

En los últimos años se han realizados estudios y probados sistemas en todo el mundo para la introducción de la radiodifusión sonora digital, tanto en las bandas de frecuencias ya atribuidas a estos servicios (caso de la OM, OC y de la FM) o bien en nuevas bandas de frecuencias atribuidas a los servicios de radiodifusión sonora (caso del DAB). Un caso particular son los sistemas que utilizan las bandas de ondas métricas (estaciones de frecuencia modulada).

LA FM DIGITAL. SISTEMA IBOC FM

Luis del Amo.

Subdirector Técnico de la Cadena Ser

En Europa se efectuaron estudios basados en el proyecto Eureka 147 dando como resultado el sistema la estandarización del sistema DAB. En abril de 2005 el Comité Nacional de Sistemas de Radio (NRSC) de la Administración de EE.UU. aprobó el estándar denominado NRSC-5 (sistema IBOC FM).

Con el fin de facilitar una migración gradual de los actuales sistemas de radiodifusión sonora analógicos a los sistemas digitales se han investigado sistemas que permiten realizar «simulcast»; esto es, transmitir en el mismo canal la señal analógica y la señal digital, sin que se originen interferencias entre ellas. La señal analógica es recogida por los antiguos receptores analógicos y la señal digital por los modernos receptores digitales.

SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL TERRENAL EN LA BANDA DE ONDAS MÉTRICAS

La Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT), en su Recomendación UIT-R BS.774, INDICA que requi-

sitos deberían satisfacer los futuros sistemas de radiodifusión sonora digital terrenal en las bandas de ondas *métricas* y *decimétricas*.

Que de manera resumida son:

- Calidad de la señal de audio transmitida comparable a los medios de grabación digital de consumo de alta calidad (disco compacto), para receptores a bordo de vehículos, portátiles y fijos.
- Mayor eficacia en lo que respecta a la utilización del espectro radioeléctrico y la potencia transmitida, comparado con

los actuales sistema de frecuencia modulada.

- Mejora en la calidad de funcionamiento frente condiciones de propagación multitrayecto.
- Compromiso entre robustez de la señal recibida y la calidad del audio.
- Posibilidad de reconfiguración del sistema para poder transmitir más programas a expensas de pérdida de calidad de la señal de audio.
- Posibilidad de transmitir datos asociados o no al programa.

Abreviaturas

AAC	Advanced Audio Coding
PAC	Perceptual Audio Coder (Lucent Technologies)
IBOC	In-Band On-Channel
NRSC	Nacional Radio Systems Committee
PDS	Personal Data Service
SIS	Station Identification Service
AAS	Auxiliary Application Service
MPS	Main Program Service
OFDM	Orthogonal frequency division
SPS	Supplemental Program Service
IDS	Information Data Service
FEC	Forward Error Correction
FCC	Federal Communications Comisión

- Posibilidad de ofrecer servicios de valor añadido.

- Posibilidad de fabricación a gran escala de receptores y antenas.

La Recomendación UIT-R BS.1114 propone que cuando alguna administración implemente los servicios de radiodifusión sonora digital terrenal en la gama de frecuencias de 30-3.000 MHz se utilice alguno de los sistemas descritos en la referida recomendación:

- Sistema digital A: proyecto Eureka 147 (Europa y otros países).
- Sistema digital F: ISDB-T (Japón).
- Sistema digital C: IBOC.

SISTEMA IBOC FM

En los últimos años varias empresas de los EE.UU., en colaboración con la FCC (Federal Communications Commission), han realizado pruebas de laboratorio y de campo para la estandarización de un sistema de radiodifusión sonora digital en la banda de ondas métricas.

El sistema IBOC FM (In-Band ON-Channel) permite la utilización de los sistemas híbridos (Simulcast), que tiene capacidad para transmitir la señal analógica y digital en el ancho de banda atribuido a los actuales sistemas de frecuencia modulada.

