

**ESPECTRO DE RADIOFRECUENCIA DE LOS TRANSMISORES DE
RADIODIFUSIÓN SONORA CON MODULACIÓN DE FRECUENCIA**

(Cuestión 46/10, Programa de Estudios 46L/10)

(1986)

1. Introducción

El espectro de radiofrecuencia (RF) de los transmisores de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia es teóricamente infinito. En la práctica, puede plantearse la necesidad de conocer con precisión la anchura de banda necesaria (número 146 del Reglamento de Radiocomunicaciones) o la anchura de banda ocupada (número 147 del Reglamento de Radiocomunicaciones). Por ejemplo, sólo cuando se conoce la anchura de banda ocupada es posible planificar un servicio aceptable en las bandas adyacentes.

El Reglamento de Radiocomunicaciones prescribe las reglas para el cálculo de la anchura de banda de emisión necesaria para numerosos servicios y en el apéndice 6 a dicho Reglamento figuran ejemplos. De acuerdo con estas reglas, la anchura de banda necesaria de las emisiones con modulación de frecuencia se calcula utilizando la regla de Carson:

$$B_n = 2f_{m\acute{a}x} + 2DK$$

donde:

B_n : anchura de banda necesaria,

$f_{m\acute{a}x}$: frecuencia más alta de modulación,

D : excursión máxima de la portadora RF,

K : factor esencialmente indefinido y que en los ejemplos se considera igual a 1.

En la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia la excursión máxima es $D = 75$ kHz, y la frecuencia de modulación más alta $f_{m\acute{a}x} = 15$ kHz o $f_{m\acute{a}x} = 53$ kHz para emisiones monofónicas o estereofónicas, respectivamente. Cuando se transmiten señales de programas radiofónicos o de información suplementaria, el valor correspondiente puede ser de 76 kHz.

Con estos valores y $K = 1$ las anchuras de banda resultantes de la aplicación de la Regla de Carson serían:

$$B_n = 180 \text{ kHz}, B_n = 256 \text{ kHz}, \text{ o } B_n = 302 \text{ kHz}, \text{ respectivamente.}$$

* Este Informe se señala a la atención de la Comisión de Estudio 1.

Los resultados de las mediciones, particularmente cuando se trata de emisiones estereofónicas difieren considerablemente de los valores calculados. De acuerdo con el Informe 418, es bastante dudoso si la regla de Carson puede utilizarse o no en los cálculos de la anchura de banda para emisiones estereofónicas, pues la hipótesis $D \gg f_{\max}$ no se cumple y, en consecuencia, es posible tener que utilizar un valor de K distinto de 1.

Se experimentan también dificultades al calcular la anchura de banda ocupada y las emisiones fuera de banda. Por ejemplo, en la Recomendación 328 «Espectros y anchuras de banda de las emisiones», no se hace ninguna referencia a las emisiones fuera de banda de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia, aunque estas emisiones se definen en dicha Recomendación. Incluso en los Informes 275 y 324, que se citan en la Recomendación y tratan de las mediciones de las anchuras de banda de las emisiones, no se facilita información útil al respecto. En el Informe 977 se describen las mediciones del espectro de frecuencia de los transmisores modulados en frecuencia por ruido blanco, pero los resultados de esas mediciones no permiten sacar conclusiones en lo que se refiere al espectro de radiofrecuencia de los transmisores de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia. Las mediciones descritas a continuación se realizaron teniendo presentes estas consideraciones [CCIR, 1982-86a].

2. Señal de programa simulado

Con respecto a las variaciones en el tiempo, existe una relación estrecha entre el espectro RF de un transmisor MF y la señal de programa moduladora. De ahí que sólo pueda darse información estadística sobre la distribución media de la densidad de potencia o sobre el porcentaje de tiempo en que se rebasan determinados niveles.

