

## RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1271-0\*

**UTILIZACIÓN EFICAZ DEL ESPECTRO EMPLEANDO MÉTODOS PROBABILÍSTICOS**

(Cuestión UIT-R 45/1)

(1997)

**Alcance**

Esta Recomendación sirve de base para los criterios de calidad de funcionamiento desarrollados a través de la aplicación de métodos probabilísticos a fin de lograr una utilización más eficiente del espectro.

**Palabras clave**

Probabilidad de interferencia, utilización del espectro, modelo de interferencia, cofrecuencia, criterios de interferencia

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que la tecnología de comunicaciones ha experimentado grandes avances durante la última década y la utilización de los servicios de radiocomunicaciones por las administraciones ha multiplicado la demanda de espectro radioeléctrico;
- b) que la compartición de frecuencias es uno de los aspectos importantes para la utilización eficaz del espectro de frecuencias;
- c) que muchas directrices y criterios de compartición se basan en las hipótesis de interferencia más desfavorables;
- d) que la utilización más eficaz del espectro puede depender de la aceptación de criterios de calidad de funcionamiento elaborados mediante la aplicación de métodos probabilísticos;
- e) que sería necesario determinar las características estadísticas de las señales deseada e interferente para evaluar las situaciones de compartición del espectro y la utilización del espectro en función de las normas de calidad de funcionamiento,

*recomienda*

**1** que para lograr la utilización más eficaz del espectro, las administraciones consideren la utilización de las probabilidades de interferencia y su influencia en la calidad de funcionamiento del sistema.

**2** que para evaluar en su totalidad la posible interferencia al introducir un nuevo sistema en el entorno, se considere la probabilidad de interferencia debido a múltiples fuentes interferentes, utilizando técnicas tales como las indicadas en el Anexo 1 y para calcular la probabilidad de interferencia de estación de base a estación móvil y de estación móvil a estación de base en un sistema dúplex móvil terrestre, el método que aparece en el Anexo 2 debe ser usado.

NOTA 1 – Se incluirán ejemplos para explicar la forma de utilizar métodos probabilísticos a fin de realizar una estimación de las características de las señales deseada e interferente con objeto de aumentar la utilización del espectro.

---

\* La Comisión de Estudio 1 de Radiocomunicaciones introdujo algunas modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2018 y 2019, de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

ANEXO 1  
(Ejemplo 1)

**Cálculo de la tensión recibida debida a la radiación  
procedente de múltiples fuentes cofrecuencia**

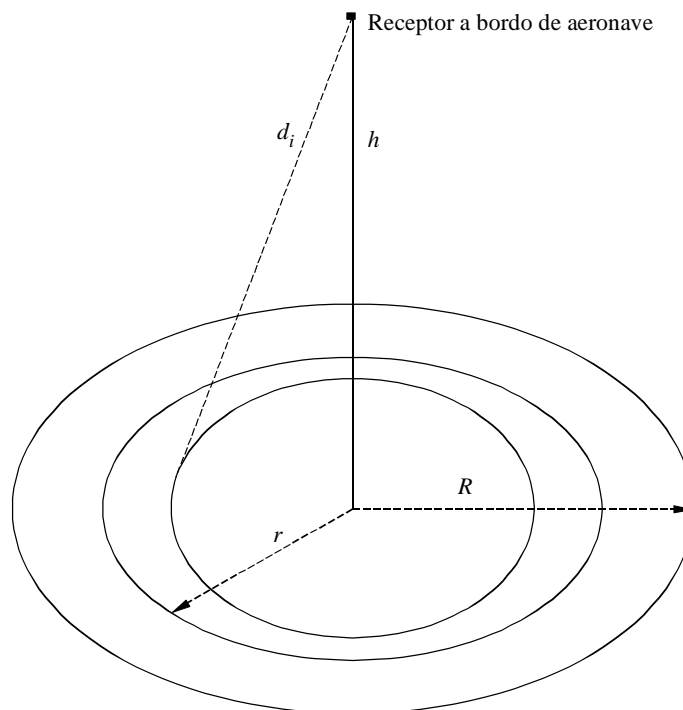
**1 Introducción**

Existen diversas situaciones de compartición de frecuencias en que puede aparecer interferencia. En algunas de estas situaciones se desconoce el número y el emplazamiento de las posibles fuentes interferentes (por ejemplo, cuando la interferencia procede de transmisores radioeléctricos del servicio móvil terrestre). En estos casos, la interferencia puede estimarse utilizando métodos probabilísticos.

