

Aula 4

Diagrama de radiação, Lóbulos, Principais tipos de diagrama, Radiação de campo próximo e Campo distante

→ formulação eletromagnética p/ problemas de antenas utiliza o formalismo vetorial.

↳ em coordenadas esféricas.

perceba que antenas radiam em todas as direções e os campos são expressos como uma função de θ e ϕ , em torno da antena.

Para evitar complicações matemáticas, geralmente associamos às aplicações do eletromagnetismo à sistemas: lineares, homogêneos e isotrópicos.

Eg's de Maxwell formal das grandezas Eletromagnéticas

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} = -j\omega \mu \vec{H}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J}_T = j\omega \epsilon \vec{E} + \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{TOTAL} \quad \longrightarrow \text{ou} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \longrightarrow \text{ou} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_T = -j\omega \rho_{TOTAL} \quad \longrightarrow \text{ou} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -j\omega \rho$$

forma harmônica no tempo das Eq's de Maxwell

forma harmônica no tempo, mas com \vec{J} e ρ mostrados explicitamente

↳ Destas Equações é possível definir o

Teorema de Poynting

que diz o seguinte: A direção do fluxo de Potência P é \perp ao produto vetorial \vec{E} por \vec{H} .

Portanto, a potência que flui através de uma superfície fechada é dado por:

$$P = \frac{1}{2} \oint_S \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{s}$$

vetor de Poynting $[W/m^2]$

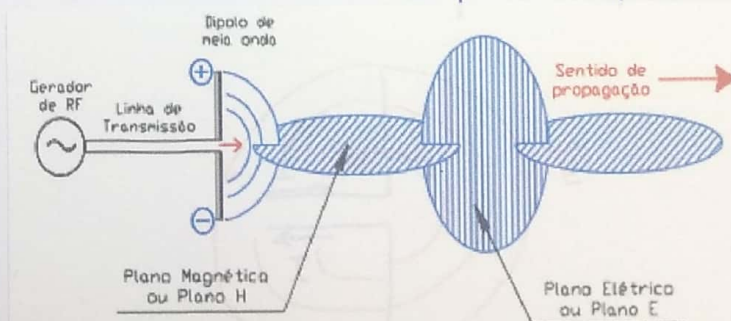
Dipolo Ideal

Descreve uma corrente de amplitude constante e eletricamente pequena, com $\Delta z \ll \lambda$.

Dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda.

São antenas pequenas

↳ exemplo: Dipolo curto



*E, em física, é o símbolo da intensidade de campo elétrico
H, em física, é o símbolo da intensidade de campo magnético*

Qualquer antena prática pode ser, primeiro, decomposta em filamentos de correntes contínuas, que são, então, subdivididos em dipolos ideais.

Os dipolos ideais também são chamados:

Dipolo elétrico de Hertz, dipolo elétrico, dipolo infinitesimal e doublet.

Usaremos o Potencial Vetor \vec{A} e o Potencial Elétrico V

Só lembrando

Potencial Elétrico $V \rightarrow$ é expresso como uma distribuição de cargas.

$$V = \int \frac{\rho_v \cdot dv}{4\pi\epsilon r}$$

Potencial Vetor Magnético $\vec{A} \rightarrow$ é obtido de uma distribuição de corrente constante no tempo.

$$\vec{A} = \int \frac{\mu \vec{J}}{4\pi r} \cdot dv$$

Agrupadas, resultam numa Condição de Lorentz (gauge) para Potenciais.

$$\boxed{\nabla \cdot \vec{A} = -\epsilon\mu \frac{\partial V}{\partial t}} \rightarrow = -\epsilon\mu j\omega V$$

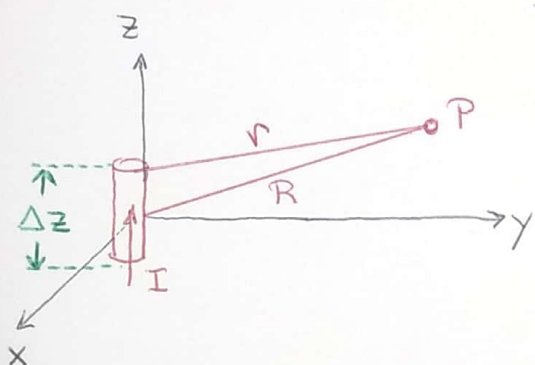
Vamos lá então!

