

Experiência

8

PTC-2440

---

LABORATÓRIO DE ANTENAS E MICROONDAS

# Diagrama de Radiação de Antenas



LABORATÓRIO DE ANTENAS E MICROONDAS

# Diagrama de Radiação de Antenas

---

© Luiz Cezar Trintinalia  
Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
2007

---



# Índice

<i>Objetivos</i> .....	<i>1</i>
<i>Teoria</i> .....	<i>1</i>
<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>Diagrama de radiação</b> .....	<b>1</b>
<b>Ganho e Diretividade</b> .....	<b>2</b>
<b>Polarização</b> .....	<b>3</b>
<b>Fórmula de Friis e métodos de medida do ganho</b> .....	<b>4</b>
<b>Antena Corneta</b> .....	<b>5</b>
<b>Antena Parabólica</b> .....	<b>5</b>
<b>Antena helicoidal</b> .....	<b>6</b>
<b>Antena em guia de onda fendido</b> .....	<b>8</b>
<i>Parte Experimental</i> .....	<i>8</i>
<b>Material Utilizado</b> .....	<b>8</b>
<b>Procedimento Inicial</b> .....	<b>9</b>
<b>Diagrama de radiação da corneta</b> .....	<b>11</b>
<b>Medida de ganho da corneta</b> .....	<b>11</b>
<b>Antena parabólica</b> .....	<b>11</b>
<b>Método das 3 antenas</b> .....	<b>12</b>
<b>Antena helicoidal</b> .....	<b>13</b>
<b>Medida de polarização</b> .....	<b>14</b>
<i>Referências</i> .....	<i>15</i>

---



# Diagrama de Radiação de Antenas

*Antenas de microondas.*

Nesta experiência estudaremos alguns tipos de antenas utilizadas na faixa de microondas bem como métodos para determinação de seus ganhos, diagramas de radiação e polarização. A teoria sobre antenas será rapidamente revista e os principais conceitos envolvidos serão explorados na parte experimental.

## Objetivos

- Determinação experimental do ganho de antenas utilizando-se duas antenas idênticas;
- Medida do diagrama de radiação de antenas;
- Determinação experimental do ganho de antenas utilizando-se o método das 3 antenas;
- Determinação da polarização de antenas;
- Familiarização com diversos tipos de antenas usadas na faixa de microondas.

## Teoria

### Introdução

Uma antena é o dispositivo utilizado para radiar ou receber ondas de rádio, ou seja, é o dispositivo de transição entre o espaço livre e uma linha de transmissão ou um guia de onda. Além de possibilitar a transmissão ou recepção de energia eletromagnética, geralmente, também se requer que a antena otimize ou acentue a radiação de energia em algumas direções e as suprima em outras.

Assim, uma antena pode possuir diferentes formas para atender a diferentes aplicações, podendo ser um pedaço de fio condutor, uma abertura, um arranjo de elementos, um refletor, uma lente, etc. Uma breve descrição de diferentes tipos de antenas pode ser encontrada em [1], p. 1-6. Alguns parâmetros de interesse em antenas serão discutidos a seguir; outros como impedância de entrada, eficiência e temperatura de antena, que não serão objeto da presente experiência, encontram-se analisados em maior detalhe em [1].

### Diagrama de radiação

O diagrama de radiação de uma antena é definido como uma representação gráfica das propriedades de radiação de uma antena em função de coordenadas espaciais. Em muitos casos o diagrama de radiação é definido no campo-distante e é representado como função das coordenadas de direção (ângulos). O gráfico da potência recebida de uma antena, quando observada a uma distância radial constante, é denominado diagrama de radiação de potência e o gráfico da variação espacial do campo elétrico (ou magnético) também a uma distância constante é denominado diagrama de campo. Na prática, o diagrama de radiação tri-dimensional é medido e armazenado como uma série de diagramas bidimensionais.

Entretanto, para a maior parte das aplicações práticas, uns poucos gráficos do diagrama como função de  $\theta$  para alguns valores particulares de  $\phi$  e uns poucos gráficos do diagrama como função de  $\phi$  para alguns valores particulares de  $\theta$  nos dão a maior parte da informação necessária.

Uma antena, hipotética, que irradia igualmente em todas as direções é denominada radiador isotrópico, ou antena isotrópica. Esta antena é freqüentemente utilizada como referência para o ganho de outras antenas.

Para determinar-se experimentalmente o diagrama de radiação de campo distante de uma antena é necessário que as medições de potência ou campo sejam feitas a uma distância suficientemente grande para que as componentes de campo distante do campo (que decaem com o inverso do raio) sejam predominantes. Os critérios para a determinação dessa distância estão detalhados em [2] e podem ser resumidos pelas seguintes expressões:

$$R \geq \frac{10 \lambda}{2 \pi}; \quad R \geq 5 D; \quad R \geq \frac{2 D^2}{\lambda} \quad (1)$$

Nessas expressões,  $D$  é o diâmetro da menor esfera que contém toda a estrutura da antena e  $R$  é a distância radial do ponto de medição à antena.

Alguns parâmetros de interesse relacionados ao diagrama de radiação incluem:

- Lóbulos: porção do diagrama de radiação limitada por regiões de relativamente fraca radiação. Um lóbulo principal ou feixe principal, é definido com sendo o lóbulo que contém a direção de máxima radiação. Algumas antenas podem apresentar mais de um lóbulo principal. Os lóbulos secundários são os lóbulos não principais e, em geral, representam radiação em direções não desejadas, devendo, portanto, ser minimizados.
- Ângulo de 3 dB (ou de meia potência): é o ângulo entre dois pontos do lóbulo principal cuja intensidade de potência é metade da intensidade máxima.
- Ângulo entre nulos: é o ângulo entre os dois pontos de mínima radiação adjacentes ao lóbulo principal.

