

RECIPROCIDAD EN CALCULOS DE INTENSIDAD  
DE CAMPO EN ONDA DE SUPERFICIE

Víctor H. Padula Pintos

Centro Argentino de Estudios  
de Radicomunicaciones y Compatibilidad  
Electromagnética  
(CAERCEM)

Buenos Aires  
República Argentina

RESUMEN

Se comparan los métodos actualmente utilizados para cálculo de intensidades de campo, en onda de superficie, sobre trayectos de características mixtas. Apoyado en los razonamientos en que se basan los desarrollos que llevan a las curvas de  $E=f(D)$  se sugiere el uso de un método alternativo, no recíproco, de campo equivalente.

SUMMARY

The methods commonly used to obtain field intensities for ground wave over mixed paths are compared. Considering the reasonings which lead to the expressions used to plot the curves of  $E=f(D)$ , an alternative non reciprocal method of equivalent field is suggested.

## INTRODUCCION

El desarrollo de la teoría de propagación de la onda terrestre ha llevado a expresiones (Bremmer Van del Pol) como la que ha utilizado el Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR) para preparar curvas de utilización práctica para hallar intensidades de campo en función de distancia, frecuencia y características eléctricas de suelos (Joachim y otros; 1973).

$$E = \frac{752}{D_{\text{km}}} \sqrt{\frac{0,0537 D_{\text{km}}}{\sqrt[3]{\lambda_m}}} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{j^s \frac{0,0537 D_{\text{km}}}{\sqrt[3]{\lambda_m}}}{2\tau_s - 1/\delta^2}$$

Se comprueba que la derivada de E con respecto a distancias es de la forma:

$$\frac{\delta E}{\delta D} = A D^{-1/2} e^{jBD} \left[ \frac{D^{-1}}{2} + jB \right]$$

donde:

$$A = \frac{752 \sqrt{5,37 \times 10^{-2}}}{(2\tau_s - 1/\delta^2)^2} \quad B = \tau_s \frac{5,37 \times 10^{-2}}{\sqrt[3]{\lambda}}$$

Esto nos indica que la atenuación de la onda al hacer un determinado recorrido depende de la ubicación de dicho recorrido con respecto a la antena emisora. Si se toma por ejemplo una frecuencia de 1 MHz, para  $\epsilon=4$  y  $\sigma=1\text{mS/m}$  la atenuación entre 10 y 20 Km es de aproximadamente 20 dB. En cambio, entre 150 y 160 Km resulta ser sólo 1,5 dB. Si se hubiera tomado  $\sigma=40\text{mS/m}$  los valores de la atenuación serían 11 dB y 1 dB respectivamente.

Se llega a un resultado equivalente si se considera el valor del factor de atenuación en función de distancia (Jordan y Balmain, 1968).

$$A = |F| = 1 - j \sqrt{\pi\omega} e^{-\omega} \operatorname{erfc}(j\sqrt{\omega}) \Big|_{\psi=\bar{\psi}} = 1 - j \sqrt{\pi p_1} e^{-P_1} \operatorname{erfc}(j\sqrt{p_1})$$

donde:

$$\omega|_{\psi=0} = p_1 = p e^{jb}$$

$$p = \frac{\pi R}{\lambda x} \frac{\cos^2 b''}{\cos b'} \approx \frac{\pi R}{\lambda x} \cos b$$

$$b = (2 b'' - b') \approx \text{arc tg } \frac{\epsilon_r + 1}{x}$$

$$b'' = \text{arc tg } \epsilon_r/x$$

$$b' = \text{arc tg } \frac{\epsilon_r - \cos^2 \psi}{x} \approx \text{arc tg } \frac{\epsilon_r - 1}{x}$$

$$x = \frac{18000 \sigma}{f_{\text{MHz}}}$$

En efecto se comprueba que en 1 MHz y con  $\epsilon=15$  se hallan los siguientes valores:

$\sigma$	b	cos b	R	p	A	"εA"
1mS/m	41°6	0,7478	10 Km	4,35	0,14	0,07
			20 Km	8,70	0,07	
			100 Km	43,51	0,011	0,001
			110 Km	47,80	0,010	
30mS/m	1°7	0,9996	10 Km	0,19	0,9	0,08
			20 Km	0,38	0,82	
			100 Km	1,94	0,42	0,02
			110 Km	2,09	0,40	

Esto significa que con 1mS/m el factor por el que se debe multiplicar la intensidad de campo a la unidad de distancia para obtenerla a otra mayores, disminuye en un 50% al pasar de 10 a 20 Km y sólo en un 10% entre 100 y 110 Km. Con 30 mS/m se halla que son 9 y 5%.

