

RECOMENDACIÓN UIT-R BO.1130-1

SISTEMA DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL PARA LOS RECEPTORES DE VEHÍCULOS, PORTÁTILES Y FIJOS DEL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN (SONORA) POR SATÉLITE EN LA GAMA DE FRECUENCIAS 1400-2700 MHz

(Cuestión UIT-R 93/10)

(1994-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que hay en todo el mundo un interés creciente por la radiodifusión sonora digital para receptores de vehículos, portátiles y fijos en las bandas del servicio de radiodifusión (sonora) por satélite (SRS (sonora)) atribuidas en la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones para examinar la atribución de frecuencias en ciertas partes del espectro (Málaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92) y que se están considerando diversos servicios de radiodifusión sonora digital por satélite para dar cobertura nacional y supranacional;
- b) que el UIT-R había ya adoptado las Recomendaciones UIT-R BS.774 y UIT-R BO.789 para indicar los requisitos necesarios de los sistemas de radiodifusión sonora digital dirigida a receptores de vehículos, portátiles y fijos en aplicaciones terrenales y por satélite, respectivamente;
- c) que el sistema digital A, descrito en el Anexo 1 satisface los requisitos de estas Recomendaciones y que se ha ensayado en condiciones reales y se han efectuado demostraciones de él en diversos países de las partes de transmisión y recepción;
- d) que el modelo tecnológico actual del sistema digital B, descrito en el Anexo 2, se ha probado en condiciones reales desde un satélite de comunicaciones de baja potencia disponible;
- e) que las Recomendaciones UIT-R BS.774 y UIT-R BO.789 reconocen las ventajas de la utilización complementaria de los sistemas terrenales y por satélite y plantean la necesidad de un sistema de radiodifusión sonora digital que permita utilizar un receptor común con circuitos comunes de procesamiento VLSI y la fabricación de receptores de bajo coste mediante la producción en masa;
- f) que el Grupo de Trabajo 10B de Radiocomunicaciones está examinando una norma de radiodifusión sonora digital terrenal para receptores de vehículo, portátiles y fijos en la gama de frecuencias 30-3 000 MHz;
- g) que en la séptima Conferencia Mundial de Uniones de Radiodifusión (México, 27-30 de abril de 1992) la Unión Mundial de Radiodifusión resolvió unánimemente:
- «1 que se tomen iniciativas para acordar una norma única mundial sobre radiodifusión sonora digital, y
 - 2 instar a las administraciones a examinar las ventajas para el consumidor de disponer de una fuente y una codificación de canales y una realización comunes en la radiodifusión sonora digital con carácter mundial en 1 500 MHz.»;
- h) que como parte del proceso de normalización en Europa se ha adoptado el sistema digital A (EUREKA 147 como norma ETS 300 401 del ETSI) para el SRS/SR (sonora), dirigido a receptores de vehículo, portátiles y fijos,

recomienda

- 1 que las administraciones que deseen poner en práctica en un futuro próximo un servicio de radiodifusión (sonora) por satélite que satisfaga algunas o todas las condiciones estipuladas en la Recomendación UIT-R BO.789, consideren la utilización del sistema digital A, que se describe en el Anexo 1;

NOTA 1 – Las administraciones que deseen poner en práctica el servicio de radiodifusión (sonora) por satélite a más largo plazo consideren asimismo la utilización del sistema digital B, que se describe en el Anexo 2, cuando sus características estén plenamente especificadas y su calidad se haya confirmado mediante pruebas. La tecnología en este

sector se está desarrollando rápidamente. Por consiguiente, si se elaboran otros sistemas que satisfagan las condiciones estipuladas en la Recomendación UIT-R BO.789, también es posible tenerlos en cuenta. En respuesta al § g), las administraciones que participan en el desarrollo de normas aplicables al sistema SRS (sonora) deben hacer todo lo posible por armonizarlas con otras normas aplicables a ese sistema que ya se hayan desarrollado o que estén en estudio.

ANEXO 1

Sistema digital A

1 Introducción

El sistema digital A se ha diseñado para proporcionar radiodifusión digital multiservicio de alta calidad destinada a receptores a bordo de vehículos, portátiles y fijos. Puede funcionar en cualquier banda de frecuencia hasta 3 000 MHz para distribución terrenal y por satélite, híbrida (satélite y terrenal) y por cable. Se trata de un sistema flexible y de aplicación general de radiodifusión digital de servicios integrados (RDSI) que permite una amplia gama de opciones de codificación de fuente y canal, datos asociados con los programas sonoros y servicios de datos independientes, cumpliendo los requisitos flexibles y de amplio alcance en materia de servicio y sistemas establecidos en las Recomendaciones UIT-R BO.789 y UIT-R BS.774, complementadas por los Informes UIT-R BS.1203 y UIT-R BO.955.

El sistema es robusto y ofrece un gran aprovechamiento del espectro y la potencia en la radiodifusión sonora y de datos. Se utilizan técnicas digitales avanzadas para eliminar, en la señal fuente de audio, la redundancia y la información irrelevante desde el punto de vista de la percepción, y después se aplica una redundancia estrechamente controlada a la señal transmitida para la corrección de errores. La información transmitida se dispersa en los dominios de la frecuencia y del tiempo para obtener en el receptor, sea fijo o móvil, una señal de elevada calidad, aún en condiciones de propagación multitrayecto muy difíciles. La eficacia espectral se obtiene mediante la intercalación de varias señales radiofónicas, y una técnica especial de reutilización de frecuencias permite una ampliación casi sin límites de la red mediante transmisores adicionales que funcionan en las mismas frecuencias de emisión.

En la Fig. 1 se muestra un diagrama conceptual de la parte de transmisión del sistema.

El sistema digital A ha sido elaborado por el Consorcio Eureka 147 (DAB – «digital audio broadcasting») y se conoce como Sistema DAB Eureka. Ha recibido el pleno apoyo de la Unión Europea de Radiodifusión, con miras a introducir en 1995 servicios de radiodifusión sonora digital en Europa. Desde 1988 ha sido objeto de demostraciones y amplias pruebas en Europa, Canadá, Estados Unidos de América y otros países. En el presente Anexo, el sistema digital A se denomina «el Sistema». Su especificación completa figurará en la Norma Europea de Telecomunicaciones ETS 300 401 (véase la Nota 1).

NOTA 1 – Se ha considerado conveniente la adición de un nuevo modo de transmisión, que se está estudiando como una mejora compatible al sistema digital A; ello permitiría utilizar retransmisores terrenales cocanal de mayor potencia, con el consiguiente aumento de la capacidad de relleno y, de este modo, una mayor flexibilidad y disminución de los precios de implementación del SRS (sonora) híbrido en la banda 1 452-1 492 MHz.

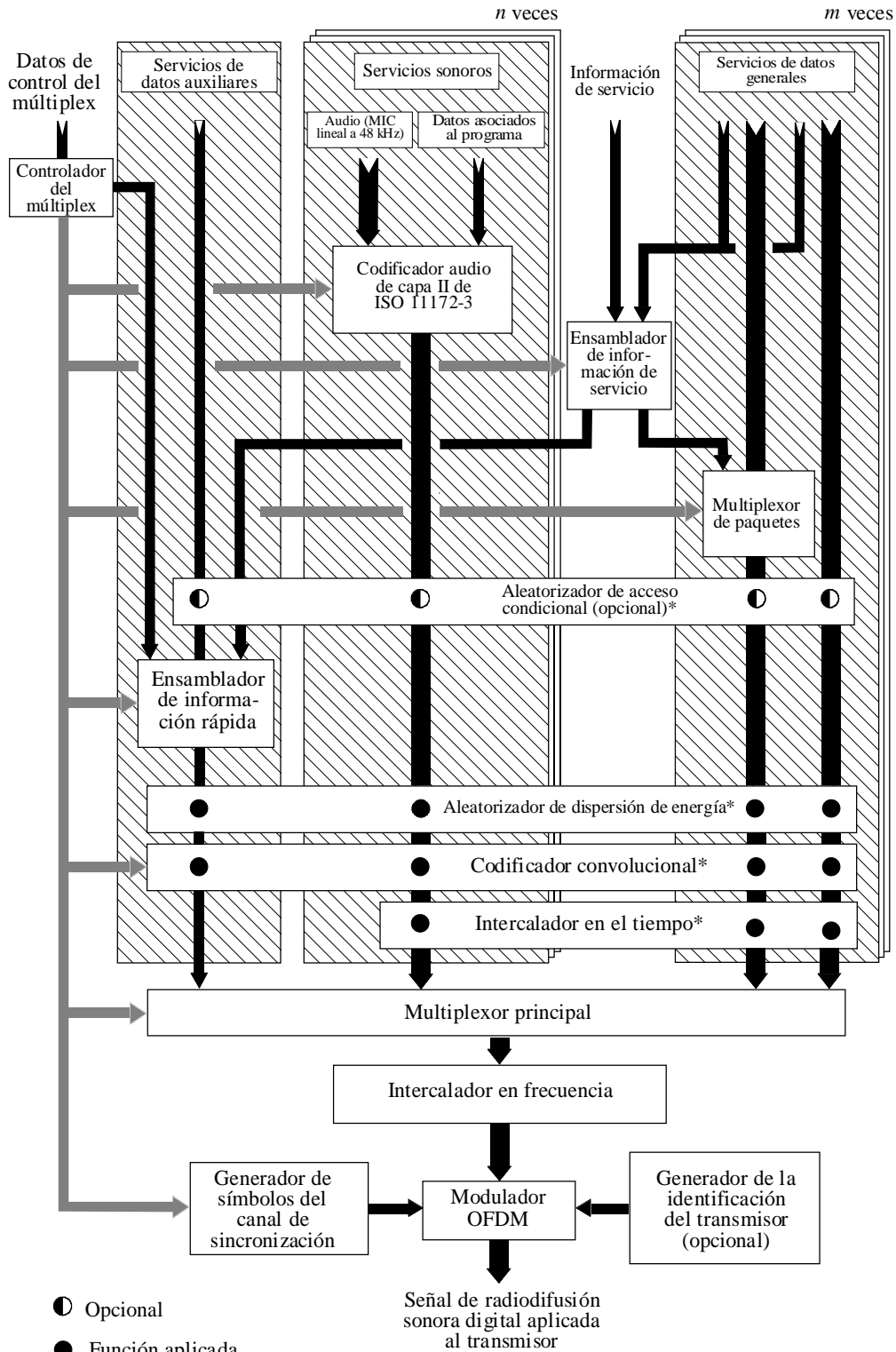
2 Utilización de un modelo estratificado

El Sistema puede cumplir los requisitos del modelo de referencia básico de interconexión de sistemas abiertos de la ISO descrito en la Norma ISO 7498 (1984). Se aconseja la utilización de este modelo en la Recomendación UIT-R BT.807 y en el Informe UIT-R BT.1207, y en la Recomendación se presenta además una interpretación adecuada para su utilización en sistemas de radiodifusión estructurados en capas. De acuerdo con estas directrices, el Sistema se describirá en relación con las capas del modelo, y la interpretación que aquí se aplica se ilustra en el Cuadro 1.

Las descripciones de muchas técnicas que intervienen vienen dadas más fácilmente en relación con el funcionamiento del equipo en el transmisor o en el punto central de una red de distribución en el caso de una red de transmisores.

Como el propósito fundamental del Sistema es la entrega de programas radiofónicos al oyente, la siguiente descripción comenzará con la capa de aplicación (empleo de la información de radiodifusión) y procederá en sentido descendente hasta la capa física (medio de transmisión radioeléctrica).

FIGURA 1
Diagrama conceptual de la parte de transmisión del Sistema



- Opcional
- Función aplicada

* Estos procesadores funcionarán independientemente en cada canal de servicio.

OFDM: Múltiplex por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal frequency division multiplex)

CUADRO 1

Interpretación del modelo estratificado OSI

Nombre de la capa	Descripción	Características específicas del sistema
Aplicación	Utilización práctica del sistema	Facilidades del sistema Calidad audio Modos de transmisión
Presentación	Conversión para la presentación	Codificación y decodificación audio Presentación audio Información de servicio
Sesión	Selección de datos	Selección de programas Acceso condicional
Transporte	Agrupación de datos	Servicios radiofónicos Múltiplex de servicio principal Datos auxiliares Asociación de datos
Red	Canal lógico	Tramas audio ISO Datos asociados con el programa radiofónico
Enlace de datos	Formato de la señal transmitida	Tramas de transmisión Sincronización
Física	Transmisión (radioeléctrica) física	Dispersión de energía Codificación convolucional Entrelazado en el tiempo Entrelazado de frecuencia Modulación MDPD-4/OFDM Transmisión radioeléctrica

3 Capa de aplicación

Esta capa concierne al uso del Sistema en el nivel de aplicación. Considera las facilidades y la calidad audio que proporciona el Sistema y las que los organismos de radiodifusión pueden ofrecer a sus oyentes, así como los diferentes modos de transmisión.

