

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1134-1*, **

Cálculos de la interferencia de intermodulación en el servicio móvil terrestre

(1995-2007)

Alcance

La presente Recomendación sirve de base para calcular un máximo de tres interferencias de intermodulación que aparecen a la salida de un receptor bajo la influencia de señales no deseadas intensas a la entrada del mismo, debida a la no linealidad de la respuesta en amplitud del receptor.

Palabras clave

Interferencia de intermodulación, señales no deseadas, no linealidad

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, en los casos más característicos, los factores principales que determinan la interferencia en el servicio móvil terrestre son los siguientes:
- productos de intermodulación en banda generados por dos (o varias) señales interferentes de alto nivel;
 - emisiones no deseadas que se pueden producir en un transmisor cuando una señal procedente de otro transmisor también está presente en la entrada de las etapas de RF del transmisor afectado;
 - los niveles de las señales deseada e interferente son variables aleatorias;
- b) que dos (o varias) señales no deseadas deben tener frecuencias específicas tales que los productos de intermodulación caigan en la banda de frecuencias de un receptor;
- c) que la probabilidad de que se produzca una interferencia de intermodulación debida a más de dos señales no deseadas de alto nivel es muy pequeña;
- d) que el procedimiento de cálculo de la interferencia de intermodulación ofrecerá un medio útil de promover la utilización eficaz del espectro por el servicio móvil terrestre,

recomienda

- 1** que para el cálculo de la interferencia de intermodulación en el servicio móvil terrestre se utilice el modelo de intermodulación en el receptor que figura en el Anexo 1;
- 2** que para calcular la interferencia de intermodulación se siga el procedimiento siguiente, cuyos detalles figuran en el Anexo 1;
- 2.1** que se determine el valor medio y la dispersión de la potencia de una señal aleatoria deseada en la entrada del receptor;
- 2.2** que se determine el valor medio y la dispersión de la potencia de una señal aleatoria de interferencia de intermodulación en la entrada del receptor;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 5 de Radiocomunicaciones.

** 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.

2.3 que se determine la probabilidad de que los productos de intermodulación generados en el propio receptor y los ocasionados por la intermodulación en el transmisor se produzcan durante la recepción;

3 que las zonas afectadas por la interferencia de intermodulación y la separación geográfica necesaria entre los transmisores y receptores interferentes se determinen sobre la base de un valor dado de la probabilidad de interferencia, como se describe en el Anexo 1.

Anexo 1

Modelos de intermodulación

En este Anexo, dividido en cinco puntos, se describen dos modelos de intermodulación: el modelo de intermodulación en el receptor (RXIM) y el modelo de intermodulación en el transmisor (TXIM).

En el § 1 se describe la fórmula general para calcular la interferencia de intermodulación en el receptor. En el § 2 se indica el procedimiento de medición de la RXIM. En el § 3 se describe un procedimiento para evaluar la interferencia de intermodulación en el receptor utilizando la fórmula general. En el § 4 se indica la fórmula para calcular la interferencia de intermodulación en el transmisor y en el § 5 se indica cómo se calculan las probabilidades de interferencia de RXIM y TXIM.

1 Modelo de análisis de la intermodulación en el receptor

La potencia de interferencia de intermodulación de tercer orden de dos señales se calcula con la siguiente fórmula (Informe 522-2 del ex CCIR, Düsseldorf, 1990):

$$P_{ino} = 2(P_1 - \beta_1) + (P_2 - \beta_2) - K_{2,1} \quad (1)$$

donde:

- P_1 y P_2 : potencias de las señales interferentes a las frecuencias f_1 y f_2 , respectivamente
- P_{ino} : potencia del producto de intermodulación de tercer orden a la frecuencia f_0 ($f_0 = 2f_1 - f_2$)
- $K_{2,1}$: coeficiente de intermodulación de tercer orden y se puede calcular con las mediciones de intermodulación de tercer orden u obtener a partir de las especificaciones del equipo
- β_1 y β_2 : parámetros de selectividad de frecuencia de RF a las desviaciones de frecuencia Δf_1 y Δf_2 con respecto a la frecuencia de funcionamiento f_0 , respectivamente.

Los valores de β_1 y β_2 , por ejemplo, se pueden obtener mediante la ecuación para calcular la atenuación de una señal a una frecuencia fuera de sintonía.

$$\beta(\Delta f) = 60 \log \left[1 + \left(\frac{2 \Delta f}{B_{RF}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

donde B_{RF} es la anchura de banda de RF del receptor.

