



Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações Licenciatura em Engenharia Aeroespacial

Propagação e Radiação de Ondas Eletromagnéticas – PROE

Ano letivo 2023/24

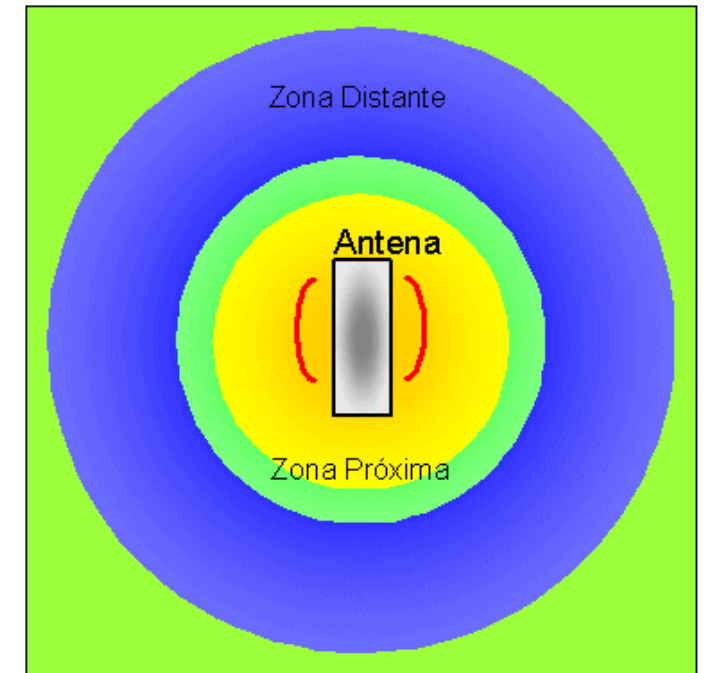
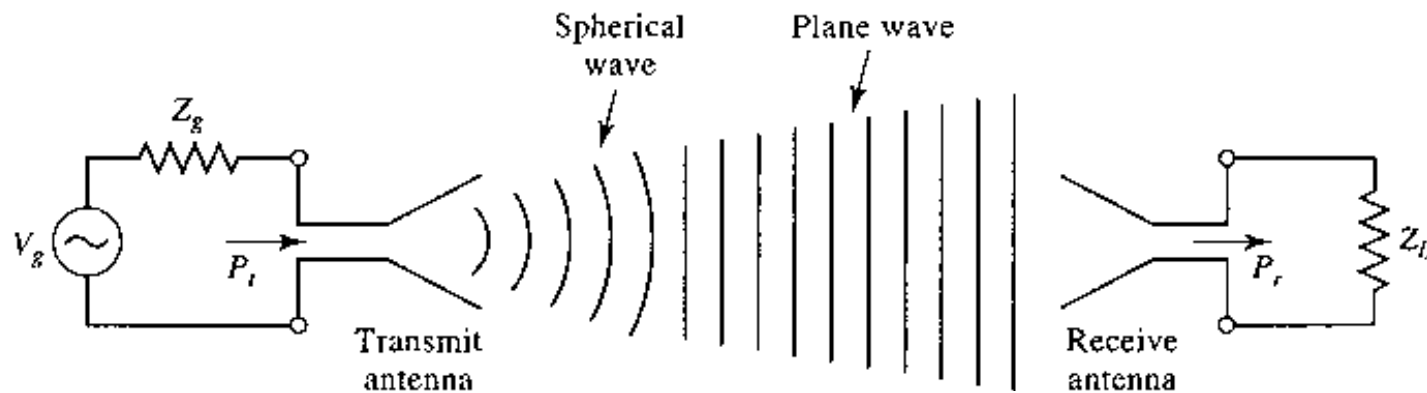
Prof. Pedro Pinho

ptpinho@ua.pt

O docente agradece o apoio na elaboração dos diapositivos ao Prof. Armando Rocha

Antena

- Dispositivo que emite ou recebe ondas eletromagnéticas com características que se adequam à aplicação a que se destinam;
- Fazem uma transição eficiente entre a propagação guiada (num guia de onda, cabo coaxial, linha de transmissão) e a propagação em espaço livre – Eficiência de radiação, promovendo uma adaptação de impedâncias entre os dois meios;



Tipos de antenas

- As antenas podem ser classificadas com base em vários critérios:
 - Geometria:
 - Dipolos, monopolos, laço, espiral, log-periódica, lente,...
 - Princípio de funcionamento:
 - Onda estacionária, onda progressiva, abertura,...
 - Dimensões (em comprimentos de onda)
 - Eletricamente pequena, ressonante,...
- Uma antena pode pertencer a várias categorias simultaneamente:
 - Por exemplo, duas antenas com a mesma geometria podem ser colocadas numa ou noutra categoria consoante as suas dimensões.



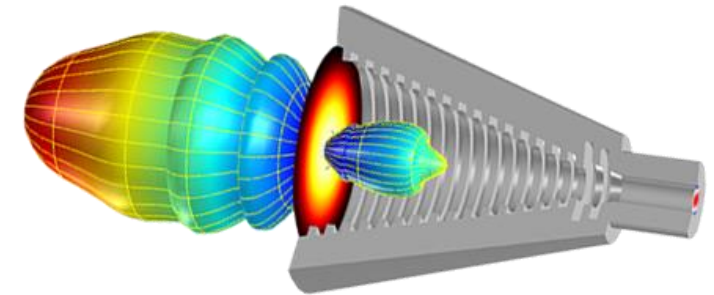
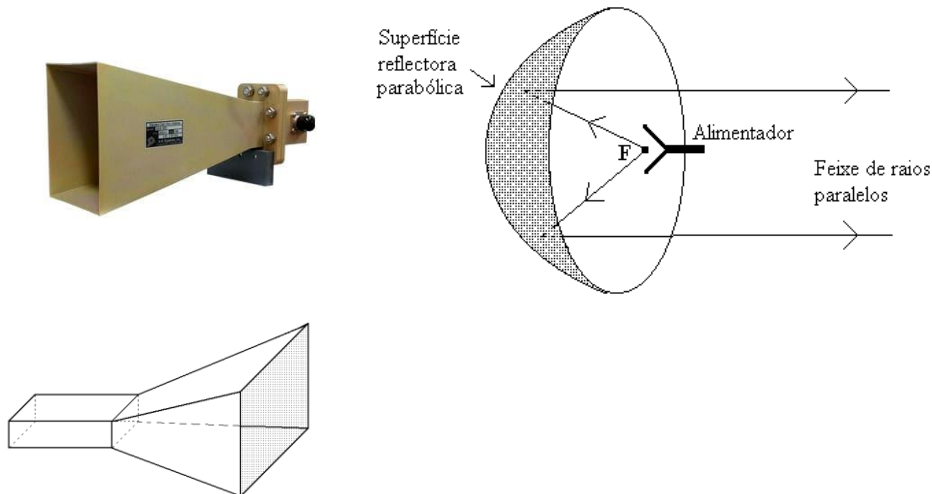
Tipos de antenas: filiformes ou filamentosas

- Antenas constituídas por um fio condutor o qual é percorrido por uma corrente elétrica;
- Tipicamente têm uma secção muito menor que o seu comprimento, tendo inúmeras aplicações.



