

Aula 15

- ▣ Dipolo de Meio Comprimento de Onda,
- ▣ Dipolo Elétrico Vertical e Horizontal,
- ▣ Efeitos do Solo
 - ↳ sob:
 - Dipolo Elétrico Vertical
 - Dipolo Elétrico Horizontal
- ▣ Curvatura da Terra

▣ Uma antena muito comum é a antena dipolo de meio comprimento de onda ($l = \lambda/2$)

▣ Rrad típica é de $\approx 3\Omega$

Eq's de Campo \vec{E} e \vec{H} , serão:

$$E_{\theta} \approx j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$$

$$H_{\phi} \approx j \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$$

sendo a média temporal da densidade de potência ...

$$S_{\text{med}} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]^2 \approx \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \sin^3\theta$$

... e a intensidade de radiação:

$$U = r^2 S_{\text{med}} \approx \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \sin^3\theta$$

Potência total irradiada ser:

$$P_{\text{rad}} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} (2,435) \quad \text{ou}$$

$$P_{\text{rad}} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi} (2,435)$$

este resultado é proveniente de uma integração de S_{med} .

$$\text{Como: } \left. \begin{matrix} D_{\text{max}} \\ \text{Balanis} \end{matrix} \right\} = 4\pi \frac{U}{P_{\text{rad}}}$$

então:

$$D_{\max} \approx 1,643$$

vide eq. (4.91 - Balanis)

A máxima área efetiva (A_{eff}), será:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} (1,643) \approx 0,13 \lambda^2$$

A resistência de radiação (no espaço livre $\eta \approx 120\pi$), é:

$$R_{\text{rad}} = \frac{2P_{\text{rad}}}{|I_0|^2} = 30 (2,435) \approx 73$$

A impedância de entrada total, p/ $l = \lambda/2$ será:

$$Z_{\text{im}} = 73 + j42,5$$

Para reduzir a zero a parte imaginária da Z_{im} , a antena é:

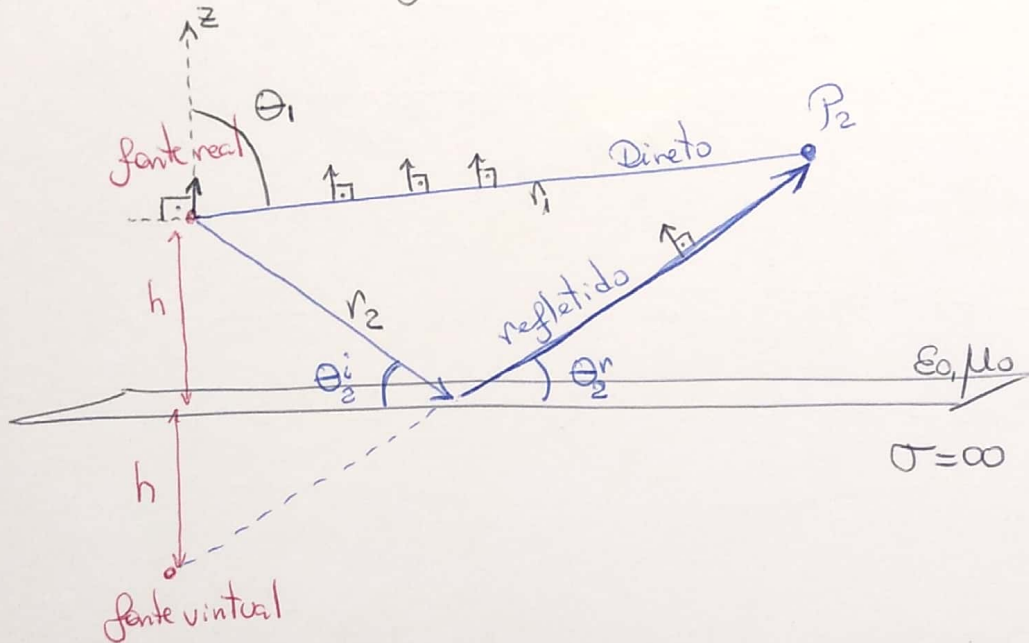
(a) casada

(b) l é reduzido até que a reatância se anule.

No caso de fios mais grossos, um maior segmento de fio deve ser removido de $\frac{\lambda}{2}$ p/ alcançar a condição de ressonância.