Cabe señalar que para una determinada serie de mediciones de intermodulación de tercer orden en receptores radioeléctricos analógicos del servicio móvil terrestre en las bandas de ondas métricas y decimétricas, se puede obtener la siguiente fórmula [McMahon, 1974] derivada de la ecuación (1):

$$P_{ino} = 2P_1 + P_2 + 10 - 60 \log(\alpha f) \quad (3)$$

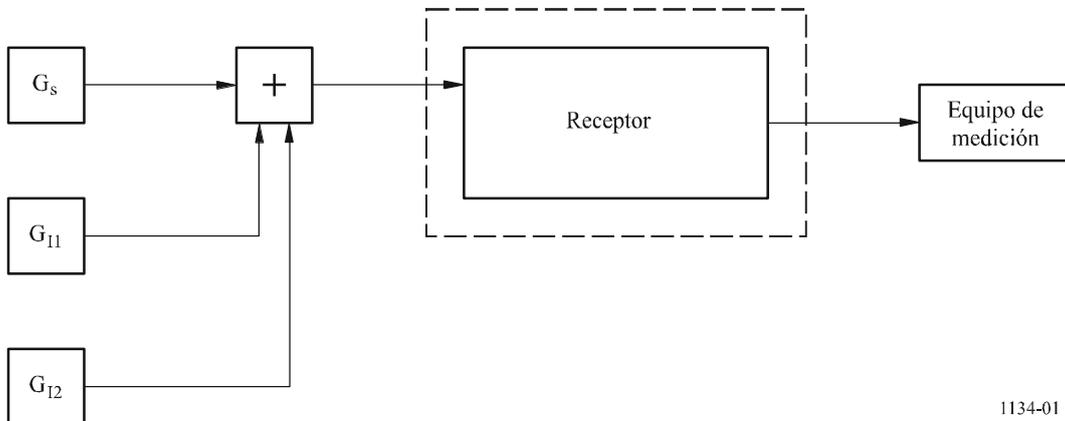
donde αf es la desviación de frecuencia media (MHz) y es igual a:

$$\frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2}$$

2 Características de la interferencia de intermodulación en el receptor

En la Fig. 1, G_s representa el generador de la señal deseada y G_{I1} y G_{I2} son los generadores de las señales interferentes que constituyen el producto RXIM. Estas señales se aplican a la entrada del receptor.

FIGURA 1
Diagrama en bloque para las medidas de intermodulación en el receptor



1134-01

Cuando se mide la característica de intermodulación del receptor, hay dos señales interferentes de igual nivel procedentes de los generadores G_{I1} y G_{I2} y la señal deseada de nivel P_{sr} procedente del generador G_s , que se aplican a la entrada del receptor. La desintonización de frecuencia de la primera señal interferente se hace igual a Δf_0 ; en cuanto a la segunda señal interferente, es aproximadamente igual a $2\Delta f_0$. El nivel de ambas señales interferentes a la entrada del receptor se aumenta hasta que alcanza $P_I(IM)$, nivel en que la calidad de recepción de la señal deseada no debe ser inferior a un valor determinado. La calidad de recepción está, pues, vinculada con la relación de protección cocanal A.

Obsérvese que:

P_{sr} : sensibilidad del receptor radioeléctrico (dBW)

$P_I(IM)$: sensibilidad a la intermodulación, que fue medida en el receptor (dBW).

Se obtiene, pues, conforme a la ecuación (1):

$$P_{ino} = 3P_I(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - K_{2,1} \quad (4)$$

Este nivel tiene la relación siguiente con P_{sr} :

$$P_{sr} - A = P_{ino} \quad (5)$$

Por tanto $K_{2,1}$ es:

$$K_{2,1} = 3P_I(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - P_{sr} + A \quad (6)$$

3 Procedimiento para el análisis de la intermodulación en el receptor

3.1 Modelo general

La interferencia causada por productos de intermodulación en el receptor se produce cuando se da las dos condiciones siguientes:

$$F_R - 0,5 \cdot B_{FI} \leq f_{IMP} \leq F_R + 0,5 \cdot B_{FI} \quad (7)$$

y

$$P_s - P_{ino} < A \quad (8)$$

siendo:

f_{IMP} : frecuencia del producto de intermodulación considerado

F_R : frecuencia de sintonización del receptor

B_{FI} : valor de la banda de paso en la etapa FI o, si no existe dicha etapa, la anchura de banda del filtro de banda de base

P_s : potencia de la señal útil (dBm)

P_{ino} : potencia equivalente de la interferencia del producto de intermodulación recalculada a la entrada del receptor (dBm)

A : relación de protección cocanal.