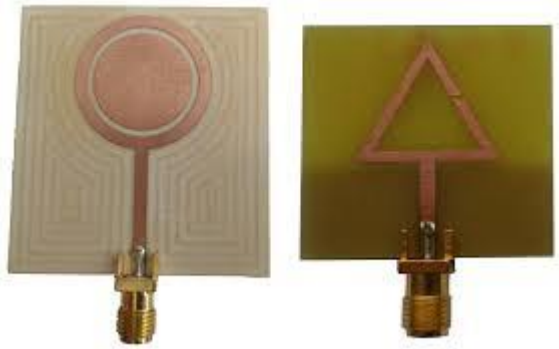
Tipos de antenas: aberturas

- Radiação a partir dos campos eletromagnéticos formados sobre as aberturas resultantes de modificações apropriadas em guias de onda (GO) metálicos;
- São utilizadas normalmente como alimentadores de refletores ou como antenas de referência em medidas laboratoriais;
- Antenas bastante diretivas e com aplicação em micro-ondas.



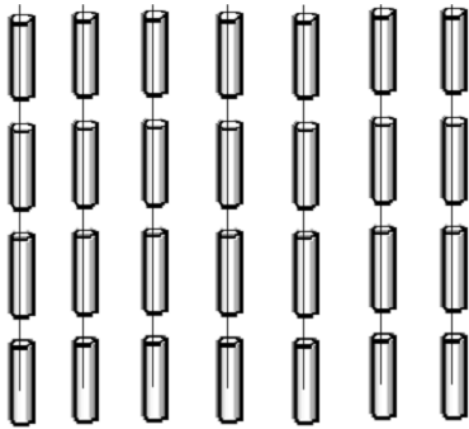
Tipos de antenas: impressas

- Estrutura metálica impressa num material não condutor (substrato);
- O baixo perfil, o preço e a versatilidade de projeto fazem com que sejam das antenas mais utilizadas atualmente.



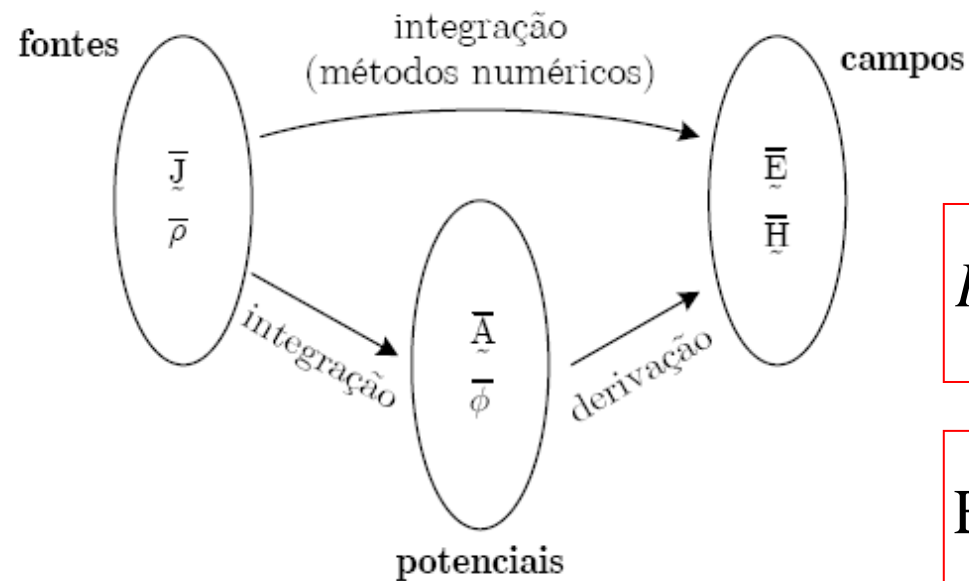
Tipos de antenas: Agregados

- Conjunto de antenas distribuídas no espaço. São flexíveis porque as suas características dependem do tipo, do número, da posição relativa e da alimentação que cada elemento tem no espaço;
- Permitem obter ganhos elevados e diagramas de radiação potencialmente controláveis.



Métodos de análise: Resolução analítica

- Resolução direta, por via analítica, das equações de Maxwell;
 - Exequível apenas para antenas com uma estrutura muito simples e utilizando algumas aproximações;
 - Requerem uma boa estimativa da distribuição de corrente na antena.



$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \epsilon E = j \omega \mu J + \nabla \left(\frac{\rho}{\epsilon} \right)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$$

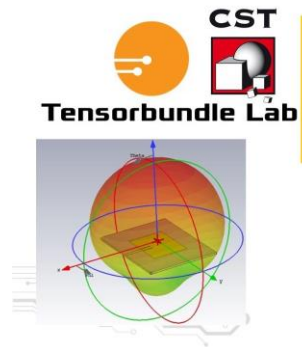
$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-j\beta R}}{R} dV$$

$$E = -j\omega \vec{A} - j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{A})$$

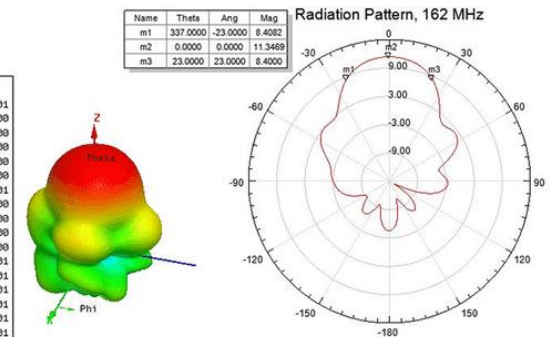
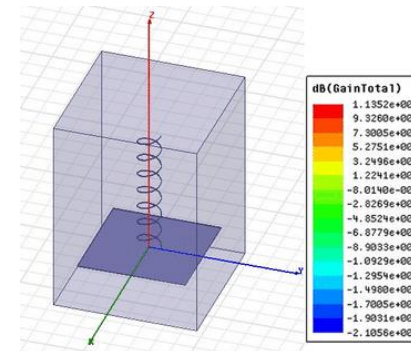
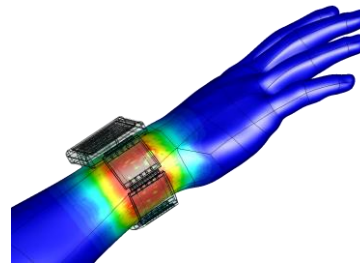
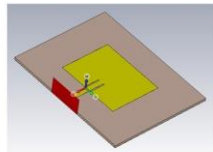


Métodos de análise: Simulação eletromagnética

- Resolução numérica, utilizando simulação eletromagnética, das equações de Maxwell;
 - Exequível para qualquer antena, embora dependendo da dimensão do problema possa ser necessário um grande poder computacional;
 - Resultados simulados muito próximos dos resultados medidos;
 - Diversos métodos de simulação consoante o problema em análise.