En vista de la estrecha relación existente entre el espectro de RF y la señal moduladora de audiofrecuencia se trató de determinar en primer lugar una señal representativa del programa. En varias mediciones se utiliza el ruido coloreado descrito en la Recomendación 559 para simular una señal de programa. La distribución espectral de la densidad de potencia de ese ruido coloreado concuerda bastante con la de un programa de radiodifusión no comprimido representativo, y se prefiere para determinadas mediciones debido a su reducida gama dinámica. En cambio, en el caso de mediciones del espectro, deberá utilizarse una señal moduladora de audiofrecuencia que tiene características dinámicas similares a las de un programa ordinario de radiodifusión. Con ese fin se determinó durante un periodo de una semana la distribución de amplitud de un programa de radiodifusión estereofónico no comprimido. La línea continua de la fig. 1 indica la distribución temporal acumulada de los niveles de programas radiofónicos para esta señal de audiofrecuencia. Además, las mediciones indicaron que las variaciones de un día a otro eran inferiores a 2 dB.

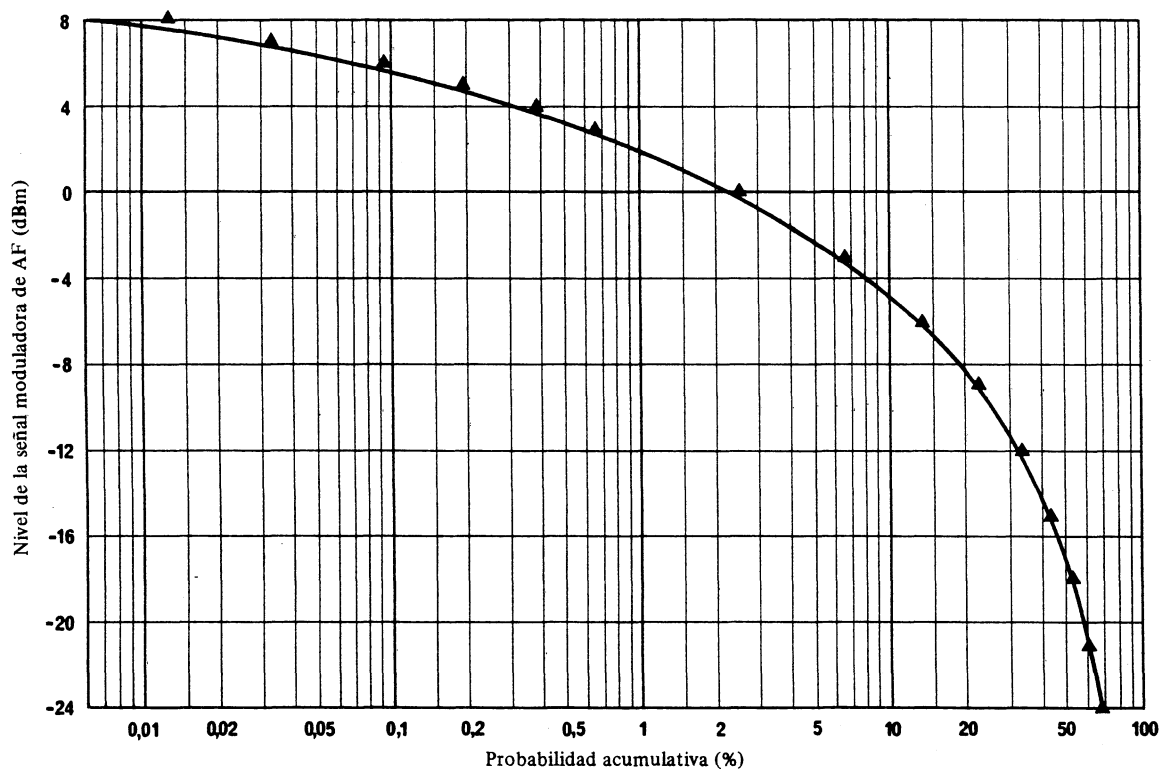


FIGURA 1 – Distribución de la amplitud de las emisiones de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia

- ▲ : Distribución obtenida con la cinta de prueba formada por una secuencia de 60 muestras de programa (representativa de un programa de alta calidad no comprimido)
- : Distribución correspondiente al programa durante una semana

A fin de reducir el tiempo necesario para las mediciones, se tomaron muestras de un minuto de duración a intervalos de tiempo equidistantes. De esta manera, se obtuvo una secuencia de 60 muestras de programas radiofónicos que es representativa de un programa estereofónico de 24 horas. Esto puede observarse en la fig. 1, en la cual los puntos de referencia indican la distribución acumulada de la secuencia de muestras. La utilización de esta secuencia de muestras como sustituto representativo de un programa real se justifica por la casi coincidencia de los puntos de referencia con la curva en la fig. 1.