Servicios soportados

Los servicios soportados por el sistema pueden resumirse:

- *Main Program Service (MPS)*. Corresponde al programa de audio, tanto digital como analógico. Incluye una determinada capacidad de datos para transmitir información relacionada con el programa (PSD).

- *Supplemental Program Service (SPS)*. Corresponde a programas suplementarios de audio. Incluye una determinada capacidad de datos para transmitir información relacionada con el programa (PSD).

- *Station Identification Service (SIS)*. Corresponde a la transmisión de datos necesarios para el control e identificación de la estación. Facilita al usuario la selección de la estación de radio y sus servicios soportados (nombre, localización, identificador, etc).

- *Servicios Avanzados de Datos (ADS)*. Corresponde a la transmisión de

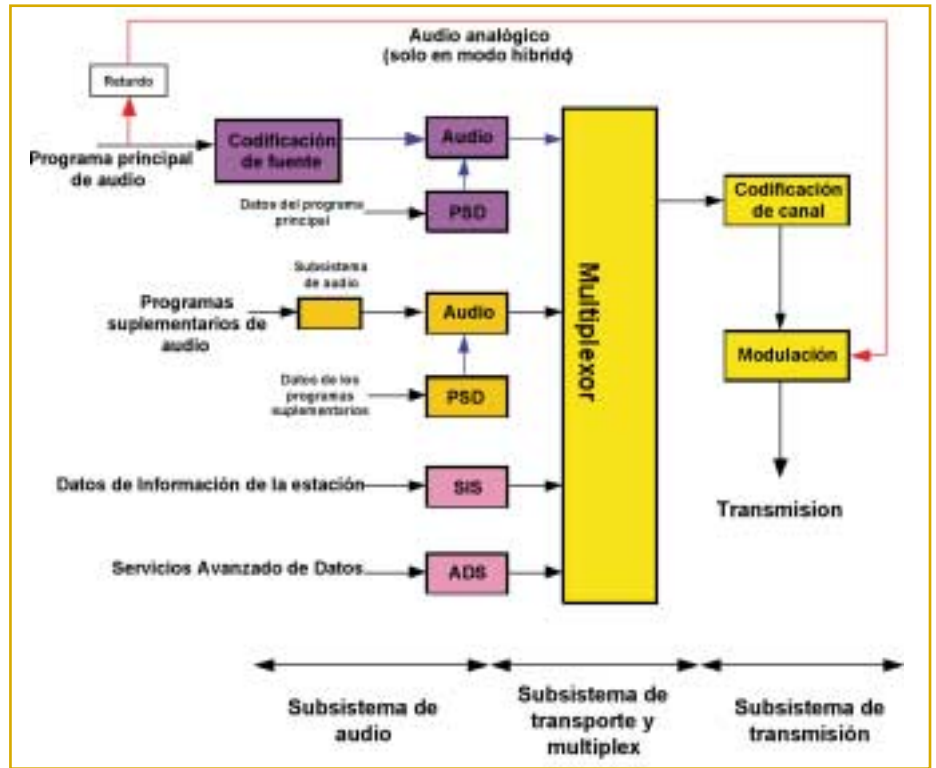


Figura 1. Diagrama de bloques

datos auxiliares para aplicaciones específicas relacionadas o no con los programas de audio.

La figura 1 muestra el diagrama de bloques básico del sistema.

Modos de funcionamiento

El sistema IBOC FM «por canal dentro de banda» (*in-band on-channel, IBOC*) puede funcionar en los modos «híbrido», «híbrido ampliado» y «totalmente digital». En el modo *híbrido* la señal digital se transmite en bandas laterales primarias a ambos lados de la señal analógica. En el modo *híbrido ampliado*

la señal digital se transmite en bandas laterales primarias a ambos lados de la señal analógica, ampliando la banda utilizada por la señal digital en detrimento de la señal analógica.

En el modo *totalmente digital* todo el ancho de banda se utiliza para la transmisión de las señales digitales por lo que aporta capacidades mejoradas de funcionamiento.