El presente ejemplo describe un método que muestra claramente el concepto de cálculo de niveles de interferencia debida a múltiples fuentes utilizando métodos probabilísticos. Para mayor sencillez se considera el caso de un receptor a bordo de aeronave volando sobre zona urbana. En este caso concreto, pueden despreciarse los efectos de la curvatura de la Tierra. Se supondrá que la antena a bordo de la aeronave es un dipolo de media onda con un diagrama de radiación en coseno. Se supone que las  $N$  fuentes de interferencia se encuentran distribuidas de manera uniforme sobre la zona que, a su vez, se supone circular y de radio  $R$ , como se ilustra en la Fig. 1.

FIGURA 1

**Receptor a bordo de aeronave volando sobre zona urbana con fuentes de interferencia distribuidas uniformemente**



1271-01

El objetivo consiste en obtener una expresión sencilla de la función densidad de probabilidad (fdp) del valor eficaz de la tensión recibida en los terminales de la antena de recepción. Este ejemplo se basa en diversas hipótesis de simplificación, a saber:

- el número de transmisores interferentes,  $N$ , es elevado;
- los transmisores interferentes se encuentran uniformemente distribuidos, en términos geográficos, sobre una zona circular de radio  $R$ ;

- todos los transmisores interferentes presentan una potencia radiada del mismo valor;
- el receptor sometido a la interferencia procedente de todos los móviles se encuentra a bordo de una aeronave volando a una altitud,  $h$ , directamente encima del centro de la zona circular que contiene todas las fuentes interferentes;
- la ley de propagación entre cualquier fuente interferente y el receptor a bordo de la aeronave se asimila a la propagación en espacio libre.

## 2 Método

Si se considera que el receptor a bordo de la aeronave se encuentra volando sobre la zona urbana, la tensión en los terminales de la antena de recepción puede expresarse de la forma siguiente:

$$V = \sum_{i=1}^N C_A A(d_i) K_i e^{j\varphi_i} \quad (1)$$

$C_A$  es la relación entre la intensidad de campo en una antena y la tensión a través de sus terminales adaptados a una impedancia de 50  $\Omega$ :

$$C_A = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{50}{73}} \quad (2)$$

$A(d_i)$  es el factor de antena complejo relacionado con la distancia entre la fuente de interferencia y la antena,  $d_i$ , como sigue:

$$A(d_i) = a(d_i) e^{j\alpha(d_i)} \quad (3)$$

$K_i$  y  $\varphi_i$  son la amplitud y la fase del campo en la antena de recepción debido a la fuente interferente  $i$  y se definen de la forma siguiente:

$$K_i = E_L \left( \frac{d_L}{d_i} \right) K_s \quad (4)$$

siendo  $E_L$  el límite de intensidad de campo especificado (mV/m) a una distancia  $d_L$  (m) procedente de una sola fuente de interferencia.  $K_s$  es el factor del diagrama de radiación de la fuente interferente que tiene en cuenta la reducción del nivel medio con respecto al nivel máximo.  $d_i$  es la distancia entre la fuente de interferencia y la antena (m).

$$\varphi_i = \varphi(0) + \frac{2\pi d_i}{\lambda} \quad (5)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\varphi(0)$  es la fase inicial de la señal cuando sale de la fuente  $i$ .

Por consiguiente, la ecuación (1) puede escribirse de la forma siguiente:

$$V = \sum_{i=1}^N v_i e^{j\psi_i} \quad (6)$$

siendo:

$$v_i = C_A E_L K_s d_L \frac{a(d_i)}{d_i} \quad (7)$$

$$\psi_i = \varphi(0) + \frac{2\pi d_i}{\lambda} + \alpha(d_i) \quad (8)$$

presentando  $\psi_i$  una distribución uniforme entre 0 y  $2\pi$ .