3. Mediciones de espectros

En determinadas hipótesis, el espectro de densidad de potencia de una función del tiempo puede medirse con un analizador de espectro. Como no sólo se pretendía determinar la distribución de densidad de potencia sino también los espectros correspondientes a distintos porcentajes de tiempo, el analizador de espectro sólo se empleó como filtro dotado de una anchura de banda de ruido de 1,2 kHz y como demodulador logarítmico. El analizador se sintonizó a diversas frecuencias de distinta separación con respecto a la portadora de RF. Mediante un contador estocástico conectado a la salida del analizador se determinó el porcentaje de tiempo en que se rebasan diversos niveles. Con este fin se moduló en frecuencia un generador de señales RF, cuya salida estaba directamente conectada con la entrada del analizador a través de una red de preacentuación (50 μ s) y un codificador estereofónico con ruido coloreado con la señal de audiofrecuencia que simulaba un programa estereofónico típico. Con el ruido coloreado, la excursión de frecuencia era de ± 32 kHz como en el método descrito en el anexo I a la Recomendación 641, mientras que para las señales AF la excursión de frecuencia correspondió a condiciones de explotación normales, es decir, ± 40 kHz cuando la señal de audiofrecuencia es un tono sinusoidal de 500 Hz de nivel de estudio (+6 dBm). Esta condición de utilización (indicador de amplitud máxima del CCITT (Informe 292 del CCIR)) se obtuvo con un transmisor ajustado de modo que la excursión máxima en el modo estereofónico no excediese de ± 75 kHz.

Las mediciones estereofónicas con ruido coloreado originaron otro problema. Hasta entonces, los transmisores MF estaban modulados con ruido coloreado en monofonía únicamente. Si se utiliza la misma fuente de ruido para los canales A y B, hay correlación entre ambas señales y, por consiguiente, no se producirá ninguna señal diferencia, S , mientras los niveles A y B sean iguales. Dado que dos fuentes distintas de ruido, con señales sin correlación entre sí, no son representativas de un programa de radiodifusión, se puede encontrar una solución intermedia adecuada de acuerdo con la distribución de amplitud de las emisiones MF. En concreto, se midió la relación existente entre la señal suma, M , y la señal diferencia, S . Tras varias mediciones que dieron resultados bastante concordantes entre sí se observó que por lo general:

$$M \approx S + 10 \text{ dB}$$

Así, en el caso de mediciones efectuadas con ruido coloreado en estereofonía se obtuvieron los niveles adecuados proporcionando niveles distintos a las entradas A y B del codificador estereofónico. La relación elegida fue:

$$A = B - 6 \text{ dB}$$

Esto significa que el nivel alcanzado por la señal en el canal A es la mitad del correspondiente al canal B. Así se obtiene, en escala lineal.

$$\text{Señal suma:} \quad M = (A + B)/2 = 1,5 B/2$$

$$\text{Señal diferencial:} \quad S = (A - B)/2 = 0,5 B/2$$

y en consecuencia:

$$M = 3 S$$

es decir, la señal M es aproximadamente 10 dB más intensa que la señal S .

4. Resultados de las mediciones

Para empezar se determinó la distribución de amplitud acumulada en función del tiempo en diversas bandas espectrales, cada una con una anchura de 1,2 kHz, dentro del espectro MF de una transmisión monofónica o estereofónica. La portadora RF no modulada sirvió como nivel de referencia (0 dB). Debido a la gama dinámica limitada de la instalación de medición (típicamente 85 dB), sólo en un caso pudieron efectuarse las mediciones con separaciones de hasta 150 kHz. Como en el modo monofónico la portadora RF no se modula durante las pausas del programa, los niveles tienden a 0 dB para una diferencia de frecuencia de 0 kHz y porcentajes de tiempo pequeños. Este resultado contrasta con el obtenido con el ruido coloreado.

A partir de las distribuciones de amplitud medidas puede calcularse la potencia contenida en las correspondientes bandas de frecuencia. En las figs. 2 y 3 se representa la distribución de densidad de potencia resultante dentro del espectro de frecuencia de un transmisor MF según el modo de modulación y la señal de programa simulado. Conviene señalar que la densidad de potencia no está referida a 1 Hz, ya que la curva identificada por ef es la diferencia de nivel entre la portadora RF no modulada y la potencia medida dentro de una anchura de banda de frecuencia de ruido de 1,2 kHz.