Consideremos um elemento de corrente de comprimento Δz ao longo do eixo z , com um ponto médio na origem do sist. de coordenadas, e amplitude constante I . Logo

$$\vec{A} = \mu I \int_{-\Delta z/2}^{\Delta z/2} \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} dz$$

constante de fase

- $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$
- $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$
- $\beta = \frac{2\pi f}{c}$



como $R \approx r$, já consideramos na expressão a distância r , entre a origem e o ponto P .

Perceba que o comprimento $\Delta z \ll \lambda$, Assim:

$$\vec{A} = \frac{\mu I e^{-j\beta r}}{4\pi r} \Delta z \hat{z}$$

Usando as Eq's de Maxwell, é possível encontrar as expressões do campo \vec{H} e \vec{E} , como:

$$\vec{H} = \frac{I \Delta z}{4\pi} j\beta \left(1 + \frac{1}{j\beta r} \right) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin \theta \hat{\phi}$$

$$\vec{E} = \frac{I \Delta z}{4\pi} j\omega \mu \left[1 + \frac{1}{j\beta r} - \frac{1}{(\beta r)^2} \right] \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin \theta \hat{\theta} +$$

$$\frac{I \Delta z}{2\pi} \eta \left[\frac{1}{r} - j \frac{1}{\beta r^2} \right] \frac{e^{-j\beta r}}{r} \cos\theta \hat{r}$$

sendo $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ impedância intrínseca do meio

(espaço livre, $\eta_0 = 376,7 \Omega \approx 120\pi \Omega$)

fazendo:

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^*$$

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \left(\frac{I \Delta z}{4\pi} \right)^2 \omega \mu \beta \frac{\sin^2\theta}{r^2} \hat{r}$$

logo

$$P = \oint_S \vec{S} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{2} \left(\frac{I \Delta z}{4\pi} \right)^2 \omega \mu \beta \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin^3\theta d\theta$$

$$P = \frac{\omega \mu \beta}{12\pi} (I \Delta z)^2 \quad \text{Potência Radiada}$$

corresponde a potência dissipada, é medida que viaja p/ longe da fonte

Campo Distante

qdo o ponto de observação está eletricamente longe da antena.

$$\begin{array}{l} \text{Zona distante} \longrightarrow \text{regra} \\ r \gg \lambda \longrightarrow \text{regra} \end{array} \left. \begin{array}{l} r > \frac{2D^2}{\lambda} \\ r > 5D \\ r > 1,6\lambda \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{fontes} \\ \text{filamentares} \end{array}$$

$r > 10\lambda$ (dipolo ideal)

log

Campos Distantes elétricos e magnéticos de um dipolo ideal

$$\begin{cases} \vec{E} \approx \frac{I \Delta z}{4\pi} j\omega\mu \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\theta} \\ \vec{H} \approx \frac{I \Delta z}{4\pi} j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin\theta \hat{\phi} \end{cases}$$

Campo Próximo

O campo magnético varia com $1/r^2$, é o de uma corrente com estacionária ou de variação lenta, em outras palavras, um campo de indução.

$$\text{Zona próxima} \longrightarrow r < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad \text{L} \rightarrow \text{dimensão da antena}$$

$r \ll \lambda$ e a densidade de potência no campo próximo é máxima p/ $\theta = 90^\circ$.

$$\vec{S} = -\frac{j\eta}{2\beta} \left(\frac{I \Delta z}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{r^5} (\sin^2\theta \hat{r} - \sin 2\theta \hat{\theta})$$