Puede demostrarse fácilmente que  $|v|$  sigue una distribución de Rayleigh de manera que:

$$p(|v|) = \frac{|v|}{\xi^2} \exp\left[-\frac{|v|^2}{2\xi^2}\right] \quad (9)$$

siendo  $\xi^2 = (N/2)$ .  $E(v_i^2)$  es el valor esperado de  $v_i^2$ . La tensión eficaz es  $v_{ef} = \sqrt{2}\xi$ .

A partir de las variables indicadas, el valor eficaz de la tensión puede calcularse de la forma siguiente:

$$v_{ef} = \sqrt{N} C_A E_L K_S d_L \sqrt{E\left[\left(\frac{a(d_i)}{d_i}\right)^2\right]} \quad (10)$$

El factor antena/distancia:

$$\sqrt{E\left[\left(\frac{a(d_i)}{d_i}\right)^2\right]}$$

se debe al efecto combinado del diagrama de la antena de recepción y la dispersión de las fuentes de interferencia en la zona determinada y puede calcularse considerando la distribución de probabilidad de las fuentes interferentes. Suponiendo una distribución uniforme para mayor sencillez, véase la Fig. 1, la fdp del emplazamiento  $r$  de las fuentes de interferencia viene dada por la expresión:

$$p(r) = \frac{(2\pi r)}{(\pi R^2)} = 2 \frac{r}{R^2} \quad (11)$$

Como la curvatura de la Tierra es despreciable, la distancia entre la fuente interferente y la antena receptora es:

$$d_i = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (12)$$

Además, como se supone que el diagrama de antena sigue la ley del coseno:

$$a(d_i) = h/d_i \quad (13)$$

En consecuencia, el factor de antena viene dado por:

$$a(d_i) / d_i = h / d_i^2 = h / (r^2 + h^2) \quad (14)$$

cuyo valor esperado es:

$$E\left[\left(\frac{a(d_i)}{d_i}\right)^2\right] = \int_0^R \left(\frac{h}{r^2 + h^2}\right)^2 \frac{2r}{R^2} dr = \frac{1}{R^2 + h^2} \quad (15)$$

Esta última expresión es la adecuada para calcular la radiación combinada procedente de diversas fuentes situadas en una zona relativamente reducida tal como una ciudad de pequeño tamaño donde la curvatura de la Tierra puede despreciarse. Para ciudades de gran tamaño en que no puede aplicarse esta última hipótesis, puede obtenerse una fórmula que es relativamente más compleja.

### 3 Conclusión

En este ejemplo puede observarse que para determinar los efectos de las múltiples fuentes de interferencia en emplazamientos desconocidos, es necesario utilizar métodos probabilísticos con las hipótesis indicadas en la introducción. Las dos variables aleatorias, es decir la tensión recibida y el factor de antena, deben considerarse en su forma de valor esperado. Las ecuaciones (10) y (15) son ejemplos de fórmulas para calcular la tensión de interferencia procedente de la suma de un número relativamente elevado de fuentes de interferencia.

## ANEXO 2

(Ejemplo 2)

## Método para calcular la probabilidad de interferencia de estación de base a estación móvil y de estación móvil a estación de base en un sistema dúplex móvil terrestre

### 1 Introducción

En los sistemas móviles terrestres, la distancia de reutilización entre estaciones de base cocanal se determina tradicionalmente en función de un nivel aceptable de interferencia para la estación móvil afectada. Se trata de un método «determinista», que no toma en cuenta la probabilidad de interferencia. Por consiguiente, el cálculo de la distancia de reutilización se basa en hipótesis del caso más desfavorable. Está claro que, a menudo dichos sistemas no funcionan según esas hipótesis, lo que da lugar a una utilización ineficaz del espectro.