3.1 Facilidades ofrecidas por el Sistema

El Sistema proporciona una señal múltiplex de datos digitales que transporta varios programas al mismo tiempo. El múltiplex contiene datos de programas audio y datos auxiliares que comprenden datos asociados con el programa (PAD – programme-associated data), información de configuración del múltiplex (MCI – multiplex configuration information) e información de servicio (SI – service information). El múltiplex también puede transportar servicios de datos generales, que pueden no estar relacionados con la transmisión de programas sonoros.

En particular, los usuarios del Sistema disponen de las siguientes facilidades:

- señal audio (es decir, el programa) del servicio seleccionado;
- aplicación opcional de funciones del receptor, por ejemplo, control de la gama dinámica, que puede utilizar datos auxiliares transportados con el programa;
- presentación visual de texto de información seleccionada, transportada por la SI. Puede tratarse de información relativa al programa seleccionado o a otros programas seleccionables;
- opciones para la selección de otros programas, otras funciones del receptor y otra SI;
- uno o más servicios de datos generales, por ejemplo, un canal de mensaje de tráfico (TMC – traffic message channel).

El Sistema posee medios de acceso condicional, y el receptor puede estar equipado con salidas digitales para señales audio y de datos.

3.2 Calidad audio

Dentro de la capacidad del múltiplex es posible elegir la cantidad de servicios radiofónicos y, para cada uno, el formato de presentación (por ejemplo, estereofónico, monofónico, sonido periférico, etc.), la calidad audio y el grado de protección contra errores (y por tanto su robustez) de acuerdo con las necesidades del organismo de radiodifusión.

Se dispone de la siguiente gama de opciones de calidad audio:

- muy alta calidad, con margen para el tratamiento de audio,
- calidad subjetivamente transparente, suficiente para radiodifusión de máxima calidad,
- alta calidad, equivalente a una buena calidad de servicio MF,
- calidad media, equivalente a una buena calidad de servicio MA,
- calidad para señal vocal solamente.

El Sistema permite la recepción con plena calidad dentro de los límites de cobertura del transmisor; más allá de esos límites la recepción se degrada de una manera subjetivamente tolerable.

3.3 Modos de transmisión

El Sistema posee tres modos de transmisión que permiten utilizar una amplia gama de frecuencia de transmisión hasta 3 GHz. Estos modos de transmisión compensan la dispersión debida al efecto Doppler y la dispersión del retardo de propagación en la recepción móvil en presencia de ecos multitrayecto.

En el Cuadro 2 se indica el retardo de eco constructivo y la gama de frecuencias nominal para la recepción móvil. La degradación debida al ruido a la frecuencia más elevada y en la condición multitrayecto más crítica, que en la práctica ocurre con poca frecuencia, es igual a 1 dB a 100 km/h.

CUADRO 2

Parámetro	Modo I	Modo II	Modo III
Duración del intervalo de guarda (μ s)	246	62	31
Retardo del eco constructivo hasta (μ s)	300	75	37,5
Gama de frecuencias nominal (para recepción móvil) hasta	375 MHz	1,5 GHz	3 GHz

Este Cuadro permite observar que la utilización de frecuencias más elevadas impone una mayor limitación al retardo de eco máximo. El Modo I es más adecuado para una red terrenal de una sola frecuencia pues permite las mayores separaciones entre transmisores. El Modo II es más adecuado para aplicaciones de radiodifusión locales que requieren un transmisor terrenal y transmisión híbrida satélite/terrenal hasta 1,5 GHz. No obstante, el Modo II también puede utilizarse para una red de una sola frecuencia de media a gran escala (por ejemplo, a 1,5 GHz) insertando, si fuera necesario, retardos artificiales en los transmisores y/o utilizando antenas de transmisión directivas. El Modo III es más apropiado para la transmisión por satélite y terrenal complementaria en todas las frecuencias hasta 3 GHz.

El Modo III también es el modo preferido para la transmisión por cable hasta 3 GHz.

4 Capa de presentación

Esta capa atañe a la conversión y presentación de la información de radiodifusión.

4.1 Codificación de la fuente audio

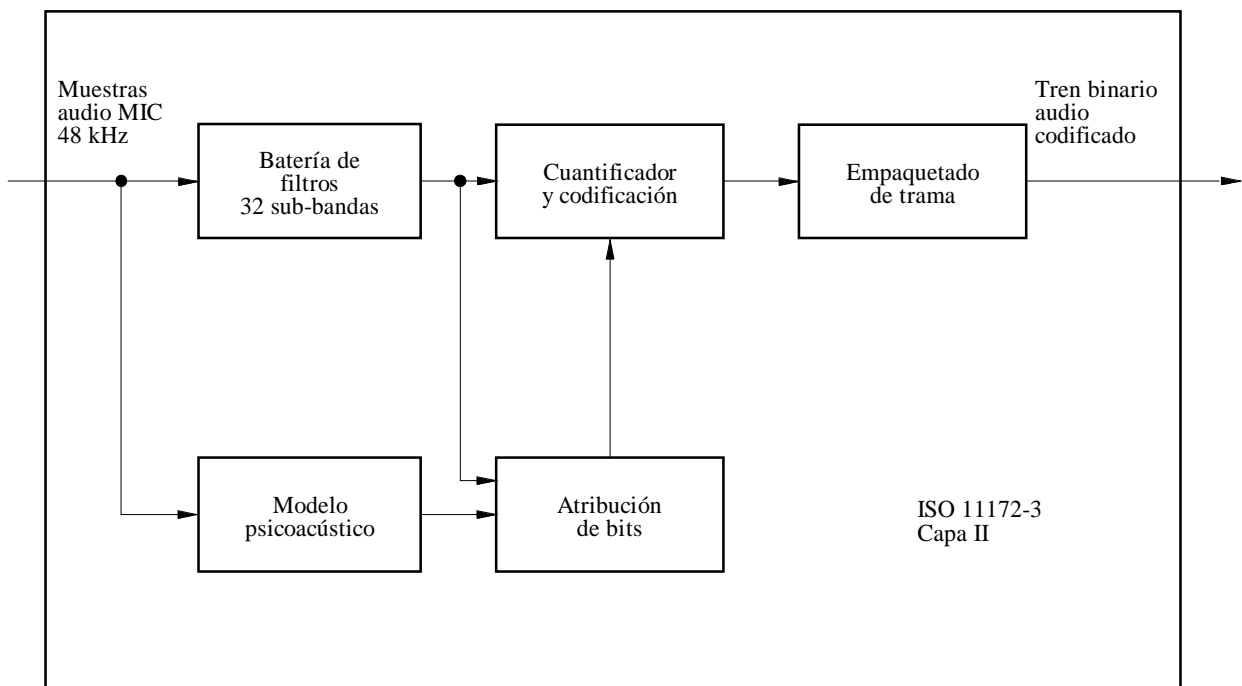
El método de codificación la fuente de audio utilizado por el Sistema es el de la capa II de audio de ISO/CEI MPEG, que figura en la Norma ISO 11172-3. Este sistema de compresión con codificación de sub-banda también se conoce como sistema MUSICAM.

El Sistema acepta varias señales audio MIC a la velocidad de muestreo de 48 kHz con datos asociados con el programa (PAD). El número de fuentes audio posibles depende de la velocidad binaria y del perfil de protección contra errores. El codificador de audio puede funcionar a 32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160 ó 192 kbit/s por canal monofónico. En estereofonía o en el modo de canal doble, el codificador produce el doble de la velocidad binaria de un canal monofónico.

Los organismos de radiodifusión pueden explotar las diferentes opciones de velocidad binaria en función de la calidad intrínseca requerida y/o del número de programas sonoros que se han de proporcionar. Por ejemplo, la utilización de velocidades binarias iguales o superiores a 128 kbit/s para monofonía o a 256 kbit/s para estereofonía, no sólo proporciona una calidad muy elevada sino también un margen de procesamiento suficiente para posteriores procesos de codificación/decodificación múltiples, incluido el post-tratamiento de audio. Para radiodifusión de alta calidad, se prefiere una velocidad binaria de 128 kbit/s para programas monofónicos o 256 kbit/s para programas estereofónicos, que aseguran una calidad audio totalmente transparente. Aún la velocidad binaria de 192 kbit/s para programas estereofónicos satisface generalmente los requisitos de la UER para sistemas audio digitales con reducción de la velocidad binaria. Una velocidad binaria de 96 kbit/s para programas monofónicos presenta buena calidad sonora, y una velocidad de 48 kbit/s puede proporcionar aproximadamente la misma calidad que la radiodifusión MA normal. Para algunos programas que sólo contengan señales vocales, puede ser suficiente una velocidad binaria de 32 kbit/s cuando se requiere el mayor número posible de servicios dentro del múltiplex del sistema.

En la Fig. 2 se muestra un diagrama en bloques de las unidades funcionales en el codificador audio. Las muestras de audio MIC de entrada se aplican al codificador audio. Un codificador puede procesar ambos canales de una señal estereofónica, aunque, opcionalmente, se le puede aplicar una señal monofónica. Una batería de filtros polifásicos divide la señal audio digital en 32 señales de sub-banda, y crea una representación filtrada y submuestreada de la señal audio entrada. Las muestras filtradas se denominan muestras de sub-banda. Un modelo perceptual del oído humano crea un conjunto de datos para controlar el cuantificador y la codificación. Estos datos pueden ser diferentes según la implementación real del codificador. Una posibilidad es utilizar una estimación del umbral de enmascaramiento para obtener esos datos de control del cuantificador. Las muestras sucesivas de cada señal de sub-banda se agrupan en bloques; luego, en cada bloque, se determina la amplitud máxima alcanzada por cada señal de sub-banda y se indica por un factor de escala. El cuantificador y la unidad de codificación crean un conjunto de palabras de codificación a partir de las muestras de sub-banda. Estos procesos se llevan a cabo durante las tramas de audio ISO, que se describirán en la capa de red.

FIGURA 2
Diagrama de bloques del codificador audio básico del Sistema

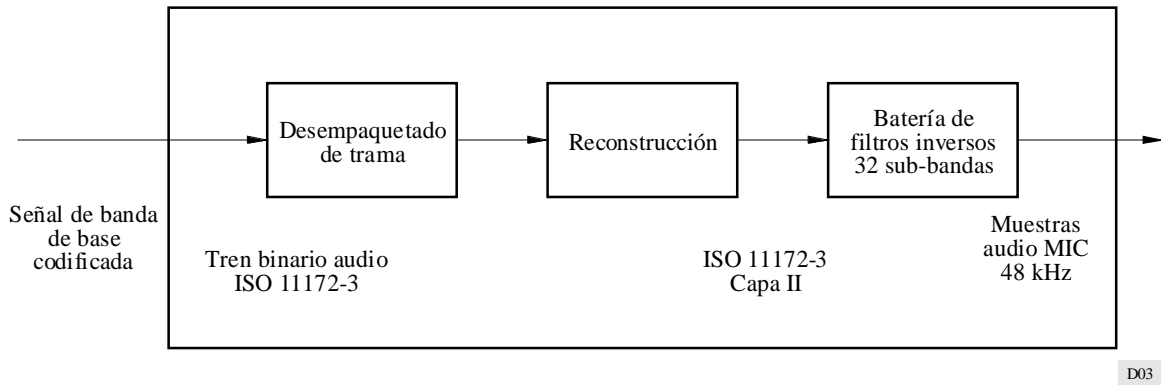


4.2 Decodificación audio

La decodificación en el receptor es directa y económica. Utiliza una técnica simple de tratamiento de señales que sólo requiere operaciones de demultiplexación, expansión y filtrado inverso. En la Fig. 3 se muestra un diagrama en bloques de las unidades funcionales del decodificador.

FIGURA 3

Diagrama de bloques del decodificador audio básico del Sistema



La trama audio ISO se aplica al decodificador audio de capa II ISO/MPEG que desempaqueta los datos de la trama para recuperar los diversos elementos de información. La unidad de reconstrucción reconstruye las muestras de sub-banda cuantificadas, y una batería de filtros inversos transforma las muestras de sub-banda para producir señales audio digitales MIC uniformes con velocidad de muestreo de 48 kHz.

4.3 Presentación de audio

Las señales audio pueden ser monofónicas o estereofónicas, o se puede agrupar canales audio para obtener sonido periférico. Los programas se pueden vincular entre sí para presentar simultáneamente el mismo programa en diferentes idiomas. A fin de satisfacer a los oyentes tanto en ambientes de alta fidelidad como en ambientes ruidosos, el organismo de radiodifusión puede transmitir opcionalmente una señal de control de gama dinámica (DRC) que se puede utilizar en el receptor en un ambiente ruidoso para comprimir la gama dinámica de la señal audio reproducida. Cabe señalar que esta técnica también puede ser beneficiosa para oyentes con deficiencias auditivas.