Dipolo Elétrico Vertical

Para analisar o desempenho de uma antena nas proximidades de um plano condutor infinito, usa-se a Teoria da Imagem.



- ▣ Substituindo "as fontes", por uma antena de dipolo
- ▣ Encontrando a componente E_θ^{direto} e $E_\theta^{\text{refletido}}$
- ▣ Considerando que o campo é muito abaixo da superfície.
- ▣ Admitindo um campo distante; onde: $(r \gg h)$

$$\begin{cases} r_1 \approx r - h \cos \theta_1 \\ r_2 \approx r + h \cos \theta_1 \end{cases}$$

- ▣ Admitindo que: $r_1 \approx r_2 \approx r$

então

$$E_{\theta} \approx j\eta \frac{k I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin\theta [2 \cos(kh \cos\theta)] \quad z \geq 0$$

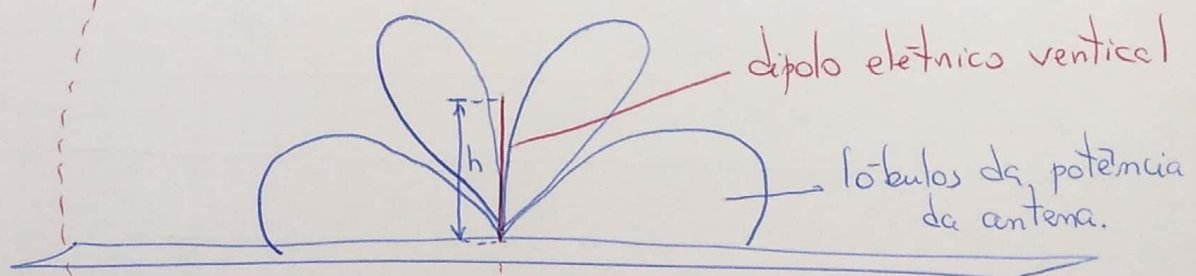
$$E_{\theta} = 0 \quad z < 0$$

↑ ↑ ↑
 ângulo de observação altura da antena foton de conjunto

O número de lóbulos secundários que surge num diagrama de radiação, será dado por:

$$n_{\text{lobulos}} \approx \frac{2h}{\lambda} + 1$$

A potência total radiada no hemisfério superior de raio r , do Dipolo Elétrico Vertical acima de um condutor elétrico perfeito (CEP).



$$P_{\text{rad}} = \oint \vec{S}_{\text{rad}} \cdot d\vec{A}_{\text{area}} = \frac{1}{2\eta} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} |E_{\theta}|^2 r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

$$P_{\text{rad}} = \pi\eta \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \left[\frac{1}{3} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right]$$

[W]

Já a intensidade de radiação pode ser escrita como:

$$U = r^2 S_{\text{med}} = r^2 \left(\frac{1}{2\eta} |E_{\theta}|^2 \right) = \frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta (kh \cos \theta)$$

Para o cálculo da Diretividade máximas, devemos admitir, antes de tudo, que: U_{max} ocorre qdo $\theta = \pi/2$ e qdo $kh \rightarrow \infty$, assim:

$$U_{\text{max}} = U \Big|_{\theta = \frac{\pi}{2}} = \frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2$$

Desta forma usamos U_{max} , p/ calcular D_{max} :

