

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.337-4

SEPARACIONES EN FRECUENCIA Y EN DISTANCIA

(Cuestión UIT-R 72/1)

(1948-1951-1953-1963-1970-1974-1990-1992-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los factores primordiales que determinan los criterios apropiados de separación en frecuencia o en distancia son, en los casos más usuales:
- la potencia y la distribución espectral de la señal requerida en el receptor;
 - la potencia y la distribución espectral de las señales interferentes y el ruido captado por el receptor;
 - la dependencia de la distancia de las pérdidas de transmisión entre equipos radioeléctricos;
- b) que por lo general, un transmisor emite radiaciones fuera de la banda de frecuencias necesariamente ocupada por la emisión;
- c) que intervienen también gran número de otros factores, tales como las propiedades del medio de transmisión, que son de carácter variable y difíciles de determinar, las características del receptor y, en el caso de recepción auditiva, las propiedades de discriminación del oído humano;
- d) que es posible establecer relaciones compensatorias con respecto a la separación de frecuencia o en distancia de los equipos radioeléctricos,

recomienda

- 1** que las separaciones en frecuencia y en distancia entre equipos radioeléctricos se calculen según el método siguiente:
- 1.1** determinación de la potencia y la distribución espectral de la señal captada por el receptor;
- 1.2** determinación de la potencia y la distribución espectral de las señales interferentes y del ruido captados por el receptor;
- 1.3** determinación de los efectos interactivos entre señales deseadas, interferentes y las características del receptor para varias separaciones de frecuencia o distancia usando las ecuaciones básicas del Anexo 1 y en caso necesario aproximaciones simples de la expresión integral, así como el concepto descrito en el Anexo 2;
- 1.4** determinación, con ayuda de estos elementos, de la separación en frecuencia o en distancia que asegure la calidad y la probabilidad de servicio necesarias para el tipo de comunicación requerido, teniendo en cuenta el carácter fluctuante de la señal y de la interferencia y, en su caso, las propiedades de discriminación del oyente u observador;
- 1.5** determinar los modelos de propagación UIT-R apropiados que deban ser utilizados;
- 2** que, en cada fase de este cálculo se haga una comparación, en la medida de lo posible, con los datos obtenidos bajo condiciones de trabajo controladas y representativas de las condiciones de explotación, particularmente en lo que se refiere al valor finalmente obtenido para la separación de frecuencia o en distancia entre equipos radioeléctricos.

ANEXO 1

Ecuaciones básicas

El presente Anexo indica las ecuaciones básicas que cuantifican los efectos recíprocos entre las señales deseadas, las interferentes y las características del receptor para distintas separaciones en distancia y en frecuencia. Las medidas son:

- el rechazo dependiente de la frecuencia (FDR – frequency dependent rejection) que es una medida del rechazo del espectro de emisión de un transmisor interferente proporcionada por la curva de selectividad del receptor;

- la característica distancia en frecuencia (FD –frequency distance) que es la medida de la distancia mínima que debe existir entre un receptor interferido y una fuente de interferencia en función de la diferencia entre sus frecuencias de sintonía;
- el valor relativo de la relación de protección en radiofrecuencia, A , que es (véase la Recomendación UIT-R BS.560) la diferencia (dB), entre la relación de protección cuando las portadoras de los transmisores deseado e interferente tienen una diferencia de frecuencia, Δf , y la relación de protección cuando las portadoras de esos transmisores tienen la misma frecuencia.

La característica distancia en frecuencia y el rechazo dependiente de la frecuencia son medidas del mecanismo de acoplamiento de interferencia entre la fuente interferente y el receptor y constituyen soluciones básicas necesarias para la evaluación de numerosos casos de interferencia. Contribuyen a la solución de los problemas de compartición cocanal de frecuencias y de interferencia en las bandas o canales adyacentes al proporcionar estimaciones de los criterios de separación mínima en frecuencia y en distancia que debe existir entre la fuente de interferencia y el receptor para que el funcionamiento de ese último sea satisfactorio.

