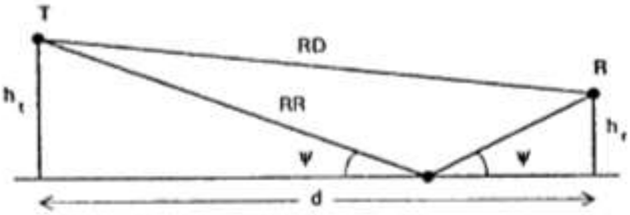
ASPECTOS IMPORTANTES, ECUACIONES Y EJEMPLOS

MODELO TIERRA PLANA



- Se supone una propagación en el Espacio Libre, pero en situaciones Reales, es afectada por el Factor de Atenuación de Campo **"Fe"**
- Basta con conocer la directividad de los Monopolos Cortos, esto depende de la longitud de los mismos.
- **Fe** se calcula con "p= distancia numérica":

  $fe = \frac{2+0.3p}{2+p+0.6p^2} \qquad p \approx \frac{\pi.d}{60.\lambda.\sigma}$
- Pérdida básica de propagación en el modelo de tierra plana:

  $L_b(dB) = 40\log d\ (Km) - 20 log h_t h_r\ (m) + \ 120$
- Se aplica para frecuencias inferiores a unos 150MHz.
- Se aplica para alturas de antenas reducidas y polarización vertical, hay que tener en cuenta, además de los rayos directos y reflejados, el efecto de la onda de superficie.
- El efecto de onda de superficie es dominante para frecuencias inferiores a 10MHz, polarización vertical (antena transmisora monopolo) y terreno buen conductor.
- En la mayoría de los casos prácticos, la altura de las antenas transmisora y receptora es mucho menor que la distancia entre ella y es válido asumir que RD≈RR y, además, el ángulo de reflexión es muy pequeño, con lo que también es válido suponer que la ganancia directiva de la antena transmisora es la misma en la dirección del rayo directo que en la dirección del rayo reflejado.
- La intensidad total del campo eléctrico en el receptor es la suma de las dos componentes: la debida al rayo directo y la debida al rayo reflejado

  $E = \ E_1 + \ E_2 = \frac{\sqrt{60P_{AT}G_1}}{RD}\ (1 + |p|e^{-jr})$

  PAT: potencia de entrada a la antena transmisora.
  G1: Ganancia directiva en la dirección del rayo directo (RD).
  p: coeficiente de reflexión.

- El ángulo de incidencia es:

  $$\boldsymbol{\psi = arctan\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right)}$$

- La diferencia de trayectos se aproxima para:

  $$\Delta \boldsymbol{l} \cong \frac{\boldsymbol{2.h_t.h_r}}{\boldsymbol{d}}$$

- La diferencia de fases en ambos trayectos es:

  $$\Delta = \frac{\boldsymbol{2\pi\ .\Delta l}}{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{\boldsymbol{4\pi.h_t.h_r}}{\boldsymbol{\lambda d}}$$

- La validez de este modelo se extiende hasta la distancia en la que la difracción asociada a la curvatura de la Tierra cobra importancia

  $$\boldsymbol{d_{max}(Km)} = \frac{\boldsymbol{100}}{\sqrt[3]{\boldsymbol{f\ (MHz)}}}$$

- Los coeficientes de reflexión dependen del tipo de suelo, del ángulo de incidencia y de la polarización de la onda. Cuando la distancia entre las antenas es muy grande comparada con la altura de las mismas (situación habitual) el ángulo de incidencia ψ tiende a 0º. En ese caso los coeficientes de reflexión para ambas polarizaciones tiende a –1, que es el valor usual en tierra plana.

$$\left|E_{rx}\right| = 2\left|E_d\right| \mathrm{sen}\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = 2\left|E_d\right| \mathrm{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{\Delta R}{2}\right) = 2\left|E_d\right| \mathrm{sen}\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)$$

EJEMPLO:

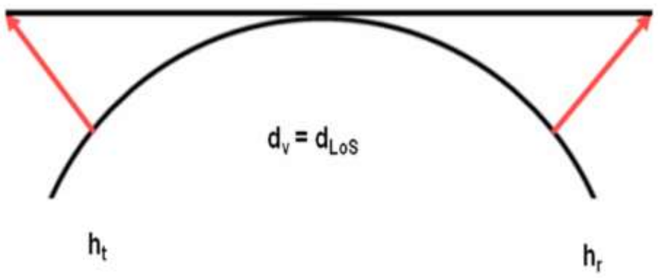
Ejemplo: Un barco tiene una antena elevada montada en un mástil a la altura h_t sobre un mar perfectamente plan y altamente conductor. Si el patrón de radiación de la antena se aproxima a la de un elemento de corriente de polarización vertical, es decir $\hat{\mathbf{e}}_\theta \cos\theta$, determinar el patrón de radiación "in situ" de la antena y, en particular, los valores nulos del patrón de radiación como una función del ángulo de elevación por encima del horizonte.

__Respuesta:__

$$f(\theta) = \hat{\mathbf{e}}_\theta \cos\theta \left|\cos\left(\frac{2\pi h_t}{\lambda}\tan\theta\right)\right| \qquad \theta = \frac{2n+1}{4}\frac{\lambda}{h_t}, \quad \forall n = 0,1,2,\ldots$$

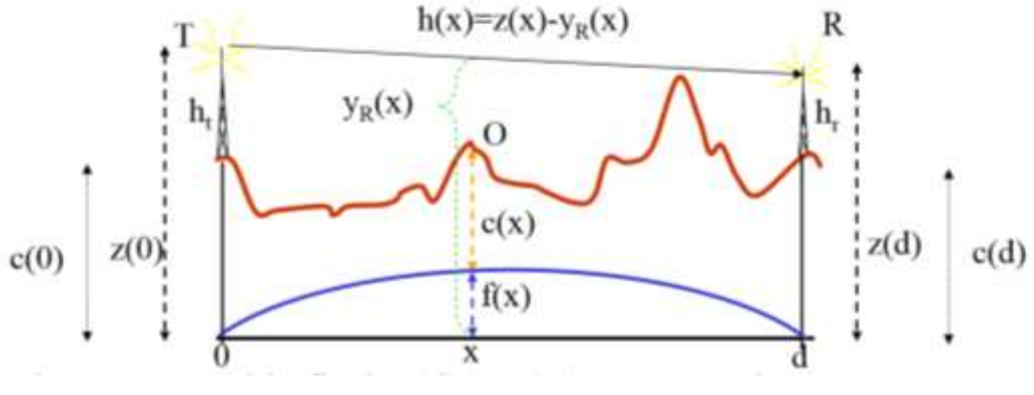
MODELO TIERRA CURVA

- Se aplica este modelo para longitudes de enlaces tales que las flechas debidas a la curvatura terrestre son superiores a unos 5m.



- Esto suele corresponder a longitudes de ondas del orden de la distancia de visibilidad radioeléctrica o mayor.
- Se considera una trayectoria rectilínea y una tierra ficticia de radio ***KRo.***
- Se supone una Tierra lisa, como sucede en propagación sobre mar, grandes lagos o llanuras con terreno muy poco ondulado.
- ¿Cuándo deja de ser válido el modelo de tierra plana?: Si las protuberancias debidas a la curvatura terrestre son superiores a unos 5 m, el modelo de Tierra plana deja de ser válido, pasando a regir el modelo de Tierra curva.

Gráficamente



Tierra curva: si la flecha (f(x) máx) es mayor de 5 metros.

Donde:

•x: distancia del transmisor a un punto, (km)

•c(x): altura del terreno sobre el nivel del mar, (m)

•f(x): protuberancia de la tierra o flecha (m)