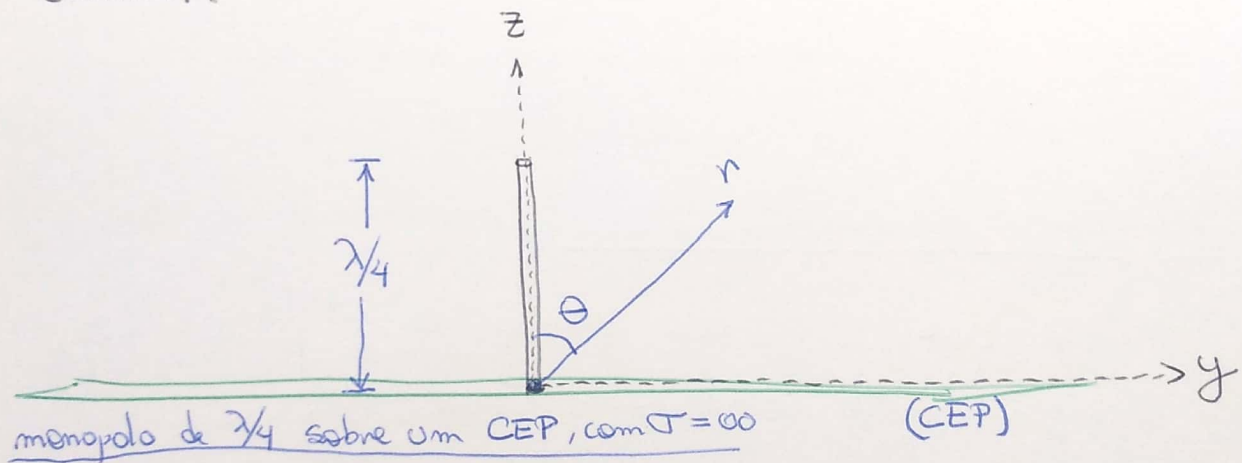
$$D_{\text{max}} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} = \frac{2}{\left[\frac{1}{3} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right]}$$

A máxima diretividade ocorre qdo $h = 0,4585\lambda$

A resistência de radiação pode ser escrita como:

$$r_{\text{rad}} = \frac{2P_{\text{rad}}}{|I_0|^2} = 2\pi\eta \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \left[\frac{1}{3} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right]$$

Na prática é muito usado o modelo de dipolo de $\lambda/4$ do λ , ou seja, $l = \frac{\lambda}{4}$, montado sobre um plano de Terra e alimentado por um cabo coaxial.



Aqui, conforme já vimos.

$$E_{\theta} \approx j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$$

$$A_{\theta} \approx j \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right]$$

Antenas Monopolo e Dipolo

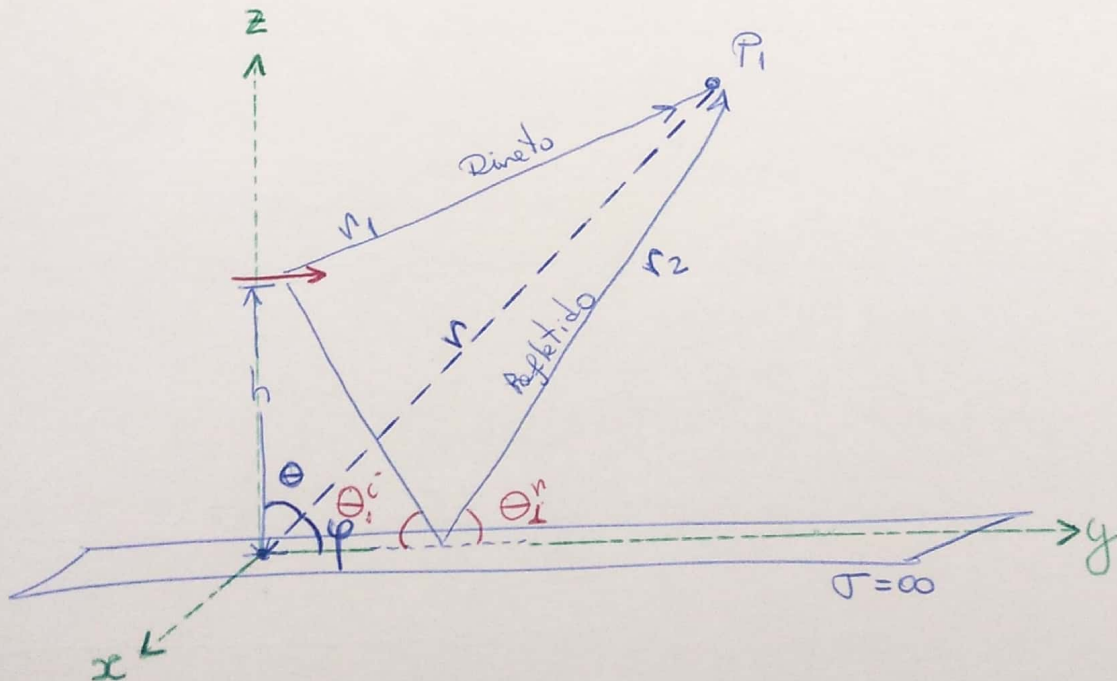
↳ sist. de comunicação sem fio.

alternativa ao monopolo

- ↳ antenas de quadro
- ↳ antena plano F inventado
- ↳ microfita (patch)
- ↳ antena espiral e outras.