El nivel de interferencia en el receptor es función de las ganancias y pérdidas que la señal interferente experimenta entre la fuente de interferencia y el receptor y se expresa por:

$$I = P_t + G_t + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f) \quad \text{dBW} \quad (1)$$

donde:

- P_t : potencia del transmisor interferente (dBW)
- G_t : ganancia de la antena del transmisor interferente en dirección del receptor (dBi)
- G_r : ganancia de la antena del receptor en dirección de la fuente de interferencia (dBi)
- $L_b(d)$: pérdida básica de transmisión para una distancia de separación, d , entre la fuente de interferencia y el receptor (dB) (véase la Recomendación UIT-R P.341)

y

$$FDR(\Delta f) = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (2)$$

donde:

- $P(f)$: densidad espectral de potencia de la señal de frecuencia intermedia (FI) equivalente interferente
- $H(f)$: respuesta de frecuencia del receptor

$$\Delta f = f_t - f_r$$

donde:

- f_t : frecuencia sintonizada de la fuente de interferencia
- f_r : frecuencia sintonizada del receptor.

El FDR puede constar de dos términos: el rechazo en sintonía (OTR – on-tune rejection) y el rechazo fuera de frecuencia (OFR – off-frequency rejection), es decir, el rechazo adicional que se produce cuando la frecuencia de interferencia es diferente de la de sintonía del receptor.

$$FDR(\Delta f) = OTR + OFR(\Delta f) \quad \text{dB} \quad (3)$$

donde:

$$OTR = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (4)$$

$$OFR(\Delta f) = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (5)$$

A menudo, el rechazo en sintonía, llamado también factor de corrección, puede expresarse aproximadamente por:

$$OTR \approx K \log \left(\frac{B_T}{B_R} \right) \quad B_R \leq B_T \quad (6)$$

siendo:

B_R : anchura de banda del receptor afectado por la interferencia a 3 dB (Hz)

B_T : anchura de banda del transmisor interferente a 3 dB (Hz)

$K = 20$ para señales no coherentes

= 20 para señales de impulsos.

ANEXO 2

Metodología para determinar las separaciones en frecuencia y en distancia aplicables a los sistemas radioeléctricos

1 Introducción

Es bien sabido que las reglas de separación en frecuencia y en distancia son un elemento importante del proceso de gestión de frecuencias en la mayoría de los servicios radioeléctricos. En los servicios canalizados estas reglas son las siguientes: los transmisores cocanal deben estar separados en al menos d_0 (km), en los transmisores en canales adyacentes deben estar separados en al menos d_1 (km), y entre los transmisores separados por dos canales debe haber como mínimo una distancia de d_2 (km), etc. Se conocen muy bien las reglas de separación en frecuencia y en distancia aplicables a las tecnologías más antiguas. No obstante, la introducción de nuevas tecnologías lleva a preguntarse qué tipo de reglas debe aplicar el gestor del espectro en el caso de que la misma banda de frecuencia esté ocupada por sistemas nuevos y antiguos. La metodología aplicable a la hora de determinar las reglas de separación en frecuencia y en distancia entre sistemas similares y diferentes se presenta a continuación.

2 Metodología

La elaboración de una nueva regla frecuencia-distancia exige calcular el nivel de interferencia a la entrada del receptor interferido, y hace necesario también definir un criterio de interferencia aceptable.

2.1 Cálculo de la interferencia

Este cálculo se basa en dos factores esenciales, a saber: un factor espectral y un factor espacial.

El *factor espectral* depende de las características espectrales del transmisor interferente y de la respuesta de frecuencia del receptor interferido. Para realizar los cálculos, hay que conocer exactamente la densidad espectral de potencia de la señal interferente, que depende de elementos tales como la técnica de modulación subyacente y la anchura de banda de la señal de información en el caso de sistemas analógicos o de la velocidad de transmisión de los datos, cuando se trata de sistemas digitales.

Por lo que al receptor interferido respecta, hay que conocer las características de respuesta de frecuencia en FI equivalente del receptor. Como modelo de base de la respuesta de frecuencia en FI del receptor, pueden utilizarse las especificaciones del fabricante, por ejemplo, la anchura de banda en la fase FI a 6 dB y 40 dB.

El factor espectral viene representado por el factor de rechazo fuera de canal, $OCR(\Delta f)$, que se define con arreglo a la siguiente relación:

$$OCR(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df} \quad \text{dB} \quad (7)$$

donde:

$P(f)$: densidad espectral de potencia de la señal interferente (W/Hz)

$H(f)$: respuesta de frecuencia equivalente en FI del receptor interferido

Δf : separación de frecuencia entre el receptor interferido y el transmisor interferente.