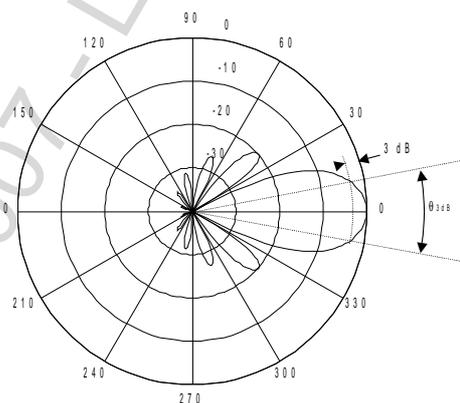


Figura 1: Diagrama de radiação de uma antena.

### Ganho e Diretividade

A diretividade numa dada direção é definida como sendo a razão entre a intensidade de radiação (vetor de Poynting multiplicado pelo quadrado da distância) nessa direção e a intensidade de radiação de uma antena de referência, que é geralmente a antena isotrópica, quando ambas radiam a mesma potência. A diretividade máxima de uma antena é normalmente denominada simplesmente diretividade da antena. Se a potência efetivamente radiada pela antena é  $P_{\text{rad}}$ , então a diretividade pode ser calculada como

$$D = \frac{4 \pi R^2 |\vec{S}|}{P_{rad}} = \frac{4 \pi U}{P_{rad}}; \vec{S} = \text{vetor de Poynting}; U = \text{Intensidade de radiação}$$

$$\vec{S} = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{\eta}; \eta = \text{impedância intrínseca do meio};$$

$$E_{\theta, \phi} = \text{componentes do campo elétrico (valor eficaz)}$$
(2)

O ganho de uma antena é definido como a razão entre a intensidade de radiação da antena e a intensidade de radiação de uma antena de referência sem perdas, que é geralmente a antena isotrópica, sendo ambas alimentadas com a mesma potência. Ou seja, o ganho é igual à diretividade multiplicada por um fator de eficiência que engloba fatores como perdas por descasamento, perdas ôhmicas na própria antena e perdas dielétricas da própria antena:

$$G = e_t D; e_t = e_r e_c e_d, \quad (3)$$

onde  $e_r = 1 - |\Gamma|^2$ ,  $e_c$  = eficiência de condução (relacionado a perdas ôhmicas) e  $e_d$  = eficiência dielétrica (relacionado a perdas dielétricas).

A área efetiva de uma antena é a área que, quando multiplicada pela densidade de potência nela incidente, nos dá a potência entregue à carga. Pode-se mostrar, por reciprocidade (ver, por exemplo [1] p. 61-3), que a área efetiva de uma antena pode ser escrita como

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4 \pi} G \quad (4)$$

### Polarização

A polarização de uma antena numa dada direção é definida como a polarização da onda por ela radiada (campo distante) nessa direção. Quando a direção não é especificada, entende-se por polarização a polarização na direção de máximo ganho da antena.

A polarização de uma onda pode ser classificada com linear, circular ou elíptica<sup>2</sup>, ver por exemplo [1] p. 48-53, de forma que o campo elétrico dessa onda pode ser descrito como

$$\vec{E} = \hat{\rho} E, \quad (5)$$

onde o versor (vetor de módulo unitário)  $\hat{\rho} = \rho_x \hat{u}_x + \rho_y \hat{u}_y$  representa a polarização de uma onda propagando-se na direção z positiva. Assim, teremos polarização linear quando  $\rho_x \rho_y^* = \text{real}$  (as duas componentes em fase ou em oposição de fase); polarização circular no sentido horário quando

$\rho_x \rho_y^* = \frac{e^{+j\frac{\pi}{2}}}{2}$ ; polarização circular no sentido anti-horário quando  $\rho_x \rho_y^* = \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{2}$  (componentes de

mesmo módulo –  $1/\sqrt{2}$  – e em quadratura no tempo) e polarização elíptica nos casos restantes.

Em muitos casos a polarização da antena receptora,  $\hat{\rho}_R$ , pode ser diferente da polarização da antena transmissora,  $\hat{\rho}_T$ , havendo, então, o que se chama de descasamento de polarização. Nesse caso, a potência extraída pela antena receptora não será a máxima possível, podendo ser quantificada pelo seguinte fator de eficiência<sup>3</sup>:

<sup>1</sup> O símbolo  $\Gamma$  representa o coeficiente de reflexão na linha de transmissão (ou guia de onda).

<sup>2</sup> Efetivamente as polarizações linear e circular são casos particulares da polarização elíptica.

<sup>3</sup> O símbolo “.” representa o produto escalar de dois vetores.

$$e_{\text{pol}} = |\hat{\rho}_T \cdot \hat{\rho}_R^*|^2 = |\cos \psi_p|^2, \quad (6)$$

onde  $\psi_p$  é o ângulo entre esses dois versores.

### Fórmula de Friis e métodos de medida do ganho

Com base nos conceitos apresentados, podemos escrever a seguinte relação entre a potência dissipada na carga ligada à antena receptora e a potência disponível do gerador ligado à antena transmissora<sup>4</sup>,

$$\begin{aligned} \frac{P_R}{P_T} &= e_{cdT} e_{cdR} (1 - |\Gamma_T|^2) (1 - |\Gamma_R|^2) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 D_T(\theta_T, \varphi_T) D_R(\theta_R, \varphi_R) |\hat{\rho}_T \cdot \hat{\rho}_R^*|^2 = \\ &= \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_T(\theta_T, \varphi_T) G_R(\theta_R, \varphi_R) |\hat{\rho}_T \cdot \hat{\rho}_R^*|^2, \end{aligned} \quad (7)$$

que é conhecida como fórmula de Friis.

