos que não temos a situação de defasamento entre as amplitudes do sinal enviado, ou seja, $\delta = 0$.

Para o ângulo inicial, 0° em relação a antena receptora horizontal, temos um exemplo de polarização horizontal. Esperávamos, pela teoria, que a antena vertical captasse um sinal muito fraco em comparação com a horizontal. Isto se verificou na realidade, uma vez que para o sinal na horizontal foi captado um valor de -30 dB, enquanto na vertical -59 dB, sinal próximo de zero na vertical.

Da mesma forma, ainda com a polarização horizontal, mas para um ângulo de 180° , obtemos -59,5 dB e -30 dB, na vertical e na horizontal, respectivamente. Portanto, correspondendo ao que se esperava: sinal mais forte na horizontal.

A situação inversa, ou seja, para um ângulo de 90° , o sinal captado correspondeu, satisfatoriamente, com a situação prevista, -36 dB na vertical e um sinal relativamente fraco na horizontal, -48 dB. De maneira semelhante, para 270° obtemos -36dB na vertical e -47.5dB na horizontal.

Fazendo uma comparação entre os casos de polarização horizontal e vertical, respectivamente mencionados acima, podemos notar uma melhor aproximação, com a teoria, para o caso de polarização horizontal. Isto pode ser consequência da aproximação feita para os ângulos em questão, ou seja, o ângulo tomado como 90° e os seus múltiplos foram implementados, desparafusando-se a estrutura móvel da antena log-periódica e afixando-a em posição vertical relativa a posição horizontal, desta forma não houve precisão nos ângulos em questão. De maneira complementar, os comportamentos individuais dos dipolos, que não são idênticos, como mostram os diagramas de irradiação em anexo, afetam as medições em cada situação.

Para ângulos múltiplos de 45° , o que esperávamos seria amplitudes igualmente distribuídas tanto na horizontal como na vertical, de maneira que a soma das amplitudes medidas resultaria em valor próximo de 0 dB. Com o uso de um esquadro apoiado sobre a mesa utilizada na montagem, posicionamos a antena nos referidos ângulos $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ e 315° . Os valores que coletamos foram bastante satisfatório, a soma obtida resultou 0.5 dB para todos os posicionamentos.

Configuramos ainda, um ângulo de 60° e as medidas -38 dB e -37 dB, na vertical e horizontal, ainda assim, a falta de precisão e as diferenças entre os dipolos receptores nos distanciaram do esperado: maior sinal na vertical.

Ainda com relação a análise qualitativa, podemos considerar apenas o módulo dos valores de amplitudes obtidos e se dispô-los em um gráfico, para observamos a

melhora de qualidade, obtida com as mudanças realizadas da primeira para a segunda montagem, teremos um gráfico da seguinte forma – Figura 13

Na figura obtida, o eixo vertical contém os valores, em dB e em módulo, da intensidade de campo elétrico em cada antena vertical e horizontal. No eixo horizontal, estão os ângulos trabalhados com a antena transmissora.

Podemos visualizar, mais facilmente, a aproximação entre teoria e prática, quando das mudanças realizadas para a montagem 2. Nos casos em que tínhamos polarização linear horizontal, e/ou vertical, ficou mais evidente o maior valor a ser encontrado nas antenas, horizontal ou horizontal, respectivamente.

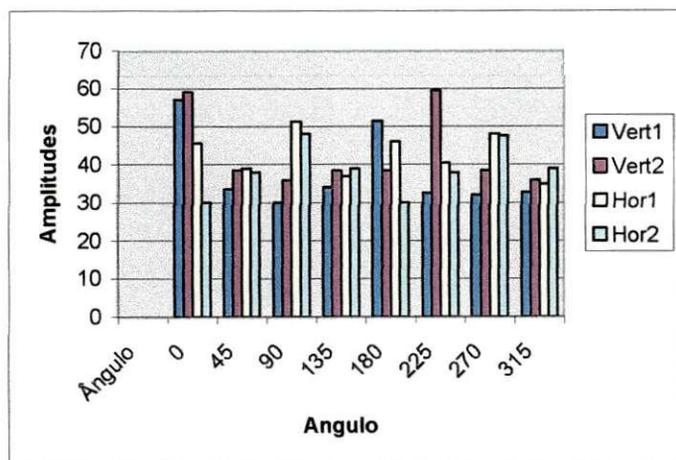


Figura 13 – Mudança qualitativa da montagem 1 (Vert1 e Hor1) para a montagem 2 (Vert2 e Hort2)