**Microstrip
Patch Antenna
2.4 GHz**



Mecanismo de radiação: Equações de Maxwell

➤ Meio homogêneo, linear, isotrópico

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + J$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$J = \sigma E + J_g$$

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon E = j\omega \mu J + \nabla \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)$$

Equação de onda não homogênea, cuja resolução analítica é bastante complexa

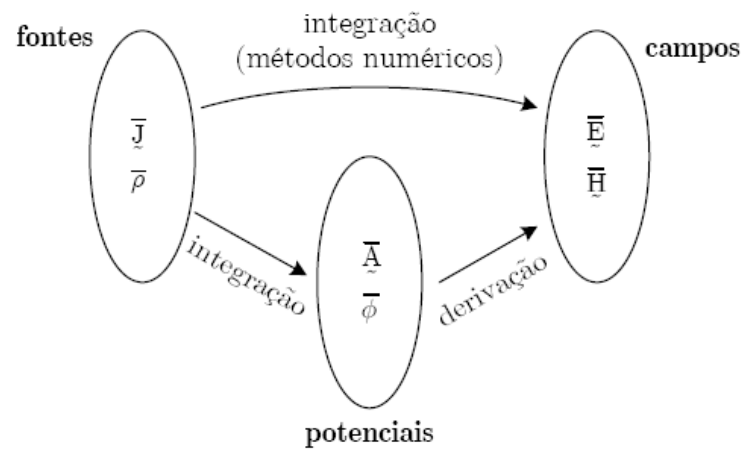
➤ Solução: Utilização de Potenciais;

- Solução matemática válida, mas em problemas simples.

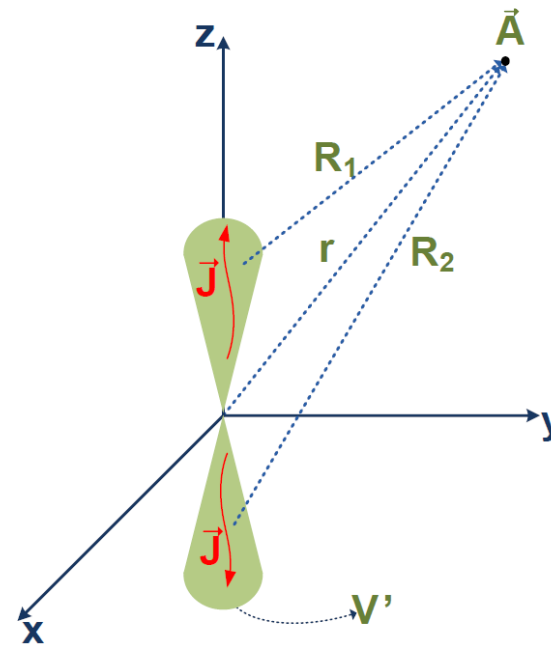


Resolução das equações de Maxwell

➤ Potencial vetor \vec{A} e sua relação com os campos:



$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-j\beta R}}{R} dV$$



$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{A})$$

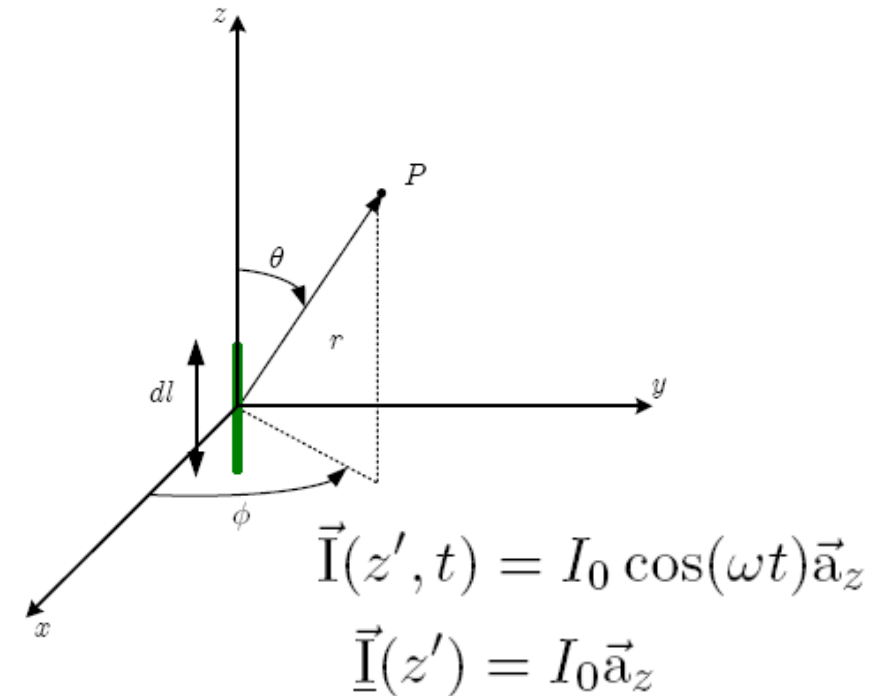
Dipolo infinitesimal: definição

➤ Também conhecido como dipolo de Hertz;

- Antena linear, teórica, infinitamente fina e de comprimento dl infinitesimal, no limite pode ser considerada como uma fonte pontual;
- Antena fundamental':
 - Campos criados por antenas filamentosares podem ser obtidos por integração do campo de sucessivos dipolos elementares de Hz

➤ Etapas para a obtenção dos campos eletromagnéticos:

- 1) Cálculo do potencial vetor \vec{A} ;
- 2) Expressar o potencial vetor em coordenadas esféricas;
- 3) Cálculo dos campos em coordenadas esféricas;
- 4) Análise dos campos em função das zonas de radiação;
- 5) Obtenção do campo na zona distante de radiação.