4.4 Presentación de la información de servicio

En cada programa transmitido por el Sistema se puede disponer de los siguientes elementos de información de servicio (SI) para indicación en el receptor:

- etiqueta de programa básica (es decir, nombre del programa),
- hora y fecha,
- referencia recíproca del mismo programa o a uno similar (por ejemplo, en otro idioma) que se transmite en otro conjunto o se difunde simultáneamente por un servicio MA o MF,
- etiqueta de servicio ampliada para los servicios relacionados con el programa,
- información del programa (por ejemplo, los nombres de los actores o ejecutantes),
- idioma,
- tipo de programa (por ejemplo, noticias, deportes, musical, etc.),
- identificador del transmisor,
- canal de mensaje de tráfico (que puede utilizar un sintetizador de señales vocales en el receptor).

Pueden incluirse también datos de la red de transmisores para uso interno de los organismos de radiodifusión.

5 Capa de sesión

Esta capa concierne a la selección de la información de difusión y el acceso a la misma.

5.1 Selección de programas

Para que el receptor pueda tener acceso a alguno o todos los servicios individuales con un mínimo de retardo global, la información acerca del contenido actual y futuro del múltiplex se transmite por el canal de información rápida (FIC – fast information channel). Esta información es la MCI, que contiene datos de lectura automática. Los datos del FIC no están entrelazados en el tiempo, de modo que la MCI no está sujeta al retardo del proceso de entrelazado en el tiempo aplicado a los servicios de audio y de datos generales. No obstante, estos datos se repiten frecuentemente para más seguridad. Cuando la configuración múltiplex está a punto de cambiar, la nueva información, junto con la temporización del cambio, es enviada a la MCI por anticipado.

El usuario del receptor puede seleccionar los programas, mediante la información textual transportada en la SI, utilizando el nombre del servicio radiofónico, la identidad del tipo de programa o el idioma. La selección se ejecuta entonces en el receptor utilizando los elementos correspondientes de la MCI.

Si se dispone de fuentes alternativas para un servicio radiofónico elegido y un servicio digital original se hace insostenible, se pueden utilizar los datos de vinculación transportados en la SI (es decir, la «referencia recíproca») para identificar una alternativa (por ejemplo, en un servicio MF) y conmutar a ella. Sin embargo, en tal caso el receptor volverá al servicio original tan pronto como la recepción sea posible.

5.2 Acceso condicional

Existe una sincronización y control del acceso condicional.

El acceso condicional se puede aplicar independientemente a las componentes del servicio (transportados por el MSC o FIC), a los servicios o al múltiplex total.

6 Capa de transporte

Esta capa se relaciona con la identificación de grupos de datos como servicios radiofónicos, la multiplexión de los datos de esos servicios y la asociación de los elementos de los datos multiplexados.

6.1 Servicios radiofónicos

Un servicio radiofónico comprende generalmente una componente de servicio audio y opcionalmente componentes de servicio audio y/o de datos adicionales, proporcionados por un proveedor de servicios. La capacidad total del múltiplex puede ser atribuida a un sólo proveedor de servicio (por ejemplo, que difunda cinco o seis servicios radiofónicos de alta calidad) o se puede dividir entre diversos proveedores de servicios (por ejemplo, que difundan colectivamente unos 20 servicios radiofónicos de calidad media).

6.2 Múltiplex del servicio principal

Con referencia a la Fig. 1, los datos que representan cada uno de los programas que se difunden (datos audio digitales con algunos datos auxiliares, y quizá también datos generales) se someten a una codificación convolucional (véase el § 9.2) y entrelazado en el tiempo, ambos para la protección contra errores. El entrelazado en el tiempo mejora la inmunidad de la transmisión de datos en un entorno variable (por ejemplo, recepción en un vehículo en movimiento) e impone un retardo de transmisión predecible. Los datos entrelazados y codificados se aplican al multiplexor de servicio principal en el cual, cada 24 ms, los datos se agrupan secuencialmente para formar la trama múltiplex. La salida combinada del tren de bits del multiplexor se conoce como canal de servicio principal (MSC – main service channel) que posee una capacidad bruta de 2,3 Mbit/s. Dependiendo de la velocidad de código elegida (que puede ser diferente de una componente de servicio a otro), esto arroja una velocidad binaria neta comprendida aproximadamente entre 0,8 y 1,7 Mbit/s, con una anchura de banda de 1,5 MHz. El multiplexor de servicio principal es el punto en el que se reúnen los datos sincronizados provenientes de todos los servicios radiofónicos que utilizan el múltiplex.

Los datos generales se pueden enviar en el MSC como un tren de impulsos no estructurado u organizado como un múltiplex de paquetes que combina diversas fuentes. La velocidad de datos puede ser cualquier múltiplo de 8 kbit/s sincronizado con el múltiplex del sistema, a reserva de que la capacidad total del múltiplex sea suficiente para atender la demanda de servicios audio.

El FIC es externo al MSC y no está entrelazado en el tiempo.

6.3 Datos auxiliares

Existen tres sectores en los que se puede transportar datos auxiliares dentro del múltiplex del sistema:

- el FIC, que tiene una capacidad limitada, dependiendo de la MCI esencial incluida;
- se prevé el transporte de una cantidad moderada de PAD en cada canal de audio;
- todos los datos auxiliares restantes son tratados como un servicio separado dentro del MSC. La presencia de esta información se señala en la MCI.

6.4 Asociación de datos

En la MCI se proporciona una descripción precisa del contenido en curso y futuro del MSC, que se transporta por el FIC. Los ítems esenciales de SI que atañen al contenido del MSC (por ejemplo, para la selección de programas) también se deben transportar en el FIC. Los textos más extensos, tales como la lista de todos los programas del día, se deben transportar separadamente como un servicio de datos generales. Por consiguiente, la MCI y la SI contienen contribuciones de todos los programas que se han de difundir.

Los PAD, transportados en cada canal audio, comprenden principalmente la información íntimamente relacionada con el programa sonoro, que, por tanto, no puede ser enviada en un canal de datos diferente que puede estar sujeto a un retardo de transmisión distinto.

7 Capa de red

Esta capa se ocupa de la identificación de grupos de datos como programas.

7.1 Tramas audio ISO

Los procesos en el codificador de la fuente de audio se llevan a cabo durante las tramas de audio ISO de 24 ms de duración. La atribución de bits, que varía de una trama a otra, y los factores de escala se codifican y multiplexan con las muestras de sub-banda en cada trama audio ISO. La unidad de empaquetado de trama (véase la Fig. 2) ensambla el tren de bits real de los datos de salida del cuantificador y de la unidad de codificación y agrega otras informaciones, como la información de encabezamiento, palabras CRC para la detección de errores, y PAD, que se transmiten con la señal audio codificada. Cada canal audio contiene un canal PAD que tiene una capacidad variable (por lo general, 2 kbit/s como mínimo), que se puede utilizar para transmitir la información íntimamente relacionada con el programa sonoro. Ejemplos típicos de ello son el canto, la indicación de señales vocales/música y la información de control de la gama dinámica (DRC – dynamic range control).

La trama audio resultante transporta datos que representan 24 ms de duración de audio estereofónico (o monofónico) más PAD para un solo programa y se ajusta al formato de capa II de ISO 11172-3, de modo tal que puede denominarse trama ISO. Esto permite utilizar un decodificador audio de capa II ISO/MPEG en el receptor.

8 Capa de enlace de datos

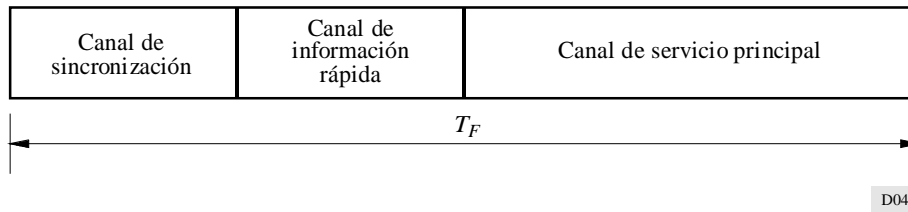
Esta capa proporciona los medios para la sincronización del receptor.

8.1 Trama de transmisión

Para facilitar la sincronización del receptor, la señal transmitida tiene una estructura de trama regular (véase la Fig. 4). La trama de transmisión comprende una secuencia de símbolos fija. El primer símbolo es nulo, para la sincronización gruesa (cuando no se transmite señal RF), y va seguido por un símbolo de referencia fijo para la sincronización fina y las funciones CAG, CAF y de referencia de fase en el receptor; estos símbolos integran el canal de sincronización. Los símbolos siguientes se reservan para el FIC, y los restantes proporcionan el MSC. La duración total de la trama, T_F , es de 96 ms o 24 ms, dependiendo del modo de transmisión, como se indica en el Cuadro 3.

Se atribuye un intervalo de tiempo fijo de la trama a cada servicio de audio dentro del MSC.

FIGURA 4
Estructura de la trama múltiplex



CUADRO 3
Parámetros de transmisión del Sistema

	Modo I	Modo II	Modo III
Duración total de la trama, T_F	96 ms	24 ms	24 ms
Duración del símbolo nulo, T_{NULL}	1,297 ms	324 μ s	168 μ s
Duración de símbolo global, T_s	1,246 ms	312 μ s	156 μ s
Duración de símbolo útil, t_s	1 ms	250 μ s	125 μ s
Duración del intervalo de guarda, Δ ($T_s = t_s + \Delta$)	246 μ s	62 μ s	31 μ s
Número de portadoras radiadas, N	1 536	384	192

9 Capa física

Esta capa se ocupa de los medios de transmisión radioeléctrica (por ejemplo, el esquema de modulación y la protección contra errores asociada).

9.1 Dispersión de energía

Para asegurar una dispersión de energía apropiada en la señal transmitida, las fuentes individuales que se aplican al múltiplex están aleatorizadas.

9.2 Codificación convolucional

Se aplica codificación convolucional a cada una de las fuentes de datos aplicadas al múltiplex para asegurar una recepción fiable. El proceso de codificación conlleva el agregado deliberado de redundancia a las ráfagas de datos fuente (utilizando una longitud de restricción de 7). Esto produce ráfagas de datos «brutas».

En el caso de una señal de audio, se da mayor protección a algunos bits codificados en la fuente que a otros, según un esquema preseleccionado conocido como perfil de protección contra errores desigual (UEP – unequal error protection). La relación de código media, definida como la relación entre el número de bits codificados en la fuente y el número de bits codificados después de una codificación convolucional, puede tomar un valor desde 1/3 (nivel de protección más elevado) a 3/4 (nivel de protección más bajo). Se pueden aplicar diferentes relaciones de código medias a fuentes de audio distintas, con arreglo al nivel de protección requerido y a la velocidad binaria de los datos codificados en la fuente. Por ejemplo, el nivel de protección de los servicios de audio transportados por redes de cable puede ser inferior que el de los servicios transmitidos por canales de radiofrecuencia.

Los servicios de datos generales se codifican de forma convolucional utilizando una de una selección de relaciones uniformes. Los datos del FIC se codifican con relación 1/3 constante.

9.3 Entrelazado en el tiempo

Se aplica entrelazado en el tiempo con una profundidad de entrelazado de 16 tramas a los datos codificados por convolución, a fin de mejorar las condiciones de los receptores móviles.

9.4 Entrelazado en frecuencia

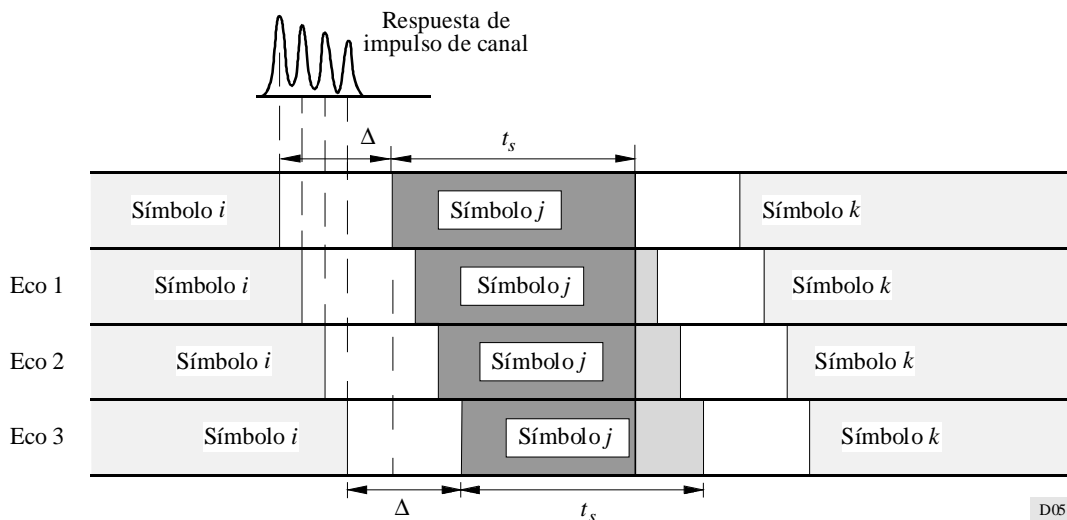
En presencia de propagación por trayectos múltiples, algunas portadoras mejoran debido a las señales constructivas mientras que otras sufren interferencia destructiva (desvanecimiento selectivo en frecuencia). Por tanto, el sistema proporciona entrelazado en frecuencia reordenando el tren de bits digital entre las portadoras, de modo tal que las muestras de fuente sucesivas no resulten afectadas por desvanecimiento selectivo. Cuando el receptor es estacionario, la diversidad en el dominio de la frecuencia es el medio principal para asegurar una recepción satisfactoria.