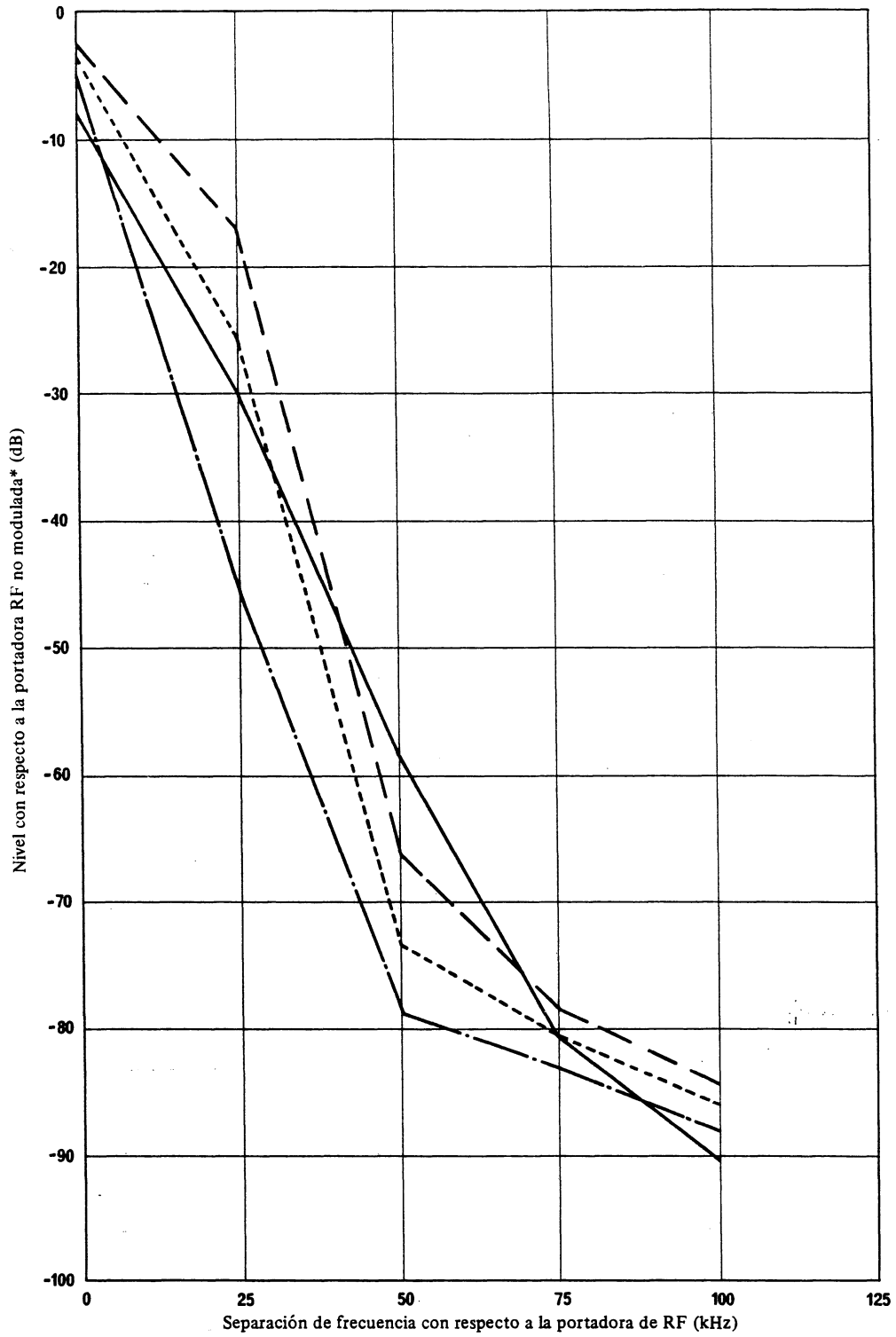


FIGURA 2 - Espectro MF con programa (monofonía)

- 1%
 - - - 3%
 - · - · 10%
 - ef: Nivel eficaz
- } Tiempo durante el cual se rebasa determinado nivel

* Medida dentro de una anchura de banda de ruido de 1,2 kHz.