Somários das regiões de campo

Antenas pequenas ($a \ll \lambda$)

campo próximo
reativo - campos
reativos dominam



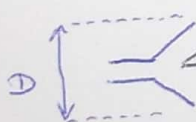
$$r = \frac{\lambda}{2\pi} = 0,16\lambda$$

campo próximo
radiante - campos
radiados dominam

$$r = 5\lambda$$

campo distante -
apenas radiação

campo próximo
reativo



$$r = 0,62 \sqrt{D^3/\lambda}$$

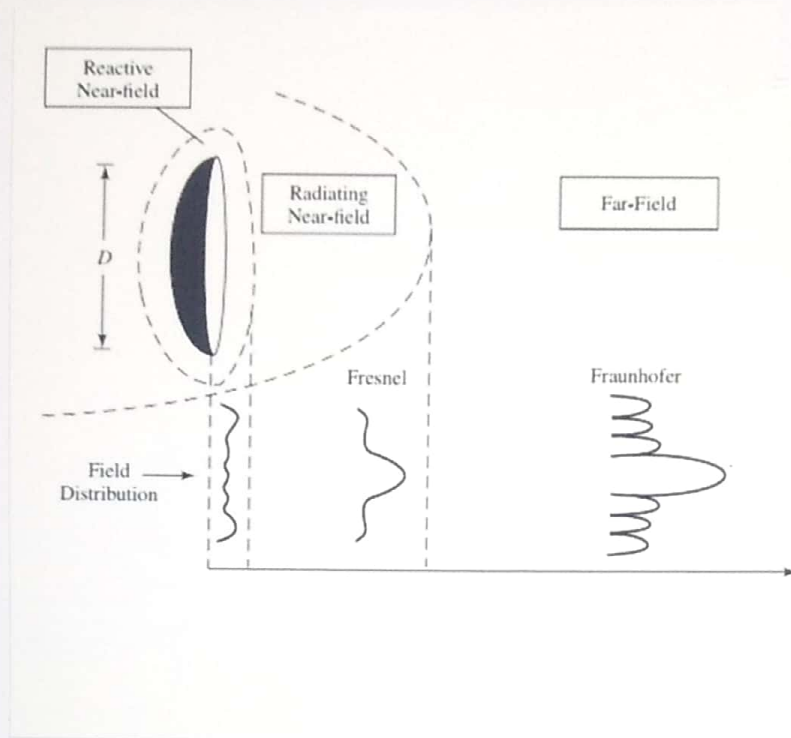
campo próximo
radiante

$$r = \frac{2D^2}{\lambda}$$

freq. em UHF e acima

campo distante

Antenas grandes ($D > 2,5\lambda$)



Importante

Em projetos de antenas com simulações ou métodos numéricos, é importante SEMPRE dizer, qual o método usado.

- ▣ método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
Eq's Maxwell como função temporal
- ▣ método da Equação Integral
- ▣ Teoria Geométrica da Difração
- ▣ método de Elementos Finitos

Diagrama de Radiação

... ou diagrama da antena, é uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coord. espaciais.

↳ geralmente, um Diag. de Radiação é determinado na região de campo distante.

As propriedades de radiação incluem:
Densidade de fluxo de Potência, Intensidade de Radiação, Intensidade de Campo, Diretividade, fase ou polarização.

↳ sistemas de coordenada esférico
↳ Diagrama de Amplitude de Campo (\vec{E} ou \vec{H})
↳ Diagrama de Amplitude de Potência

↳ usualmente traçado numa escala logarítmica ou em decibéis (dB).

↳ mostra melhor os lóbulos secundários.

Tipos de Diagrama

a. Diagrama de Campo (em escala linear): gráfico da magnitude do campo elétrico ou magnético como função do espaço angular.

b. Diagrama de Potência (com escala linear): gráfico do quadrado da magnitude do campo elétrico ou magnético como uma função do espaço angular.

c. Diagrama de Potência (em dB): gráfico da magnitude do campo elétrico ou magnético, em decibéis, com função do espaço angular.

Exemplo: Conjunto colinear de 10 fontes isotrópicas, com espaçamento $d = 0,25\lambda$ entre duas fontes adjacentes.