La P_{ino} viene dada por la ecuación (1). Según la ecuación (1), la condición (8) se puede expresar como sigue:

$$2P_1 + P_2 - P_s > R_0 \quad (9)$$

donde:

$$R_0 = -A + 2\beta_1 + \beta_2 + K_{2,1} \quad (10)$$

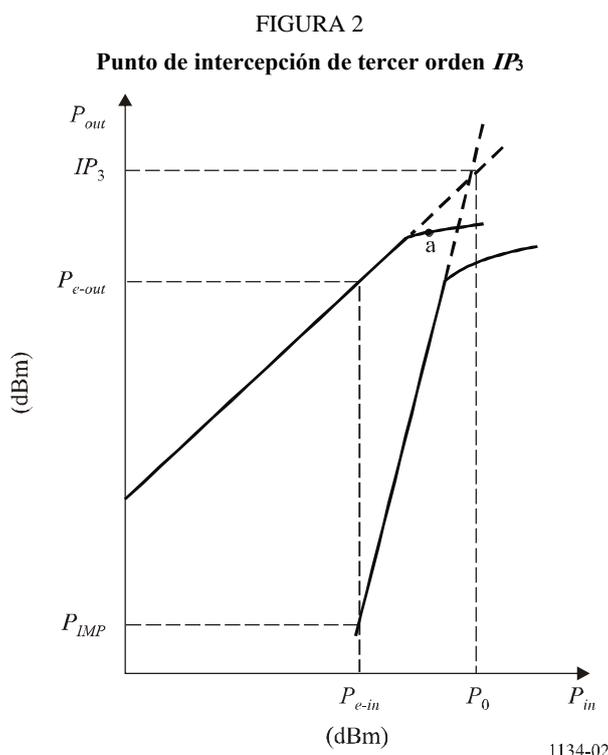
3.2 Método de cálculo del producto de intermodulación basado en puntos de intercepción

3.2.1 En los casos en que no se pueda medir el factor $K_{2,1}$ del receptor, para determinar el producto de intermodulación conviene emplear parámetros tales como el IP_i (puntos de intercepción de i -ésimo orden, siendo $i = 2, 3$ y 5) y factores IM_i de idéntico orden de los microcircuitos empleados en las etapas de entrada (preselectores y mezcladores) de los receptores modernos. El valor de los parámetros IP_i e IM_i figura en las correspondientes especificaciones.

El parámetro más conocido es el IP_3 (Manual de comprobación técnica del espectro de la UIT, 2002, § 6.5), «punto de intercepción de tercer orden» que es un nivel teórico para el que el nivel del producto de intermodulación de tercer orden es igual a los niveles de cada señal de entrada (dos señales idénticas que generan el producto de intermodulación tales como $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$) recalculado a la salida de un elemento no lineal (véase la Fig. 2).

Los parámetros IP_i representan el grado de linealidad de las etapas de entrada del receptor en el sentido de su capacidad para generar productos de intermodulación del orden correspondiente. Cuanto mayor sea el nivel de IP_i , mejor será la linealidad del receptor y más amplia su gama dinámica y, por consiguiente, mayores serán los niveles de las señales de entrada en los que se produce el producto de intermodulación y mejor será la protección del receptor contra la interferencia de intermodulación.

Los factores IM_i representan la susceptibilidad del receptor al producto de intermodulación de orden correspondiente. Estos factores dan una idea de la relación entre el nivel de intermodulación a la salida del receptor y el nivel de las señales a la entrada del mismo (dos señales idénticas que generan el producto de intermodulación a la salida).



En el Cuadro 1 se indican los valores medios y los límites de variación de los parámetros de los microcircuitos que se utilizan en las etapas de entrada de los receptores (preselectores y mezcladores), según los datos facilitados por los fabricantes más conocidos. Cada uno de los valores de estos parámetros figura en las especificaciones técnicas del equipo de que se trate. El parámetro G en el Cuadro 1 representa el factor de amplificación del preselector y las unidades dBc son decibelios respecto a la potencia de la portadora sin modular la emisión.