9.5 Modulación MDPD-4/OFDM

El Sistema utiliza multiplexión por división de frecuencia ortogonal (OFDM) con modulación por desplazamiento de fase diferencial cuadrivalente (MDPD-4). Este esquema satisface las elevadas exigencias de la radiodifusión digital de alta velocidad binaria para receptores móviles, portátiles y fijos, especialmente en condiciones de propagación multitrayecto.

El principio básico consiste en dividir la información por transmitir en un gran número de trenes de bits que poseen bajas velocidades binarias, y que se utilizan para modular distintas portadoras. La duración de símbolo correspondiente es así más larga que la dispersión de los tiempos de propagación del canal de transmisión. En el receptor, cualquier eco más corto que el intervalo de guarda no causará interferencia entre símbolos, sino que contribuirá positivamente a la potencia recibida (véase la Fig. 5). El elevado número, N , de portadoras se conoce colectivamente como «conjunto» («ensemble»).

FIGURA 5
Contribución constructiva de ecos



En presencia de propagación por trayectos múltiples, algunas de las portadoras se intensifican debido a las señales constructivas, mientras otras sufren interferencia destructiva (desvanecimiento selectivo en frecuencia). Por tanto, el sistema incluye una redistribución de los elementos del tren de bits digital en el tiempo y en frecuencia, de modo tal que las muestras de fuente sucesivas estén afectadas por desvanecimientos independientes. Cuando el receptor es estacionario, la diversidad en el dominio de la frecuencia es el único medio para asegurar una recepción satisfactoria; la diversidad en el tiempo proporcionada por entrelazado en el tiempo no ayuda a un receptor estático. Para este sistema, la propagación por trayectos múltiples es una forma de diversidad en el espacio y se considera una ventaja significativa, en total contraste con la MF convencional o los sistemas digitales de banda estrecha donde dicha propagación puede anular completamente un servicio.

En todo sistema capaz de beneficiarse de la propagación por trayectos múltiples, cuanto mayor sea la anchura de banda del canal de transmisión, más resistente será el sistema. En este sistema se ha escogido una anchura de banda del conjunto de 1,5 MHz para asegurar las ventajas de una técnica de banda ancha, así como para permitir la flexibilidad en la planificación. El Cuadro 3 también indica el número de portadoras OFDM con esta anchura de banda para cada modo de transmisión.

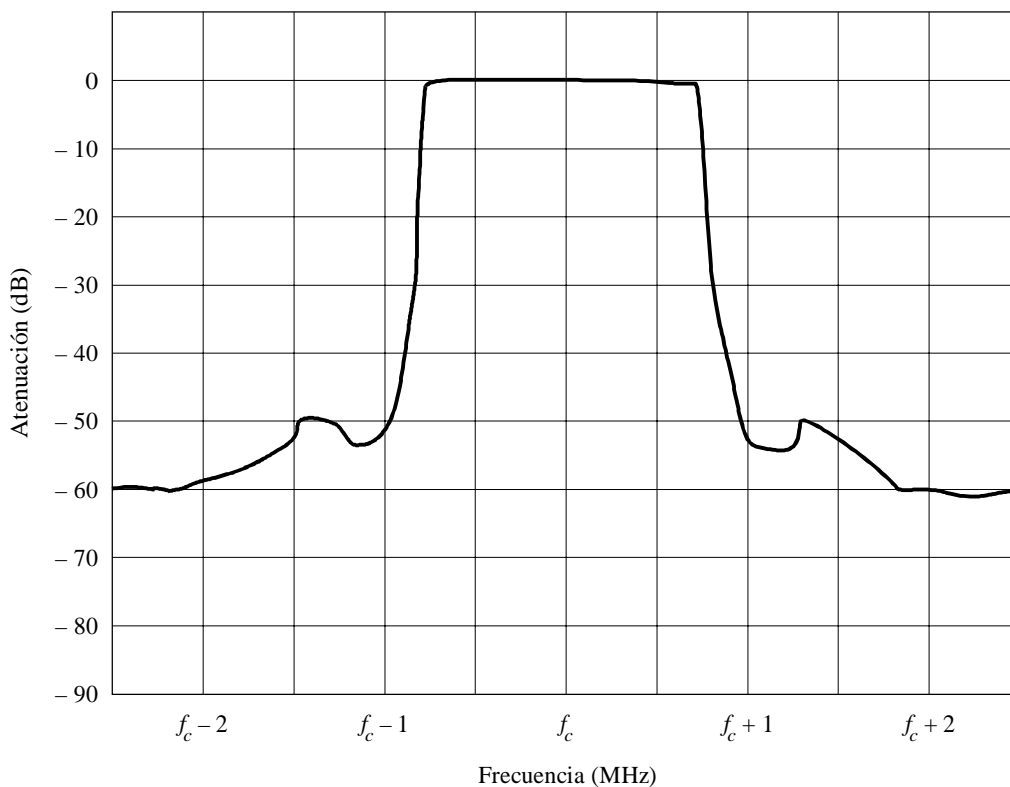
Otra ventaja del OFDM es que puede obtenerse un elevado aprovechamiento del espectro y la potencia en las redes de una sola frecuencia para cobertura de amplias zonas y también en las redes densas de zonas urbanas. Cualquier cantidad de transmisores que suministren los mismos programas pueden funcionar en la misma frecuencia, lo que también se traduce en una reducción global de las potencias de funcionamiento requeridas. Como consecuencia de ello, las distancias entre diferentes zonas de servicio se reducen considerablemente.

Teniendo en cuenta que el eco contribuye a la señal recibida, todos los tipos de receptores (es decir, portátiles, fijos y móviles) pueden utilizar antenas simples no directivas.

9.6 Espectro de la señal RF

En la Fig. 6 se ilustra el espectro del conjunto del Sistema.

FIGURA 6
Ejemplo de espectro de la señal de RF



f_c : Frecuencia central del canal

D06

10 Características de RF del sistema digital A

Se han efectuado pruebas de evaluación en RF del sistema digital A en el Modo I a 226 MHz y en el Modo II a 1 500 MHz para una diversidad de condiciones que representan la recepción móvil y fija. Se efectuaron mediciones de la proporción de bits erróneos (BER) en función de la relación portadora/ruido (C/N) en un canal de datos utilizando las siguientes condiciones:

$$D = 64 \text{ kbit/s}, R = 0,5$$

$$D = 24 \text{ kbit/s}, R = 0,375$$

donde:

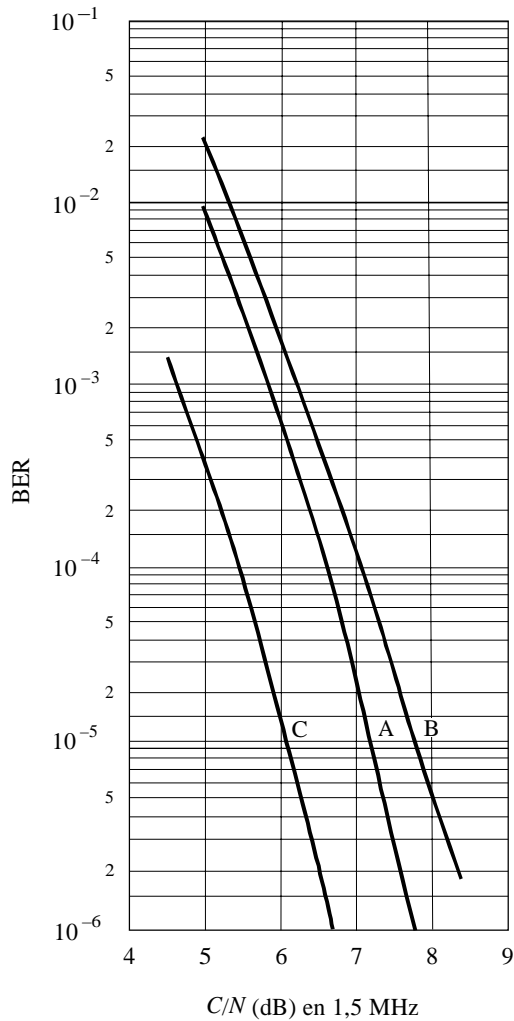
D : velocidad de datos en la fuente, y

R : relación de código media del canal.

10.1 BER en función de C/N (en 1,5 MHz) en un canal gaussiano a 226 MHz

Se agregó ruido blanco gaussiano aditivo para fijar la C/N a la entrada del receptor. Los resultados se muestran en la Fig. 7. Como ejemplo, para R = 0,5 se pueden comparar los resultados medidos con los de una simulación informática, para mostrar la calidad de funcionamiento propia del sistema. Se puede observar que se obtiene un margen de realización menor que 0,5 dB con una BER de 10⁻⁴.

FIGURA 7
**Proporción de bits erróneos en 1,5 MHz
 y en un canal gaussiano, 226 MHz, Modo I**



Curvas A: R = 0,5 (simulación por soporte lógico)
 B: R = 0,5
 C: R = 0,375

D07

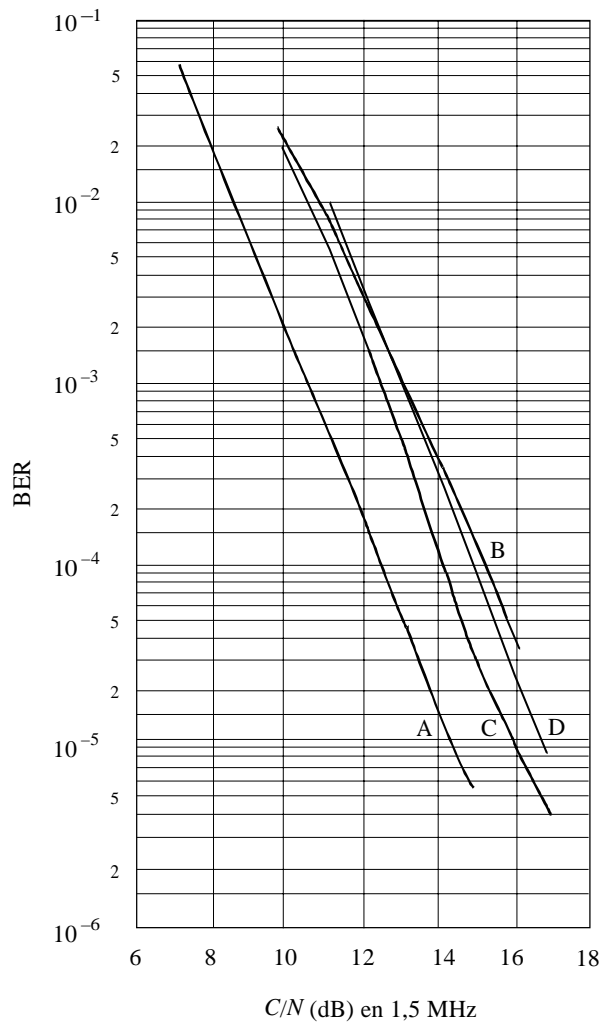
10.2 BER en función de C/N (en 1,5 MHz) en un canal Rayleigh a 226 MHz

Se efectuaron mediciones de BER en función de C/N en un canal de datos (D = 64 kbit/s, R = 0,5), utilizando un simulador de canal con desvanecimiento.

Los resultados se muestran en la Fig. 8. Para el ejemplo de un canal Rayleigh con perfil rural y el receptor desplazándose a una velocidad de 130 km/h, se pueden comparar los resultados medidos (curva B) con los de una simulación informática (curva A). La diferencia es menor que 3 dB con una BER de 10⁻⁴. La curva C ilustra la calidad de funcionamiento urbana típica a velocidad relativamente baja, pero en un canal altamente dispersivo en frecuencia. La curva D ilustra el comportamiento en una red representativa de frecuencia única en malas condiciones, en las que las señales se reciben con retardos de hasta 600 μs (correspondiente a una longitud de trayecto 180 km mayor).