Capítulo 5 - Conclusão e Sugestões

A polarização de ondas contribui, significativamente, para um melhor resultado na irradiação e, conseqüentemente, na transmissão do sinal. Entendemos que a combinação de duas antenas polarizadas linearmente, com uma variação de suas amplitudes e defasagem entre seus sinais pode nos levar aos outros tipos de polarização: circular e elíptica. Da mesma forma com antenas polarizadas circularmente, podemos obter polarização elíptica e linear.

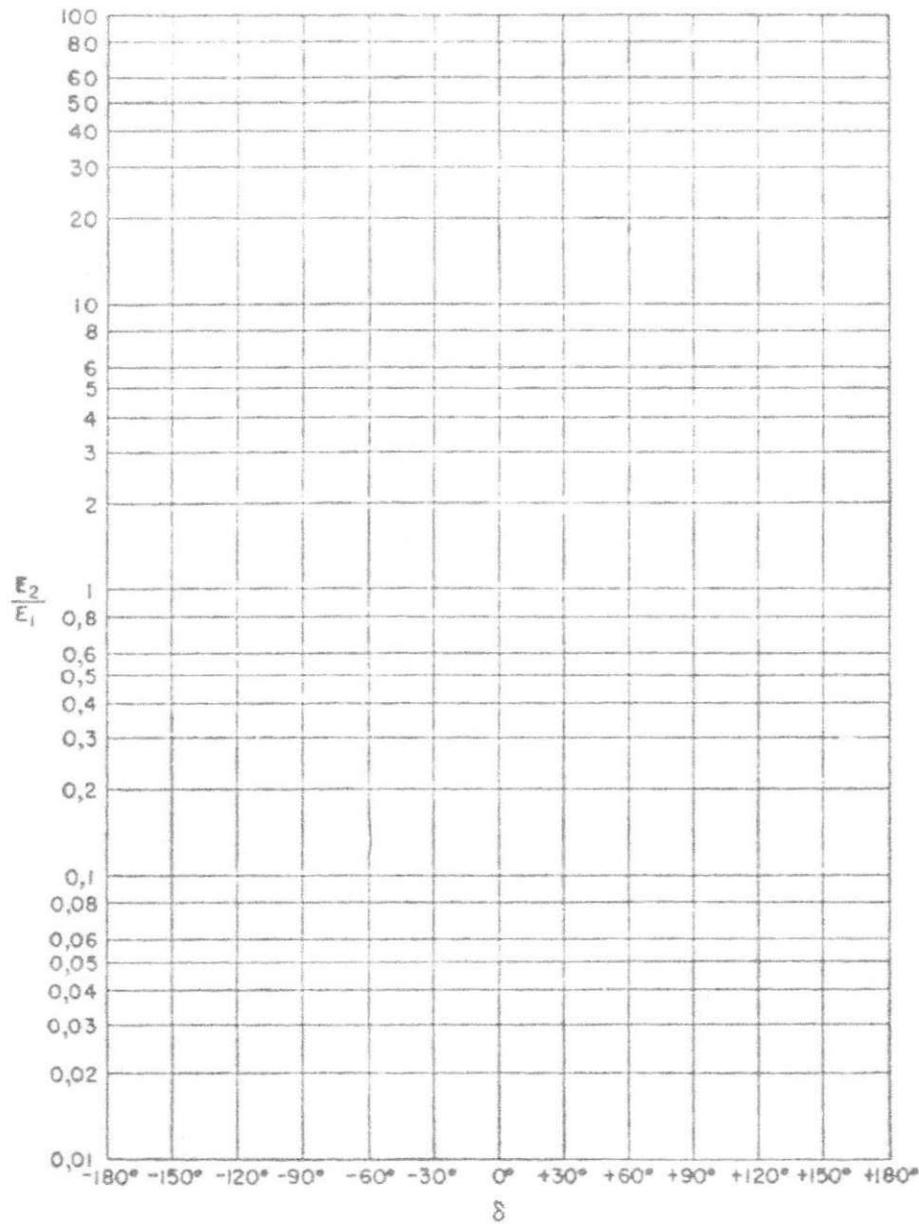
Embora o trabalho experimental implementado, tenha atingido o foco da teoria sugerida parcialmente, podemos esperar que se as medições, com as antenas para a recepção, foram de tão boa qualidade, trabalha-lás na transmissão combinada de sinais nos aproximará das polarizações que desejamos configurar.