+ ou - é a polarização da amplitude entre os lóbulos

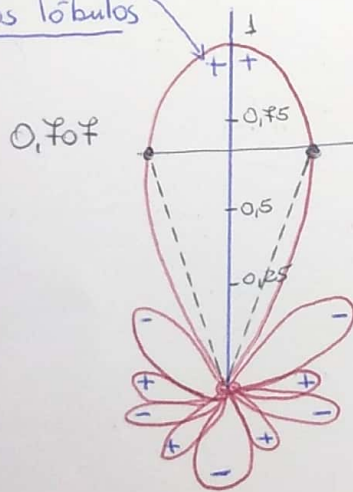


Diagrama de campo

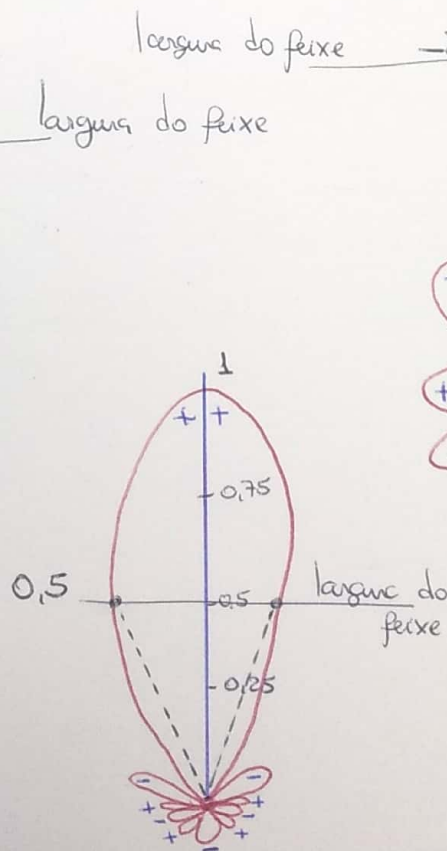


Diagrama de potência

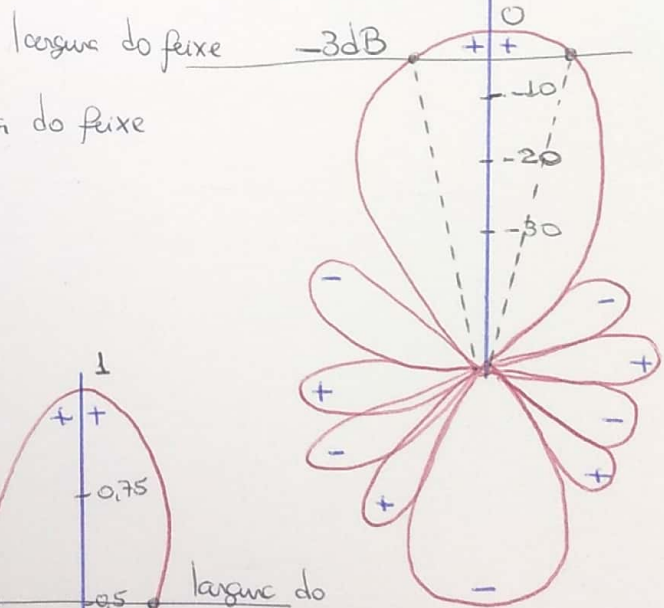
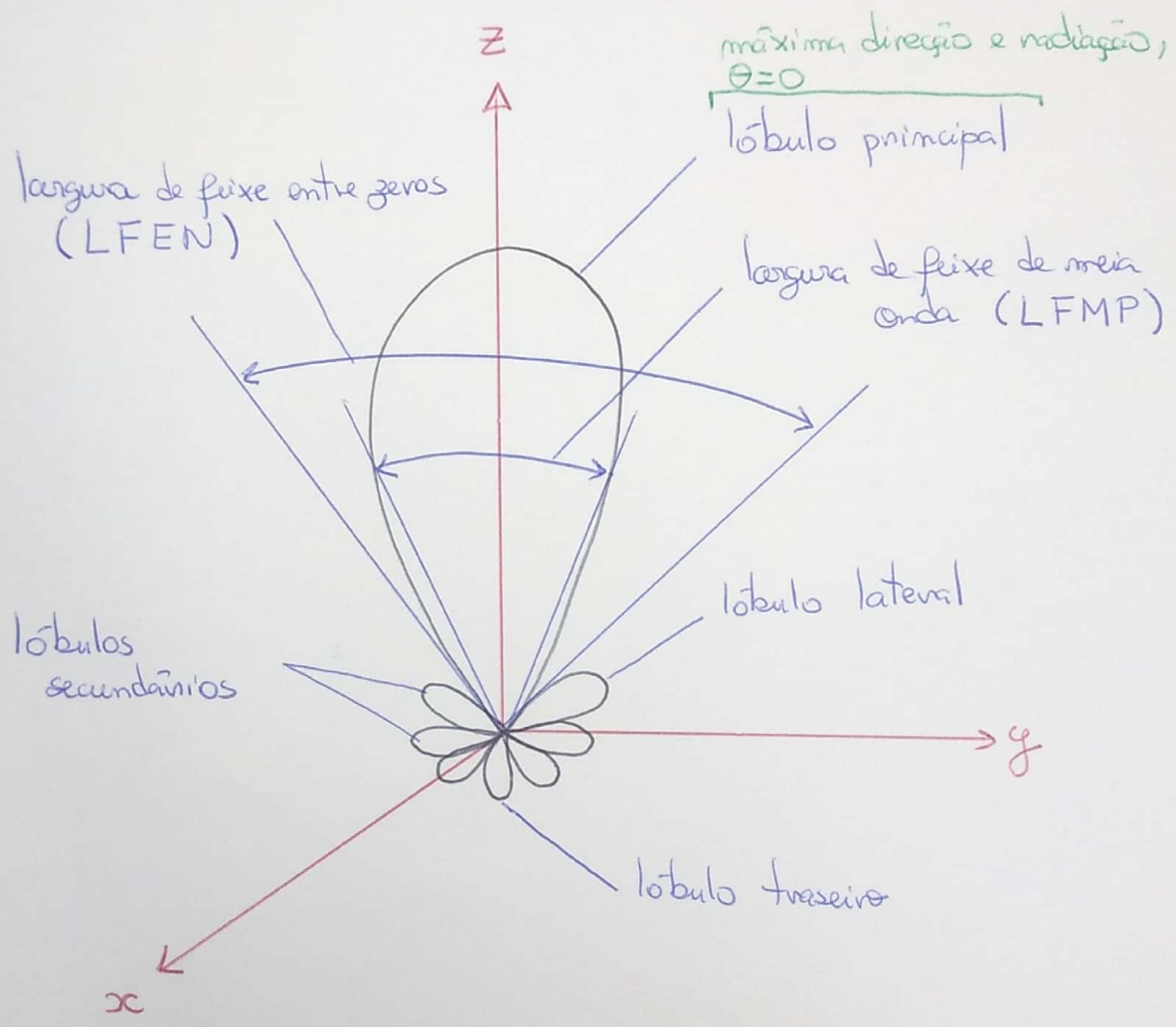