Dipolo infinitesimal: campos eletromagnéticos

➤ Em coordenadas esféricas:

$$\underline{A}_r = \underline{A}_z \cos \theta = \frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta$$

$$\underline{A}_\theta = -\underline{A}_z \sin \theta = -\frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta$$

$$\underline{A}_\phi = 0$$

➤ Campo magnético: $\underline{\vec{H}} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \underline{\vec{A}}$

$$\underline{H}_r = 0$$

$$\underline{H}_\theta = 0$$

$$\underline{H}_\phi = j \frac{k I_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr}$$

Campo elétrico: $\underline{\vec{E}} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \underline{\vec{H}}$

$$\underline{E}_r = \frac{Z I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr}$$

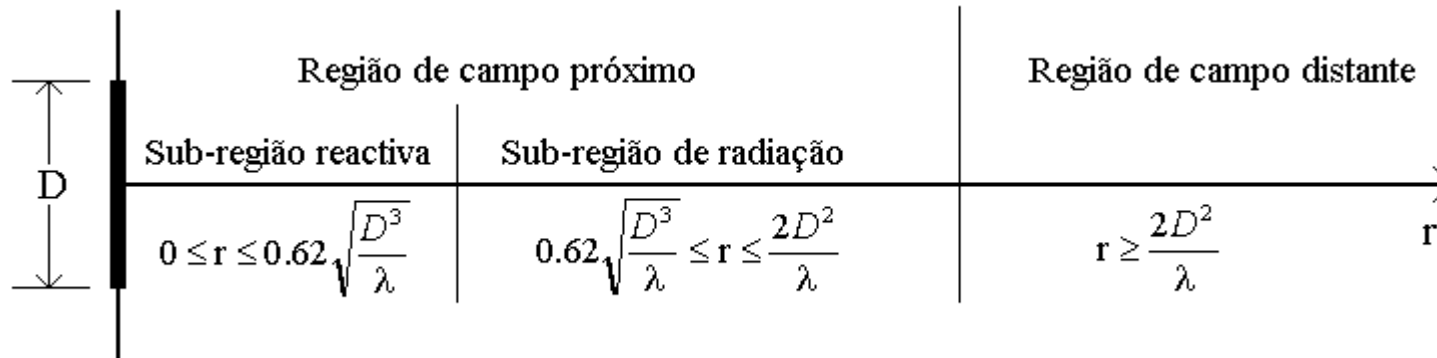
$$\underline{E}_\theta = j \frac{Z I_0 k l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr}$$

$$\underline{E}_\phi = 0$$

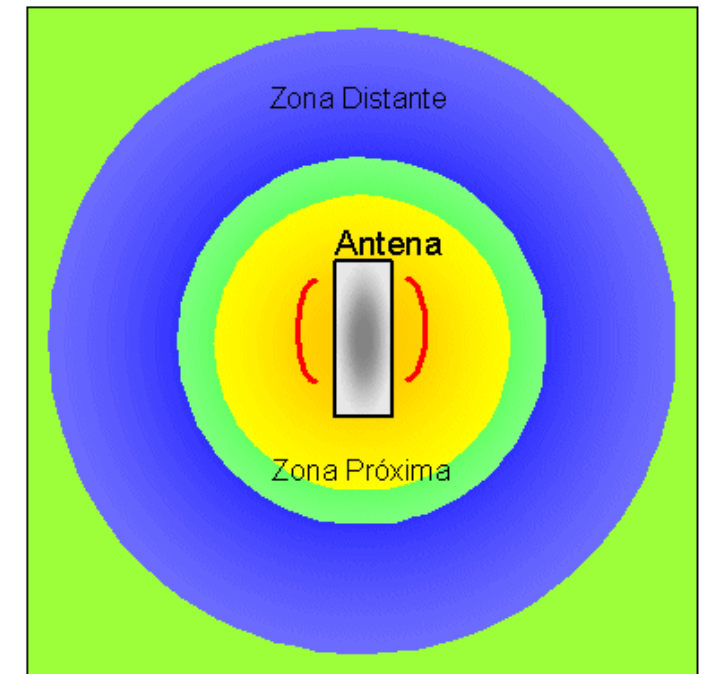


Dipolo infinitesimal: zonas de radiação

- Existem parcelas que decaem com $1/r^3$, outras com $1/r^2$ e outras com $1/r$. Se nos afastarmos da antena, existirá uma distância a partir da qual apenas as parcelas com $1/r$ têm relevância.



D é por referência a maior dimensão da antena



Dipolo infinitesimal: campos eletromagnéticos em zona distante de radiação

➤ Para pontos muito afastados da antena (ou seja, na zona distante de radiação) os campos eletromagnéticos são dados por:

$$\underline{E}_\theta = j \frac{Z k I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin \theta$$

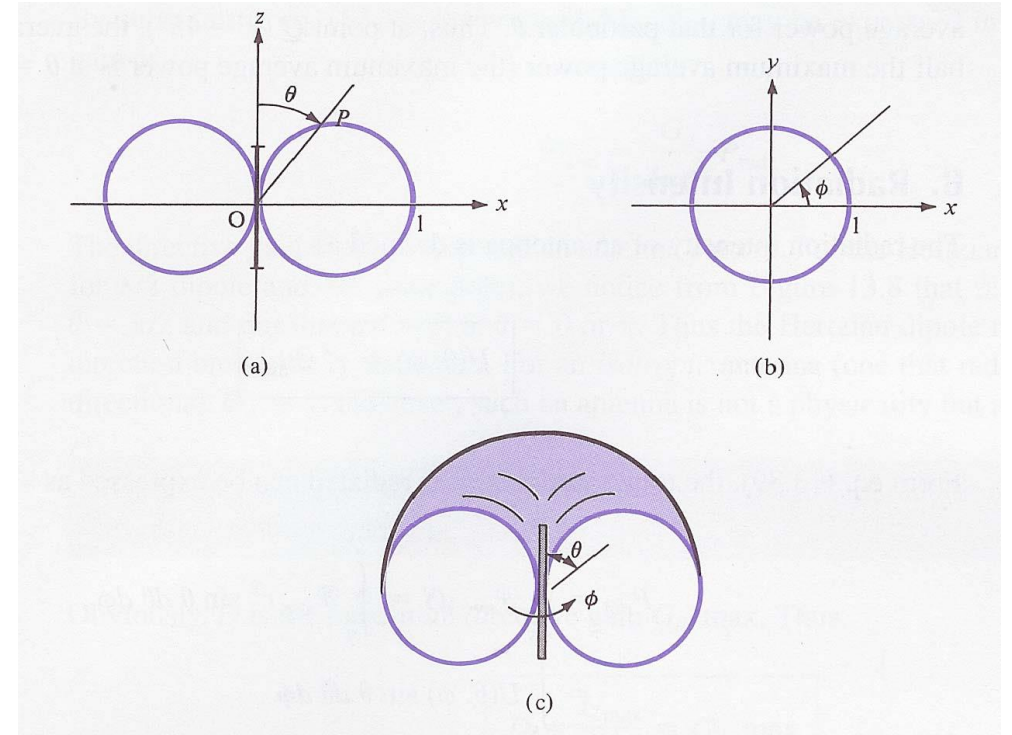
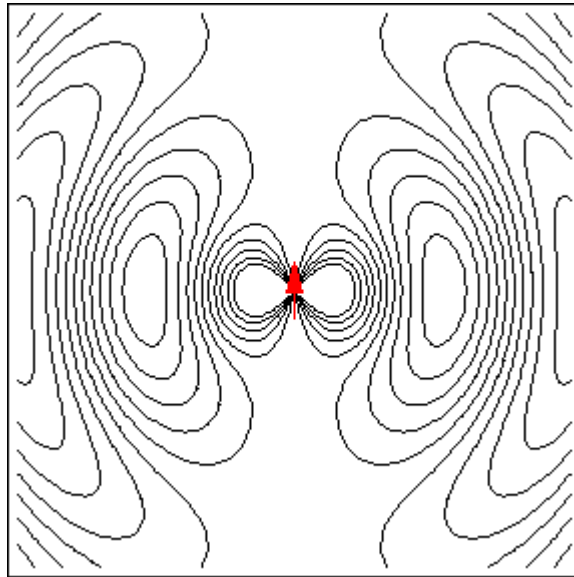
$$\underline{H}_\phi = j \frac{k I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin \theta$$