Sugerimos que se trabalhe com dois pares de antenas lineares, uma para a reprodução da polarização desejada para a transmissão, e outro para a investigação qualitativa, na recepção do sinal enviado. Bem como, a obtenção do defasamento conforme citado em Kraus. Podemos ainda, comparar a polarização configurada com um padrão, tomando uma antena helicoidal como referência, na transmissão e/ou na recepção.

Bibliografia

1. Valle, Rômulo R. M. do, *Fundamentos de Antenas: Um Curso introdutório*, Apostila UFPB – DEE, 1997
2. Kraus, John D, *Antenas*; tradução de Paulo Antonio Mariotto.- Rio de Janeiro: Ed.Guanabara Dois, 1983.
3. Blake, Lamont V., *Antennas*, John Wiley & Sons, New York, 1966.
4. Hayt, William H., Jr. *Engineering Eletromagnetics*, McGrawll-Hill, 1983
5. Valle, Rômulo R. M, *Guia do Laboratório de Antenas*, Apostila UFPB, 1997

Anexo A - Carta de Polarização



Anexo B – Medidas e Diagramas de Irradiação dos Dipolos Receptores**Antena 1 (Plano Vertical)**

Ângulo(°)	Potência (dB)
0.00	-41.40
5.00	-38.50
10.00	-36.00
15.00	-34.00
20.00	-32.60
25.00	-31.40
30.00	-30.60
35.00	-29.50
40.00	-29.00
45.00	-28.60
50.00	-28.40
55.00	-28.00
60.00	-27.80
65.00	-27.50
70.00	-27.50
75.00	-27.50
80.00	-27.00
85.00	-27.00
90.00	-27.00
95.00	-27.50
100.00	-27.50
105.00	-27.60
110.00	-28.00
115.00	-28.50
120.00	-29.00
125.00	-29.50
130.00	-30.80
135.00	-31.80
140.00	-32.80
145.00	-34.20
150.00	-35.80
155.00	-37.50
160.00	-39.50
165.00	-41.80
170.00	-45.50
175.00	-48.00
180.00	-45.50
185.00	-41.40
190.00	-38.00
195.00	-36.50
200.00	-36.00
205.00	-35.80
210.00	-35.50
215.00	-35.50
220.00	-35.20
225.00	-34.50
230.00	-33.40
235.00	-32.60
240.00	-31.80
245.00	-31.20
250.00	-30.80
255.00	-30.40
260.00	-30.20

265.00	-30.20
270.00	-30.40
275.00	-30.80
280.00	-31.80
285.00	-32.60
290.00	-33.80
295.00	-35.00
300.00	-36.50
305.00	-37.00
310.00	-37.00
315.00	-36.50
320.00	-36.00
325.00	-35.80
330.00	-37.00
335.00	-38.50
340.00	-41.80
345.00	-48.00
350.00	-53.00
355.00	-45.00
360.00	-40.60