Dipolo Eletrico Horizontal

Neste caso a antena filamentar é posicionada horizontalmente ao plano de Terra ∞ .



idêntico aos parâmetros do Dipolo Eletrico Vertical,
temos:

$$E_{\theta} \approx -j \frac{\omega \mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \cos \theta \sin \phi$$

ou

$$E_{\theta} \approx j \frac{\omega \mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \cos \phi$$

$$\mathcal{H}_{\phi} \approx -\frac{E_{\phi}}{\eta}$$

A medida que h aumenta em relação a λ , um maior número de lóbulos é mais uma vez formado.

logo:

$$N_{\circ} \text{ lóbulos} \approx 2 \left(\frac{h}{\lambda} \right)$$

Potência total

$$P_{\text{rad}} = \eta \frac{\pi}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \left[\frac{2}{3} - \frac{\sin(2kh)}{2kh} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right]$$

Resistência de Radiação

$$R_{\text{rad}} = \eta \pi \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \left[\frac{2}{3} - \frac{\sin(2kh)}{(2kh)} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right]$$

↓
p/ valores pequenos de kh , a eq. se reduz para:

$$R_{\text{rad}} = \eta \frac{32\pi^3}{15} \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2$$

Intensidade de Radiação

$$U = \frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \phi) \sin^2(kh \cos \theta)$$

U_{max} depende

$$h \leq \frac{\lambda}{4}, \theta = 0^\circ$$

$$\frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \sin^2(kh)$$

$$h > \frac{\lambda}{4}, \phi = 0^\circ$$

$$\frac{\eta}{2} \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2$$

Assim:

$$D_{\max} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad \text{então}$$

$$D_{\max} = \begin{cases} \frac{4 \sin^2(kh)}{R(kh)} & h \leq \frac{\lambda}{4} \\ \frac{4}{R(kh)} & h > \frac{\lambda}{4} \end{cases}$$

Resistência de Radiação

$$R_{\text{rad}} = \left[\frac{2}{3} - \frac{\sin(2kh)}{2kh} - \frac{\cos(2kh)}{(2kh)^2} + \frac{\sin(2kh)}{(2kh)^3} \right]$$

Quando, $kh \rightarrow 0$, então

$$D_{\max} = 1,5 \left(\frac{\sin kh}{kh} \right)^2$$

Para $h=0$, o elemento é curto-circuitado e não radia.

Efeito do Solo

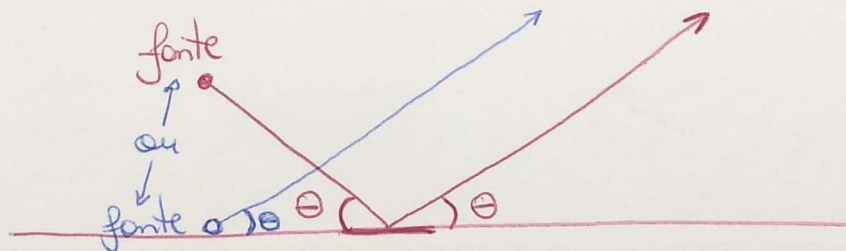
▣ Sempre consideramos (dipolos filamentosos, vertical e horizontal) sobre condutores elétricos ideais ($\sigma = \infty$)

▣ Mas... o nosso condutor não é perfeito

▣ além disso, a superfície da Terra não é plana.

▣ Se $R_{Terra} \gg \lambda$, então podemos considerar a superfície terrestre como PLANA.