El método que aquí se presenta se basa en un enfoque «probabilístico». Define una probabilidad de interferencia en función de la distancia entre estaciones de base cocanal. La distancia de reutilización puede entonces determinarse considerando un nivel aceptable de probabilidad de interferencia, que es una función de parámetros específicos del sistema, así como el factor de rechazo fuera de canal (OCR), que mide la capacidad de un receptor para rechazar interferencias. Este parámetro se define en la Recomendación UIT-R SM.337.

La probabilidad de interferencia se define como la relación entre el área de la zona de cobertura expuesta a interferencia y el área total de dicha zona. En nuestro ejemplo, se supone una distribución uniforme de las estaciones móviles dentro de las zonas de cobertura interferente y afectada. Podría pensarse que esta probabilidad disminuye al aumentar la distancia de separación entre las estaciones de base. Nuestro análisis muestra que no es siempre así. Para algunos valores de OCR, la probabilidad de interferencia en realidad aumentará al principio para luego disminuir al aumentar la distancia. Utilizando las curvas de probabilidad es posible seleccionar una distancia de separación menor, correspondiente a una probabilidad de interferencia aceptable, con lo que aumentaría la utilización del espectro. Este método de cálculo de la probabilidad de interferencia es independiente de la técnica de modulación utilizada. Es asimismo aplicable tanto a sistemas radioeléctricos analógicos como digitales de diferentes anchuras de canal.

### 2 Cálculo de los criterios de interferencia

El ejemplo que nos ocupa suministra un método para determinar la probabilidad de interferencia en un sistema dúplex móvil terrestre. Las interferencias de base a móvil y de móvil a base son tratadas separadamente. En primer lugar es necesario definir un criterio para determinar la existencia o no de interferencia perjudicial.

En el criterio de interferencia se supone que ésta tiene lugar cuando la diferencia entre el nivel de potencia de interferencia  $P_i$  y el nivel de potencia deseado  $P_r$  es mayor que una proporción de protección dada,  $\varepsilon$  (dB) (es decir, si  $P_i - P_r > \varepsilon$ ). Aplicando la ley de la cuarta potencia, es posible expresar los niveles de potencia en términos de distancias, con lo cual el criterio de interferencia se transforma en  $d_2 < k d_1$ , parámetros que se definen como sigue:

$d_1$ : distancia (km) entre el transmisor y receptor deseados

$d_2$ : distancia (km) entre el transmisor interferente y el receptor deseado

$k$ : factor del criterio de interferencia, definido por:

$$k = 10^{\frac{\varepsilon - 20 \log \left( \frac{h_{DTx}}{h_{ITx}} \right) - 10 \log \left( \frac{G_{DTx}}{G_{ITx}} \right) - P_{iDTx} + P_{iITx} - OCR}{40}}$$

donde:

$h$ : altura de la antena (m)

$G$ : ganancia de antena isotrópica (dB)

$P_t$ : potencia transmitida (dBW)

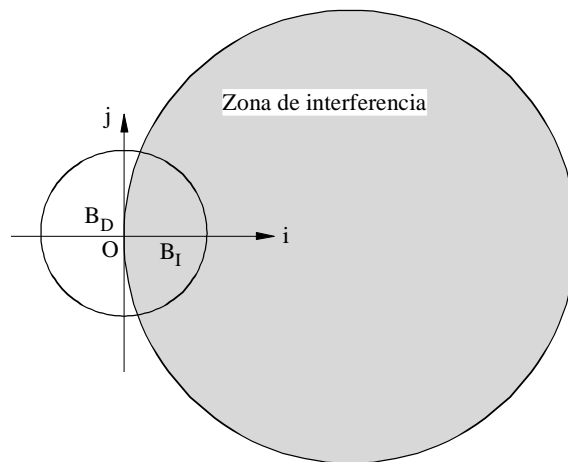
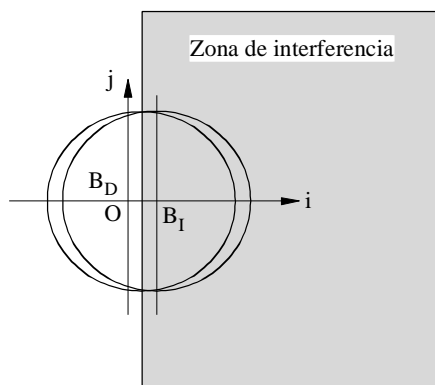
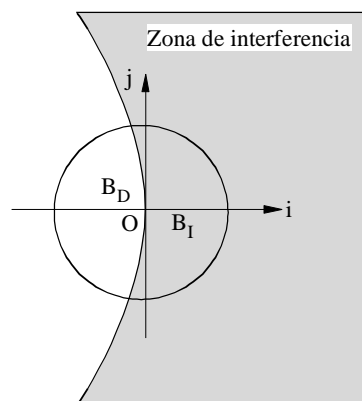
$OCR$ : factor de rechazo fuera de canal (dB)