FIGURA 8

Proporción de bits erróneos en 1,5 MHz
y en un canal Rayleigh, 226 MHz, Modo I



Curvas A: $R = 0,5$, rural, 130 km/h
(simulación por soporte lógico)
B: $R = 0,5$, rural, 130 km/h
C: $R = 0,5$, urbano, 15 km/h
D: $R = 0,5$, red de una sola frecuencia,
130 km/h

D08

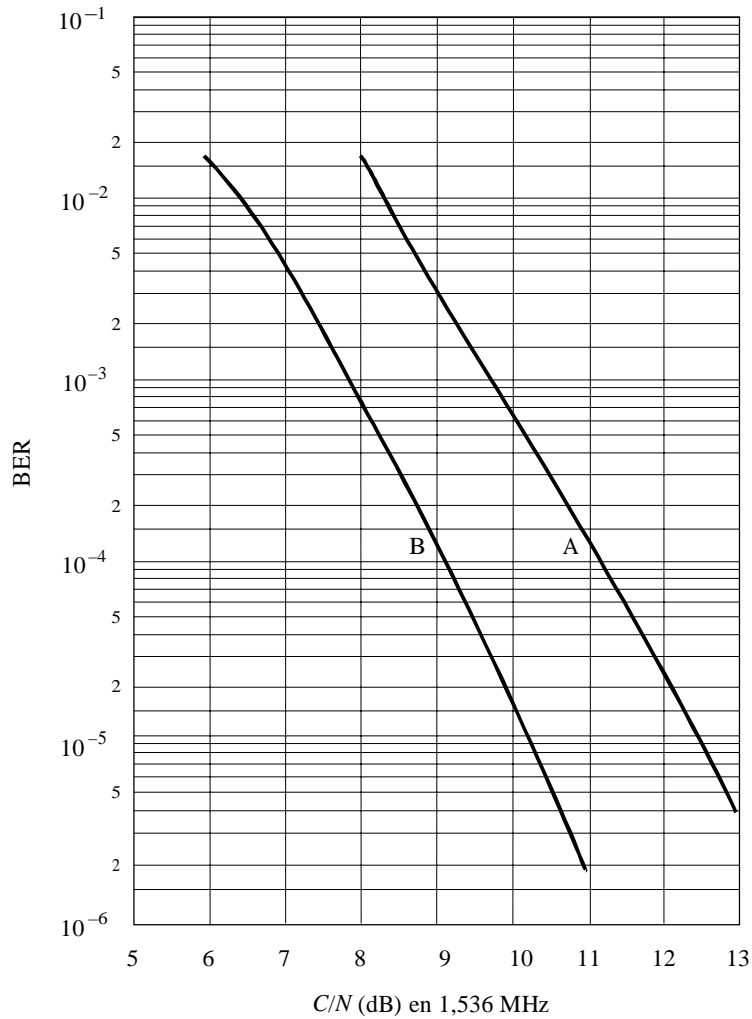
10.3 BER en función de C/N (en 1,5 MHz) en un canal Rayleigh a 1 500 MHz

Se efectuaron mediciones de BER en función de C/N en un canal de datos utilizando un simulador de canal con desvanecimiento. Los resultados se muestran en la Fig. 9.

10.4 Disponibilidad del servicio audio

Las evaluaciones provisionales de la calidad del sonido indican que no hay degradación perceptible si la BER es menor que 10^{-4} .

FIGURA 9
 Proporción de bits erróneos en 1,5 MHz
 y en un canal Rayleigh, 1 500 MHz, Modo II



Curvas A: $R = 0,5$, urbano, 15 km/h
 B: $R = 0,375$, urbano, 15 km/h

D09

ANEXO 2

Sistema digital B

1 Introducción

El sistema de radiodifusión sonora digital B es un sistema flexible, que utiliza eficazmente la anchura de banda y la potencia para la recepción de radiodifusión de audio y datos digitales por receptores fijos, portátiles y móviles en interiores y exteriores. El Sistema B está diseñado para sistemas de radiodifusión por satélite, terrenales e híbridos y también es adecuado para usarlo en cualquier banda atribuida al servicio de radiodifusión.

El Sistema B permite una multiplexación flexible de fuentes de audio y datos digitalizados que han de ser modulados en cada portadora. Esto, junto con una gama de posibles velocidades de transmisión, resulta en una adaptación eficaz entre los requisitos del proveedor del servicio y los recursos de potencia y anchura de banda del transmisor.

El diseño del receptor del Sistema B es modular. Un diseño de receptor básico normalizado proporciona la capacidad necesaria para la recepción fija y portátil. Este diseño se basa en técnicas de procesamiento de señales normalizadas

comprobadas, para las cuales se han elaborado circuitos integrados de bajo costo. Las técnicas de mitigación, que se necesitan en general para la recepción móvil, se aplican como funciones de procesamiento incorporadas.

En la radiodifusión por satélites, la principal degradación es el bloqueo de las señales por edificios, árboles y otros obstáculos. Este bloqueo de las señales produce desvanecimientos de señal muy profundos y por lo general no es posible compensarlos completamente con el margen del enlace. Se han elaborado o adaptado varias técnicas de mitigación durante el diseño del receptor del Sistema B. Este receptor puede admitir las siguientes:

- Diversidad en el tiempo (retransmisión de datos): Una versión retardada del tren de datos se multiplexa junto con los datos originales y el transmisor en la misma portadora.
- Recepción por diversidad (diversidad de antena/receptor): Dos antenas/receptores separados físicamente reciben y procesan la misma señal.
- Diversidad de transmisión (diversidad de satélite/transmisor): El mismo tren de datos es transmitido por dos transmisores físicamente separados en frecuencias separadas, y ambos son recibidos por la misma antena, y después procesados independientemente.
- Amplificadores en el canal (red de una sola frecuencia): El mismo tren de datos es transmitido por dos o más transmisores separados físicamente en la misma frecuencia, y después la señal recibida compuesta es procesada por un igualador.

En un sistema terrenal, con varios transmisores en el canal, así como en un sistema de satélite con amplificadores terrenales en el canal, el Sistema B utilizará la igualación en el receptor. Ésta es la única vez que se afecta la configuración del receptor básico. Si un receptor no realiza la igualación, debe tener la capacidad de reconocer y descartar los símbolos de acondicionamiento que han sido insertados en el tren de datos.

2 Visión general del Sistema

Se puede obtener una visión general del diseño del Sistema B examinando el diagrama de bloques funcionales del receptor (que comienza en la frecuencia intermedia) y que se muestra en la Fig. 10. Las funciones del receptor básico se muestran en bloques de línea continua y las funciones facultativas para realizar la mitigación de los problemas de propagación se muestran en bloques de línea interrumpida.

Después que la portadora deseada es seleccionada por la sección de sintonía del receptor, la señal se traduce a una frecuencia intermedia fija.

En el receptor básico, la portadora se reconstruye en un bucle Costas con modulación por desplazamiento de fase cuadrivalente (MDP-4), y los símbolos son detectados por un filtro adaptado con temporización proporcionada por un bucle de seguimiento de símbolos. Después de establecida la sincronización de trama, los símbolos recuperados son decodificados y demultiplexados. El decodificador Reed-Solomon realiza la función adicional de marcar los bloques de datos que no fueron decodificados satisfactoriamente. Esta información es utilizada por el decodificador de audio y puede ser utilizada por el combinador de diversidad de tiempo o de señal, si está incorporado en el receptor.

Los datos de fuente de audio digital seleccionados son enviados al decodificador de audio mientras que otros datos digitales son enviados a las interfaces de datos apropiadas. Cada decodificador de audio tendrá la capacidad de multiplexar datos asíncronos relacionados con el programa, con el tren de datos de audio mostrado en la figura.

En un receptor equipado con un igualador, la igualación puede ser inhabilitada en ausencia de propagación multirayecto porque el igualador introducirá una cantidad nominal de degradación de la calidad de funcionamiento.

La presencia de la propagación multirayecto puede ser detectada automáticamente o el igualador puede ser conmutado manualmente si el receptor ha de funcionar en una zona servida por transmisores terrenales. Cuando el igualador está funcionando, se abren los bucles de seguimiento de portadora y de símbolos.

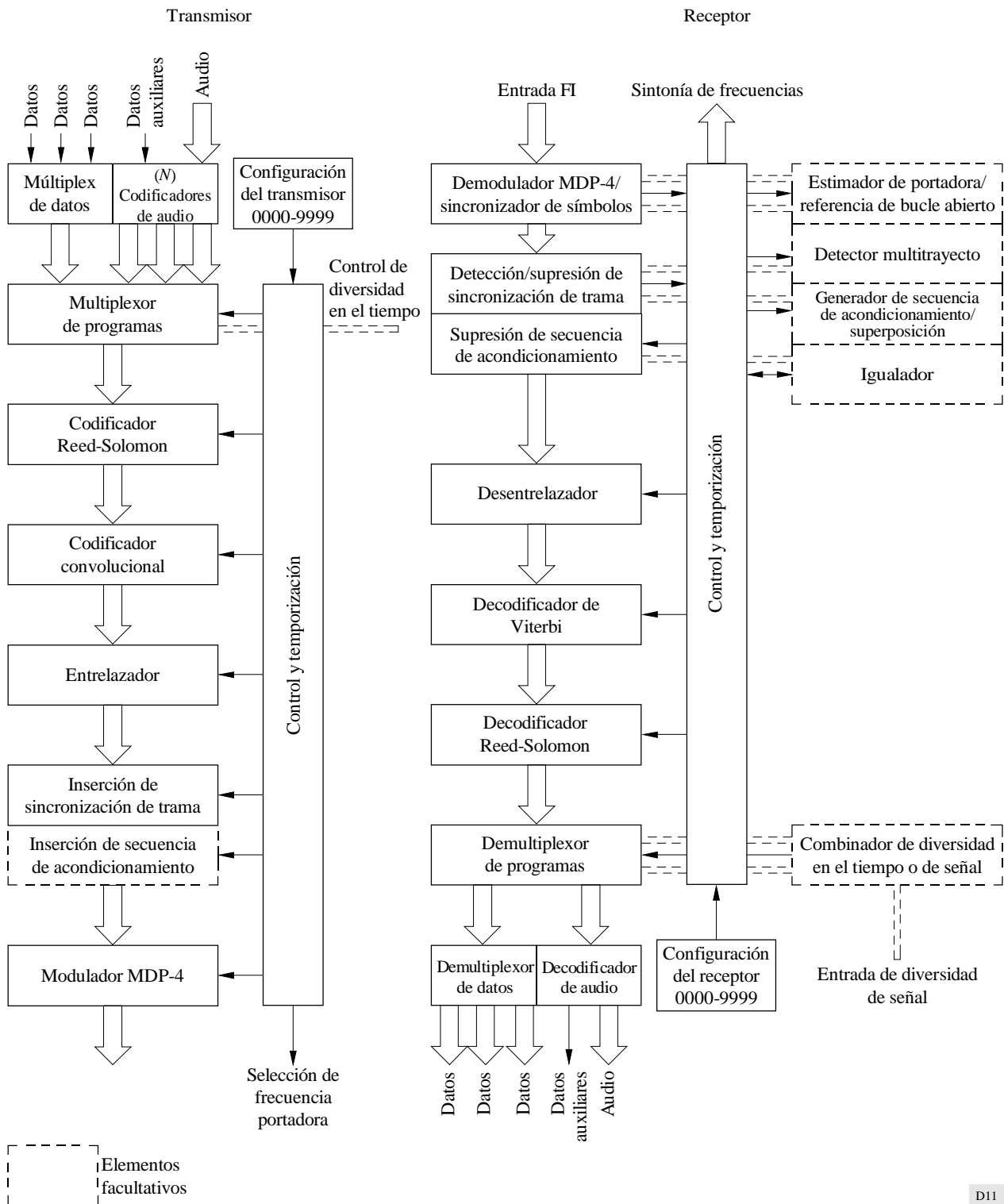
La diversidad en el tiempo se aplica transmitiendo una versión retardada de un tren de datos multiplexados junto con el original. En el receptor, estos dos trenes de datos son demultiplexados y realineados temporalmente. Se selecciona para la salida el tren de datos con el menor número de errores.

La diversidad de señal requiere el procesamiento independiente de la señal, o de diferentes señales de frecuencia, hasta el combinador de diversidad. Este combinador ejecuta las funciones de alineación temporal y selección del tren de datos con menos errores.

3 Descripción del Sistema

Las capas de procesamiento del transmisor y del receptor del Sistema B se describen bloque por bloque, haciendo referencia al diagrama de la Fig. 11. Se definen especificaciones para cada bloque, según proceda.

FIGURA 11
Diagrama de bloques del Sistema B



D11

Cada codificador acepta también un canal de datos asíncrono, que se multiplexa con el tren de datos de audio. La velocidad de datos de estos canales varía dinámicamente de acuerdo con la capacidad no utilizada del canal de audio.

La salida de cada codificador de audio es un tren de datos síncrono con una velocidad de datos proporcional a la anchura de banda y a la calidad de audio. La velocidad varía de un mínimo de 16 kbit/s para canales monoaurales con anchura de banda limitada a 320 kbit/s aproximadamente para cinco canales (la velocidad exacta ha de ser determinada por el Grupo MPEG-2). Las velocidades de datos del codificador de audio están limitadas a múltiplos de 16 kbit/s.

3.1.3 Multiplexación de programas

Todos los canales de audio y los canales de datos digitalizados son multiplexados en un tren de datos en serie compuesto. La velocidad de datos de salida variará de un mínimo de 32 kbit/s a un máximo determinado por los recursos de anchura de banda y potencia del sistema transmisor. Se prevé que este máximo esté comprendido entre 1 y 10 Mbit/s.