CUADRO 1

**Parámetros de los microcircuitos que se utilizan
en las etapas de entrada de los receptores**

G (dB)	IP_3 (dBm)	IM_2 (dBc)	IM_3 (dBc)	IM_5 (dBc)
12 ± 5	28 ± 5	-24 ± 5	-30 ± 5	-35 ± 5

En el Cuadro 2 aparecen las fórmulas para calcular los componentes del producto de intermodulación que se encuentran en la banda de paso de FI del receptor, siendo:

- f_{IMP} : frecuencias del producto de intermodulación de 2°, 3° y 5° orden generados por dos o tres señales entrantes
- P_{e-in} : la potencia de la señal entrante equivalente a la entrada del receptor; por dos o tres señales entrantes a la entrada del receptor con niveles de P_{e-in} idénticos generan el mismo producto de intermodulación que las señales con niveles P_1 , P_2 , P_3 distintos
- P_{IMP} : niveles del producto de interferencia de 2°, 3° y 5° orden generados por dos o tres señales a la entrada, siendo P_1 , P_2 , P_3 la potencia de dichas señales entrantes a las frecuencias f_1 , f_2 , f_3 , respectivamente. Los valores de PIMP se expresan en función de IP_i e IM_i .

CUADRO 2

**Interferencia del producto de intermodulación de 2°, 3° y 5° orden
en el caso de 2 ó 3 señales entrantes no deseadas**

Frecuencia, f_{IMP}	$f_g \pm f_h$ ($f_g > f_h$)	$2f_g - f_h$	$f_k + f_l - f_m$	$3f_g - 2f_h$	$2f_k - 2f_l + f_m$
Orden y tipo de productos	2 (1; 1)	3 (2; 1)	3 (1; 1; 1)	5 (3; 2)	5 (2; 2; 1)
P_{e-in} (dBm)	$(P_g + P_h)/2$	$(2P_g + P_h)/3$	$(P_k + P_l + P_m)/3$	$(3P_g + 2P_h)/5$	$(2P_k + 2P_l + P_m)/5$
P_{IMP} (dBm)	$2(P_{e-in} + G) - IP_2$	$3(P_{e-in} + G) - 2.IP_3$	$3(P_{e-in} + G) - 2.IP_3 + 6$	$5(P_{e-in} + G) - 4.IP_5$	$5(P_{e-in} + G) - 4.IP_5 + 9,5$
	$IM_2 + P_{e-in}$	$IM_3 + P_{e-in}$	$IM_3 + P_{e-in} + 6$	$IM_5 + P_{e-in}$	$IM_5 + P_{e-in} + 9,5$

En el Cuadro 2, las frecuencias f_{IMP} y los niveles P_{e-in} del producto de intermodulación de diversos subíndices se determinan del modo siguiente.

En el caso de dos señales entrantes: cada índice g y h toma uno de los dos valores 1 ó 2 con la condición:

$$g + h = 3$$

En el caso de tres señales entrantes: cada índice k , l y m toma uno de los tres valores 1, 2 ó 3 con la condición:

$$k + l + m = 6$$

Los cálculos de los niveles P_{e-in} del producto de intermodulación para diversos componentes del mismo debe efectuarse para la misma distribución de índices utilizada al calcular las frecuencias f_{IMP} de dichos componentes.

En el Cuadro 2 también se indica el número de componentes f_{IMP} y el número posible de niveles distintos P_{e-in} de diferente orden para señales entrantes de varios niveles. De las fórmulas P_{e-in} se desprende que para niveles de señales entrantes diferentes, los distintos componentes del producto de intermodulación a la salida para el mismo orden tienen también niveles diferentes, que pueden calcularse mediante este método.

La relación entre los niveles IP_i e IM_i puede calcularse sustituyendo los valores de P_{IMP} en el Cuadro 2:

$$\begin{aligned} IP_2 &= P_{e-in} + 2G - IM_2 \\ IP_3 &= P_{e-in} + 0,5 (3G - IM_3) \\ IP_5 &= P_{e-in} + 0,25 (5G - IM_5) \end{aligned}$$

El nivel equivalente del producto de intermodulación recalculado a la entrada del receptor P_{ino} es igual a:

$$P_{ino} = P_{IMP} - G$$

Para atenuar las señales entrantes interferentes no deseadas se instalan generalmente filtros diplexores o paso banda a la entrada de los receptores, antes de los preselectores. Los parámetros de los filtros (con características de forma trapezoidal) son: la banda de paso B_{RF1} , el extremo de la banda de atenuación B_{RF2} y la atenuación de las señales entrantes $\beta(\Delta f)$ fuera de la banda de paso (a $\Delta f > 0,5 \cdot B_{RF2}$ la atenuación se considera constante e igual a L_F dB).