Los valores mencionados indican que la atenuación que aparecerá en cualquier tramo del recorrido de la onda depende de la situación de dicho tramo con respecto al recorrido total.

Esto, que se comprende fácilmente cuando se trata de propagación sobre terreno de características uniformes, no resulta tan evidente cuando la onda se propaga so-

bre distintos tipos de suelos.

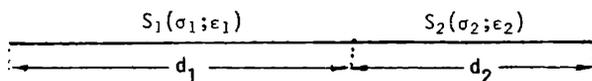
Se han desarrollado varios métodos para considerar esta situación. Se mencionan algunos de ellos.

#### PROPAGACION DE LA ONDA DE SUPERFICIE POR TRAYECTOS MIXTOS

Para la predicción de la intensidad de campo de la onda de superficie para trayectos compuestos de secciones sucesivas de terreno de conductividades diferentes (incluidas las secciones por encima del agua), existen dos métodos básicos: el método de la distancia equivalente (Kirke) y el método de la intensidad de campo equivalente elaborado por Millington (CCIR; 1980). Debe señalarse que el de la distancia equivalente no satisface el principio de reciprocidad, mientras que el método de Millington ha sido concebido para cumplirlo. El método de la distancia equivalente presenta inconvenientes particulares cuando se aplica a trayectos sobre agua, pues en tales casos puede dar lugar a una subestimación de la intensidad de campo. Por ejemplo, si un trayecto tiene una sección considerable por encima del mar, -lo que puede suceder en el caso de las islas en alta mar o a través de amplias zonas de estuario y, particularmente, en torno al Caribe,- se puede subestimar la señal interferente en 10 o más dB si se aplica el método de predicción de la distancia equivalente.

#### Método de Millington

Puede considerarse un trayecto constituido por las secciones  $S_1, S_2, S_3$ , etc. de longitudes  $d_1, d_2, d_3$ , etc. cuyas conductividades y constantes dieléctricas son  $\sigma_1, \epsilon_1; \sigma_2, \epsilon_2; \sigma_3, \epsilon_3$ , etc. tal como se indica en la siguiente ilustración para dos secciones:



Se consideran disponibles las curvas correspondientes a los distintos tipos de terreno de las secciones  $S_1, S_2$ , etc. supuestas individualmente homogéneas (figura 1).

Se escoge entonces para la frecuencia de trabajo la curva correspondiente a la sección  $S_1$ , y se determina el valor de la intensidad de campo  $E_1(d_1)$  en dB a la distancia  $d_1$ . Mediante la curva correspondiente a  $S_2$  se determinan las intensidades de campo  $E_2(d_1)$  y  $E_2(d_1 + d_2)$  y así sucesivamente si hubieran más tramos.

La ecuación:

$$E_R \approx E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) \quad (1)$$

define así una intensidad de campo recibida  $E_R$  en un punto R.

Se invierte luego el procedimiento, suponiendo el transmisor en R y al receptor en T, lo que conduce a una intensidad de campo  $E_T$ , en T, definida por la ecuación

$$E_T = E_2 (d_2) - E_1(d_2) + E_1 (d_2 + d_1) \quad (2)$$

La intensidad de campo que se considera como válida es el promedio  $(E_R + E_T)/2$  siendo evidente la forma de extender el cálculo a un número mayor de secciones.