Se tivermos duas antenas idênticas alinhadas para máxima diretividade (portanto sem descasamento por polarização) a expressão anterior se reduz a

$$\frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G^2. \quad (8)$$

Nessa configuração o ganho pode, então, ser determinado por

$$G = \sqrt{\frac{P_R}{P_T} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)} \Rightarrow G_{\text{dB}} = \frac{1}{2} (P_{\text{RdBm}} - P_{\text{TdBm}}) + 10 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right). \quad (9)$$

Note que não é necessário determinar-se os valores absolutos das potências, apenas sua relação, que pode ser obtida, no caso da presente experiência, utilizando-se um detector a diodo casado.

Outra forma de determinar-se experimentalmente o ganho de uma antena é utilizando-se uma antena de referência com ganho conhecido ( $G_R$ ). Medindo-se, então, a relação entre as potências recebida e transmitida, o ganho pode ser calculado como

$$G_T = \frac{P_R}{P_T} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^{-2} G_R^{-1} \Rightarrow G_{\text{TdB}} = 10 \log \left( \frac{P_R}{P_T} \right) - 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right) - G_{\text{RdB}}, \quad (10)$$

admitindo-se que ambas as antenas tenham a mesma polarização.

Caso não se disponha de duas antenas idênticas e nem de uma antena com ganho conhecido, pode-se utilizar o método das 3 antenas, descrito a seguir. Dispondo-se de 3 antenas com ganhos desconhecidos  $G_1$ ,  $G_2$ , e  $G_3$ , mede-se a relação entre as potências recebida e transmitida para uma distância  $R$  usando-se as antenas 1 e 2. Repete-se, então, o procedimento para as antenas 1 e 3. Por fim, utilizam-se as antenas 2 e 3, sempre com a mesma distância entre elas.

Dessa forma, obtêm-se as seguintes relações:

$$G_1 G_2 = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \frac{P_R}{P_T} \Big|_{12}; \quad G_1 G_3 = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \frac{P_R}{P_T} \Big|_{13}; \quad G_3 G_2 = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \frac{P_R}{P_T} \Big|_{32}, \quad (11)$$

que, convenientemente manipuladas, nos fornecem

<sup>4</sup> Nessa expressão considerou-se o gerador casado com a linha/guia e desprezaram-se as perdas nas linhas/guias.

$$G_1^2 = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \frac{P_R}{P_T} \Big|_{12} \frac{P_R}{P_T} \Big|_{13} \frac{P_R}{P_T} \Big|_{32} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G_{1dB} = \frac{1}{2} \left\{ 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + (P_{RdB} - P_{TdB}) \Big|_{12} + (P_{RdB} - P_{TdB}) \Big|_{13} - (P_{RdB} - P_{TdB}) \Big|_{32} \right\} \quad (12)$$

Conhecendo-se  $G_1$  facilmente obtêm-se os ganhos das outras duas antenas.

### Fontes de erros

Em todas os métodos de medida descritos a principal fonte é a reflexão em objetos próximos (incluindo o solo, paredes, etc). Portanto, é importante que as reflexões sejam reduzidas a um mínimo. É interessante, também, que os experimentos sejam repetidos com diferentes posicionamentos das antenas para aumentar a precisão das medidas.

Outros fatores de erros são a determinação da distância entre as antenas (onde é o centro de amplitude da antena?), influência do campo próximo da antena (para distâncias pequenas entre as antenas), erro na medida da relação de potências e erro devido ao descasamento do detector.

### Antena Corneta

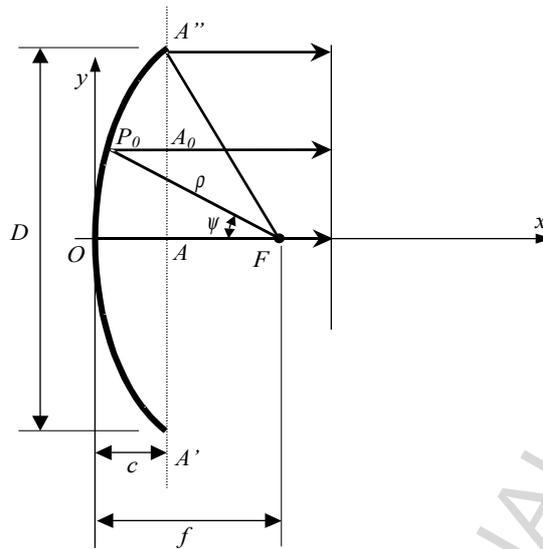
Um guia de onda, deixado em aberto, radia energia, funcionando, portanto, como uma antena. Porém, no caso de um guia retangular, por exemplo, essa antena apresenta um descasamento com um COE  $\cong 2$  e radia em muitas direções (alto nível de lóbulos secundários). Para melhorar esse casamento entre o guia e o espaço livre e aumentar a diretividade utiliza-se, portanto, uma antena do tipo corneta.

A antena do tipo corneta, especificamente a corneta piramidal, é análoga a uma corneta acústica. Ela é usada, freqüentemente, como alimentador para antenas parabólicas e como antena de referência de ganho.

A referência [1], no capítulo 12, traz uma análise detalhada desse tipo de antena contendo expressões para seu diagrama de radiação e diretividade em função de seus parâmetros geométricos, além de técnicas de projeto. A antena corneta utilizada no laboratório tem ganho nominal de 16 dB para o meio de sua banda que vai de 8,2 a 12,4 GHz. O seu COE é, nominalmente 1,25.

### Antena Parabólica

Uma antena parabólica consiste de um disco parabólico (refletor principal) e um alimentador. A iluminação do refletor principal pelo alimentador pode ser direta (focal point) ou indireta (Cassegrain) e, neste último caso, um sub-refletor é necessário. Uma descrição e análise mais aprofundada de antenas parabólicas e outras antenas com refletores pode ser encontrada no capítulo 13 de [1]. Na presente experiência a antena utilizada é iluminada por um alimentador traseiro de guia de onda (waveguide rear feed).