A cada combinación múltiplex autorizada de fuentes de audio y sus velocidades, así como de fuentes de datos y sus velocidades, se le asignará un número de identificador de transmisión único. Este número será utilizado por el receptor para establecer la velocidad de datos y la configuración de demultiplexación.

3.1.4 Codificación con corrección de errores

La codificación con corrección de errores del tren de datos compuesto consiste en codificación convolucional $k=7$, a 1/2 velocidad, precedida por la codificación de Reed-Solomon a velocidad 140/160.

3.1.5 Entrelazado

Se utiliza un entrelazador de bloques para entrelazar en el tiempo el tren de datos compuesto. La longitud del bloque entrelazador será proporcional a la velocidad de datos compuesta para proporcionar un tiempo de trama de entrelazador del orden de 200 ms a cualquier velocidad de datos.

3.1.6 Sincronización de trama

Se inserta una palabra de código PN al principio de cada trama de entrelazador. La sincronización de trama de entrelazador tendrá también una relación única con la trama de multiplexor de programas.

3.1.7 Inserción de secuencia de acondicionamiento

Si la radiodifusión ha de recibir un entorno con repetidores en el canal, se insertará una secuencia de símbolos de acondicionamiento conocida, con un símbolo de acondicionamiento colocado cada n símbolos de datos, donde n puede variar de 2 a 4. La presencia de símbolos de acondicionamiento y su frecuencia será identificada también por el número de identificador de transmisión único.

3.1.8 Modulación

El paso final en el proceso es la modulación por desplazamiento de fase cuadrivalente (MDP-4) en una frecuencia intermedia (FI). Se utilizará conformación del impulso para restringir la anchura de banda de la señal. Desde este punto, la señal FI modulada es traducida a la frecuencia portadora apropiada para transmisión. Cuando se utiliza multiplexación por división de frecuencia, se generan portadoras adicionales duplicando el transmisor descrito anteriormente.

3.2 Receptor

Después de sintonizar la portadora deseada y traducir la señal a una frecuencia intermedia fija, el receptor realizará las funciones de demodulación, decodificación y demultiplexación, así como la conversión de digital a analógico de la señal de audio seleccionada.

La velocidad de datos del receptor y la configuración del demultiplexor de programas se establecerán insertando el número de identificador de transmisión único. El receptor básico podrá realizar todas las funciones de recepción requeridas en un entorno de recepción fijo o portátil, donde haya una señal estable con una relación señal/ruido suficiente.

En entornos de recepción móvil, donde se plantean problemas con el bloqueo de las señales, el receptor incluirá las mejoras necesarias para incluir la diversidad en el tiempo o de señal, o la igualación si se utilizan amplificadores.

3.2.1 Demodulación

La demodulación normal de la portadora se produce en un demodulador MDP-4 coherente enganchado en fase, y los símbolos son detectados por un filtro adaptado con temporización proporcionada por un bucle de seguimiento de símbolos.

Cuando se utiliza igualación en presencia de ecos, los bucles de seguimiento de portadora y de símbolos están abiertos. Se utiliza un estimador de frecuencia FFT para fijar una referencia de demodulación de portadora fija. El filtro adaptado de símbolos es muestreado al doble de la velocidad de símbolos y estas muestras son enviadas al igualador.

3.2.2 Sincronización de trama

La sincronización de trama del entrelazador se establece mediante detección de transcorrelación de la única palabra de sincronización de trama. Este proceso suprime también la ambigüedad producida por la modulación MDP-4.

3.2.3 Igualación

En presencia de ecos, habrá varias crestas de correlación estrechamente espaciadas en la salida del detector de sincronización de trama. Esta información se puede utilizar para conmutar automáticamente en el igualador. El igualador utiliza una secuencia de acondicionamiento generada localmente cuyo comienzo se basa en una estimación de la posición de la palabra de sincronización de trama. Una comparación de la temporización de la palabra de sincronización de trama generada localmente y de la salida del detector de sincronización de trama permite al igualador ajustar cualquier error de temporización entre los símbolos entrantes y la referencia de temporización de símbolos generada localmente.

El Sistema B utiliza un diseño de igualador de realimentación con decisión predictiva por rejilla (Lattice PDFE). El margen autorizado en la dispersión temporal de todos los ecos es una función de la longitud del igualador. Para probar el funcionamiento del Sistema B se empleó un igualador con 22 derivaciones hacia adelante y 4 hacia atrás. El igualador funcionará durante un intervalo igual a 100 símbolos sucesivos. Se puede aumentar la longitud del igualador si es necesario para compensar una mayor dispersión del retardo de la señal.

3.2.4 Supresión de secuencia de acondicionamiento

En la salida del igualador, los símbolos de secuencia de acondicionamiento son descartados. Si un receptor sin igualador funciona con una señal que contiene símbolos de acondicionamiento, debe descartar también estos símbolos. Éste es un proceso simple, dado que la posición de los símbolos de acondicionamiento es conocida en relación con la palabra de sincronización de trama.

3.2.5 Desentrelazado

El desentrelazador restablece la secuencia de tiempo original de los símbolos detectados, tal como existía en el transmisor antes del entrelazado.

3.2.6 Decodificación con corrección de errores

Un decodificador de Viterbi, seguido por un decodificador de Reed-Solomon, reduce la tasa de errores detectada en los símbolos y convierte de nuevo los símbolos en bits de datos. Si el decodificador de Reed-Solomon no puede suprimir todos los errores en un bloque de datos, marca los bloques de datos erróneos. Esta indicación puede ser utilizada posteriormente por el combinador de diversidad para seleccionar la mejor señal, así como por el decodificador de audio para controlar el silencio de la salida de audio.

3.2.7 Demultiplexación de programas

En este punto, el tren de datos compuesto es demultiplexado en trenes de datos digitales separados y el tren de datos de audio deseado es seleccionado y encaminado al decodificador de audio.

Si se utiliza diversidad en el tiempo, el demultiplexor de programas separa la versión en tiempo real y la versión retardada del tren de datos y las envía al combinador de diversidad para seleccionar los datos menos corrompidos.

Si se utiliza un receptor independiente para la recepción con diversidad, éste es el punto donde se seleccionan los datos de salida más robustos.

3.2.8 Decodificación de audio

El decodificador de audio convierte el canal de audio digital seleccionado a analógico. Demultiplexa también el canal de datos auxiliares y envía los datos a la interfaz de salida apropiada.

La interfaz del demultiplexor de programas proporciona no sólo los datos y reloj recuperados, sino también una indicación de la calidad de los datos a partir del decodificador de Reed-Solomon. Esta señal se puede utilizar para facilitar el control del silencio del decodificador de audio de control durante las condiciones de señal de umbral. Esta característica se utilizó durante la prueba del sistema digital B con el decodificador de audio AT&T PAC y se inhabilitó durante las pruebas con un decodificador de audio MUSICAM.

3.2.9 Interfaces de salida

Las interfaces de salida consisten en el canal de audio seleccionado y los canales de datos seleccionados. Los datos pueden ser marcados como buenos o malos utilizando el indicador de calidad de datos de Reed-Solomon. El canal de datos puede activar visualizaciones en el receptor, o ser encaminado para visualizaciones especiales en aplicaciones de distribución de datos. Como puede existir más de un canal de audio en un múltiplex de transmisión, los canales no seleccionados para escucha pueden ser grabados para reproducción ulterior.

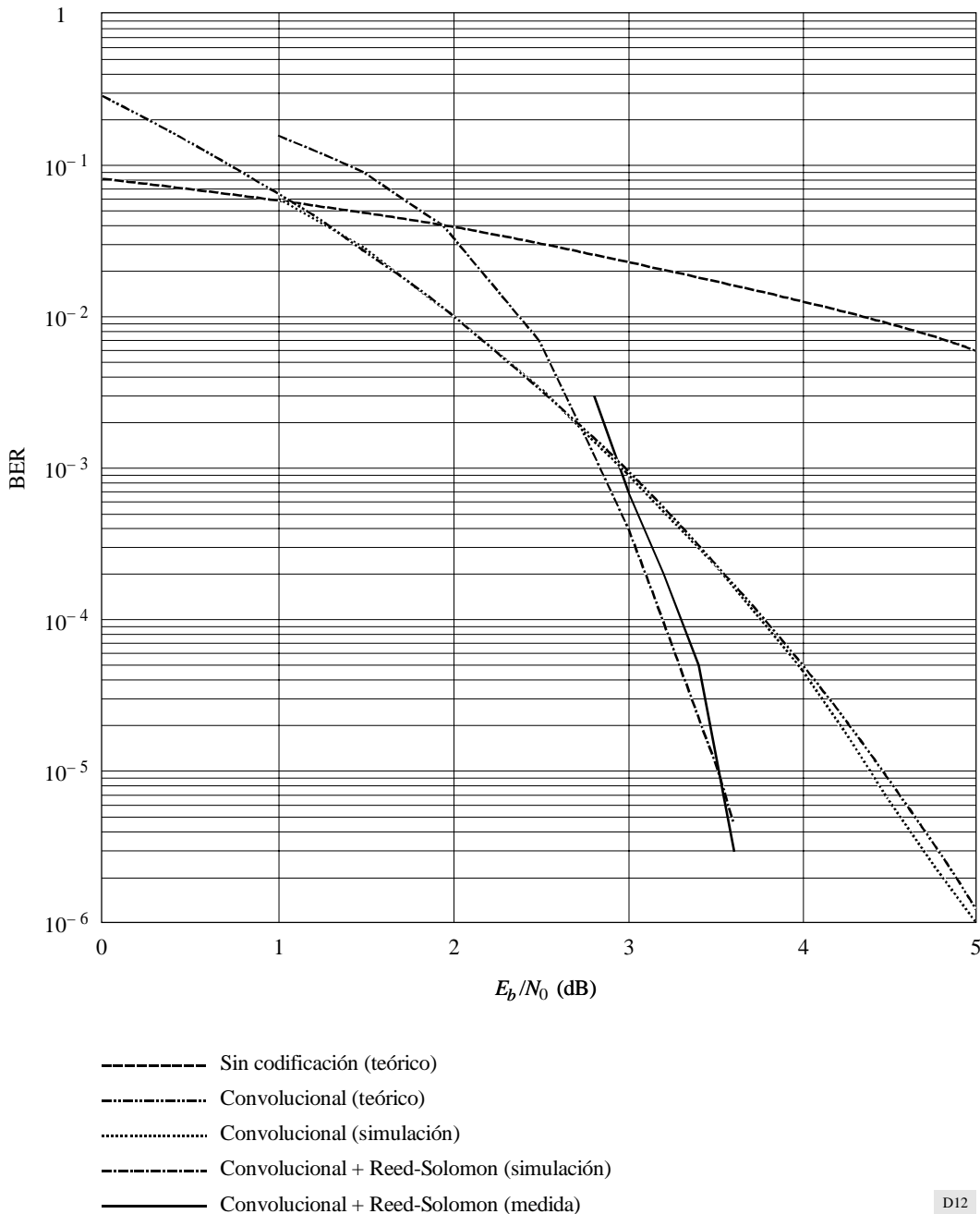
4 Calidad de funcionamiento

La calidad de funcionamiento del Sistema B se determina por referencia a un conjunto de modelos de canales normalizados: un canal de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN-additive white Gaussian noise); un modelo de satélite para una señal de satélite, y un modelo de señales múltiples (a una sola frecuencia) que puede representar una señal de satélite con amplificadores terrenales o una red puramente terrenal.

4.1 Canal AWGN

Un enlace de satélite con visibilidad directa en cielo despejado puede ser aproximado con un canal AWGN. Hay muy poca propagación multitrayecto (factores k de Rician generalmente por debajo de 10 dB) en ángulos de elevación de satélite por encima de 20°. En la Fig. 12 se muestra la calidad de funcionamiento medida de un receptor del Sistema B en un canal AWGN y se muestran también algunas comparaciones entre resultados teóricos, simulados y medidos.