$DTx$ : transmisor deseado

$ITx$ : transmisor interferente.

En función de los valores de estos parámetros,  $k$  puede tener uno de los tres valores posibles siguientes:  $0 < k < 1$ ,  $k = 1$ ,  $k > 1$ . En las Figs. 2a), 2b) y 2c) se presentan las zonas de interferencia para esos tres valores, respectivamente. Obsérvese que el área sombreada corresponde a la zona donde existe interferencia y que  $OCR = 1$  corresponde a un valor de OCR de 18 dB. Los resultados del análisis presentados en el § 6 muestran que los valores pequeños de OCR corresponden a una alta probabilidad de interferencia y que los altos valores de OCR corresponden a una baja probabilidad de interferencia para la misma distancia de separación.

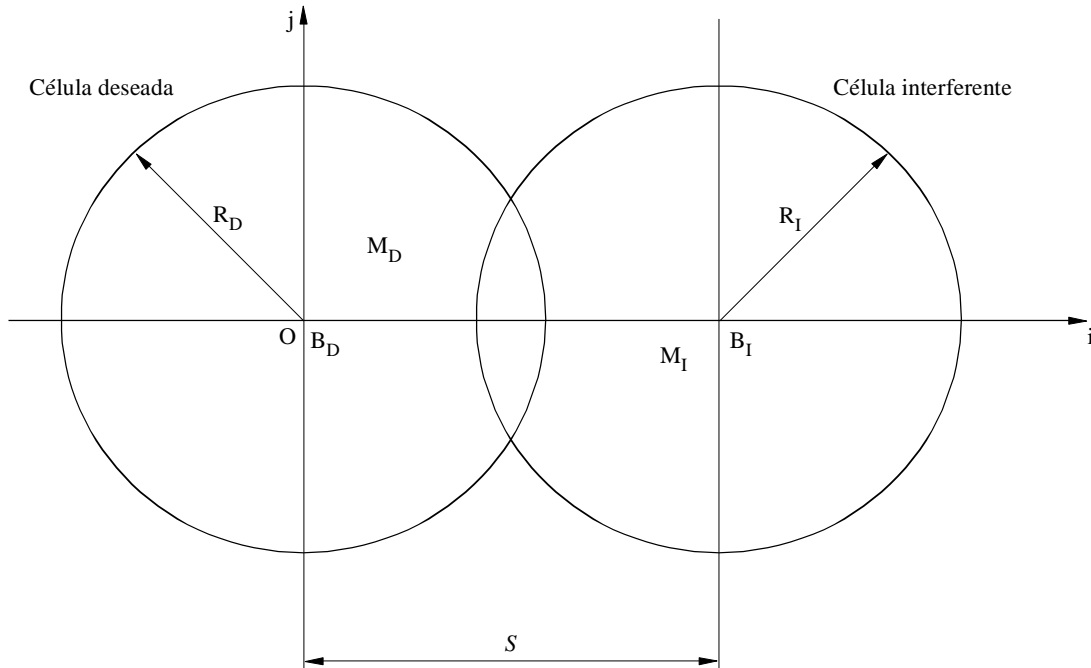
FIGURA 2

Zonas de interferencia para los tres valores de  $k$ a)  $k < 1$ b)  $k = 1$ c)  $k > 1$

### 3 Modelo probabilístico

La Fig. 3 representa las zonas de cobertura – o células – de dos estaciones de base separadas entre sí  $S$  km.