Modo Híbrido (Simulcast)

La señal digital es transmitida en sendas bandas laterales a ambos lado de la señal analógica.

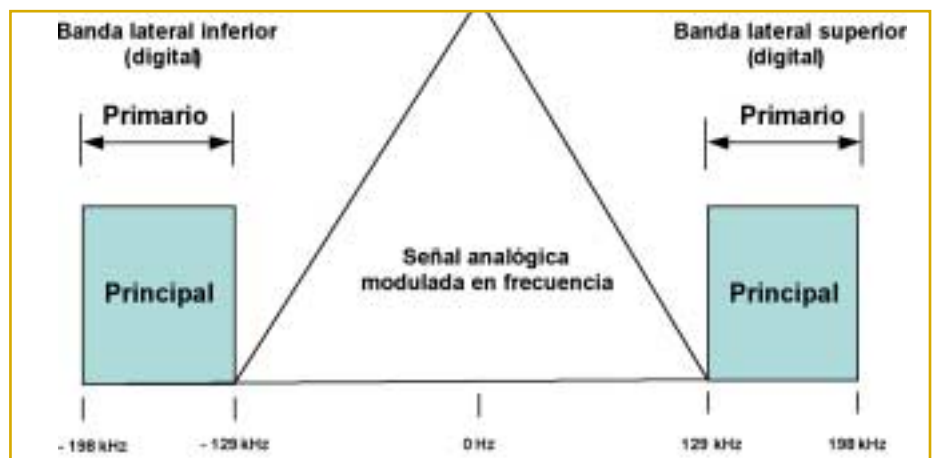


Figura 2. IBOC FM híbrido



La figura 2 muestra la distribución de señales.

La señal digital es reducida en amplitud respecto a la señal analógica.

El modo híbrido permite que, durante el periodo de introducción del sistema, sea posible la recepción del programa tanto por los nuevos receptores digitales como con los receptores convencionales de modulación de frecuencia.

Una prestación interesante de este modo de funcionamiento es que incorpora diversidad en el tiempo entre ambas señales, analógica y digital. La señal analógica es retardada respecto a la señal digital con el objeto de que exista sincronización entre ambas señales para la situación en que el receptor conmuta a la recepción analógica cuando se produce un elevado porcentaje de bits erróneos de

la señal digital. La señal analógica sirve de respaldo de la señal digital.

Modo Híbrido ampliado (Simulcast)

La señal digital es transmitida en sendas bandas laterales a ambos lado de la señal analógica.

La figura 3 muestra la distribución de señales.

La señal digital es reducida en amplitud respecto a la señal analógica.

Las bandas laterales digitales son ampliadas hacia la señal analógica para aumentar la capacidad digital.

El modo híbrido ampliado también permite que, durante el periodo de introducción del sistema, sea posible la recep-

ción del programa tanto por los nuevos receptores digitales como con los receptores convencionales de modulación de frecuencia.

Al igual que el sistema híbrido también incorpora diversidad en el tiempo entre ambas señales, analógica y digital. La señal analógica es retardada respecto a la señal digital con el objeto de que exista sincronización entre ambas señales para la situación en que el receptor conmuta a la recepción analógica cuando se produce un elevado porcentaje de bits erróneos de la señal digital.

El modo extendido amplía el ancho de banda utilizado por la señal digital en detrimento de la señal analógica.

Modo totalmente digital

Se transmiten exclusivamente las señales digitales. Permite el modo de funcionamiento óptimo.

Los radiodifusores pasarán del sistema híbrido al sistema totalmente digital cuando el número de receptores analógicos sea escaso.

La principal diferencia entre ambos sistemas es que en el sistema totalmente digital se ha suprimido la señal analógica, se han desplazado en frecuencia las señales digitales y se aumenta su potencia, según se muestra en la figura 4.

Se transmiten bandas laterales secundarias en el espectro de frecuencias que ocupaba la señal analógica.