**Figura 2: Geometria de um parabolóide.**

A geometria do parabolóide, mostrada na Figura 2, é dada por

$$y^2 = 4 f x = 4 D x \frac{f}{D} \quad (13)$$

onde  $f = D^2/16 c$  é a distância focal; ou, em coordenadas esféricas com origem no foco,

$$\rho = \frac{2 f}{1 + \cos \psi} \quad (14)$$

A propriedade básica de um parabolóide perfeito é que ele converte uma onda esférica vinda de um uma fonte puntiforme no seu foco (F) em uma onda plana na abertura A'-A''. Inversamente, toda a energia recebida de uma fonte distante (na direção x) é refletida para um único ponto no foco. Isso ocorre porque o caminho seguido por um “raio” do ponto F, refletindo no parabolóide, até o plano A'-A'' tem o mesmo comprimento independente do ângulo de saída  $\psi$ , ou seja,  $\overline{F-O-A} = \overline{F-P_0-A_0} = \overline{F-A''} = f + c$ . Assim, as ondas dos diferentes raios estão exatamente em fase no plano da abertura. Uma parte da energia irradiada pelo alimentador será espalhada para fora do refletor. Esse efeito é denominado “spill-over”.

Antenas baseadas em refletores parabólicos são as mais importantes na banda de microondas. Elas podem operar em qualquer frequência e, em princípio, podem ser projetadas para um ganho tão alto quanto desejado. Lembrando da relação entre ganho e área efetiva,  $G = 4 \pi A_{ef} / \lambda^2$ , vemos que se pode obter um ganho maior aumentando a área efetiva<sup>5</sup>; assim, ao se dobrar o diâmetro da parábola temos um aumento de 4 vezes, ou 6 dB, no seu ganho<sup>6</sup>. A presença do alimentador à frente do refletor causa um bloqueio de parte da potência irradiada, mas, desde que o seu diâmetro seja pequeno (menos de 30% do diâmetro da parábola) a perda em ganho devido a esse bloqueio é de menos de 1 dB.

### **Antena helicoidal**

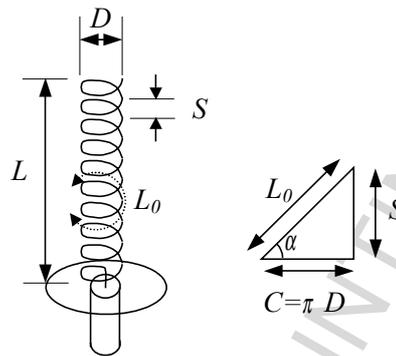
A antena helicoidal é, talvez, um dos tipos de antenas mais simples de se construir, especialmente quando se deseja polarização circular, pois ela mantém sua impedância e características de radiação sobre uma larga faixa de frequências. A antena helicoidal tem dois modos de radiação de interesse, o modo normal,

<sup>5</sup> Antenas Cassegrain apresentam eficiência de abertura entre 65-80% e antenas focal-point 10% abaixo disso. Eficiência de abertura é a relação entre a área efetiva e a área da abertura da antena.

<sup>6</sup> Desde que o mesmo perfil de iluminação da parábola seja mantido.

com máximo de radiação normal ao eixo da antena, e o modo axial com máximo de radiação paralelo ao eixo da antena. O primeiro ocorre quando o diâmetro da antena é pequeno em relação ao comprimento de onda, e o segundo quando o comprimento de uma volta é da ordem de um comprimento de onda. Na presente experiência estudaremos antenas helicoidais operando no modo axial apenas.

A antena helicoidal é, em geral, utilizada com um plano de terra, com diâmetro de pelo menos meio comprimento de onda, e alimentada por uma linha coaxial. As dimensões para o modo axial de operação não são críticas, resultando, portanto, em uma banda bastante larga. A configuração geométrica dessa antena consiste usualmente de  $N$  voltas de diâmetro  $D$  e espaçamento  $S$  entre cada volta, como mostrado na Figura 3.



**Figura 3: Antena helicoidal.**

Um outro parâmetro importante é o ângulo de inclinação  $\alpha$ , que é o ângulo formado entre uma linha tangente à hélice e o plano perpendicular ao eixo da hélice.

Uma análise mais detalhada de antenas helicoidais pode ser encontrada em [1], capítulo 9. Algumas expressões úteis para essas antenas, válidas para  $3/4 < C/\lambda < 4/3$  são:

- Impedância de entrada:  $R \approx 140 \frac{C}{\lambda}$  (15)

- Ângulo de meia potência (graus)  $\Delta \theta_{3dB} \approx \frac{52 \lambda^{3/2}}{C \sqrt{NS}}$  (16)

- Ângulo entre nulos (graus):  $\Delta \theta_0 \approx \frac{115 \lambda^{3/2}}{C \sqrt{NS}}$  (17)

- Diretividade:  $D \approx 15 N \frac{C^2 S}{\lambda^3}$  (18)

- Razão axial de polarização:  $AR = \frac{2N+1}{2N}$  (19)

- Campo distante normalizado: 
$$I(\theta) = \text{sen} \left( \frac{\pi}{2N} \right) \cos \theta \frac{\text{sen} \left[ \frac{(N/2)\varphi}{\text{sen}[\varphi/2]} \right]}{\text{sen}[\varphi/2]};$$
 
$$\varphi = 2\pi \left[ \frac{S}{\lambda} (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2N} \right]$$
 (20)

<sup>7</sup> Relação entre o eixo maior e o menor da elipse de polarização.

## Antena em guia de onda fendido

Antenas em guias de onda fendidos (slot antennas) são muito utilizadas em veículos que se movem em altas velocidades onde, para reduzir a resistência do ar, é importante que a antena não se exponha para fora da superfície.

Considere uma fenda estreita aberta em um guia de onda, paralela às linhas de campo magnético, como mostrado na Figura 4.