FIGURA 3  
Estaciones de base deseada e interferente



1271-03

Tanto en la célula deseada como en la célula interferente hay estaciones móviles. La estación de base deseada se denomina  $B_D$ , la estación de base interferente,  $B_I$  y, de modo similar, las estaciones móviles se denominan  $M_D$  y  $M_I$ . La constante,  $R$ , define el radio de las zonas de cobertura. La estación de base,  $B_D$ , está en el punto de origen y la estación de base,  $B_I$ , está a  $S$  km de distancia en el eje  $i$ . En ambos modelos,  $d_1$  se define como la distancia entre el Rx deseado y el Tx deseado. Del mismo modo,  $d_2$  es la distancia entre el Rx deseado y el Tx interferente. Todos los parámetros de distancia están en kilómetros.

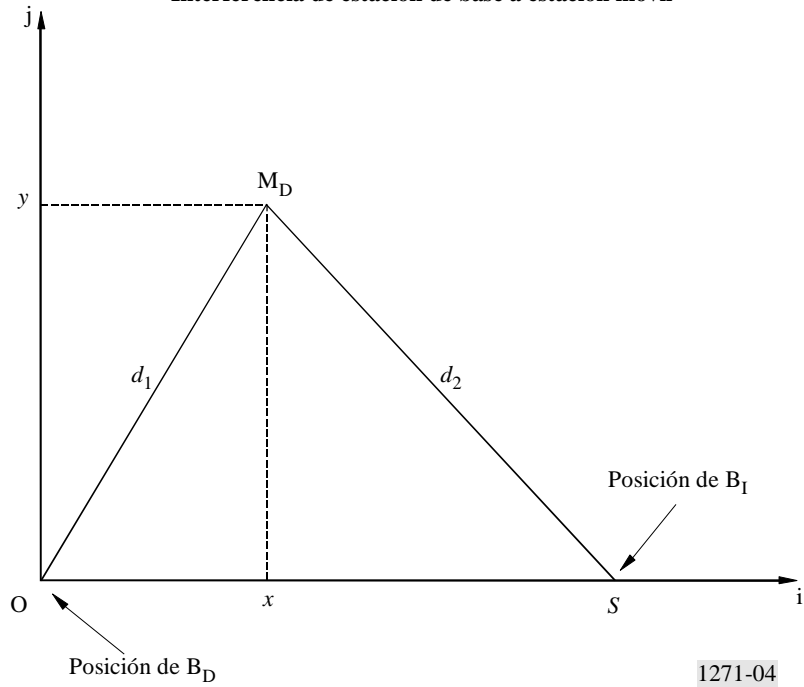
### 4 Interferencia de estación de base a estación móvil

Este tipo de interferencia ocurre cuando una estación móvil deseada,  $M_D$ , sufre interferencia de una estación de base interferente,  $B_I$ .

Para definir la probabilidad de interferencia es necesario determinar el área de superposición entre las zonas de cobertura y de interferencia, que está limitada por el perímetro de la zona de cobertura por un lado y la curva definida por  $d_2 = k d_1$  por el otro. Según el valor de  $k$ , dicha curva puede ser una circunferencia que encierra la región de interferencia ( $k < 1$ ), una recta ( $k = 1$ ) o una circunferencia que encierra la región sin interferencia ( $k > 1$ ). Estos círculos de interferencia, diferentes de las zonas de cobertura, tienen un centro y un radio que varían en función de  $k$  y  $S$ . Una vez determinadas estas áreas, la probabilidad de interferencia puede obtenerse dividiendo el área de interferencia por el área de cobertura.