Anexo B – Medidas e Diagramas de Irradiação dos Dipolos Receptores

Antena 1 (Plano Horizontal)

Ângulo (°)	Poência (dB)
0.00	-30.80
5.00	-30.00
10.00	-29.50
15.00	-29.50
20.00	-29.00
25.00	-29.00
30.00	-29.50
35.00	-28.00
40.00	-27.50
45.00	-27.00
50.00	-26.50
55.00	-26.50
60.00	-26.30
65.00	-26.00
70.00	-26.00
75.00	-26.00
80.00	-26.00
85.00	-25.80
90.00	-25.80
95.00	-25.80
100.00	-25.80
105.00	-25.80
110.00	-25.80
115.00	-26.00
120.00	-26.50
125.00	-26.70
130.00	-27.00
135.00	-27.30
140.00	-27.50
145.00	-27.70
150.00	-28.00
155.00	-28.00
160.00	-27.80
165.00	-27.80
170.00	-27.50
175.00	-27.80
180.00	-28.00
185.00	-28.00
190.00	-28.00
195.00	-27.80
200.00	-27.00
205.00	-27.00
210.00	-27.50
215.00	-28.00
220.00	-29.00
225.00	-29.50
230.00	-30.00
235.00	-30.80
240.00	-30.70
245.00	-30.20
250.00	-30.00
255.00	-29.50
260.00	-29.00

265.00	-28.80
270.00	-28.60
275.00	-28.70
280.00	-29.00
285.00	-30.00
290.00	-31.40
295.00	-32.50
300.00	-33.40
305.00	-33.80
310.00	-34.50
315.00	-35.50
320.00	-36.50
325.00	-37.80
330.00	-38.00
335.00	-37.50
340.00	-36.00
345.00	-34.00
350.00	-32.40
355.00	-31.20
360.00	-30.60

Anexo B – Medidas e Diagramas de Irradiação dos Dipolos Receptores

Antena 2 (Plano Vertical)

Ângulo (°)	Potência (dB)
0.00	-45.50
5.00	-41.40
10.00	-37.80
15.00	-35.50
20.00	-33.80
25.00	-32.60
30.00	-31.20
35.00	-30.60
40.00	-30.00
45.00	-29.00
50.00	-28.80
55.00	-28.50
60.00	-28.00
65.00	-27.80
70.00	-27.50
75.00	-27.50
80.00	-27.40
85.00	-27.20
90.00	-27.00
95.00	-27.00
100.00	-27.40
105.00	-27.50
110.00	-28.00
115.00	-28.50
120.00	-28.70
125.00	-29.80
130.00	-30.80
135.00	-31.80
140.00	-33.00
145.00	-34.80
150.00	-36.80
155.00	-39.50
160.00	-44.00
165.00	-52.20
170.00	-56.00
175.00	-45.50
180.00	-41.00
185.00	-38.00
190.00	-36.80
195.00	-35.50
200.00	-34.50
205.00	-33.80
210.00	-33.20
215.00	-33.00
220.00	-32.80
225.00	-32.40
230.00	-32.20
235.00	-31.60
240.00	-31.20
245.00	-30.80
250.00	-30.20
255.00	-29.50
260.00	-29.00
265.00	-29.00
270.00	-29.50