Hay que señalar que la ecuación (7) no difiere de la ecuación (2), aun cuando los límites inferiores de la integración sean diferentes.

De la ecuación (7) se desprende claramente que $OCR(\Delta f)$ depende en gran medida de la magnitud de la superposición entre la banda de paso del receptor y el espectro de potencia de la señal interferente. Cuando Δf aumenta, la magnitud de la superposición disminuye, lo que se traduce en una potencia de interferencia más baja o, dicho de manera equivalente, en valores más elevados para $OCR(\Delta f)$.

El *factor espacial* de la metodología se refiere al cálculo de la atenuación de la señal en función de la distancia; este factor se encuentra estrechamente relacionado con el modelo de propagación que ha de utilizarse y con la distribución estadística a la señal interferente en la etapa de entrada del receptor interferido. Habría que utilizar un modelo de propagación apropiado, como el recomendado por el UIT-R.

Huelga decir que el modelo de propagación que ha de utilizarse con este procedimiento depende de la configuración del sistema, así como de la banda de frecuencias de trabajo, del entorno geográfico de la zona de servicio y de la anchura de banda del sistema.

2.2 Criterio de interferencia

Este criterio es normalmente una relación sencilla que se basa en la opinión de que la interferencia sea perjudicial o tolerable. Idealmente, dicho criterio debería vincularse al nivel de degradación de la calidad de funcionamiento que el receptor interferido sea capaz de tolerar. Sin embargo, esto puede no ser práctico, al menos si se considera que existe un gran número de diferentes tipos de sistemas y tecnologías que tal vez no puedan tratar la interferencia del mismo modo. En consecuencia, se ha adoptado un criterio más genérico, basado en una relación de protección α (dB). La interferencia se considerará tolerable si se satisface la siguiente desigualdad:

$$P_d - P_i \geq \alpha \quad (8)$$

donde:

P_d : nivel de la señal deseada (dBW)

P_i : nivel de la señal interferente (dBW)

α : relación de protección (dB).

2.3 Procedimiento

El procedimiento que debe seguirse para elaborar una regla de separación en frecuencia y en distancia puede resumirse como sigue:

Etapas 1: Determinar el nivel de la señal deseada, P_d (dBW), en la etapa de entrada del receptor interferido.

Etapas 2: Calcular el nivel de interferencia resultante en la etapa de entrada del receptor interferido aplicando la fórmula:

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f) \quad (9)$$

donde:

P_t : potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) del transmisor interferente (dBW)

G_r : ganancia de la antena receptora con respecto a una antena isotrópica (dBi)

L_p : pérdida en el trayecto de propagación

$OCR(\Delta f)$: factor de rechazo fuera de canal para una separación de frecuencia Δf expresada por la ecuación (7).

Se toman como hipótesis los valores OCR utilizados en la presente Recomendación. El objeto de la presente Recomendación es más presentar el método que obtener los valores de OCR .

Etapas 3: Sustituir P_d y P_i de las Etapas 1 y 2 en la ecuación (8) para derivar o calcular numéricamente una relación entre la separación de frecuencia, Δf , y la separación en distancia, d , de forma tal que la interferencia se considere tolerable.

3 Aplicación a los sistemas radioeléctricos móviles terrestres

Para demostrar la aplicación de la metodología antes descrita, en la presente sección se describe un ejemplo en que se utilizan dos sistemas radioeléctricos móviles terrestres distintos. Los dos sistemas considerados pueden ser digitales o analógicos con técnicas de acceso múltiple por división en tiempo (AMDT) o acceso múltiple por división en frecuencia (AMDF). Nuestros cálculos se basan en máscaras de emisión espectral y una serie de características de selectividad del receptor, por lo cual los resultados no dependen de la técnica de modulación que pueda utilizar cualquiera de los dos sistemas. En este ejemplo, se supone que la selectividad del receptor tiene características similares a las máscaras de emisión espectral, lo cual será también el caso en principio para los sistemas digitales.

En los Cuadros 1 y 2 se resumen las hipótesis adoptadas para ambos sistemas.