FIGURA 4

## Interferencia de estación de base a estación móvil

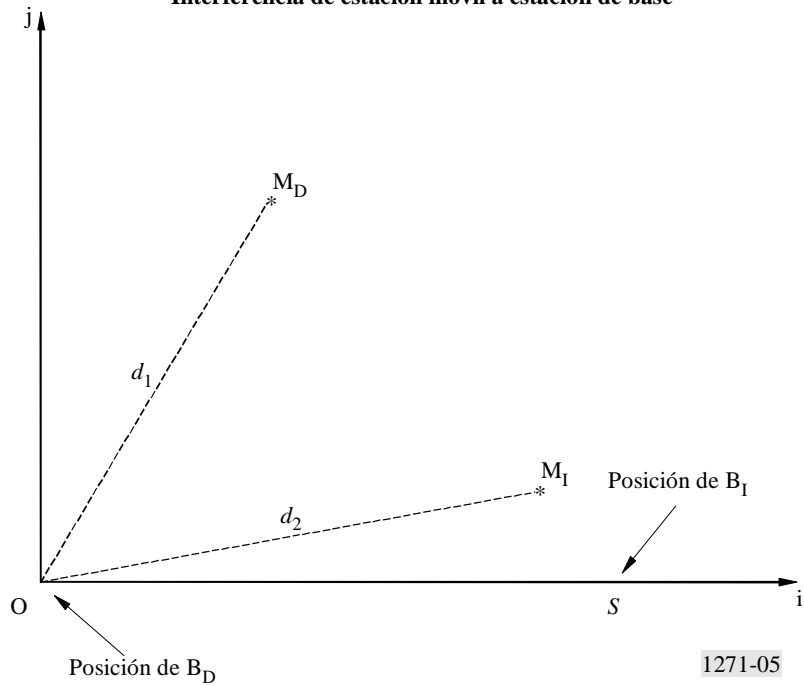


## 5 Interferencia de estación móvil a estación de base

Este tipo de interferencia ocurre cuando una estación de base deseada,  $B_D$ , sufre interferencia de una estación móvil interferente,  $M_I$ .

FIGURA 5

## Interferencia de estación móvil a estación de base





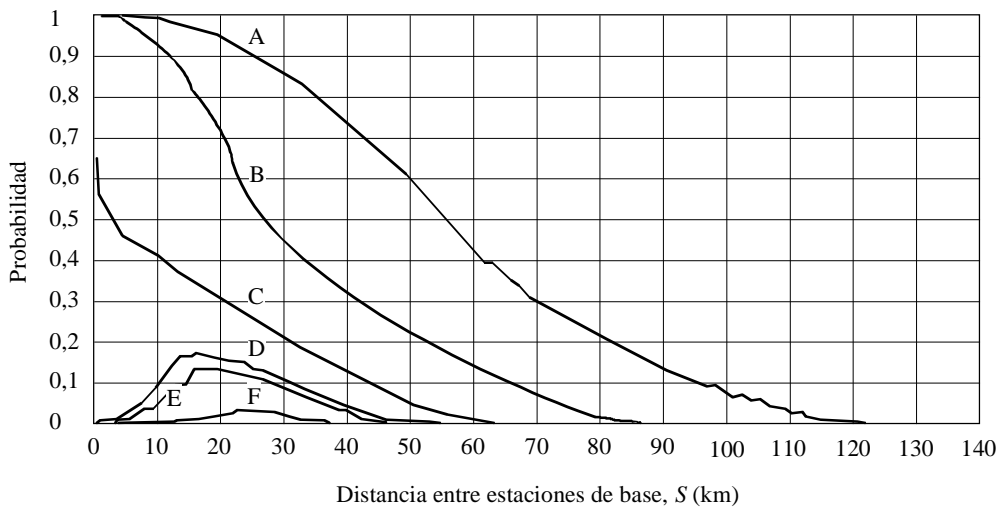
Para que una estación móvil produzca interferencia a una estación de base, la estación móvil deseada debe encontrarse a  $r$  km de  $B_D$  y la estación móvil interferente debe estar a menos de  $k r$  km de  $B_D$ . La probabilidad de interferencia en el receptor de la estación de base es el producto de las probabilidades de estos dos acontecimientos.

## 6 Resultados

Aplicando esta metodología, la interferencia de estación de base a estación móvil y viceversa se calcula para varios valores de OCR y  $S$ . Los distintos valores de OCR tienen en cuenta que diferentes sistemas móviles terrestres (tanto analógicos como digitales con diversas anchuras de canal) pueden interferirse entre sí.