En ese caso, las pérdidas de inserción del filtro en dB, son:

$$\beta(\Delta f) = \begin{cases} 0 & \text{para } |\Delta f| \leq 0,5 \cdot B_{RF1} \\ a \cdot |\Delta f| + c & \text{para } 0,5 \cdot B_{RF1} \leq |\Delta f| \leq 0,5 \cdot B_{RF2} \\ L_F & \text{para } 0,5 \cdot B_{RF2} \leq |\Delta f| \end{cases}$$

siendo: $|\Delta f|$ el desplazamiento de frecuencia de la señal entrante a la entrada del receptor:

$$\begin{aligned} a &= L_F / 0,5 (B_{RF2} - B_{RF1}) \\ c &= -0,5 \cdot a \cdot B_{RF1} \end{aligned}$$

La potencia de la señal a la entrada del preselector P_j a la frecuencia f_j ($j = 1; 2; 3$) es:

$$P_j = P_{j-in} - \beta(\Delta f)$$

siendo P_{j-in} la potencia de la señal entrante a la entrada del receptor.

3.2.2 Procedimiento de cálculo de la interferencia de intermodulación

- Paso 1:* Se determina la atenuación de las señales entrantes que aparecen a la entrada del receptor debida a los filtros de entrada $\beta(\Delta f_j)$, $j = 1; 2; 3$.
- Paso 2:* Se calculan los niveles de las señales entrantes que aparecen a la entrada del preselector P_j .
- Paso 3:* Se determinan los niveles del producto de intermodulación a la salida del mezclador P_{IMP} .
- Paso 4:* Se obtiene el nivel de intermodulación equivalente recalculado a la entrada del receptor P_{ino} .
- Paso 5:* Se calcula la relación señal/interferencia a la entrada del receptor R .
- Paso 6:* Se compara la relación señal/interferencia, R , con la relación de protección, A , para determinar las condiciones de compatibilidad del receptor con los otros sistemas radioeléctricos en el entorno electromagnético del caso.

3.2.3 Ejemplo de cálculos

Supóngase que se desea calcular la interferencia de intermodulación del tipo $f_1 + f_2 - f_3$ en el receptor y determinar su efecto perjudicial.

Datos disponibles: $IP_3 = 24$ dBm; $G = 15$ dB; $P_{1-in} = -50$ dBm; $P_{2-in} = -10$ dBm; $P_{3-in} = -15$ dBm; $P_s = -114$ dBm; $A = 9$ dB; $L_F = 30$ dB.

Supóngase además que los desplazamientos de frecuencia $|\Delta f_j| = |F_R - f_j|$ de las señales entrantes a la entrada del receptor son los siguientes:

$$|\Delta f_1| \leq 0,5 \cdot B_{RF1}; |\Delta f_2| > 0,5 \cdot B_{RF2} \text{ y } |\Delta f_3| > 0,5 \cdot B_{RF2},$$

Es decir, una de las señales entrantes se encuentra en la banda de paso del filtro situado a la entrada del receptor y las otras dos fuera de dicha banda.

En este caso:

$$\beta(\Delta f_1) = 0; \beta(\Delta f_2) = \beta(\Delta f_3) = 30 \text{ dB}$$

$$P_j = P_{j-in} - \beta(\Delta f_j); P_1 = -50 \text{ dBm}; P_2 = -40 \text{ dBm}; P_3 = -45 \text{ dBm}$$

A continuación se calculan P_{e-in} y P_{IMP} mediante las fórmulas del Cuadro 2:

$$P_{e-in} = (-50 - 40 - 45)/3 = -45 \text{ dBm}$$

$$P_{IMP} = 3(-45 + 15) - 2 \cdot 24 + 6 = -132 \text{ dBm}$$

$$P_{ino} = P_{IMP} - G = -132 - 15 = -147 \text{ dBm}$$

$$R = P_s - P_{ino} = -114 - (-147) = 33 \text{ dBm}$$

$R > A$, por lo que de conformidad con la fórmula (8) existe compatibilidad.