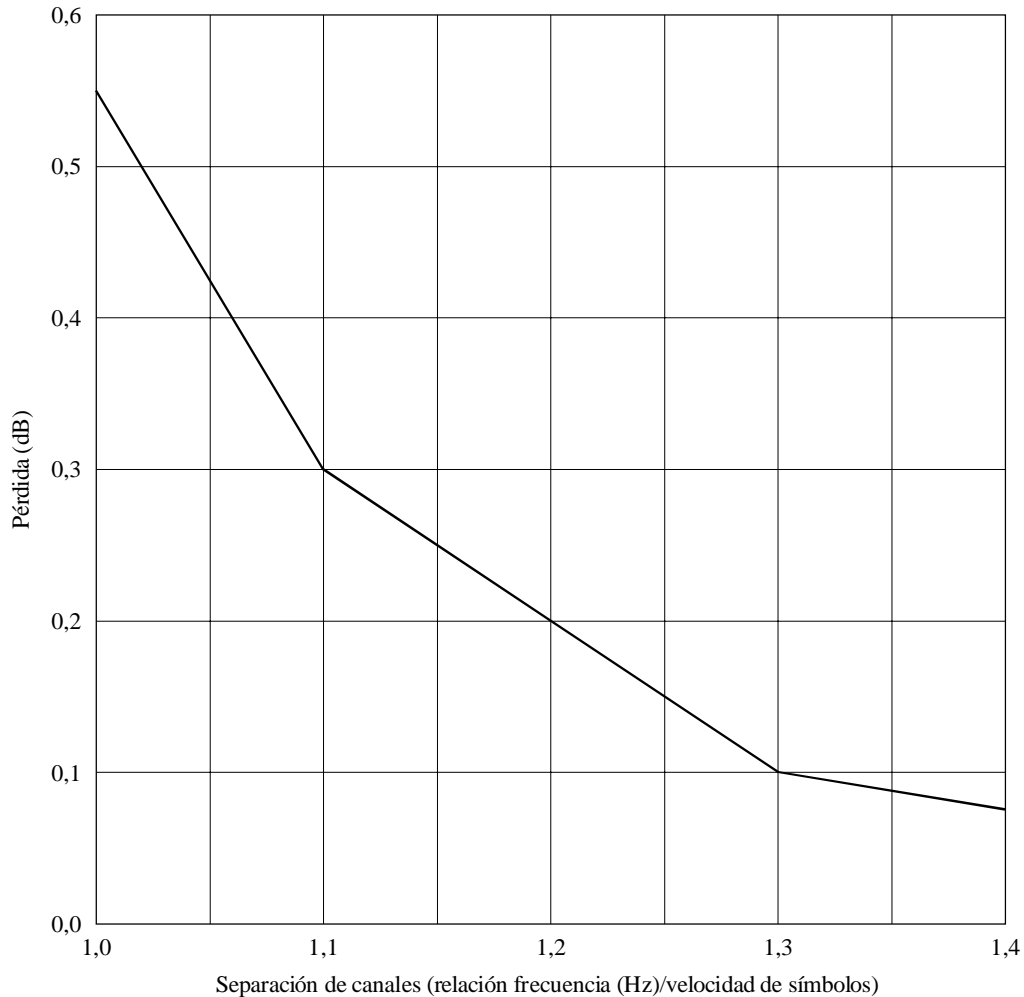
FIGURA 12
Calidad de funcionamiento del Sistema B en un canal AWGN



Como el Sistema B puede utilizar varias portadoras independientes en un modo de modulación por división de frecuencia, es interesante la separación de portadoras. La Fig. 13 muestra la degradación de la calidad de funcionamiento medida en función del espaciamiento de la portadora adyacente.

FIGURA 13

Degradación de la calidad de funcionamiento en función de la separación de portadoras



D13

El espaciamiento viene dado como una relación entre la separación de portadoras en Hz y la velocidad de símbolos transmitida en símbolos por segundo. En el Sistema B la velocidad de símbolos es igual a la velocidad de datos multiplicada por la tara de Reed-Solomon de 160/140, multiplicada por la tara de símbolos de acondicionamiento.

4.2 Canal de satélite

El canal de satélite cambia para la recepción móvil porque la señal de satélite es bloqueada aleatoriamente por edificios, árboles y otros obstáculos. Para evaluar la calidad de funcionamiento del Sistema B en condiciones de recepción móvil, se creó un modelo mediante una medición de señales de satélite en una prueba específica en la zona de Pasadena, California. La prueba toma 45 min y comprende una variedad de condiciones de recepción, incluidos segmentos abiertos, moderadamente sombreados y muy sombreados. La señal de satélite se midió con banda estrecha, lo que dio una gama dinámica de más de 35 dB. En la Fig. 14 se muestra un trazado del modelo. La Fig. 15 resume la estadística de la medición de las señales.

FIGURA 14
Modelo de canal de satélite

Pasada 1 de la prueba en Pasadena con el satélite en la banda S

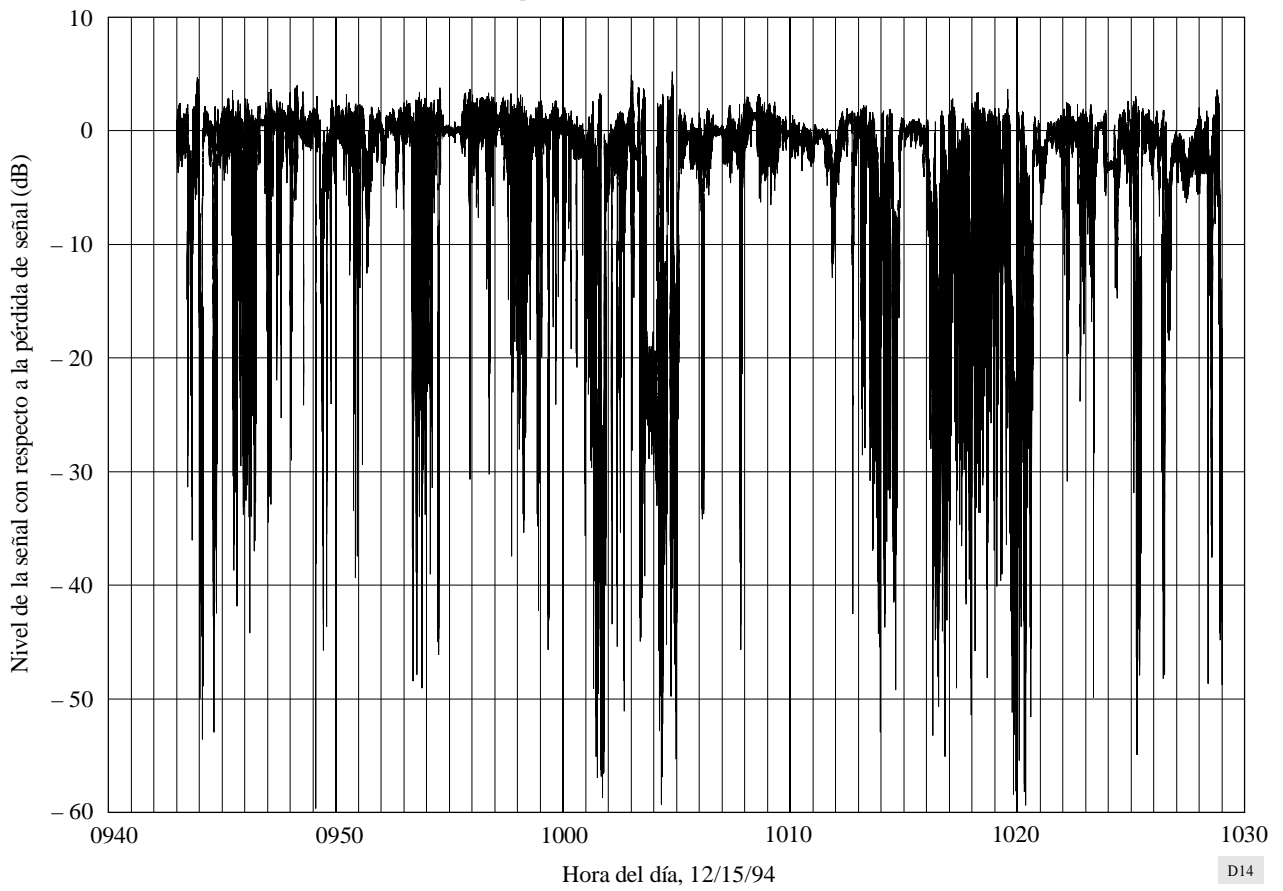
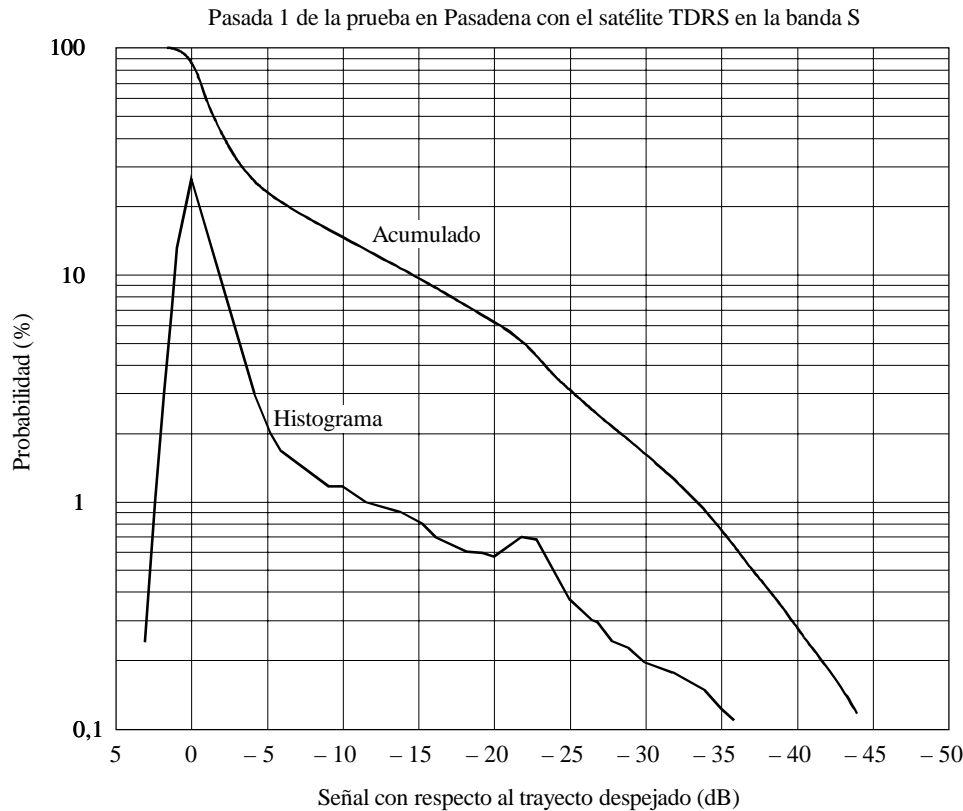


FIGURA 15
Estadística del modelo de canal de satélite



4.2.1 Diversidad en el tiempo

Si sólo se dispone de una señal de satélite, una técnica de mitigación efectiva es la diversidad en el tiempo. Una versión retardada de un tren de datos se multiplexa con el tren de datos original, esperando que al menos una versión no sea bloqueada. El receptor realinea los dos trenes de datos en el tiempo y selecciona el que tiene menos errores. Esto se puede hacer sobre la base de la indicación de errores del decodificador de Reed-Solomon.

La retransmisión del tren de datos añade una penalización de 3 dB al sistema, aunque se puede mostrar que esto es más eficaz que un aumento de 3 dB en el margen del enlace. Las Figs. 16 y 17 muestran la efectividad de la diversidad en el tiempo utilizando el modelo de canal satélite de Pasadena. La Fig. 16 muestra la probabilidad conjunta de un desvanecimiento que exceda de una gama de márgenes de enlace, promediada en todas las condiciones de recepción del modelo. Obsérvese que la mayor parte de la mejora se produce en unos 4 s de retardo. La Fig. 17 muestra las probabilidades de desvanecimiento conjuntas, para un margen fijo de 10 dB, separadas por condiciones de recepción diferentes.

4.2.2 Diversidad de satélite

Se puede utilizar más de un satélite para radiodifundir el mismo tren de datos, utilizando frecuencias separadas y receptores separados para cada señal. Con esta técnica se espera que al menos una de las señales no será bloqueada debido a la diferencia de sentido del receptor a los satélites.

La efectividad de la diversidad de satélites, al igual que la diversidad en el tiempo, depende de la geometría local de los obstáculos que producen el bloqueo de las señales. Recientemente se han aplicado técnicas fotogramétricas para obtener estadísticas de la efectividad de la diversidad de satélite. Estas técnicas comprenden la toma de imágenes fotográficas con una cámara de lente de ojo de pez apuntada al cenit y después el análisis de estas imágenes para determinar el porcentaje de cielo despejado, sombreado o bloqueado. La posición del satélite se puede superponer en estas imágenes para dar una evaluación de la ganancia por diversidad en un lugar o trayecto específico.