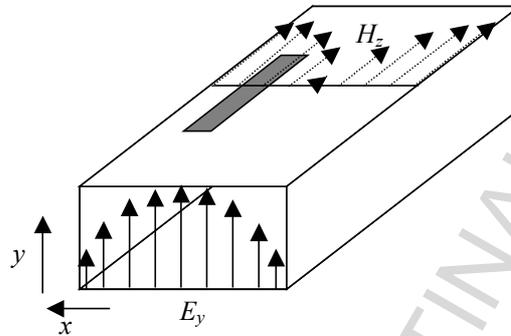


Figura 4: Guia de onda fendido.

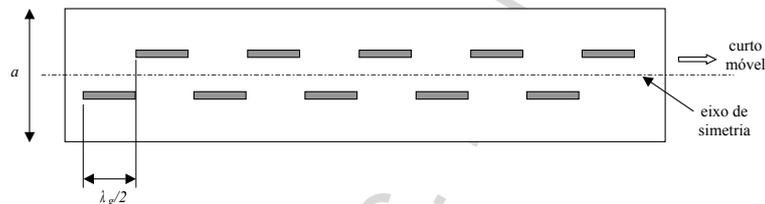


Figura 5: Vista superior do guia de onda fendido.

Note que a abertura dessa fenda perturba os campos dentro do guia, pois as linhas de corrente na parede do guia são ortogonais a  $H_z$ . Essa interrupção da corrente elétrica na região da fenda produz nela um campo elétrico na direção  $x$ . Estendendo-se a superfície superior externa do guia, formando um plano infinito, pode-se demonstrar, pelo princípio das fontes equivalentes de Huygens [1], p. 447-52, que essa fenda pode ser substituída por uma densidade superficial de corrente magnética fluindo na direção  $z$ , sendo, portanto, análoga a um dipolo elétrico (ela é um dipolo magnético), e esse é o princípio de radiação de uma antena em guia de onda fendido. Para obter-se um feixe mais estreito (maior ganho), várias fendas são abertas no guia. As fendas são espaçadas de meio comprimento de onda guiado e são abertas em lados opostos do eixo de simetria para obter-se coerência de fase, como mostrado na Figura 5. A posição do curto deve ser ajustada para se obter um máximo de corrente ( $H_z$ ) na posição das fendas.

## Parte Experimental

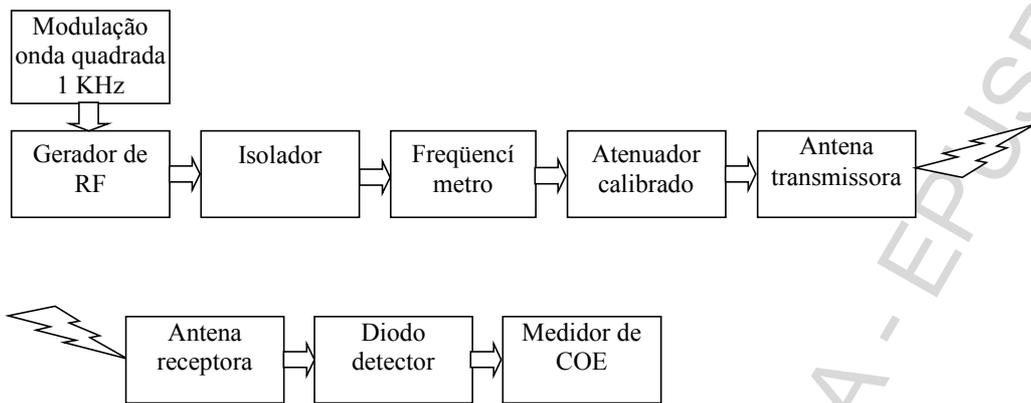
### Material Utilizado

- Gerador de RF HP8350B+83545A ou similar;
- Gerador de funções Phillips PM5133 ou similar;
- Isolador PM 7045X;
- Freqüencímetro PM 7072X;
- Atenuador calibrado PM 7101 X;

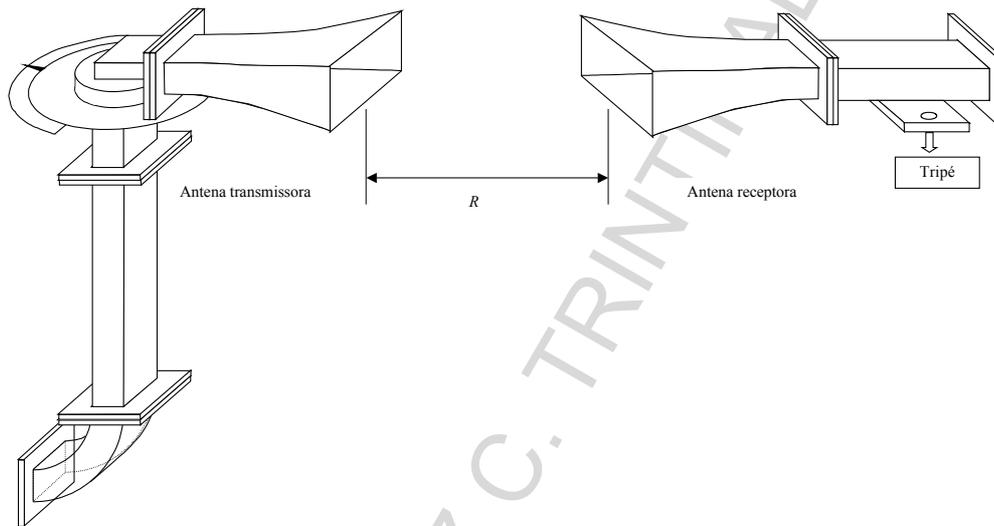
- Detector PM 7197 X ;
- Medidor de COE HP 415E ou similar;
- 3 Curvas em guia de onda – plano E – PM 7345 X;
- Curva em guia de onda – plano H – PM 7350 X;
- Junta rotatória PM 7888X;
- 3 transições guia de onda / coaxial (tipo N);
- 2 antenas corneta PM 7320X/01;
- suportes para os guias de onda;
- 2 trechos retos de guia de onda R100 (min. 10 cm);
- Curto móvel PM 7216X;
- Antena parabólica SL 19700;
- Antena em guia de onda fendido SL 19701;
- 2 antenas helicoidais pol. à direita, SL 19702/01 e uma pol. à esquerda, SL 19702/02;
- Antena em microstrip SL 19703;
- Placa plana condutora (min. 25 x 25 cm);
- Tripé e adaptador SL 19705;
- Cabos coaxiais: um curto com conectores tipo N (macho) , um longo com conectores BNC macho (pelo menos 6 m) e outros 2, curtos, com conectores BNC macho ( $\cong 1$  m cada).
- 3 transições N-coaxial/guia de onda.
- 2 chaves de fenda e parafusos/porcas.