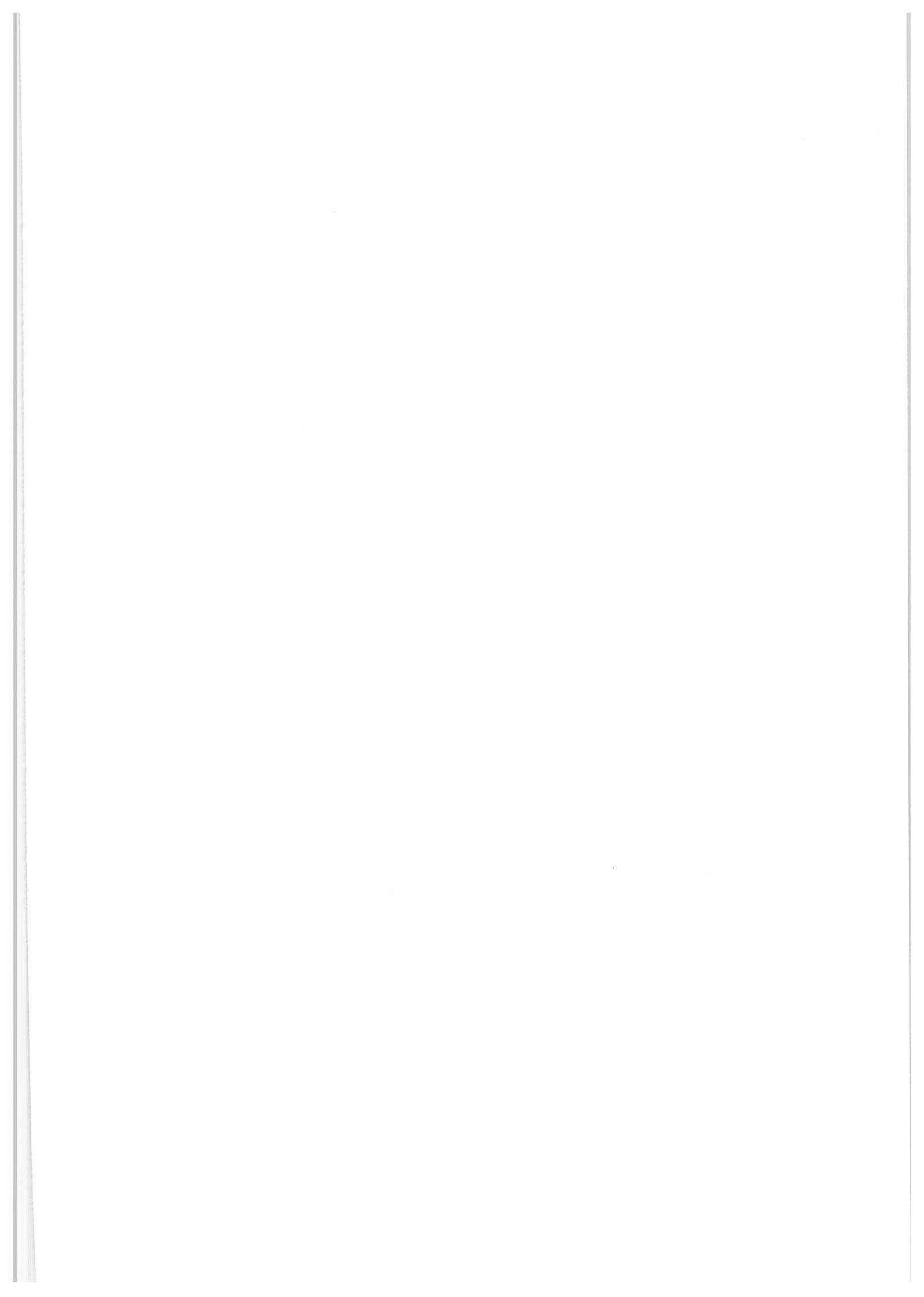
275.00	-30.00
280.00	-30.80
285.00	-31.40
290.00	-32.50
295.00	-33.60
300.00	-35.00
305.00	-35.50
310.00	-36.00
315.00	-36.50
320.00	-37.00
325.00	-38.00
330.00	-39.00
335.00	-39.50
340.00	-40.00
345.00	-41.00
350.00	-41.60
355.00	-41.80
360.00	-41.40

Anexo B – Medidas e Diagramas de Irradiação dos Dipolos Receptores

Antena 2 (Plano Horizontal)