FIGURA 16
Probabilidad de desvanecimiento conjunto en función del margen del enlace

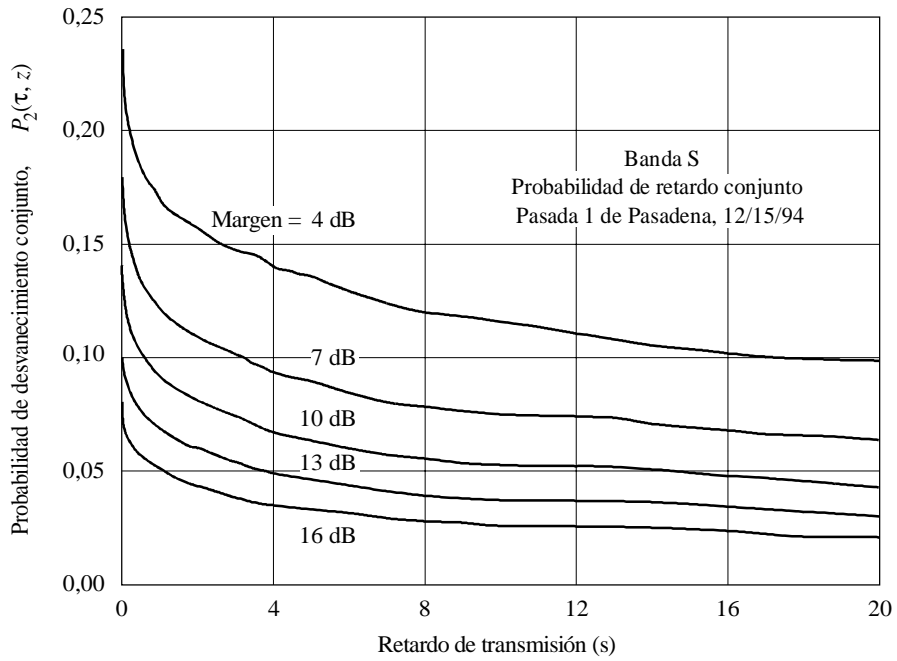
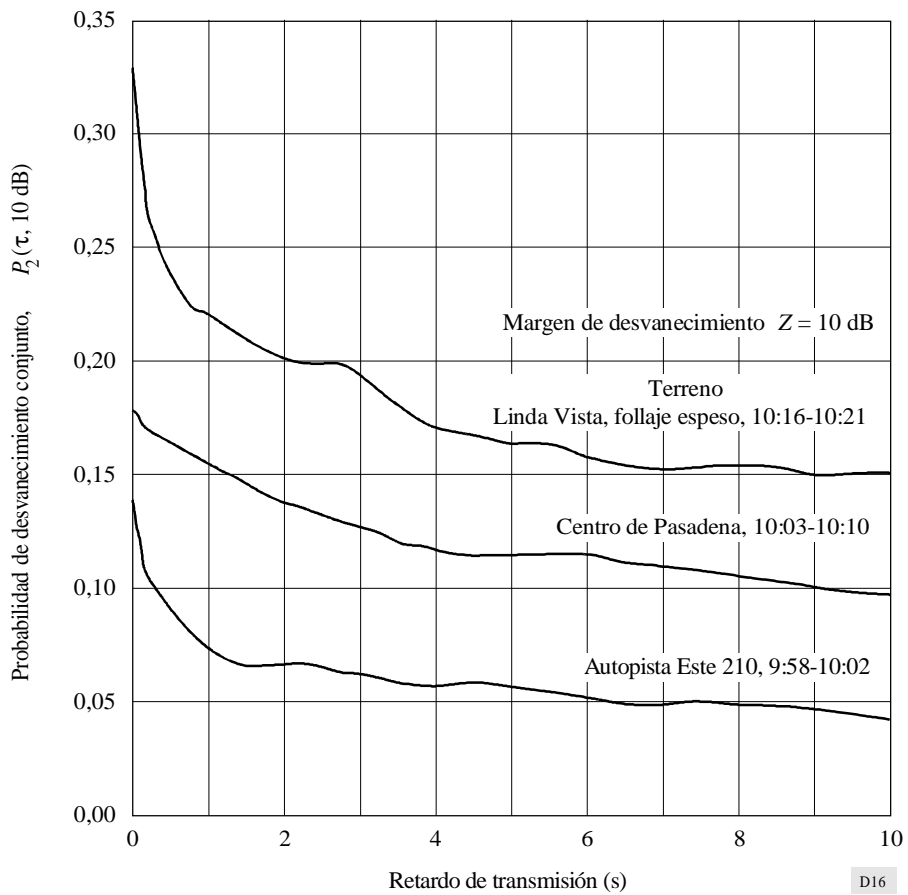


FIGURA 17
Probabilidad de desvanecimiento conjunto en función del entorno



4.3 Red a una sola frecuencia

Un método para obtener una señal de satélite en zonas de recepción muy difícil es utilizar una red de repetidores terrenales en el canal. El Sistema B utiliza la igualación para funcionar en este entorno de señales. La única restricción en la utilización de la igualación es que las señales son retardadas por lo menos medio símbolo entre sí. No hay restricciones en cuanto a la proximidad de los amplificadores entre sí, si se incorporan retardos diferentes en cada uno. El retardo máximo entre amplificadores será fijado por el número de etapas incorporadas en el igualador.

4.3.1 Modelos de canal

Se establecieron dos modelos de señal para evaluar la calidad de funcionamiento del igualador del Sistema B. Además, se evaluó la efectividad de la diversidad de recepción de la señal.

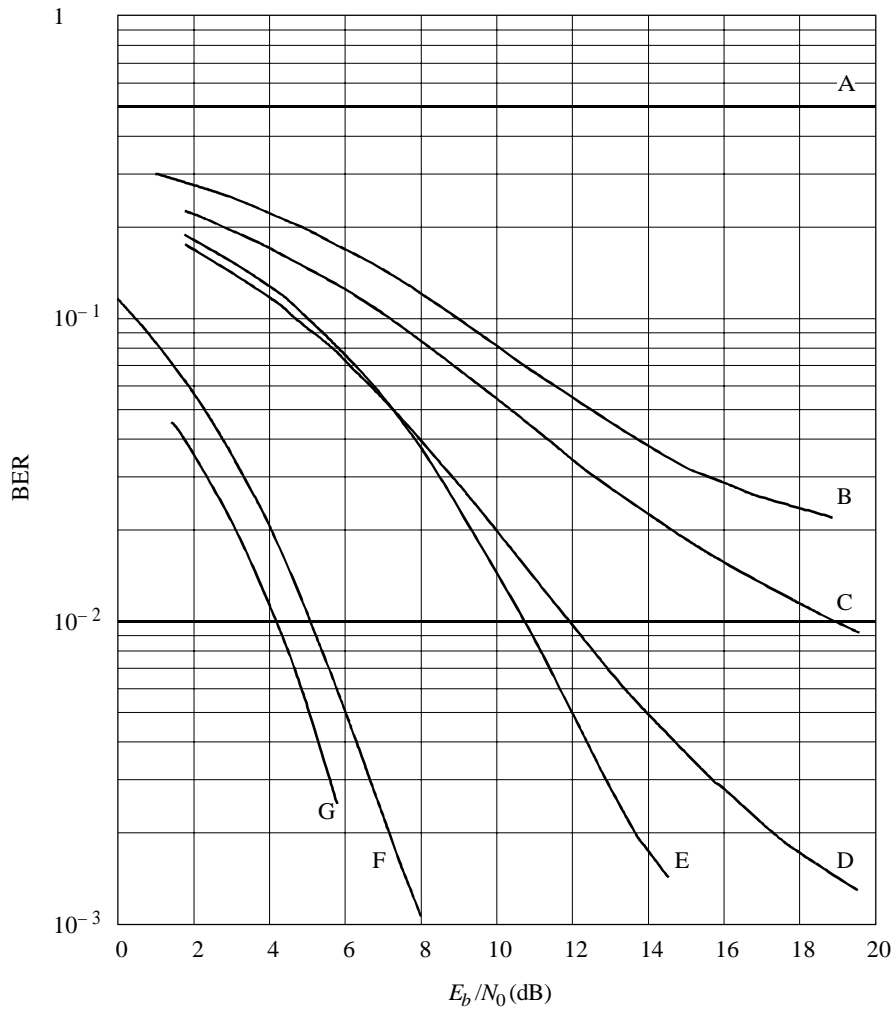
El primero es un modelo de Rician, con una mitad de la potencia en un componente de señal directo y un cuarto de la potencia en cada uno de los dos componentes de Rayleigh. La dispersión debida al efecto Doppler en los componentes de Rayleigh se estableció en ± 213 Hz, lo que corresponde a la velocidad de un vehículo a 100 km/h, en una frecuencia portadora de 2,3 GHz. La velocidad de transmisión es 300 000 símbolos por segundo. E_b/N_0 se define sobre la base de la potencia de señal total e incluye el efecto de la tara de secuencia de acondicionamiento.

El segundo es un modelo de Rayleigh, con tres componentes de señal de Rayleigh de igual potencia.

4.3.2 Funcionamiento del igualador

Se realizó una evaluación inicial de la calidad de funcionamiento utilizando una simulación «corta», que supuso una separación en el tiempo de las señales en duraciones de símbolos enteros y una recuperación de temporización de símbolos perfecta. Los resultados se muestran en la Fig. 18. La proporción de bits erróneos es la proporción de errores no codificados, antes de la decodificación de Viterbi y de Reed-Solomon. Una proporción de errores no codificados de 1×10^{-2} será reducida a 1×10^{-6} por el proceso de decodificación.

FIGURA 18
 Calidad de funcionamiento del igualador ideal del Sistema B (sin codificación)

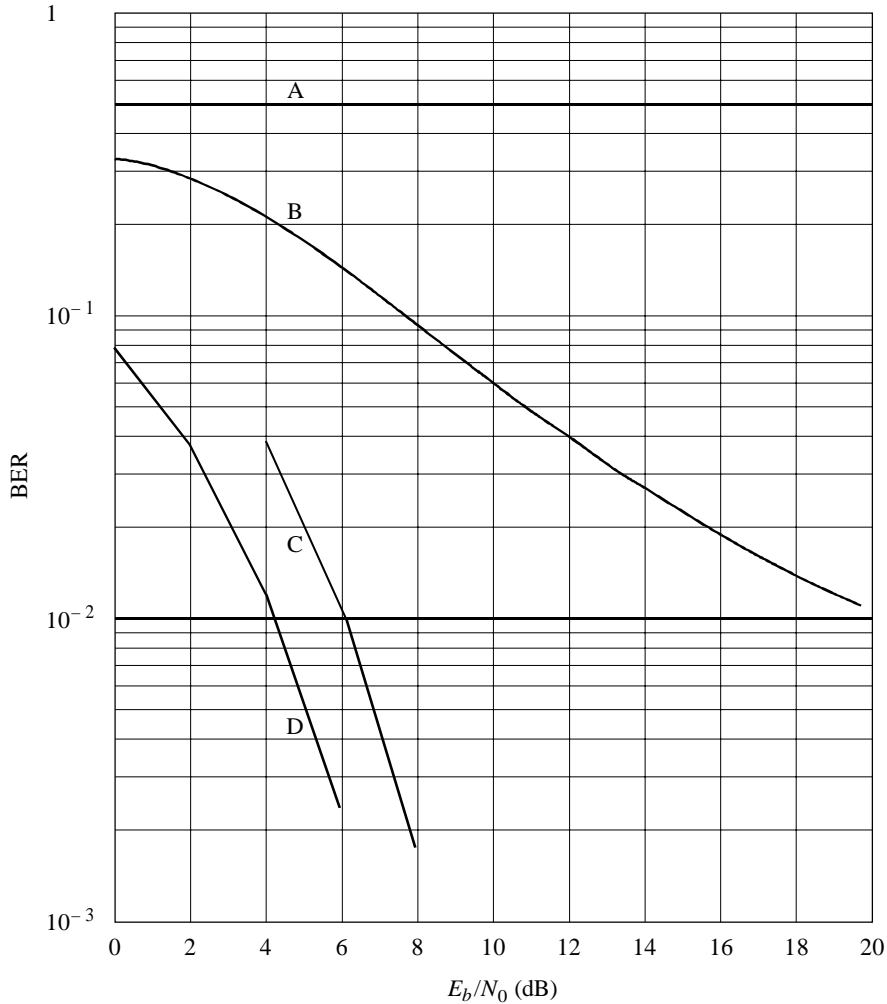


- Curvas A: Sin igualación, canal de Rician o Rayleigh
- B: Diversidad de Rayleigh = 1
 Símbolos de reacondicionamiento 1:5
- C: Diversidad de Rayleigh = 1
 Símbolos de reacondicionamiento 1:3
- D: Diversidad de Rayleigh = 2
 Símbolos de reacondicionamiento 1:3
- E: Diversidad de Rician = 1
 Símbolos de reacondicionamiento 1:3
- F: Sin propagación multitrayecto, sin desvanecimiento, igualador activado
 Sin tara de símbolo de reacondicionamiento
- G: Sin propagación multitrayecto, sin desvanecimiento, sin igualador

BER sin codificación = 1×10^{-2}
 BER con codificación = 1×10^{-6}

La Fig. 19 muestra la calidad de funcionamiento obtenida con una simulación de escala completa, incluido el funcionamiento en bucle abierto de la demodulación de la portadora y los bucles de temporización de símbolos.

FIGURA 19
Calidad de funcionamiento del igualador del Sistema B (sin codificación)



- Curvas A: Sin igualación, canal de Rayleigh
- B: Diversidad de Rayleigh = 1
Símbolos de reacondicionamiento 1:3
- C: Sin propagación multirrayecto, sin desvanecimiento, igualador activado
Sin tara de símbolos de reacondicionamiento
- D: Sin propagación multirrayecto, sin desvanecimiento, sin igualador

BER sin codificación = 1×10^{-2}
 BER con codificación = 1×10^{-6}