Bloques funcionales del sistema

La figura 5 muestra la estructura básica de los bloques funcionales del sistema, que comprende los siguientes componentes básicos:

- Codificador y compresión de la fuente de audio.
- Codificación de canal.
- Entrelazado en tiempo y en frecuencia.
- Generador de señal OFDM.
- Subsistema de transmisión.

El audio una vez digitalizado alimenta, junto a los datos y servicios suplementarios, el dispositivo cuya función es la aleatorización de datos. Para la configuración de los modos de servicio se dis-

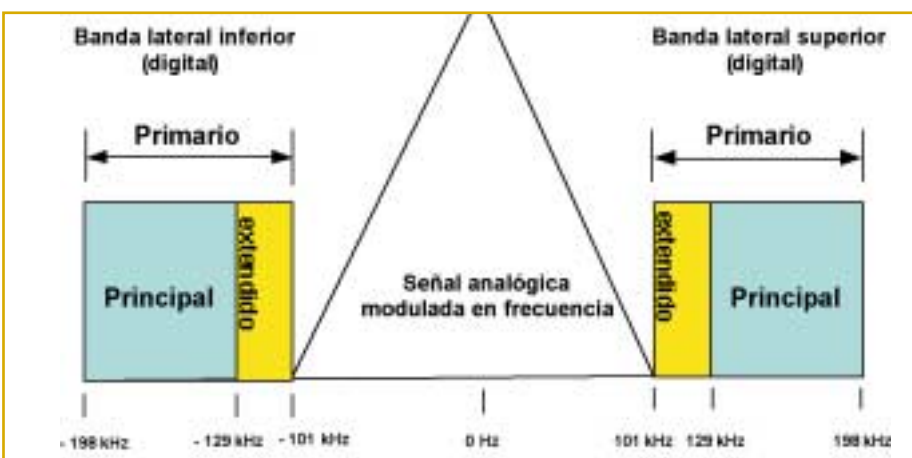


Figura 3. IBOC FM híbrido extendido

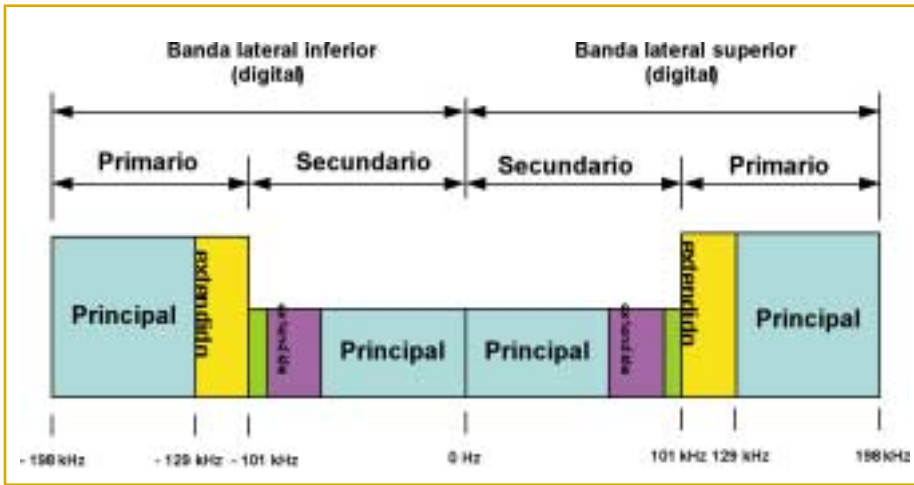


Figura 4. IBOC FM totalmente digital

pone 4 canales lógicos principales (P1, P2, P3 y PIDS) y 6 canales lógicos secundarios (S1, S2, S3, S4, S5 y SIDS).