•z(x): altura del terreno sobre la base (m),

$\boldsymbol{Z(x) = f(x) + c(x)}$

$\boldsymbol{f(x) = \frac{x.(d-x)}{2kRo} = 0.07849\frac{x.(d-x)}{k}}$

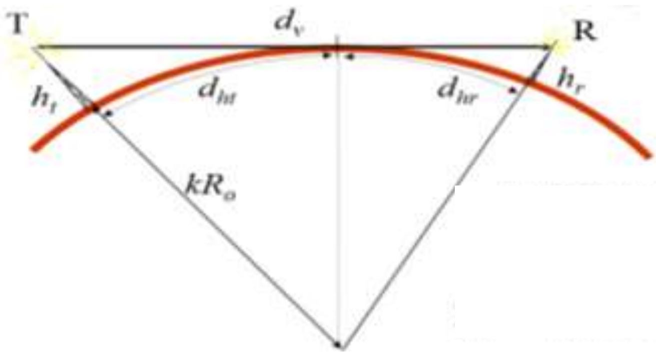
K es el Factor de modificación del radio terrestre

Ro=Radio de la tierra 6370km

•y_R(x): altura del rayo sobre la base (m)

•h(x): Altura del rayo directo sobre el terreno, en metros

- **Distancia de visibilidad radioeléctrica**: suma de las distancias de horizonte



$$\boldsymbol{(kRo + h_t)^2 = d^2 + (kRo)^2}$$

$$\boldsymbol{d^2 \approx 2kR_oh_t}$$

$$\boldsymbol{d_{h_t}(Km) = 3.57\sqrt{kh_t(m)}}$$

$$\boldsymbol{d_{h_t}(Km) = 3.57\sqrt{kh_r(m)}}$$

La distancia de visibilidad crece con $\sqrt{k}$

$\boldsymbol{d_v = 3.57(\sqrt{k\,h_t} + \sqrt{k\,h_r})}$

Ejemplo:

$$d_v\left(k=\frac{4}{3}\right)=4.1(\sqrt{h_t(m)}+\sqrt{h_r(m)})$$

- Calcular las pérdidas para: Trayectoria rectilínea, ***KRo***
- Se trata de asimilar el modelo de tierra curva al modelo de tierra plana

$$l_b = l_{bf} - 10log_{10}[1+|R|^2+2|R|.\cos(\beta+\Delta)]$$

Para ello

1. Se calculan unas ht' y hr' Y calculamos el desfase Δ
2. Se comprueba que la tierra no obstaculice el enlace
3. Se actualiza el coeficiente de reflexión R
   - Con la divergencia
   - Con la rugosidad del terreno
4. Se calculan las pérdidas
   - **Modelo de Reflexión, sobre tierra curva**

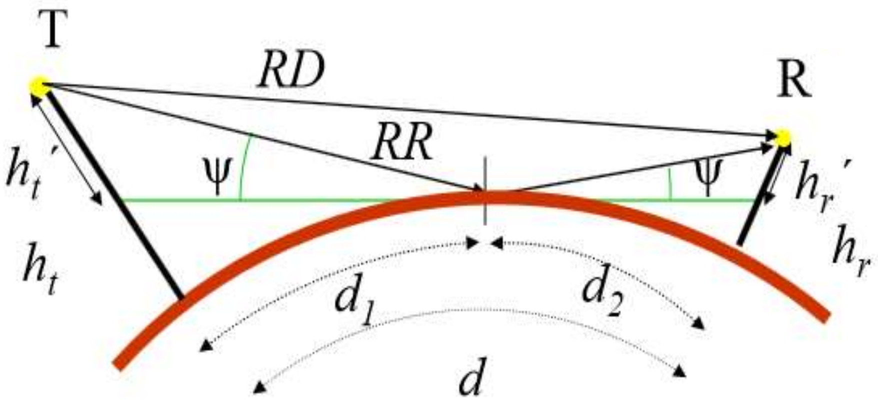
$$h_t' = h_t - \frac{{d_1}^2}{2kR_o}$$

$$h_r' = h_r - \frac{{d_2}^2}{2kR_o}$$

$$\frac{h_t'}{h_r'} = h_r - \frac{d_1}{d_2}$$

$$d = d_1 + d_2$$

$$ {d_1}^3 - \frac{3d}{2}\,{d_1}^2 - \left[kRo(h_t+h_r) - \frac{d^2}{2}\right]d_1 + kR_oh_td = 0$$



Si asociamos T y 1 al de mayor altura

$$d_1 = \frac{d}{2} + p.\cos\left(\frac{\pi + \emptyset}{3}\right)$$

$$p = \frac{2}{3}.\left[6,37.k.(h_t + h_r) + \left(\frac{d}{2}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$\emptyset = arccos\left[\frac{12.74.k.(h_t + h_r).d}{p^3}\right]$$