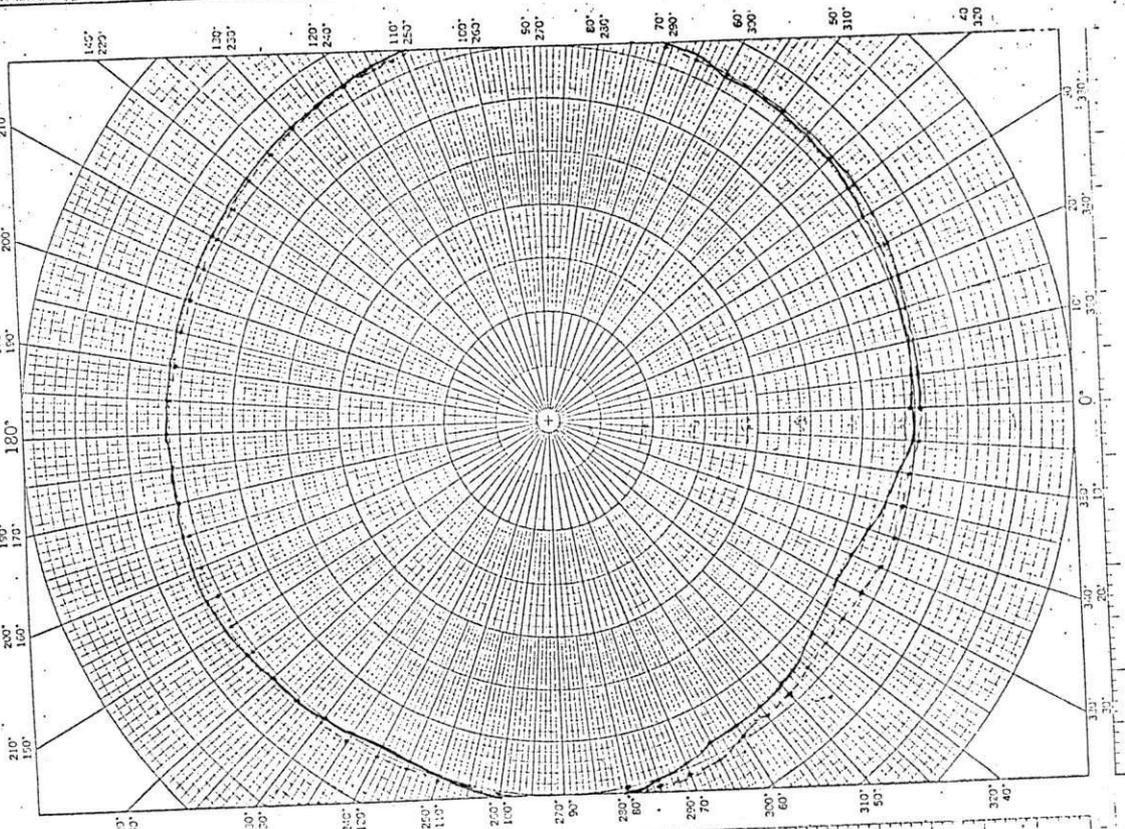
Ângulo (°)	Potência (dB)
0.00	-29.00
5.00	-28.50
10.00	-28.50
15.00	-28.30
20.00	-28.00
25.00	-27.80
30.00	-27.50
35.00	-27.50
40.00	-27.30
45.00	-27.20
50.00	-27.00
55.00	-26.80
60.00	-26.70
65.00	-26.50
70.00	-26.50
75.00	-26.30
80.00	-26.40
85.00	-26.30
90.00	-26.20
95.00	-26.20
100.00	-26.40
105.00	-26.30
110.00	-26.50
115.00	-26.70
120.00	-27.00
125.00	-27.40
130.00	-27.80
135.00	-28.00
140.00	-28.20
145.00	-28.50
150.00	-28.60
155.00	-28.70
160.00	-28.60
165.00	-28.50
170.00	-28.30
175.00	-28.00
180.00	-27.80
185.00	-28.00
190.00	-28.20
195.00	-28.20
200.00	-28.50
205.00	-28.50
210.00	-28.60
215.00	-29.00
220.00	-29.20
225.00	-29.50
230.00	-29.50
235.00	-29.50
240.00	-29.00
245.00	-29.00
250.00	-29.00
255.00	-28.80
260.00	-28.50
265.00	-28.40
270.00	-28.40