CUADRO 1

Parámetros supuestos para el ejemplo

Nivel mínimo de la señal deseada, $P_{mín}$	-145 dBW
Relación de protección requerida, α	18 dB
Altura de la antena de la estación de base, h_b	75 m
Frecuencia de trabajo, f	450 MHz
p.i.r.e. de la estación de base	20 dBW
Ganancia de la antena receptora de base	0 dBi
Permitividad relativa equivalente, ϵ	30
Conductividad equivalente, σ	10^{-2} S/m

En los sistemas radioeléctricos móviles terrestres existen cuatro modos de interferencia: base a base, base a móvil, móvil a base y móvil a móvil. En los sistemas símplex, en los que la base y los móviles transmiten en la misma frecuencia, están presentes los cuatro modos de interferencia. En cambio, en los sistemas en dúplex, los móviles y la base transmiten en diferentes frecuencias y sólo sería necesario considerar los modos base a móvil y móvil a base. No obstante, para analizar la distancia de separación sólo es necesario examinar el caso más desfavorable, es decir, el caso en que la interferencia exige la mayor distancia de aislamiento entre sistemas. En la mayoría de los casos, se puede suponer que las estaciones de base funcionan cerca del 100% del tiempo y que el modo de interferencia base a base es el modo dominante que exige la mayor distancia de separación. Por este motivo no se consideran aquí otros modos.

A continuación, exponemos los modelos de propagación para los sistemas radioeléctricos móviles terrestres con los resultados numéricos para cada una de las dos combinaciones de sistemas examinadas.

3.1 Interferencia base a base

El modelo de propagación elegido para el modo base a base es el modelo de propagación por difracción (véase la Recomendación UIT-R P. 526). Según ese modelo, la atenuación del trayecto se expresa como:

$$L_{P_{bb}} = L_{FS} - L_{DIF/FS} \quad (10)$$

donde:

L_{FS} : atenuación del trayecto (dB) debida al espacio libre (FS – free space)

$L_{DIF/FS}$: relación entre la atenuación por difracción y la atenuación en el espacio libre (dB) que se define como sigue:

$$L_{DIF/FS} = 20 \log \left(\frac{E_{DIF}}{E_{FS}} \right) = F(X) + G(Y1) + G(Y2) \quad (11)$$

siendo:

$F(X)$: término de ganancia dependiente de la distancia normalizada entre estaciones de base

$G(Y1), G(Y2)$: términos de ganancia dependientes de las alturas de antena normalizadas de las estaciones de base

X : distancia normalizada entre las antenas de las estaciones de base

$Y1, Y2$: alturas de antena normalizadas, que se definen como sigue:

$$X = 2,2 \beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (12)$$

$$Y = 9,6 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h_{1,2} \quad (13)$$

donde:

$$\beta = \frac{1 + 1,6 K^2 + 0,75 K^4}{1 + 4,5 K^2 + 1,35 K^4} \quad (14)$$

K : admitancia en la superficie de la Tierra para la polarización vertical:

$$K = 0,36(a_e f)^{-1/3} \left[(\epsilon = 1)^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \left[\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

donde:

ϵ : permitividad relativa equivalente de la Tierra

σ : conductividad equivalente (S/m) de la Tierra

a_e : radio equivalente de la Tierra igual a 4/3 de 6 371 km

d : distancia (km) entre el transmisor y el receptor

f : frecuencia de transmisión

h_1 y h_2 : altura (m) de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente.

$$F(X) = 11 + 10 \log (X) - 17,6 X \quad (16)$$

$$G(Y) \cong 17,6 (Y - 1,1)^{1/2} - 5 \log (Y - 1,1) - 8 \quad \text{para } Y > 2 \quad (17)$$

$$G(Y) \cong 20 \log (Y + 0,1 Y^3) \quad \text{para } 10 K < Y < 2 \quad (18)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K + 9 \log (Y / K) [\log (Y / K) + 1] \quad \text{para } K / 10 < Y < 10 K \quad (19)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K \quad \text{para } Y < K / 10 \quad (20)$$

siendo K la admitancia superficial normalizada.