Donde *h* (m), *d* (Km)

Una vez calculadas d_1y d_2 (en km), se calculan las alturas

$$h_t' = h_t - \frac{4{d_1}^2}{51k}$$

$$h_r' = h_r - \frac{4{d_2}^2}{51k}$$

Y el ángulo de incidencia en mili radianes $\psi_{lim}(mrad) = \frac{h_t' + h_r'}{d}$El límite sobre el cual se puede aplicar óptica geométrica:

$\psi > \psi_{lim}$

$\psi_{lim}(mrad) = \left(\frac{5400}{f}\right)^{1/3}$, $f\ (MHz)$

La diferencia de recorridos, $\Delta l(m) = \frac{2h_r'.h_r'}{d}.10^{-3}$

La diferencia de fases

$$\Delta = \frac{\boldsymbol{2\pi.\Delta l}}{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{\boldsymbol{\pi.f(MHz).\Delta l}}{\boldsymbol{150}} \quad (\boldsymbol{0-2\pi})$$

La reflexión sobre superficie esférica convexa produce divergencia que se traduce en reducción aparente del coeficiente de reflexión,

$$\boldsymbol{R_e}' = \boldsymbol{R.D}$$

$$\boldsymbol{D} = \left[\boldsymbol{1} + \left(\frac{\boldsymbol{5}}{\boldsymbol{16k}}\right)\frac{\boldsymbol{d_1}^{\boldsymbol{2}}.\boldsymbol{d_2}}{\boldsymbol{d.h_t}'}\right]^{-\frac{1}{2}} (\boldsymbol{D} < 1)$$

Se puede además corregir el coeficiente de Reflexión introduciendo una atenuación (en el RR) debida a la rugosidad del terreno

$$\boldsymbol{R_e} = \boldsymbol{R.D.e}^{\frac{-\gamma^2}{2}}$$

Donde

$$\boldsymbol{\gamma} = \frac{\boldsymbol{4.\pi.\sigma_z.sen(\psi)}}{\boldsymbol{\lambda}}$$

Y $\boldsymbol{\sigma_z}$ es la desviación típica de las ondulaciones del terreno:
Con todo esto es posible formular:

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{e_o}.\left[\boldsymbol{1} + \boldsymbol{R_e}^{\boldsymbol{2}} + \boldsymbol{2.R_e.cos(\beta} + \Delta)\right]^{\boldsymbol{1/2}}$$

Donde Δ se calcula con $\boldsymbol{h_t}'\boldsymbol{y}\ \boldsymbol{h_r}'$

Y $\boldsymbol{R_e}$ se ha actualizado convenientemente

La pérdida básica de propagación

$$\boldsymbol{l_b} = \boldsymbol{l_{bf}} - \boldsymbol{10log_{10}}\left[\boldsymbol{1} + \boldsymbol{R_e}^{\boldsymbol{2}} + \boldsymbol{2.R_e.cos(\beta} + \Delta)\right]$$

EJEMPLO:

Empleando las cartas de la UIT-R, obtenga la distancia a la que se alcanza un campo de 100μV/m eficaces transmitiendo con un mástil de 75 m que a 1 MHz radia una potencia de 91.5 kW.

a) Sobre la superficie del mar

b) Sobre tierra seca

Para resolver el ejercicio se utilizan las gráficas de las Figuras 1 y 2 para la frecuencia de 1MHz. Conocemos que el campo eléctrico de 100 μ V/m, se consigue radiando 91.5 kW con una antena de longitud igual a 75 metros, que corresponde a un monopolo de longitud λ/4. Para dicha longitud, la directividad del monopolo es 3.28, con lo que la PIRE es:

$$\boldsymbol{PIRE = P_{rad}.D_o = 91.5\ .\ \ 3.28 = 300kW}$$

Por lo tanto se tiene que buscar el valor de ordenadas en sendas cartas de:

$$\boldsymbol{20logE_{carta} = 20log\frac{100\mu V/m}{\sqrt{\frac{300}{3}}} = 20dB\ (\mu V/m)}$$