275.00	-28.50
280.00	-28.30
285.00	-28.50
290.00	-29.00
295.00	-29.50
300.00	-30.60
305.00	-31.40
310.00	-32.20
315.00	-32.50
320.00	-32.60
325.00	-32.60
330.00	-32.20
335.00	-31.80
340.00	-31.20
345.00	-30.60
350.00	-30.20
355.00	-29.50
360.00	-29.00



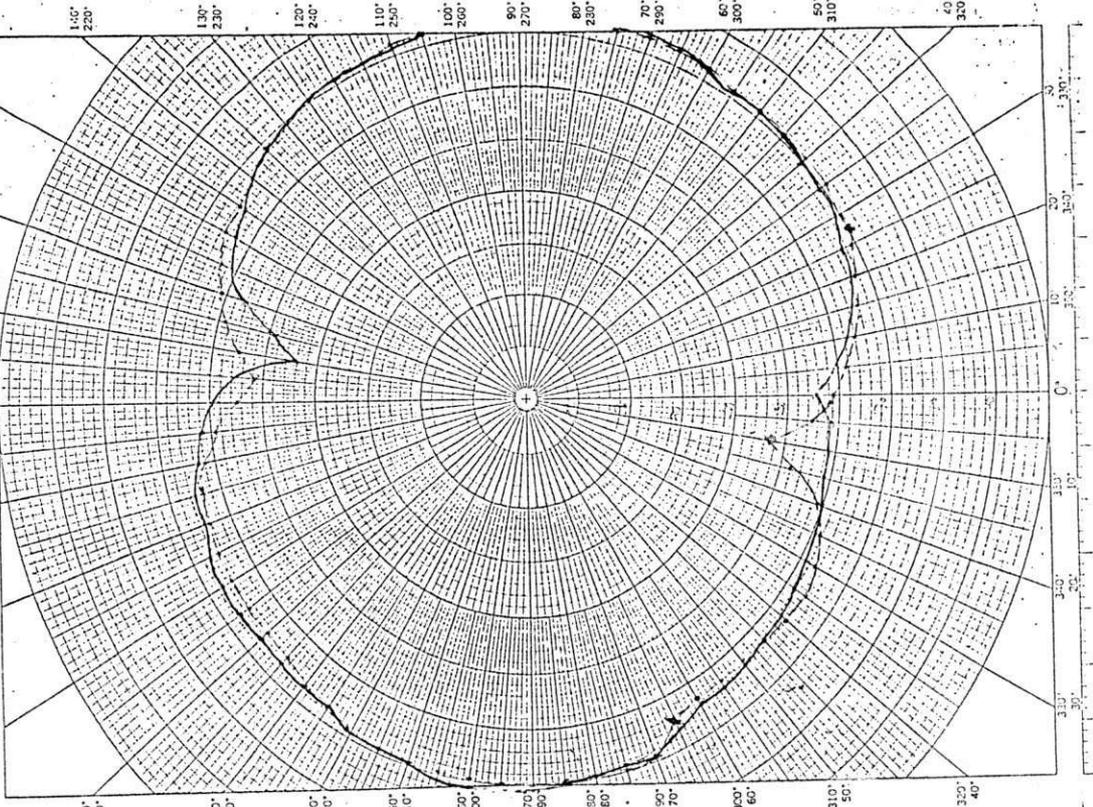
ANTENA 1 - PLANO HORIZONTAL

ANTENA 2 - PLANO VERTICAL



46 4412

POLAR COORDINATE
KUFFEL & ESSER CO. NEW YORK



46 4412

POLAR COORDINATE
KUFFEL & ESSER CO. NEW YORK