▣ E também que $\theta > \frac{57.3}{k R_{Terra}}$



ou seja: $\theta > 3^\circ$

▣ freq. em LF e MF têm influência de perdas da Terra.

na Região de Campo distante

coef. de Reflexão $R_{\parallel} = \frac{\eta_0 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_0 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} = -R_{\parallel}$

coef. de reflexão de polarização paralela.

onde: Ω

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

impedância intrínseca do espaço livre

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{j\omega\mu_1}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1}}$$

impedância intrínseca do solo

$\theta_i =$ ângulo de incidência (em relação à normal)
 $\theta_t =$ ângulo de refração (em relação à normal)

→ se relacionados pela lei de Snell da refração:

$$\gamma_0 \sin \theta_i = \gamma_1 \sin \theta_t$$

constante $j\gamma_0$ de propagação do espaço livre

$(\alpha_1 + j\gamma_1)$ Np/m rad/m constante de propagação do solo

constante de fase do solo

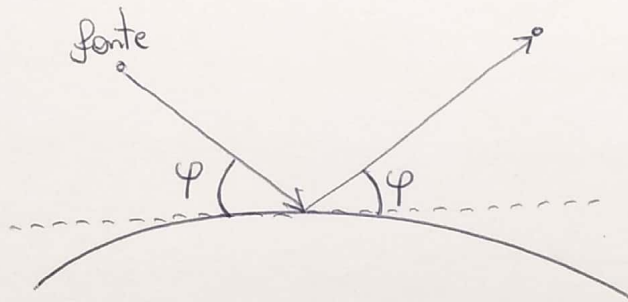
constante de atenuação do solo

Um Dipolo Elétrico Vertical

$$E_{\theta} = j\eta \frac{k I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin\theta \left[e^{jkh \cos\theta} + R_{\theta} e^{-jkh \cos\theta} \right]$$

$$H_{\phi} = \frac{E_{\theta}}{\eta}$$

Um Dipolo Elétrico Horizontal



$$E_{\phi} = j\eta \frac{k I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sqrt{1 - \sin^2\theta \sin^2\phi} \left[e^{jkh \cos\theta} + R_{\theta} e^{-jkh \cos\theta} \right]$$

onde: $R_{\theta} = \begin{cases} R_{\perp} & \text{pl. planos } \phi = 0^{\circ} \text{ e } 180^{\circ} \\ R_{\parallel} & \text{pl. planos } \phi = 90^{\circ} \text{ e } 270^{\circ} \end{cases}$

R_{\perp} coef. de polarização em reflexão perpendicular

R_{\parallel} coef. de polarização em reflexão paralelo

Se Considerarmos a Curvatura da Terra.

A curvatura da Terra tem uma tendência a espalhar (enfraquecer, divergir) a energia refletida.



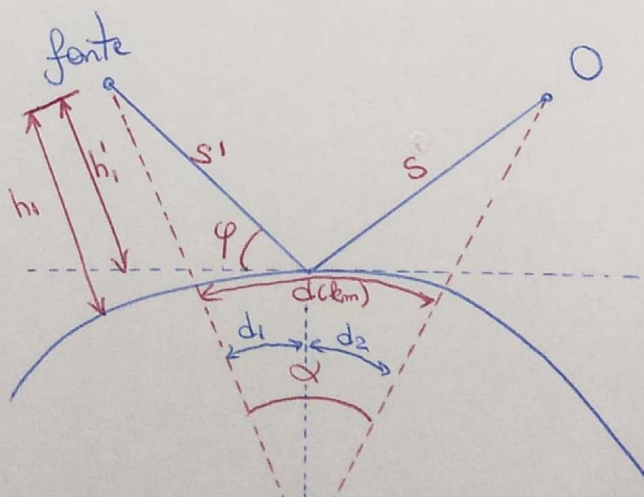
Este fator de divergência $D =$

$$D = \frac{\text{campo refletido por uma superfície curva}}{\text{campo refletido por uma superfície plana}}$$

Deduzindo D , a partir de considerações geométricas, teremos:

$$D \approx \left[1 + 2 \frac{ss'}{ad \operatorname{tg} \varphi} \right]^{-1/2}$$

$R_t = 6378 \text{ km}$ ← km → ângulo variante



and:

$$E_{\theta} = j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin\theta \left[e^{jkh \cos\theta} + DR_r e^{-jkh \cos\theta} \right]$$

$$E_{\phi} = j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \sqrt{1 - \sin^2\theta \sin^2\phi} \left[e^{jkh \cos\theta} + DR_h e^{-jkh \cos\theta} \right]$$

$$d_1 = \frac{d}{2} + p \cos\left(\frac{\Omega + \pi}{3}\right) \quad d_2 = d - d_1$$

$$\Omega = \cos^{-1} \left[\frac{2a(h_1 - h_2) \cdot d}{p^3} \right]$$

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{a(h_1 + h_2) + \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$