### **Procedimento Inicial**

- 1.1. Monte o equipamento como esquematizado na Figura 6. As antenas devem ser montadas como mostra a Figura 7.



**Figura 6: Diagrama de blocos para medida de ganho e diagrama de radiação.**



**Figura 7: Montagem das antenas.**

- 1.2. Ajuste a frequência do gerador para 9 GHz, com potência nominal de saída em 20 dBm. Ajuste o atenuador variável para 30 dB.
- 1.3. Conecte, temporariamente, o medidor de COE ao conector BNC do freqüencímetro e meça a frequência da portadora de RF. Aproveite para ajustar a frequência de áudio e a banda do medidor para maximizar o sinal do medidor, se necessário. Conecte o medidor de COE, novamente, ao diodo detector da antena receptora e tire a cavidade do freqüencímetro de sintonia.
- 1.4. Separe as antenas por uma distância de 2 a 3 metros, anotando o valor dessa distância. Procure alinhar as antenas (horizontal e verticalmente) mantendo a escala da junta rotatória em 90°. Procure, também, reduzir as reflexões dos arredores. A distância entre as antenas satisfaz aos critérios de campo distante – expressão (1) ?
- 1.5. Ajuste o ganho do medidor de COE para máxima deflexão (fundo de escala). Procure, também, corrigir o alinhamento das antenas maximizando o sinal.
- 1.6. Durante as medidas, procure manter-se afastado das antenas para diminuir as reflexões indesejadas. Apesar dos níveis de potência utilizados não serem muito altos, nunca olhe de perto as aberturas das antenas.

### Diagrama de radiação da corneta

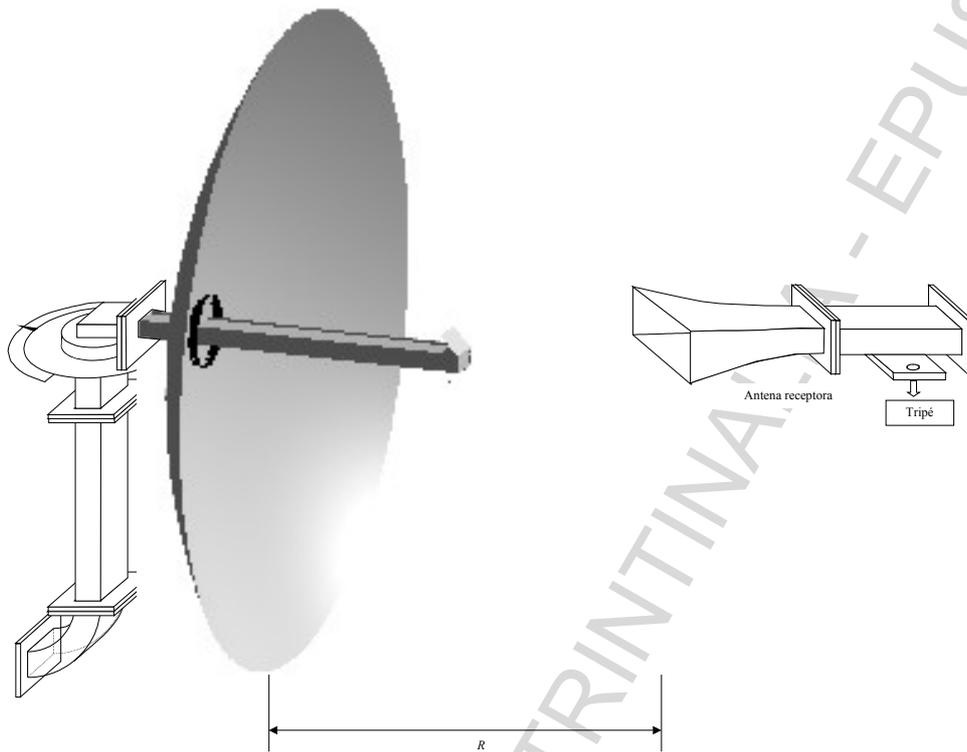
- 2.1. Gire a antena transmissora para a esquerda, em passos de  $10^\circ$ , até  $90^\circ$  da posição original. Para cada ângulo ajuste o atenuador calibrado para obter, novamente, o fundo de escala, e anote o valor dessa atenuação. Repita esse procedimento girando, agora, a antena para a direita.
- 2.2. Use os valores do item anterior para desenhar o diagrama de radiação de potência da antena corneta.
- 2.3. Com a corneta de volta à posição inicial, gire-a para a esquerda até que o sinal medido caia 3dB em relação ao sinal máximo. Anote esse ângulo e repita para o lado direito.
- 2.4. O diagrama de radiação resultou simétrico? Deveria haver alguma diferença? Justifique.