$$\underline{E}_r = 0$$

$$\underline{E}_\phi = 0$$

$$\underline{H}_r = 0$$

$$\underline{H}_\theta = 0$$



Exercício

- Considere uma ligação via rádio em que as antenas emissora e recetora são dipolos de Hertz com $l = \lambda/50$ e distanciadas de 2 km. Admita que as antenas estão alinhadas segundo a direcção de máxima radiação. Se a sensibilidade do recetor for de 2×10^{-3} V/m, calcule a corrente de alimentação mínima, a potência total radiada e a resistência de radiação do dipolo.
- Para a mesma antena emissora do problema anterior calcule o campo disponibilizado à mesma distância de 2 km mas para pontos de elevação de $15^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 75° relativamente ao eixo de máxima radiação.



Parâmetros fundamentais de antenas

➤ São parâmetros que permitem caracterizar o desempenho de uma antena:

- Potência Radiada;
- Intensidade de Radiação;
- Diretividade;
- Rendimento de radiação;
- Ganho;
- Diagrama de radiação;
- Impedância de entrada;
- Área Efetiva;
- Polarização das antenas;
- Largura de banda.



Parâmetros fundamentais: Densidade de potência

➤ Vetor de *Poynting*

- É uma densidade de potência instantânea (W/m²)

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

- Em regime harmónico sinusoidal, estamos interessados no valor médio da densidade de potência

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} R \{ \vec{E} \times \vec{H}^* \} \Rightarrow |S| = \frac{|\vec{E}|^2}{2Z} = \frac{Z|\vec{H}|^2}{2}$$

$$|S| = \frac{|\vec{E}|^2}{2Z} = \frac{I_0^2 Z \beta^2 l^2}{32\pi^2 r^2} \sin^2 \theta$$

- A potência radiada é obtida calculando o fluxo de $\langle S \rangle$ através de uma superfície fechada.

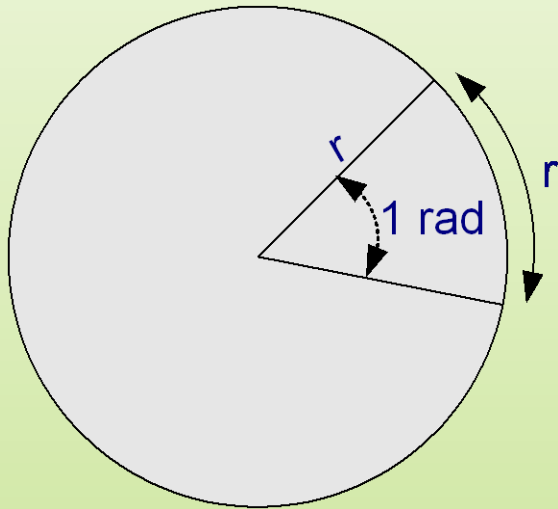
$$P_{rad} = \oint_S \langle S \rangle \cdot dS \Rightarrow P_{rad} = \oint_S |S| r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$P_{rad} = 40\pi^2 \left(\frac{I_0 l}{\lambda} \right)^2$$

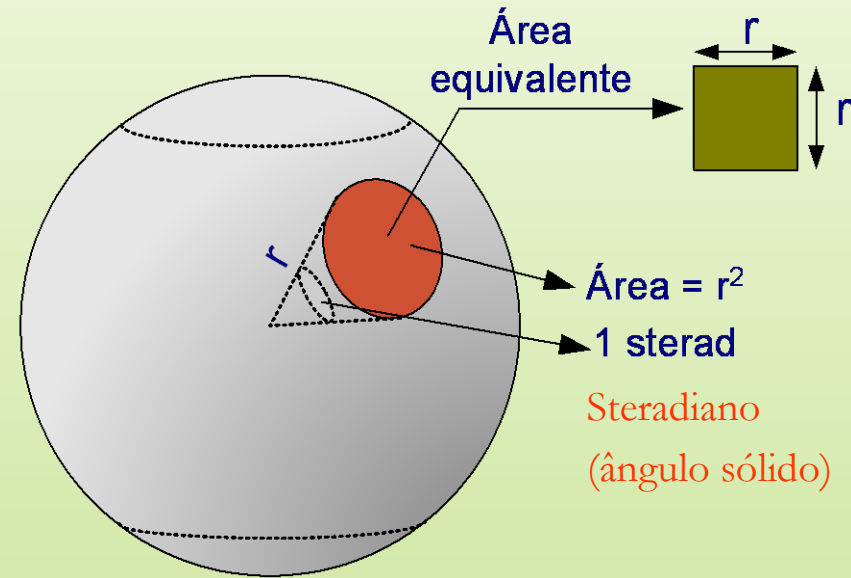


Noção de radiano e sterradiano

➤ Sterradiano é o ângulo sólido que tendo o seu vértice no centro duma esfera de raio r , a intersecta através duma superfície com uma área igual a r^2



1 circunferência = 2π rad



1 esfera = 4π sterad



Parâmetros fundamentais: Intensidade de radiação

- A intensidade de radiação $U(\theta, \phi)$ é a potência radiada por unidade de ângulo sólido W/sr .
- Na zona distante de radiação o campo é proporcional a $1/r$, S é proporcional a $1/r^2$ e portanto $r^2 S$ será independente da distância. Define-se então intensidade de radiação como sendo:

$$U(\theta, \varphi) = r^2 S(r, \theta, \varphi)$$

$$U = r^2 S = \frac{I_0^2 Z \beta^2 l^2}{32\pi^2} \sin^2 \theta$$

- Pode então também escrever-se que

$$P_{\text{rad}} = \oint_{\Omega} U(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$



Parâmetros fundamentais: Diretividade

- É uma medida da concentração da potência radiada pela antena numa determinada direção.
 - Quantificação de quanto é que uma antena radia numa dada direção;
 - Define-se como a razão entre a intensidade de radiação que a antena produz numa direção com aquela que seria produzida por uma antena isotrópica radiando a mesma potência.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_o}$$

$$U_o = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi}$$

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{\text{rad}}}$$

- A diretividade é adimensional mas é comum exprimi-la em unidades logarítmicas $D_{\text{dB}} = 10\log(D)$;



Parâmetros fundamentais: rendimento de radiação

➤ Da potência P_{in} entregue a uma antena, parte será radiada P_{rad} e a restante perde-se na própria antena P_p .