Las curvas de probabilidad para las interferencias de estación de base a estación móvil y de estación móvil a estación de base están representadas en las Figs. 6 y 7. A modo de ejemplo, se han supuesto los siguientes valores:  $R_D = R_I = 32$  km,  $\epsilon = 18$  dB. En el Cuadro 1 se describe el significado de los distintos valores de OCR.

FIGURA 6  
Probabilidad de interferencia de estación de base a estación móvil



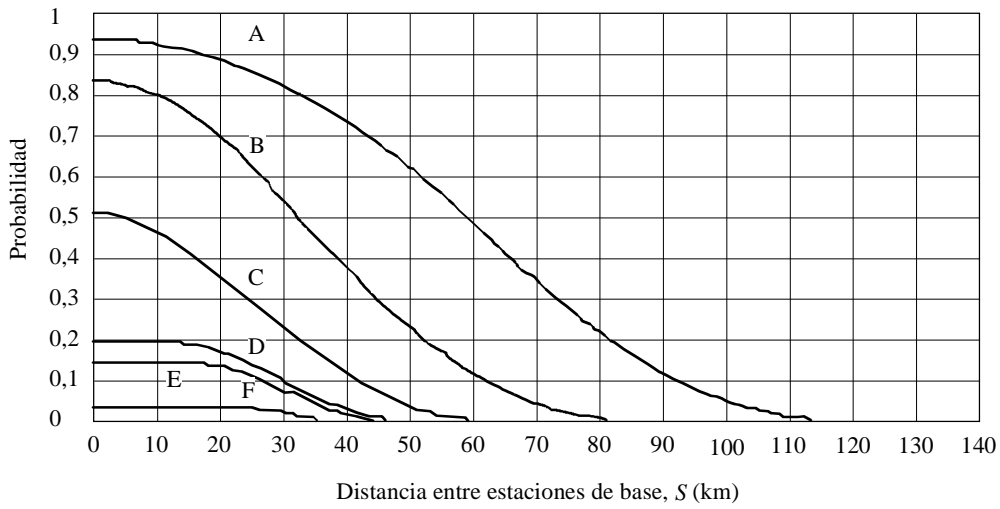
Curvas	OCR (dB)
A	0,0
B	8,5
C	17,8
D	26,4
E	29,0
F	42,9

1271-06

Mediante estas curvas es posible determinar la distancia de separación entre dos sistemas dúplex móviles terrestres, conociendo OCR y una probabilidad de interferencia aceptable. Por ejemplo, para un valor de OCR de 8,5 dB y una probabilidad de interferencia aceptable de 0,05, las curvas nos indican una distancia entre transmisores de 73 km para la interferencia de estación de base a estación móvil, y de 68 km para la interferencia de estación móvil a estación de base. Por lo tanto, ha de escogerse la distancia de 73 km, ya que satisface los requisitos mínimos de ambos tipos de interferencia.

FIGURA 7

Probabilidad de interferencia de estación móvil a estación de base



Curvas	OCR (dB)
A	0,0
B	8,5
C	17,8
D	26,4
E	29,0
F	42,9

1271-07

CUADRO 1

Curvas	OCR (dB)	$\Delta f$ (kHz)	Significado
A	0,0	0,00	Un tipo de sistema interfiere a un sistema similar
B	8,5	6,25	Dos sistemas de 12,5 kHz se interfieren entre sí
C	17,8	12,50	Dos sistemas de 25 kHz se interfieren entre sí
D	26,4	12,50	Un sistema de 25 kHz interfiere a otro de 12,5 kHz
E	29,0	12,50	Un sistema de 12,5 kHz interfiere a otro de 25 kHz
F	42,9	12,50	Dos sistemas de 12,5 kHz se interfieren entre sí

**7 Conclusión**

En el ejemplo se ha presentado un método de cálculo de la probabilidad de interferencia para sistemas dúplex móviles terrestres. Escogiendo un nivel aceptable de probabilidad de interferencia, puede determinarse la distancia de separación entre dos sistemas de este tipo. De esta manera puede determinarse la distancia mínima de separación requerida, aumentando así el grado de utilización del espectro.