#### Método de Kirke

En el método de Kirke, en cambio, se determina la intensidad de campo en el borde del primer tramo (D). Se busca a qué distancia ( $D_2$ ) se hubiera tenido ese valor si la propagación se hubiera producido sobre un terreno con las características del segundo tramo. A ésta se le suma la longitud del segundo tramo y se halla la intensidad de campo que se tendría allí, que es la que se adopta como definitiva ( $E_f$ ).

En este método no se intercambian las posiciones de transmisor y receptor.

#### Ejemplo de predicción de la propagación de la onda de superficie en trayectos mixtos a efectos de la comparación de métodos.

Se indica a continuación con detalle la manera de efectuar los cálculos para dos trayectos diferentes, ambos evaluados según los dos métodos de predicción considerados. La frecuencia elegida es 1000 KHz. Todas las intensidades de campo predichas están expresadas en dB con respecto a  $1 \mu\text{V/m}$ .

Se toma para el ejemplo un trayecto constituido por 100 Km de  $1 \times 10^{-4}$  S/m de conductividad (Curva G en la Figura 1) seguido de 100 Km de 5 S/m (Curva A).

Por el método de Kirke.

La intensidad de campo a 100 Km, (Curva G) es de 16 dB;  
La distancia equivalente en la curva A para tener los mismos 16 dB es 1100 Km.

La intensidad de campo a (1100 + 100) Km sobre la curva A, es 11 dB.

En consecuencia, la intensidad de campo en este trayecto mixto resultaría ser 11 dB.

Por el método de Millington.

La intensidad de campo a 100 Km, (Curva G) es 16 dB;

La intensidad de campo a 100 Km, (Curva A) es 68 dB;

La intensidad de campo a 200 Km, (Curva A) es de 60 dB;

Por tanto, la intensidad de campo en una dirección es  $16-68+60=8$  dB.

Se repite el proceso invirtiendo la dirección de propagación (Figura 2).

La intensidad de campo a 100 Km (Curva A) es 68 dB;

La intensidad de campo a 100 Km (Curva G) es 16 dB;

La intensidad de campo a 200 Km (Curva G) es -1 dB.

En consecuencia, en la dirección de propagación inversa se obtendría una intensidad de campo de

$$68-16-1=51 \text{ dB.}$$

La intensidad de campo para todo el trayecto, según este método, es en consecuencia de  $(8+51) / 2 = 29,5$  dB .

En este último caso, los resultados obtenidos por los dos métodos difieren en 18,5 dB.

Se advierte que si se tomara sólo la primera parte del método de Millington, es decir sin intercambiar las posiciones del transmisor y el receptor, la diferencia que hubiera resultado sería de sólo 3 dB.

En la Figura 1 se hace evidente lo señalado antes, en el sentido de que la atenuación, en un trayecto de determinada longitud, depende de la ubicación del mismo con respecto a la antena emisora. Aquí se ve que, sobre agua de mar ( $\sigma=5$  S/m), entre 100 y 200 Km la atenuación alcanza a 8 dB mientras que entre 1000 y 1100Km la onda sólo se atenúa en 5 dB.

Por lo dicho al principio, y a pesar de los fundamentos en que se basa el método de Millington, no parece justificarse aquel intercambio, a menos que se ignoren los razonamientos que llevan, por ejemplo, a las ecuaciones de Bremmer Van der Pol, cosa que no se puede hacer. De esto se deduce que para el cálculo de intensidades en propagación sobre suelos de características cambiantes, resulta aconsejable pensar en emplear el método de campo equivalente, pero sólo en parte: la que corresponde al camino directo, sin intercambiar las posiciones de transmisor y receptor. Y esto aún con una salvedad: si la onda se propaga sobre un terreno dado en una distancia suficientemente grande, tienden a disimularse los efectos que puede haber producido otro tipo de terreno por sobre el que se haya propagado antes. Es decir que se produce una especie de "recuperación" cuyos detalles requieren un estudio posterior.

Ya Kirke señaló, con respecto a la exigencia de reciprocidad que impone Millington, -que probablemente es más correcto tratar el caso como un cuádrupolo y no inter-

cambiar las antenas.