Obteniendo:

- En la gráfica de tierra seca un alcance de 100 km
- En la gráfica de mar un alcance de 1100 km

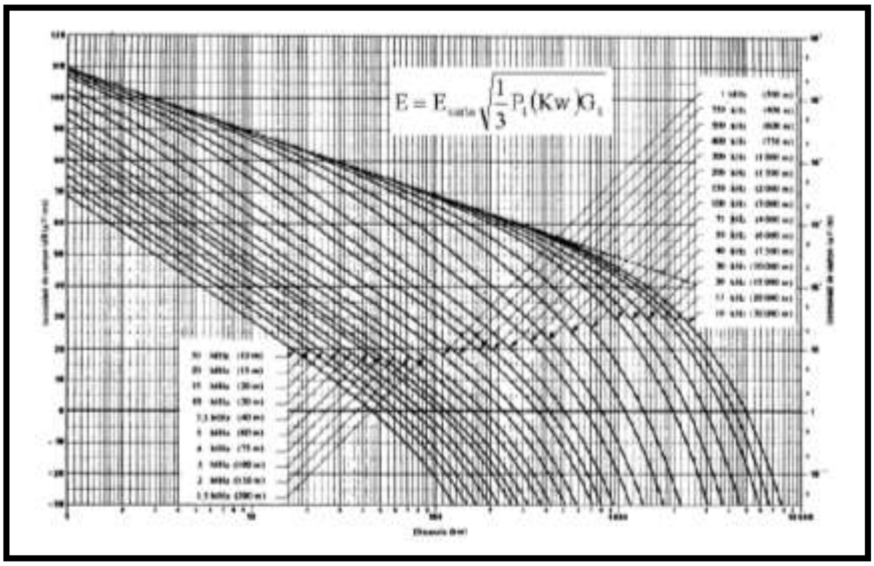


FIG.1*. Intensidad de la onda de superficie en tierra seca. Pradiada = 1 kW. Monopolo corto.*

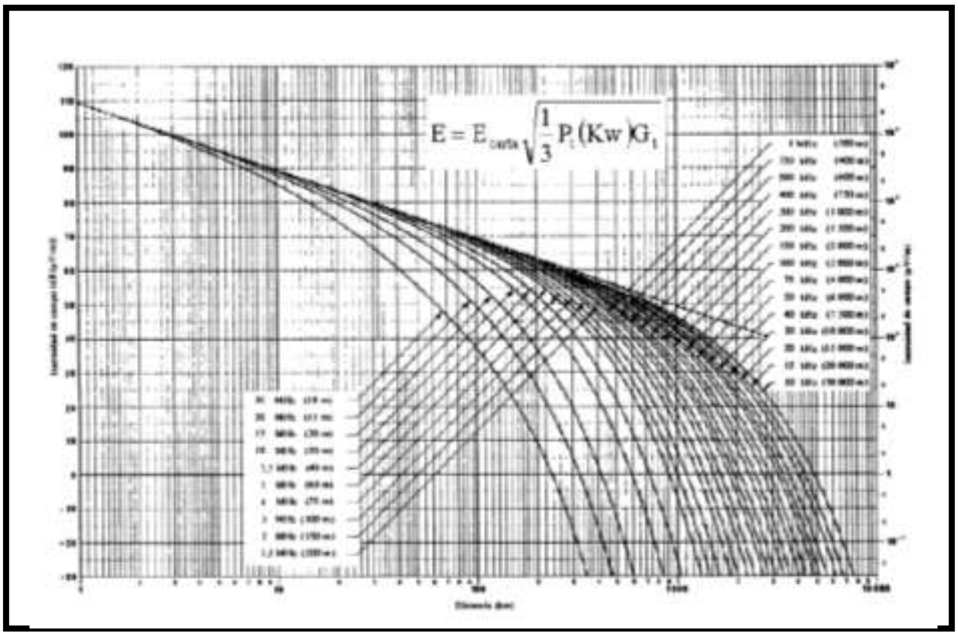


FIG.2. ***Intensidad de la onda de superficie en mar. Pradiada = 1 kW. Monopolo corto.***