### Medida de ganho da corneta

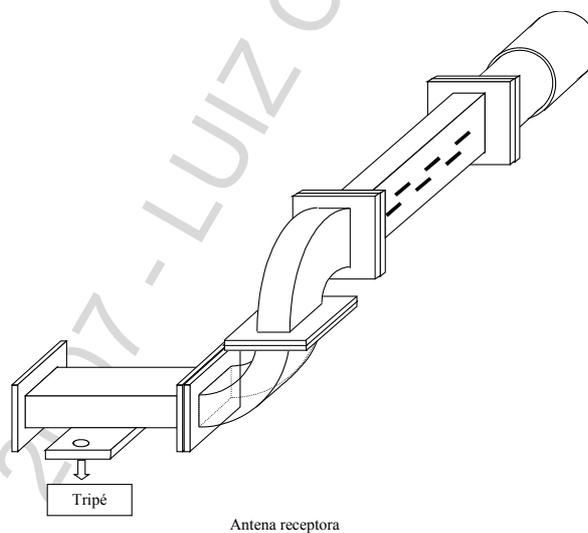
- 3.1. Ajuste o sistema como no procedimento inicial, mas coloque o atenuador calibrado em 0 dB, ajustando o medidor de COE para o fundo de escala.
- 3.2. Atenuie o sinal de 50 dB com o atenuador calibrado, remova a antena transmissora e substitua-a pelo diodo detector (não mude o ganho do medidor de COE). Ajuste, então, o atenuador calibrado para obter, novamente, máxima deflexão no medidor de COE. Anote o valor da atenuação.
- 3.3. Calcule o ganho da antena pela expressão  $G = \frac{4\pi R}{\lambda_0} \sqrt{\frac{P_R}{P_T}}$ , convertendo o resultado para dBi. Compare com o valor esperado. Justifique eventuais discrepâncias.
- 3.4. É necessário que o diodo detector esteja casado para realizar a medida de ganho? Justifique.

### Antena parabólica

- 4.1. Repita o procedimento inicial, substituindo a corneta transmissora pela antena parabólica, como mostra a Figura 8. Utilize suportes adequados para garantir a estabilidade mecânica da estrutura. A distância entre as antenas deve ser medida entre suas aberturas.
- 4.2. Repita o procedimento do item 2.1.
- 4.3. Use os valores do item anterior para desenhar o diagrama de radiação de potência da antena parabólica.
- 4.4. Meça também os ângulos de 3 dB e anote seus valores no diagrama de radiação.
- 4.5. Repita os itens 4.1 a 4.3 mudando a frequência para 9.5 GHz.
- 4.6. Gire o adaptador da corneta de  $90^\circ$  em relação ao seu eixo e meça o novo nível relativo do sinal com as antenas alinhadas. Qual a polarização da antena parabólica?



**Figura 8: Montagem da antena parabólica**



**Figura 9: Montagem da antena em guia fendido.**

### **Método das 3 antenas**

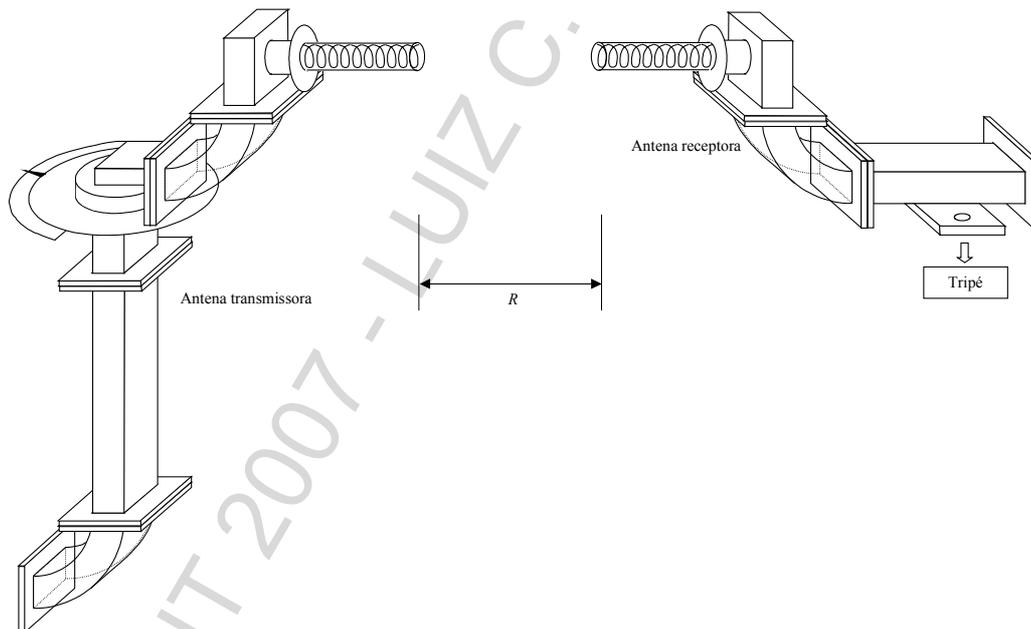
5.1. Na frequência de 9.5 GHz meça a relação  $P_R/P_T$  utilizando a antena parabólica na transmissão e a corneta na recepção, como feito nos itens 3.1 e 3.2 da Medida de ganho da corneta<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Sugestão: Coloque o atenuador calibrado em 20 dB para a montagem parábola-corneta e ajuste o medidor de COE para o fundo de escala. Sem alterar a calibração do medidor de COE anote as leituras do atenuador calibrado nas outras situações: corneta-guia fendido, guia fendido - parábola e direto.

- 5.2. Repita o item anterior, substituindo a corneta pela antena de guia fendido na recepção (mantenha a mesma distância entre as antenas). Utilize a montagem mostrada na Figura 9. Não se esqueça de ajustar o curto móvel para máximo ganho da antena.
- 5.3. Repita o item 1, substituindo, agora, a antena parabólica pela corneta na transmissão.
- 5.4. Determine os ganhos das 3 antenas.