Un canal lógico es un trayecto de se-

ñal que transporta tramas de datos con una calidad de servicio determinada. Los canales P1, P2 y P3 se utilizan para configurar los diferentes servicios de audio

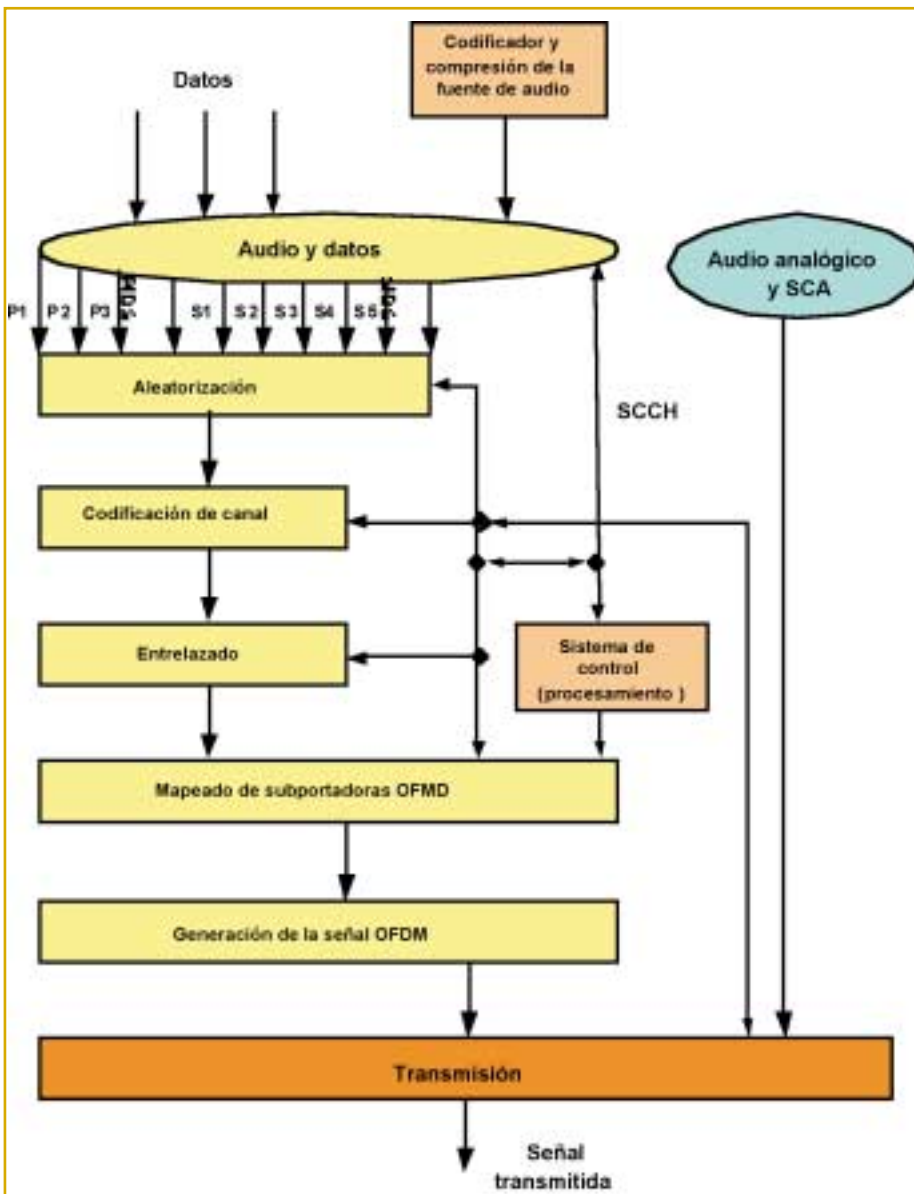


Figura 5. Diagrama de bloques funcional

primario y el canal PIDS aporta el servicio de datos primario (IDS).

Los canales S1, S2, S3, S4 y S5 se utilizan solo en el sistema totalmente digital para la transmisión de datos o de sonido ambiental (audio complementario). El SIDS aporta el servicio de datos secundario.

El canal de control del sistema (SCCH, system control channel) transporta la información de control y estado relativos al modo de funcionamiento y parámetros de configuración.