#### CONCLUSIONES

- Se han presentado las expresiones que dan la intensidad de campo en función de distancia y características del suelo por sobre el que se produce la propagación.
- Se ha mostrado que la diferencia de la intensidad de campo (o la atenuación) entre dos pares de puntos igualmente alejados entre sí dependen de su distancia a la fuente.
- Se han presentado los dos métodos de cálculo de intensidad de campo por trayectos mixtos, y se han señalado las diferencias en sus resultados.
- Se propone como alternativa un método no recíproco que sería el de campo equivalente sin intercambio de transmisor y receptor, lo que se justifica porque el "circuito" no es simétrico y a ello se llega con razonamientos coherentes como los que llevaron a deducir la expresión de  $E = f(d, \sigma, \epsilon; f)$ . Esto es equivalente a decir que en cada tramo se produce una atenuación función de  $f, \epsilon, \sigma$ , distancia a la fuente y longitud de dicho tramo, resultando como atenuación final, en dB, la suma de las parciales.

#### RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del Programa Nacional de Radiopropagación.

#### BIBLIOGRAFIA

- Bremner, H., 1948; "Terrestrial radio waves"; Elsevier Publ. Co. Inc.; Amsterdam, 1948.
- CCIR, 1980; "Informe a la Primera Sesión de la Conferencia Administrativa Regional de Radiodifusión por Ondas Hectométricas (Región 2)" Capítulo I.
- Joachim, M., Mao, Y.Y., y Boyle, W., 1973; "Computer program to calculate ground wave field strength"; Telecom. Journal, Vol. 40, Sep. 1973.
- Jordan, E. y Balmain, K., 1968; "Electromagnetic waves and radiating systems"; Prentice Hall Inc., 1968.
- Kirke, H.L., 1949; "Calculation of ground-wave field strength over composite land and sea path". Proc. of the IRE, Pg. 489-496; mayo 1949.
- Millington, G., 1949; "Ground wave propagation over an inhomogeneous smooth earth", Proc. I.E.E., Part. III, 96<sup>o</sup> 1949.
- Wait, J.R., 1974; "Recent analytical investigations of electromagnetic ground wave propagation over inhomogeneous earth models"; Proc. of the I.E.E.E., Vol. 62, N<sup>o</sup> 8, Ago.1974.