- Define-se então rendimento ou eficiência de radiação como sendo a razão entre a potência radiada e a potência aceita.

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_p} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_p}$$

$$R_p = \frac{L}{\sigma A_{ef}} = \frac{L}{\sigma 2\pi a \delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$$

➤ Se se considerar a potência fornecida pelo gerador existirá uma perda adicional de potência se a ligação entre a linha de alimentação e a antena estiver desadaptada. No entanto essa perda não é contabilizada no rendimento de radiação.



Parâmetros fundamentais: ganho

- Uma antena não possui ganho do sentido clássico do termo, isto é, a potência radiada por uma antena nunca poderá ser superior à potência aceita pela antena;
- O ganho de uma antena é um ganho obtido por comparação da antena com uma outra antena de referência. A antena de referência normalmente utilizada é a antena isotrópica sem perdas;
- Define-se então ganho como sendo a razão entre a intensidade de radiação da antena e a intensidade de radiação que se obteria se toda a potência aceita pela antena fosse radiada por uma antena isotrópica sem perdas;

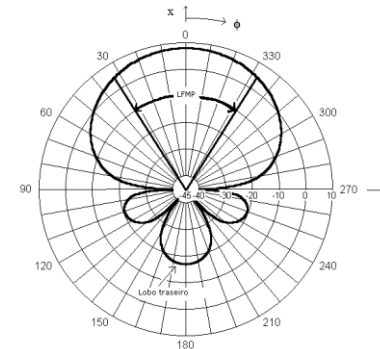
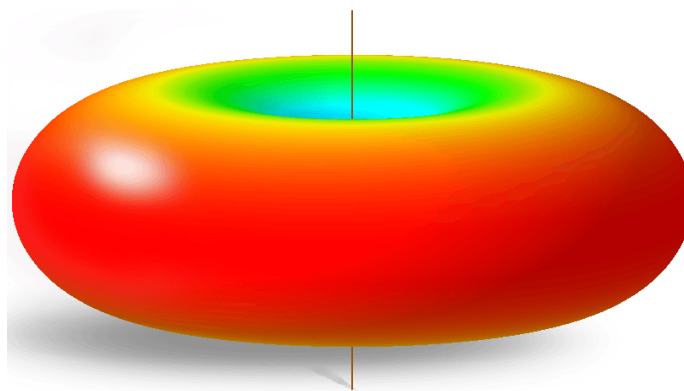
$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{\text{in}}}$$

$$G = \eta D$$

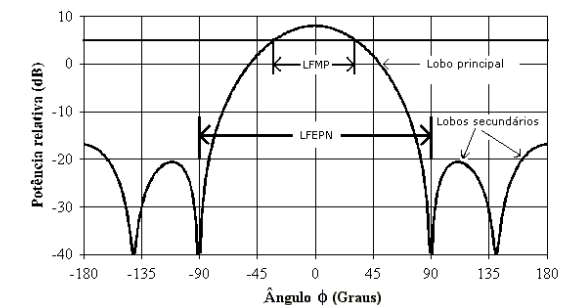
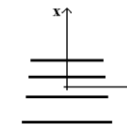


Parâmetros fundamentais: diagrama de radiação

- É uma representação gráfica da forma como uma antena distribui o campo ou a potência pelo espaço;
- A propriedade representada pode ser o campo elétrico ou magnético, a diretividade, o ganho, etc;
- Normalmente refere-se à zona distante de radiação e pode ser uma representação 3 D ou 2 D, quer em unidades lineares ou em unidades logarítmicas.



Coordenadas polares



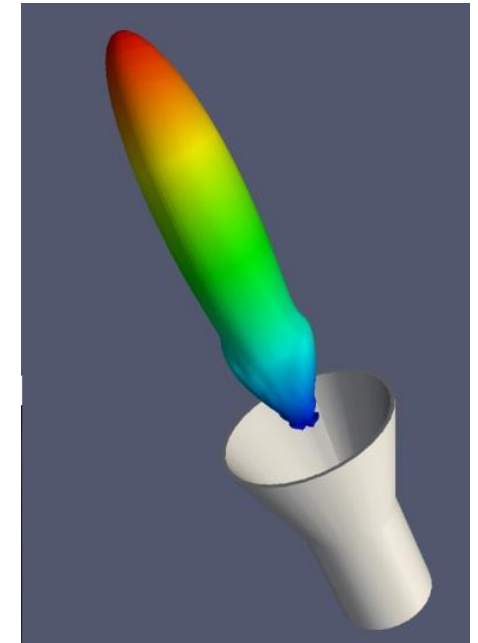
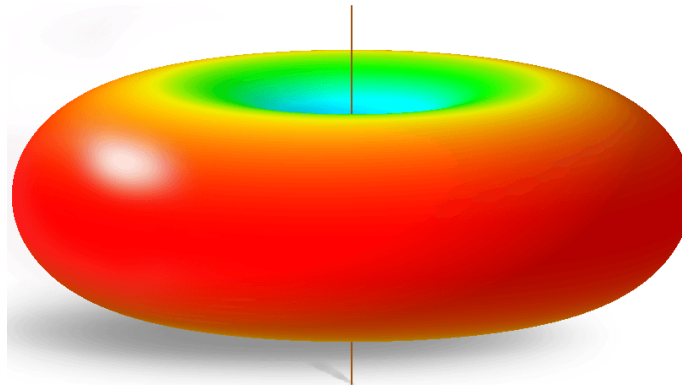
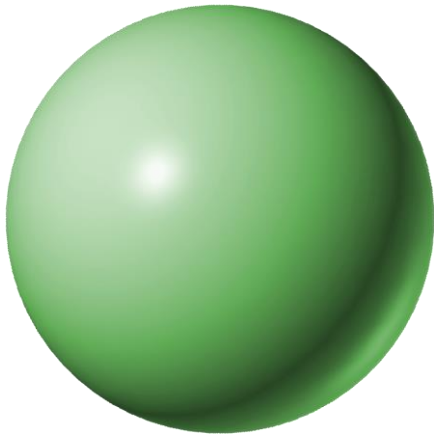
coordenadas cartesianas



Parâmetros fundamentais: diagrama de radiação

➤ Principais tipos de diagramas de radiação:

- Isotrópico → sem direção de radiação privilegiada;
- Omnidirecional → máximo de radiação num plano;
- Diretivo → máximo de radiação numa única direção.