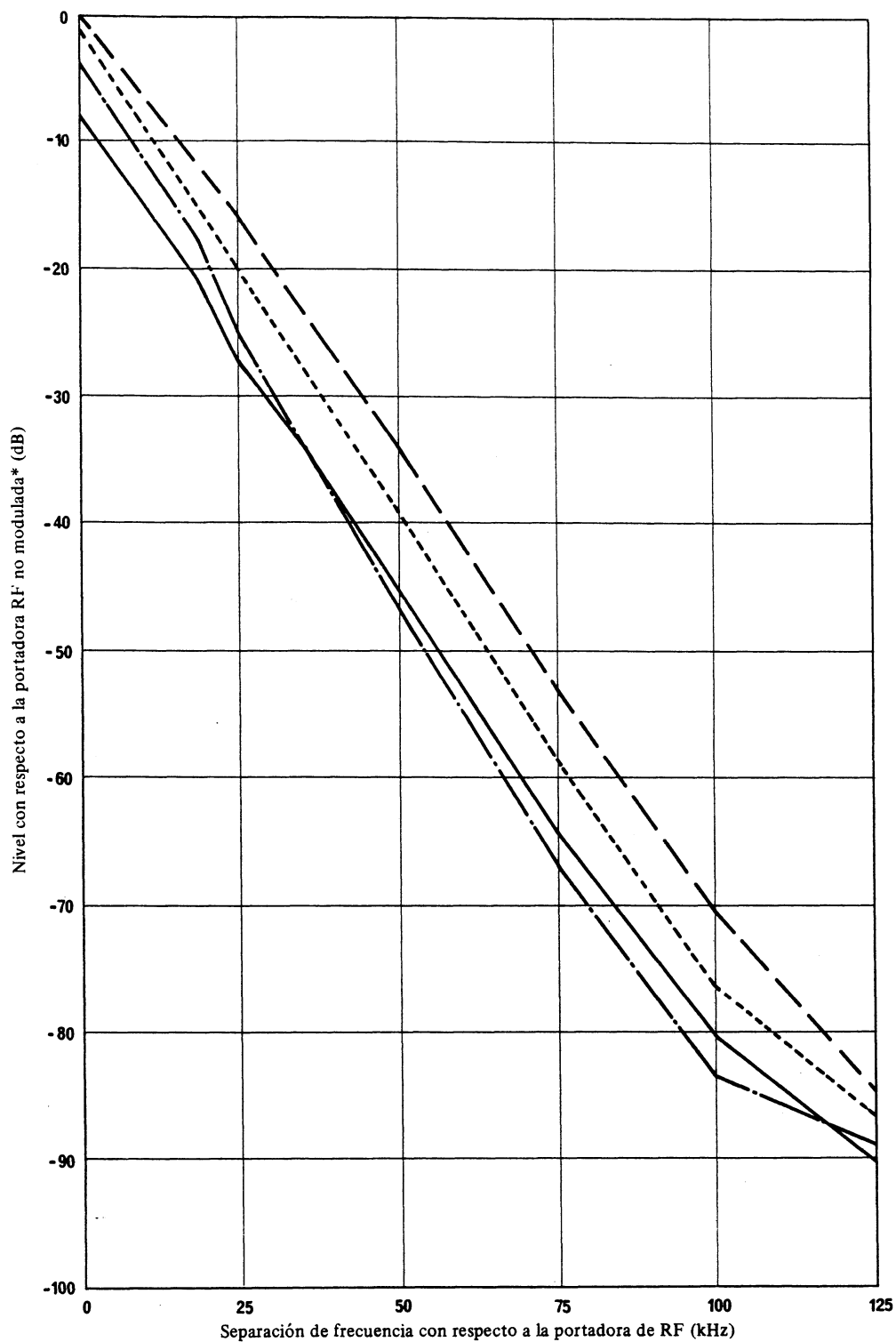


FIGURA 3 – Espectro MF con programa (estereofonía)

- | | | |
|-----------|-----|--|
| — — — | 1% | } Tiempo durante el cual se rebasa determinado nivel |
| - - - - - | 3% | |
| - · - · - | 10% | |
| — | ef: | Nivel eficaz |

* Medida dentro de una anchura de banda de ruido de 1,2 kHz.