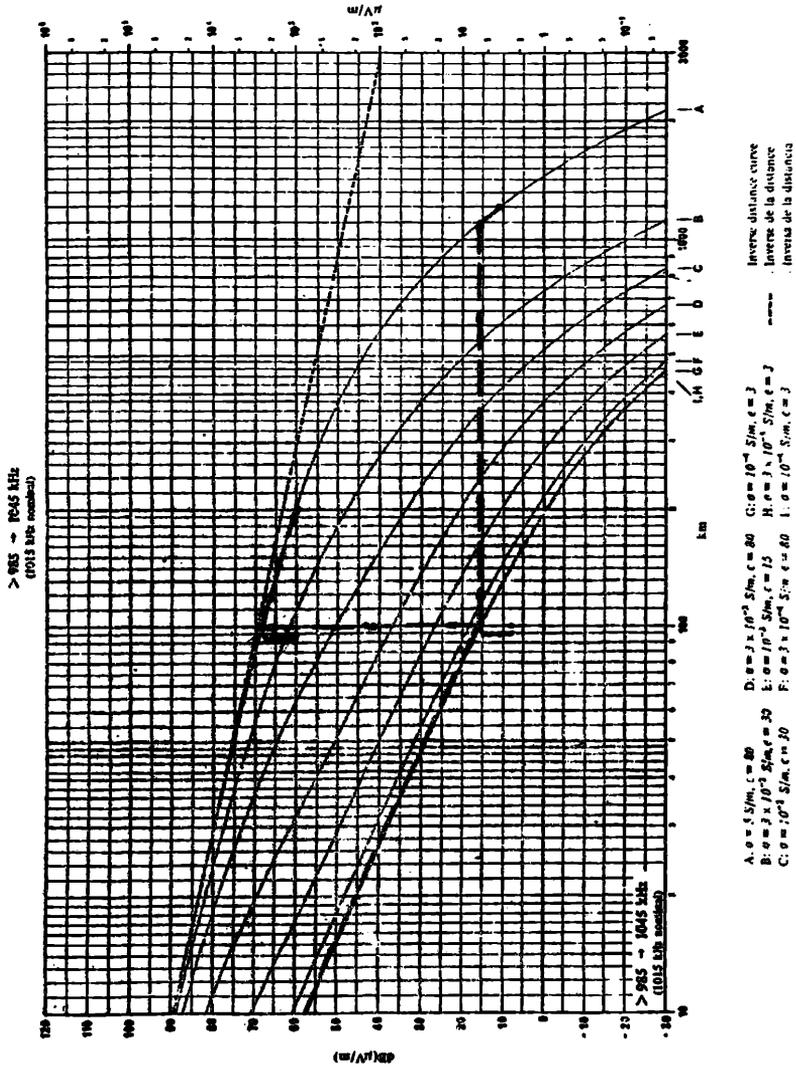


Fig. 1: Intensidad de campo en un trayecto compuesto aplicando el método de Kirke y la mitad directa del método de Millington.

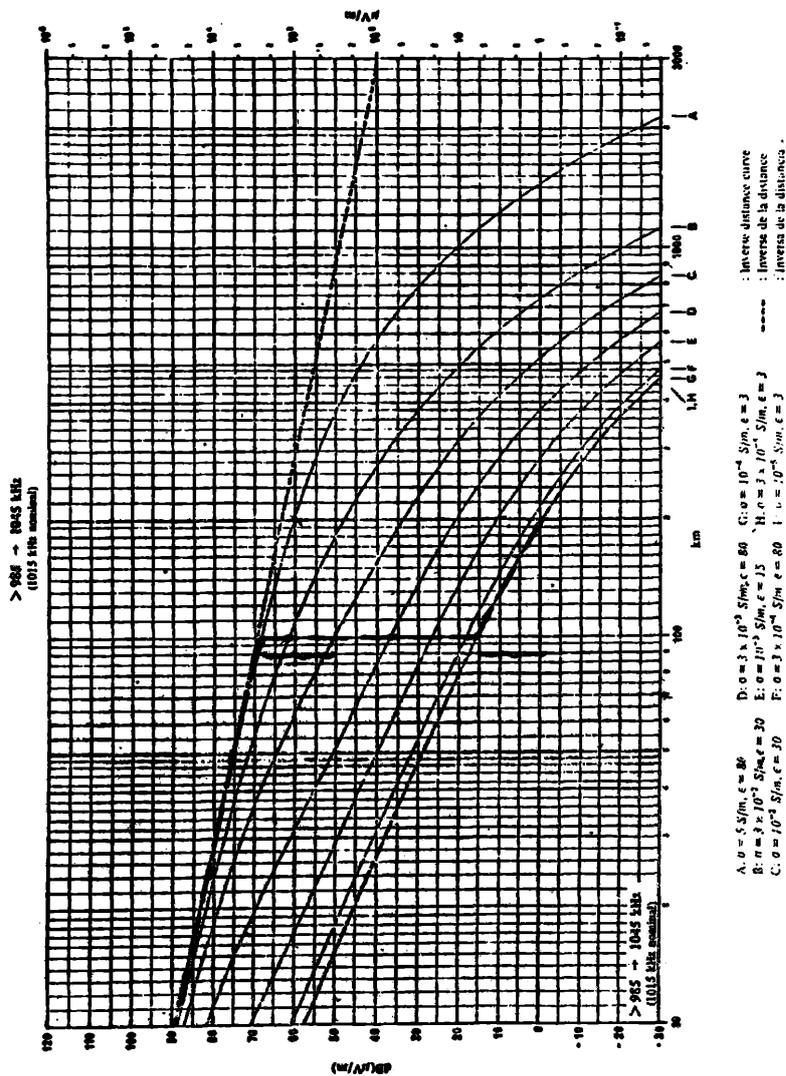


Fig. 2: Intensidad de campo en un trayecto mixto aplicando la mitad "inversa" del método de Millington.