3.2 Resultados numéricos

3.2.1 Aspectos espectrales

La ecuación (7) se utilizó para calcular el factor de rechazo fuera de canal $OCR(\Delta f)$ en función de Δf . En nuestro ejemplo, estudiamos dos casos:

Caso 1: Sistema a 25 kHz que ocasiona interferencia a un sistema a 12,5 kHz.

Caso 2: Sistema a 12,5 kHz que ocasiona interferencia a un sistema a 25 kHz.

En el Cuadro 2, en el cual se expresa $OCR(\Delta f)$, se indican las hipótesis numéricas para ambos casos en función de la separación de frecuencia, Δf (kHz).

CUADRO 2

Resultados de OCR (dB) con interferencia entre dos sistemas distintos

Δf (kHz)	Caso 1: $OCR(\Delta f)$ (dB)	Caso 2: $OCR(\Delta f)$ (dB)
0	$\cong 0$	$\cong 0$
12,5	26,4	29
25	57,7	58,8
37,5	57,7	59

3.2.2 Aspectos espaciales

Basándose en los parámetros supuestos, que se consignan en los Cuadros 1 y 2, y suponiendo una distribución logarítmica normal de la potencia de la señal deseada recibida y un factor de variabilidad de la ubicación de 17 dB, la cobertura al 90% del sistema móvil terrestre es de 32 km. El nivel correspondiente de potencia deseada del receptor es:

$$P_d = P_{mín} + L_{VF} = -128 \text{ dBW}$$

En consecuencia, el nivel de interferencia admisible es: $P_d - \alpha = -146 \text{ dBW}$.

Las distancias de separación requeridas, D , entre las estaciones de base para los dos casos que se examinan, se han calculado mediante el procedimiento expuesto en la presente Recomendación. En el Cuadro 3 se indican resumidamente los resultados.

CUADRO 3

**Distancia de separación requerida, D (km)
y separación de frecuencia, Δf (kHz)**

Δf (kHz)	Caso 1 y Caso 2: D (km)
0	107,5
12,5	72,5
25	33
37,5	33

4 Regla de intermodulación frecuencia-distancia

Aparte de la interferencia cocanal y de canal adyacente, los sistemas móviles terrestres se ven afectados también por la interferencia de intermodulación debido a la formación de productos de intermodulación. En el caso de la intermodulación de tercer orden entre dos señales en el receptor como dos transmisores de estación de base intervienen en la formación de un producto de intermodulación, sus distancias mínimas aceptables con respecto a un receptor interferido están interrelacionadas.

Basándose en el supuesto de que la ganancia de antena del receptor sea igual a la pérdida total del receptor, que el valor medio del nivel mínimo de la señal deseada para generar una relación señal/interferencia incluyendo el ruido y la distorsión (SINAD) de 12 dB en presencia de ruido sea de -145 dBW, que se utilice la pérdida de trayecto en el espacio libre y que todos los transmisores tengan la misma p.i.r.e. igual a 20 dBW, puede aplicarse la regla de intermodulación frecuencia-distancia en la banda 410-470 MHz para predecir los niveles de potencia de interferencia interferente en el receptor interferido. En este modelo:

$$P = 2 P_N + P_F - 0,57 - 60 \log (\delta f) \quad (21)$$

donde:

P : nivel de potencia interferente resultante en el receptor interferido (dBW)

P_N : potencia recibida del transmisor cuya frecuencia es más próxima a la frecuencia del receptor interferido (dBW)

P_F : potencia recibida del transmisor cuya frecuencia está más alejada de la frecuencia del receptor interferido (dBW)

δf : separación entre las frecuencias de los transmisores cercano y lejano (MHz).