4 Potencia de los productos de intermodulación en el transmisor

La potencia P_i del producto de intermodulación que se produce en el transmisor y que posteriormente llega a la entrada del receptor, se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_i = P_2' - \beta_{12} - \beta_{10} - K_{(2),1} - L_{10} \quad (11)$$

donde:

- P_2' : potencia del transmisor interferente (con frecuencia f_2) en los terminales de salida del transmisor afectado (con frecuencia f_1), donde se producen los productos de intermodulación (dBW)
- β_{12}, β_{10} : atenuación debida a los circuitos de salida y de antena del transmisor afectado a la frecuencia f_1 con respecto al transmisor interferente a la frecuencia f_2 , y al producto de intermodulación a la frecuencia f_0 , respectivamente (dB)
- $K_{(2),1}$: pérdidas de conversión de intermodulación en el transmisor (dB) que son diferentes de $K_{2,1}$ de la ecuación (1)
- L_{10} : es la atenuación del producto de intermodulación en el trayecto entre el transmisor con frecuencia f_1 y el receptor (dB).

La interferencia causada por TXIM se produce cuando:

$$P_s - P_i < A \quad (12)$$

donde A es la relación de protección cocanal.

5 Probabilidad de interferencia

5.1 Probabilidad de interferencia RXIM

En las Recomendaciones UIT-R P.370, UIT-R P.1057 y UIT-R P.1146 se indica que, debido al desvanecimiento, los niveles de las señales deseada e interferente son variables aleatorias con una distribución logarítmico-normal. Por tanto, el término de la izquierda de la condición (9) (dBW) representa la suma de las cantidades aleatorias normales independientes y constituye una cantidad aleatoria normal. El valor medio, \bar{R} y la dispersión, σ_R^2 , de la cantidad aleatoria $R = 2P_1 + P_2 - P_s$ son iguales, respectivamente, a:

$$\begin{aligned}\bar{R} &= 2P_{1m} + P_{2m} - P_{sm} \\ \sigma_R^2 &= 4\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_s^2\end{aligned}$$

donde:

P_{1m}, P_{2m}, P_{sm} son los valores medios y $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_s^2$ son las dispersiones de los niveles de potencia de las señales deseada e interferente a la entrada del receptor (determinada sobre la base de los datos contenidos en la Recomendación UIT-R P.370, UIT-R P.1057 y UIT-R P.1146).

5.2 Probabilidad de interferencia TXIM

Teniendo en cuenta la ecuación (11), la condición (12) toma la siguiente forma:

$$P_2' - P_s - L_{10} > T_0 \quad (13)$$

donde:

$$T_0 = \beta_{12} + \beta_{10} + K_{(2),1} - A$$

El valor medio, \bar{T} y la dispersión, σ_T^2 , de la cantidad aleatoria:

$$T = P_2' - P_s - L_{10}$$

son, respectivamente, iguales a:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= P_{2m}' - P_{sm} - L_{10m} \\ \sigma_T^2 &= \sigma_2^2 + \sigma_s^2 + \sigma_1^2\end{aligned}$$

donde:

P_{2m}', P_{sm}, L_{10m} : valores medios

$\sigma_2^2, \sigma_s^2, \sigma_1^2$: dispersiones de las cantidades aleatorias P_2', P_s, L_{10} .

5.3 Probabilidad de productos de intermodulación

La probabilidad, α , de que durante la recepción aparezcan productos de intermodulación generados en el propio receptor y como resultado de la intermodulación en el transmisor (condiciones (9) y (13), respectivamente), es igual a:

$$\alpha = \int_x^\infty e^{-t^2/2} \frac{dt}{\sqrt{2\pi}} \quad (14)$$

$x = (R_0 - \bar{R}) / \sigma_R$: al determinar la probabilidad de que aparezcan productos de intermodulación en los receptores (condición (9));

$x = (T_0 - \bar{T}) / \sigma_T$: al determinar la probabilidad de interferencia debida a los productos de intermodulación que aparecen en los transmisores (condición (13)).

Al determinar las zonas afectadas por la interferencia de intermodulación sobre la base de un valor dado de probabilidad de interferencia α , el valor de x se determina primero mediante la ecuación (14). Después para un valor conocido de P_{sm} se pueden determinar los valores admisibles de P_{1m} y P_{2m} o (P_{2m} y L_{10m}) y las separaciones geográficas necesarias correspondientes entre los transmisores interferentes y el receptor, de los que dependerá la zona afectada por la interferencia.