Parâmetros fundamentais: diagrama de radiação diretivo

➤ Lobo: região do diagrama de radiação contida entre duas direções de radiação nula ou muito fraca;

- Lobo principal: é o lobo que contém a direção de máximo,
- Lobo secundário: é todo o lobo que não é principal.

➤ Largura de feixe: caracteriza a abertura do lobo principal.

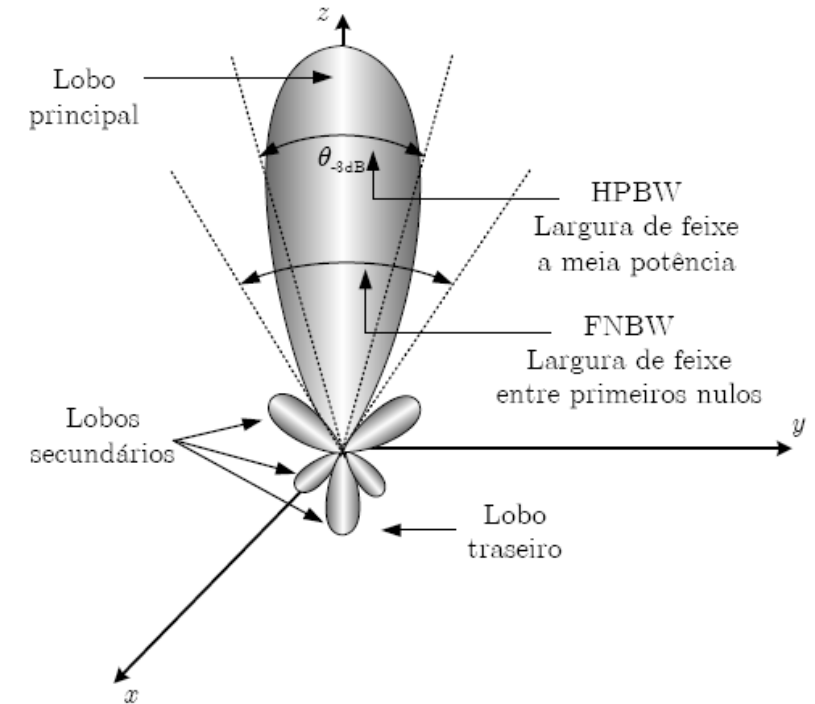
- HPBW (*Half Power BeamWidth*)
- FNBW (*First Null BeamWidth*)

➤ Nível de lobos secundários:

$$SLL = 10\log\left(\frac{U_{max}}{U_{sec}}\right)$$

➤ Relação frente trás:

$$FBR = 10\log\left(\frac{U_{max}}{U_{tras}}\right)$$



Parâmetros fundamentais: impedância de entrada

- É uma grandeza complexa definida como sendo a razão entre as amplitudes complexas da tensão e da corrente aos terminais de alimentação da antena:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a$$

- A parte real permite contabilizar a potência dissipada na antena (quer por radiação quer por perdas). Normalmente assume se que:

$$R_a = R_r + R_p$$

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{I_{in}^2}$$

$$R_p = \frac{2P_p}{I_{in}^2}$$

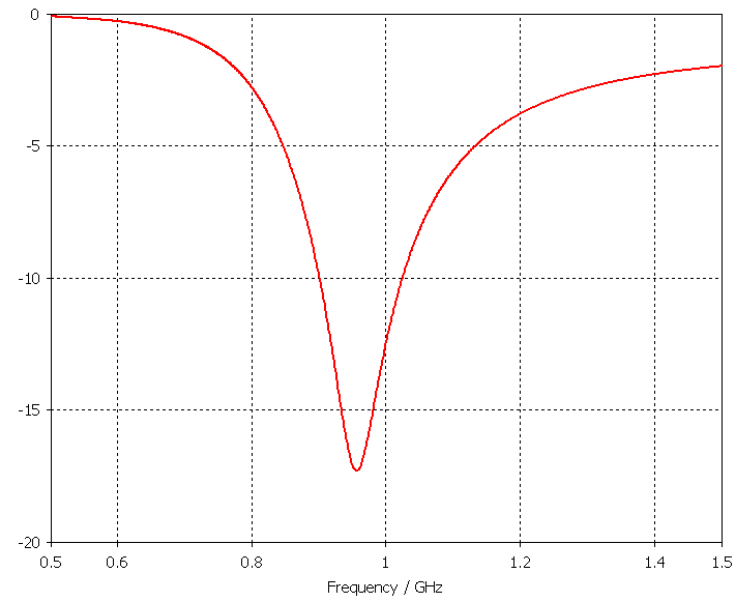
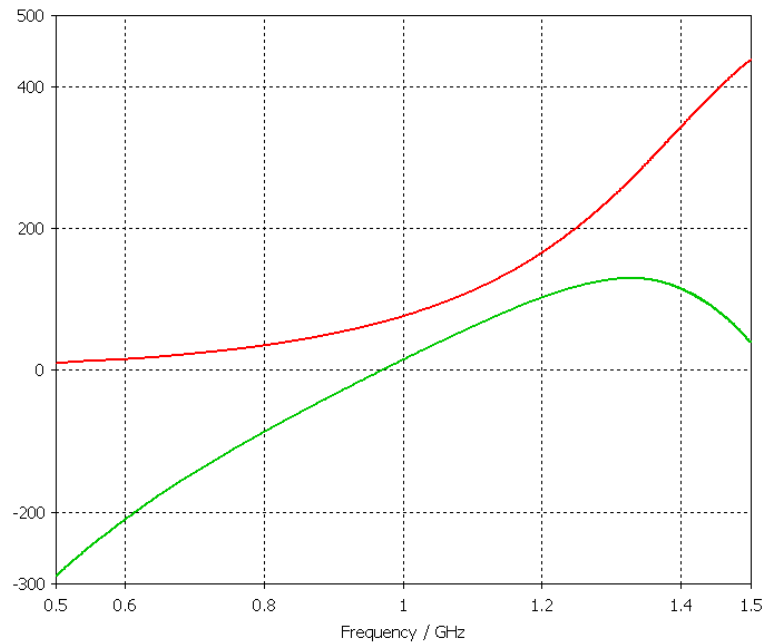
- P_{rad} é a potência radiada, P_p é a potência dissipada e I_{in} é a amplitude da corrente nos terminais de alimentação da antena;
- A parte imaginária está relacionada com a potência reativa armazenada na zona próxima da antena.