Diagrama de potência (dB)

largura do feixe é a região do diagrama onde a potência é a metade do seu valor máximo.

largura do feixe = LFMP

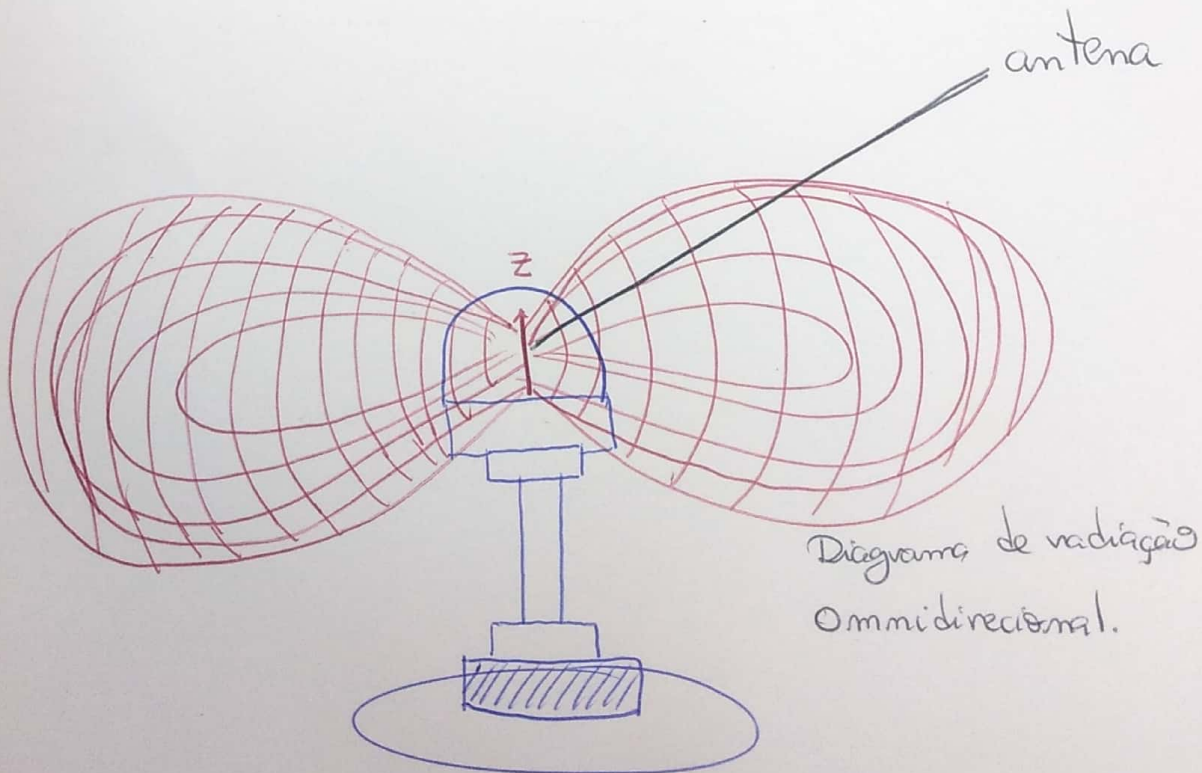


Em geral: lóbulos secundários representam radiação em direções indesejadas, e devem ser minimizados.

Radiador isotrópico; é uma antena hipotética sem perda que tem a mesma direção de radiação, ou seja, uniforme em todas as direções do espaço.

Antena direcional; tem a propriedade de radiar ou receber ODM mais eficientemente em algumas direções que em outras.

Diagrama ou Antena Omnidirecional; apresenta um diagrama não-direcional em um dado plano e um diagrama direcional em qualquer plano ortogonal.



Definições do Diagrama de Radiação

Como o diagrama de radiação é a variação do \vec{E} radiado na superfície de uma esfera com centro na antena, r é constante, assim somente \exists variação do campo \vec{E} com θ e ϕ .

É conveniente normalizar o campo para o valor máximo ser numa certa direção z , com apenas a componente θ de \vec{E} , assim:

$$\vec{F}(\theta, \phi) = \frac{E_{\theta}}{E_{\theta}(\max)} \rightarrow \text{máximo valor que } \vec{E} \text{ assume na coord. } \theta.$$

Diagrama de campo normalizado

Em geral, um diagrama de campo normalizado pode ser escrito com o produto

$$F(\theta, \phi) = \underbrace{g(\theta, \phi)}_{\text{fator de elemento}} \cdot \underbrace{f(\theta, \phi)}_{\text{fator de diagrama}}$$

para fontes na direção Z , $d\phi = \frac{E_\theta}{\eta}$



De modo que a componente radial do vetor de Poynting \vec{e} : $\frac{1}{2} E_\theta d\phi^* = \frac{|E_\theta|^2}{2\eta}$, e o

diagrama de potência normalizado é simplesmente o quadrado da magnitude do diagrama de campo: $P(\theta) = |F(\theta)|^2$.

① diagrama de potência geral é:

$$P(\theta, \phi) = |F(\theta, \phi)|^2$$

Representação do Diagrama de campo

$$|F(\theta, \phi)|_{dB} = 20 \log |F(\theta, \phi)|$$

Representação do Diagrama de Potência

$$P(\theta, \phi)_{dB} = 10 \log P(\theta, \phi) = 10 \log |F(\theta, \phi)|^2 = 20 \log |F(\theta, \phi)|$$

logo

$$P(\theta, \phi)_{dB} = |F(\theta, \phi)|_{dB}$$

Largeza de Feixe

É definido como a separação angular entre dois pontos idênticos e em lados opostos do máximo do diagrama.

LFMP = Largeza de feixe de meia Potência

LFEN = Largeza de feixe entre rulos