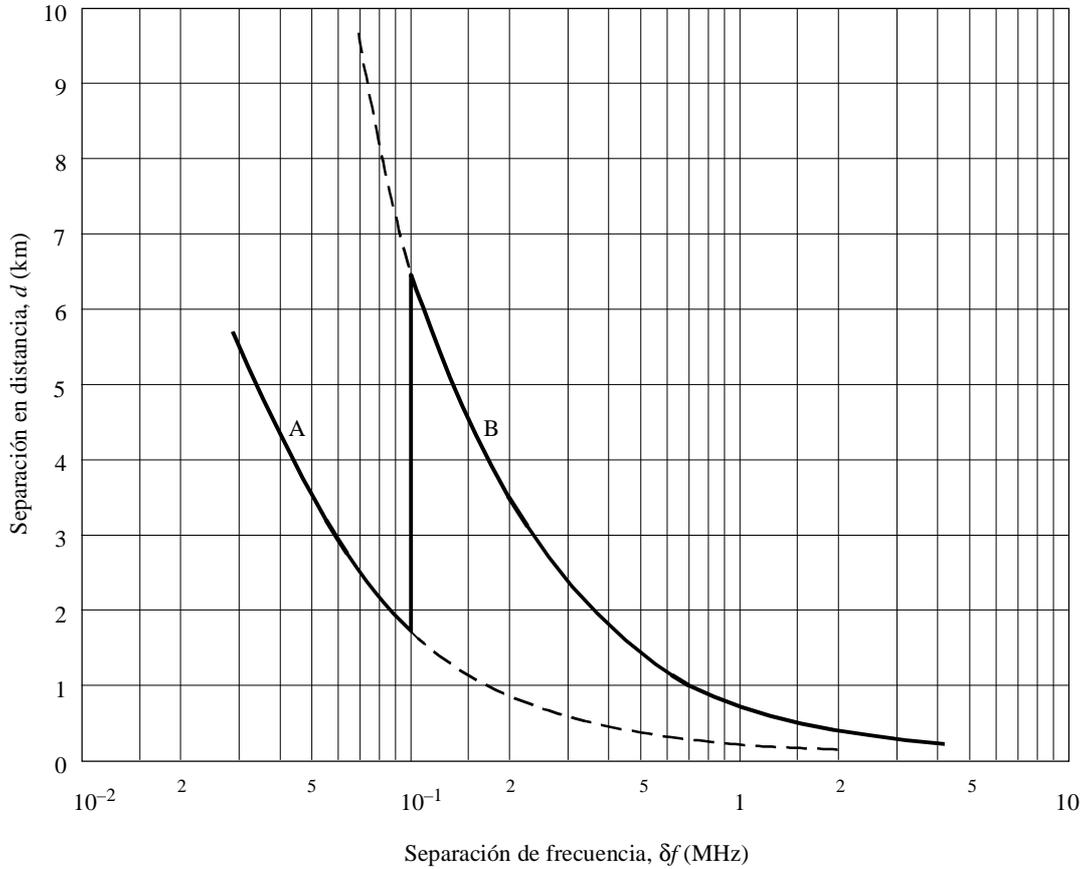
Cuando se utiliza un valor de frecuencia de la portadora de 460 MHz, se producirá intermodulación de tercer orden entre dos señales cuando:

$$d \cdot \delta f \leq 0,17 \quad (22)$$

siendo d la distancia entre la estación existente y una estación proyectada. Se ha supuesto un margen de protección de 6 dB entre el nivel de la potencia de la señal interferente y el nivel mínimo de potencia de la señal deseada. En la Recomendación UIT-R SM.1134 figura información útil al respecto. Dado que la estación proyectada puede intervenir en un producto intermodulación como receptor interferido, transmisor lejano o transmisor cercano, habrá que utilizar la curva B con la curva A para establecer la regla de intermodulación frecuencia-distancia, que se representa en la Fig. 1. La zona por encima de la curva corresponde a los casos de interferencia admisible, mientras que la zona inferior corresponde a las situaciones de interferencia potencial.

FIGURA 1

Regla de intermodulación frecuencia-distancia para el análisis de la interferencia de intermodulación de tercer orden entre dos señales en el receptor



— Curva de selección de intermodulaciones
 Curvas A: d en función de δf
 B: $2d$ en función de $2\delta f$

0337-01

5 Conclusiones

Para asignar una frecuencia a una nueva estación proyectada, se evalúa primeramente la interferencia cocanal y de canal adyacente utilizando las reglas de intermodulación frecuencia-distancia apropiadas. Una vez satisfechas estas reglas, se pasa a considerar las estaciones que pueden participar en la interferencia de intermodulación con la estación proyectada, basándose en la regla de intermodulación frecuencia-distancia. Si no se cumplen estas reglas, puede efectuarse un análisis detallado. Cabe observar que los análisis contenidos en la presente Recomendación no tienen en cuenta obstrucciones artificiales o naturales.