Parâmetros fundamentais: impedância de entrada

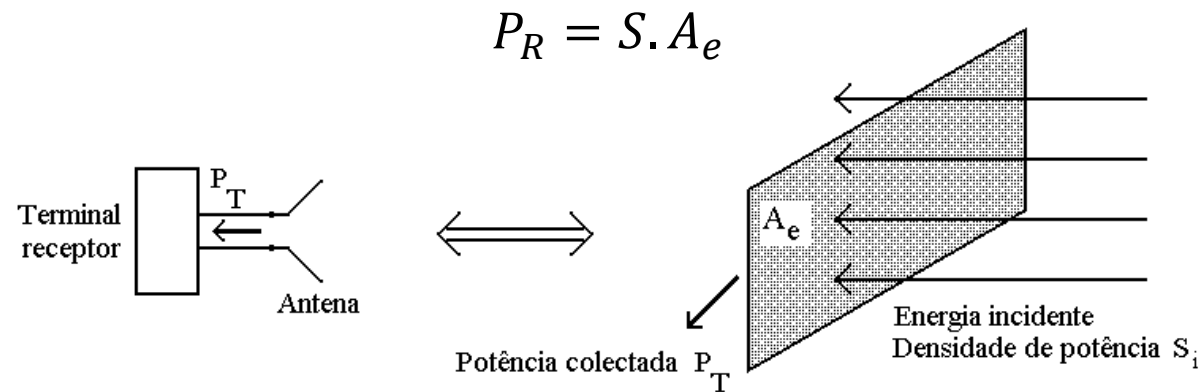
➤ Exemplo de impedância de entrada de um dipolo cilíndrico

- O parâmetro S_{11} mede a desadaptação relativamente a uma linha de alimentação com impedância característica definida (pode ser $Z_0 = 50 \Omega$)



Parâmetros fundamentais: área efetiva

- Traduz a capacidade da antena em captar energia eletromagnética.
 - Define-se como a área que, colocada no mesmo local da antena, captaria a mesma potência desta. Deste modo pode-se considerar que a antena se comporta como uma dada área coletora A_e que capta a potência P_T .
 - Pode ser vista como a relação entre a densidade de potência que incide na antena e a potência entregue pela antena a uma carga adaptada;



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

- Para qualquer antena, a relação entre a área efetiva e ganho é constante!



Parâmetros fundamentais: polarização

➤ Polarização de uma antena

- Em emissão é definida como sendo a polarização da onda emitida pela antena numa determinada direção;
- Em recepção é definida como sendo a polarização da onda que, incidindo na antena segundo uma determinada direção, permite obter a máxima potência;

➤ Para que haja máxima transferência de potência numa ligação entre duas antenas é necessário que estas tenham a mesma polarização. Caso contrário, existirá uma perda no sinal recebido.



Exercício

➤ Considere uma antena fictícia cujo campo elétrico na zona distante de radiação é dado por:

$$E_{\theta} = \frac{K}{r} \sin \theta \sin \varphi \quad [V/m]$$

- Determine a diretividade da antena. ($D=3\sin^2\theta\sin^2\phi$; $D_{\max}=3$)
- A área efetiva máxima. ($A_{\text{ef}}=3\lambda^2/4\pi$)
- Esboce o diagrama de radiação nos planos xOy , yOz e xOz .
- Determine a largura de feixe a 3 dB no plano xOy .



Fórmula de Friis

➤ Modelo utilizado para prever o sinal recebido quando não há nenhum obstáculo entre o emissor e o receptor (espaço livre) e as antenas se encontram em campo distante.

- Por exemplo ligação em feixes hertzianos em linha de vista.

➤ A densidade de potência, em $[W/m^2]$, a uma distância d é dada por:

$$S = \frac{P_E}{4\pi d^2} G_E$$

➤ Na antena de receção, a potência recebida é dada por : $P_R = S \cdot A_e$

$$P_R = \frac{P_E}{4\pi d^2} G_E \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$$

$$P_R = P_E G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$



Fórmula de Friis

➤ Em telecomunicações é comum utilizar-se as grandezas em unidades logarítmicas, pelo que a potência recebida é dada por:

$$P_R = P_E + G_E + G_R - L_{FS}$$

- Sendo L_{FS} (perdas em espaço livre) dadas por:

$$L_{FS} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)$$

- Que resulta em:

$$L_{FS} = 32.4 + 20 \log(d_{[km]}) + 20 \log(f_{[MHz]})$$

- Fórmula de Friis prevê perdas a:
 - Crescer 20 dB/década com a distância d ;
 - Crescer 20 dB/década com a frequência f ;



Intensidade do campo recebido

- A densidade de potência radiada por uma antena com um ganho G_E na direção do recetor e a uma distância d é dada por:

$$S = \frac{P_E}{4\pi d^2} G_E$$

$$S = \frac{|E|^2}{2Z_0}$$

- Então temos que:

$$E_{[V/m]} = \frac{\sqrt{60P_E G_E}}{d}$$

$$H_{[A/m]} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{P_E G_E}{240\pi^2}}$$

- Ao produto $P_E G_E$ é usual chamar-se de potência isotrópica radiada efetivamente (PIRE) ou o termo em inglês EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*)
 - 2400,0 – 2483,5 MHz (banda de 2,4 GHz) - a potência não pode exceder 100 mW EIRP (20 dBm);



Exercício

➤ Considere uma ligação por feixe hertziano na frequência de 15GHz, numa distância de 20 km. A potência de emissão é de 15W e os ganhos das antenas de emissão e receção são de 30 dB_i.

Calcule:

- A atenuação de espaço livre;
- A potência total recebida em dB_w, dB_m e W;
- A amplitude do campo elétrico e magnético na antena de receção.



Equação do RADAR (RAdio Detection And Ranging)

➤ Exprime o alcance máximo do radar em função de um conjunto de parâmetros característicos do radar e do alvo.

- Densidade de potência a uma distância d :

$$S = \frac{P_E}{4\pi d^2} G_E$$

- Potência isotrópica equivalente: $P = S \cdot \sigma$

- σ : Área efetiva de eco: área fictícia colocada no alvo que, interceptando uma certa densidade de potência incidente, dispersa-a igualmente em todas as direções, produzindo um eco no radar igual ao do alvo real

- Densidade de potência na antena recetora: $S_1 = \frac{P}{4\pi d^2} = \frac{\frac{P_E}{4\pi d^2} G_E}{4\pi d^2} \sigma = \frac{P_E G_E \sigma}{(4\pi)^2 d^4}$

- Potência recebida na antena: $P = S_1 \cdot A_{ef} = \frac{P_E G_E \sigma}{(4\pi)^2 d^4} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} G_E$

- Alcance máximo: $d = \sqrt[4]{\frac{P_E G_E^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r_{min}}}}$