### Antena helicoidal

- 6.1. Repita o procedimento para a Medida de ganho (itens 3.1 e 3.2), na frequência de 9 GHz, substituindo a corneta transmissora pela antena helicoidal polarizada a direita e mantendo uma corneta como antena receptora (ver antena transmissora da Figura 10).
- 6.2. Determine o ganho da antena helicoidal nessa polarização (qual é a polarização que está sendo medida?) utilizando o ganho da corneta determinado anteriormente.
- 6.3. Repita os itens 6.1 e 6.2 para a outra polarização, girando o adaptador da corneta de  $90^\circ$  em relação ao seu eixo.
- 6.4. Calcule o ganho total da antena helicoidal (como?).
- 6.5. Substitua, na recepção, a antena corneta pela antena helicoidal polarizada a direita, mantendo a outra antena helicoidal polarizada a direita na transmissão, como mostrado na Figura 10. Não se esqueça de alinhar as antenas para máximo sinal.



**Figura 10: Montagem das duas antenas helicoidais.**

- 6.6. Ajuste o ganho do medidor de COE para máxima deflexão, com o atenuador calibrado em 30 dB.
- 6.7. Troque a antena receptora pela antena helicoidal polarizada à esquerda e ajuste o atenuador calibrado para obter, novamente, máxima deflexão no medidor de COE. Anote o valor da atenuação.

6.8. Arranje as antenas como mostrado na Figura 11 e reajuste o atenuador calibrado para obter, novamente, máxima deflexão no medidor de COE. Anote essa nova atenuação, compare com o item anterior e justifique os resultados.

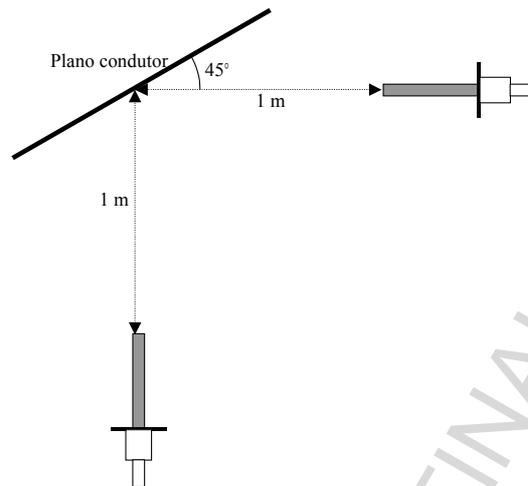


Figura 11: Montagem para experimento do espelho.

### Medida de polarização

7.1. Monte o equipamento como mostrado na Figura 12, utilizando a corneta para a transmissão e a antena helicoidal polarizada a direita para a recepção, também na frequência de 9 GHz, com uma separação de pelo menos 2 m.

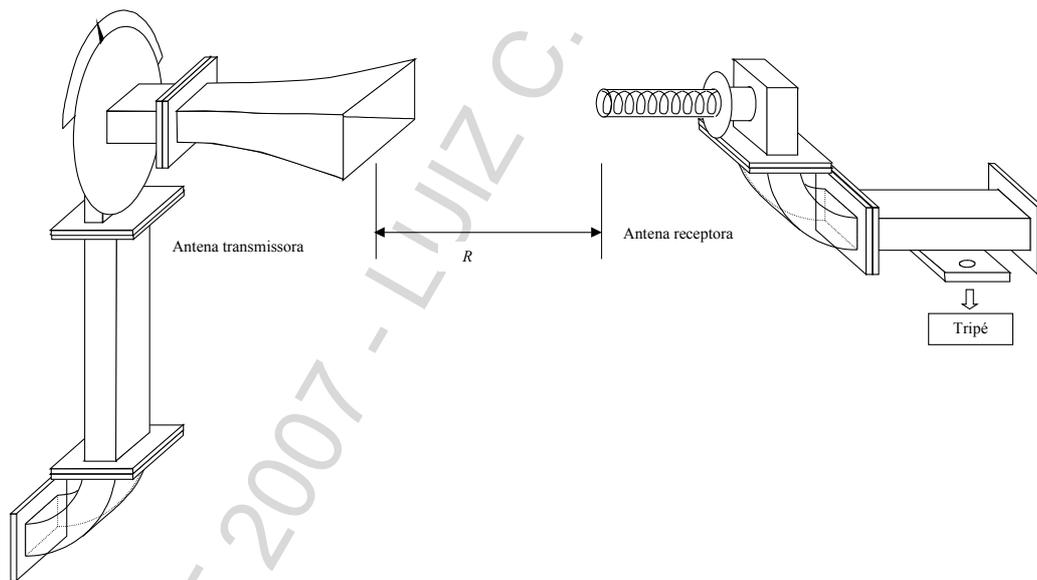


Figura 12: Montagem para medida de polarização.

7.2. Com o atenuador calibrado em 10 dB, ajuste o ganho do medidor de COE para máxima deflexão, alinhando as antenas para máximo sinal.

7.3. Gire a corneta de 10 em 10 graus, para ambos os lados, e anote os valores de atenuação para manter o sinal no medidor de COE.

7.4. Trace um gráfico da potência do sinal, em dB, em função do ângulo de rotação. Compare com o gráfico de uma antena com polarização circular ideal. Comente e justifique os resultados.

7.5. Repita os itens 7.1 a 7.4 para a antena em microstrip na frequência de 9.1 GHz.

## Referências

1. *Antenna Theory: analysis and design*, C. A Balanis. John Wiley & Sons, 1982
2. TRINTINALIA, L. C. *Experiência 3: Simulação Numérica de Antenas*. São Paulo, EPUSP, 2004.

COPYRIGHT 2007 - LUIZ C. TRINTINALIA - EPUSP