No sólo la distribución de densidad de potencia, sino también los niveles que se alcanzan o superan en pequeños porcentajes de tiempo suelen ser de interés. Por consiguiente, los valores correspondientes al 1%, 3% y 10% del tiempo se han evaluado y se han representado en forma de curvas en las figs. 2 y 3.

De la comparación de esas figuras se desprende claramente que el espectro es más amplio en la modulación estereofónica que en la modulación monofónica. Merece señalar que el espectro de frecuencia generado por el programa de radiodifusión representativo es considerablemente más reducido que el generado por el ruido coloreado.

A los fines de este estudio, se ha supuesto que 99%* (99,9%) de la potencia de la señal MF está contenida dentro de la anchura de banda ocupada. Calculando la anchura de banda ocupada a partir de las distribuciones espectrales de densidad de potencia se obtienen los resultados siguientes:

- ruido coloreado, monofonía: $B_n = 80$ kHz (100 kHz),
- ruido coloreado, estereofonía: $B_n = 74$ kHz (112 kHz),
- programa, monofonía: $B_n = 44$ kHz (62 kHz),
- programa, estereofonía: $B_n = 50$ kHz (80 kHz).

En general, los espectros son algo más amplios en modulación estereofónica que en modulación monofónica. En cambio, con ruido coloreado, la anchura de banda ocupada que se ha calculado para el 99% de la potencia es 6 kHz mayor en monofonía que en estereofonía, lo cual puede explicarse por la manera en que se distribuye la energía en las proximidades de la portadora.

Sin embargo, al examinar la anchura de banda necesaria, es decir, la anchura de banda necesaria para alcanzar un nivel definido de calidad (por ejemplo, reducidas distorsiones de la señal), se obtienen otros valores. Si se acepta, por ejemplo, que fuera de la anchura de banda necesaria sólo puede haber niveles superiores a -60 dB con respecto a la portadora RF no modulada durante el 1% del tiempo, una condición que corresponde a distorsiones no lineales de 0,1% como máximo, se obtienen las anchuras de banda siguientes:

- ruido coloreado, monofonía: $B_n = 147$ kHz,
- ruido coloreado, estereofonía: $B_n = 211$ kHz,
- programa, monofonía: $B_n = 94$ kHz,
- programa, estereofonía: $B_n = 170$ kHz.

Los valores de la anchura de banda, tanto ocupada como necesaria, parecen ser relativamente pequeños y los valores para la anchura de banda ocupada no difieren de los valores indicados en otros textos técnicos. Sin embargo, la anchura de banda necesaria depende de los requisitos de calidad. Si se imponen distorsiones inferiores o porcentajes de tiempo más pequeños, será necesario aumentar la anchura de banda necesaria.

En los resultados obtenidos puede haber pequeños errores debidos a la precisión limitada de las mediciones. No obstante, puede observarse claramente que la modulación con ruido coloreado producirá anchuras de banda ocupadas y necesarias más grandes que una señal de programa radiofónico representativa, tanto en monofonía como en estereofonía.

5. Conclusiones

Sobre la base de los resultados de las mediciones presentados, las anchuras de banda en RF de las emisiones de radiodifusión sonora con modulación de frecuencia son obviamente más pequeñas que lo que cabría esperar de los cálculos basados en la regla de Carson. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta ahora no han permitido deducir una fórmula más fiable para sustituir a la regla de Carson. Se requieren más mediciones y estudios teóricos para desarrollar un modelo fiable, que describa la relación entre las señales moduladoras típicas y los correspondientes valores de la anchura de banda ocupada o necesaria en la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia.

Debe destacarse que los resultados de las mediciones presentados son aún insuficientes para poder llegar a conclusiones con respecto a la especificación de las características de banda de paso de los receptores MF.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Documentos del CCIR

[1982-86]: a. 10/53 (Alemania (República Federal de)).

BIBLIOGRAFÍA

[1982-86]: 10/47 (Países Bajos).

* A menos que el CCIR especifique lo contrario (lo que no ha sucedido hasta ahora), el valor del 99% concuerda con el número 147 del Reglamento de Radiocomunicaciones.