Codificación y compresión de la fuente de audio

El codificador y compresor de la fuente de audio reduce sustancialmente la velocidad binaria necesaria para la transmisión de canales de audio de alta calidad. Para la compresión de los datos se hace uso de algoritmos basados en el efecto psicoacústico de oído humano. Se consigue la transmisión de canales de audio de alta calidad (comparable al disco compacto) con velocidades de transmisión de solo 96 kb/s.

El sistema IBOC FM (normalizado como NRSC-5) no propone un codificador de fuente específico sino las velocidades nominales y mínimas de los codificadores de fuente para cada uno de los modos de funcionamiento.

En las pruebas de validación del sistema IBOC FM se utilizaron los codificadores basados en las tecnologías:

- MPEG-2 AAC (Advanced Audio Coding) desarrollado por Dolby.
- PAC de Lucent Technologies.

Ambos sistemas pueden trabajar en un amplio margen de velocidades binarias.

En las pruebas se utilizaron frecuencias de muestreo de la señal de audio de 44.1 MHz y resolución de 16 bit por muestra.

En ambos casos se utiliza el efecto psicoacústico del oído con el objeto de transmitir exclusivamente aquella información no redundante. Se analiza cada porción del espectro de audio y se codifica exclusivamente aquellas componentes necesarias para el oyente. Los tonos enmascarados por otros próximos son eliminados.

Modo de servicio	Velocidad de transmisión (kbit/s)				Modo de funcionamiento
	P 1	P 2	P 3	PIDS	
MP 1	25	74	0	1	Híbrido
MP 2	25	74	12	1	Híbrido ampliado
MP 3	25	74	25	1	Híbrido ampliado
MP 4	25	74	50	1	Híbrido ampliado
MP 5	25	74	25	1	Híbrido ampliado, totalmente digital
MP 6	50	49	0	1	Híbrido ampliado, totalmente digital
MP 7	25	98	25	1	Híbrido ampliado, totalmente digital

Velocidades de transmisión de los canales lógicos primarios

Modo de servicio	Velocidad de transmisión (kbit/s)						
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	SIDS	
MS 1	0	0	0	98	6	1	Totalmente digital
MS 2	25	74	25	0	6	1	Totalmente digital
MS 3	50	49	0	0	6	1	Totalmente digital
MS 4	25	98	25	0	6	1	Totalmente digital

Velocidades de transmisión de los canales lógicos secundarios

Modos de servicio definidos en el sistema IBOC FM.

En el sistema IBOC FM se definen diferentes modos de servicio asociados a los modos de funcionamiento y a los canales lógicos.

Codificación de canal

En el proceso de codificación se añaden bits redundantes que facilitan la detección y corrección de errores. Ello minimiza la probabilidad de error de la señal decodificada en el receptor. El sistema IBOC FM utiliza códigos convolucionales de Viterbi.

Errores producidos por fading, interferencias, ruido u otras causas en el trayecto transmisor-receptor pueden ser corregidas en el receptor. Se diseñan técnicas específicas de corrección avanzada de errores FEC (Forward Error Correction) basadas en estudios realizados para el tipo de interferencias asociadas a estas bandas de frecuencia (ondas métricas).

Los sistemas de corrección de errores funcionan bien si los errores están distribuidos de manera aleatoria. La corrección es difícil cuando el intervalo en que se producen los errores es de larga duración. La solución es el entrelazado en el tiempo de los datos en la transmisión y su reordenación en la recepción.

Algunos efectos de propagación son susceptibles de causar determinados problemas: los desvanecimientos selectivos pueden afectar a grupos de portadoras próximas en frecuencia.

Para dispersar los errores producidos por desvanecimientos selectivos en frecuencia y de esta forma poder corregirlos en recepción se utilizan técnicas de entrelazado en frecuencia.

Implementación de la señal OFDM

Las subportadoras OFDM se ordenan en grupos denominados divisiones de frecuencia. Cada división de frecuencia está constituida por 18 subportadoras para datos y una subportadora de referencia, una de tipo A y otra de tipo B. En la figura 7 se muestra la estructura de ambos tipos.

Figura 6

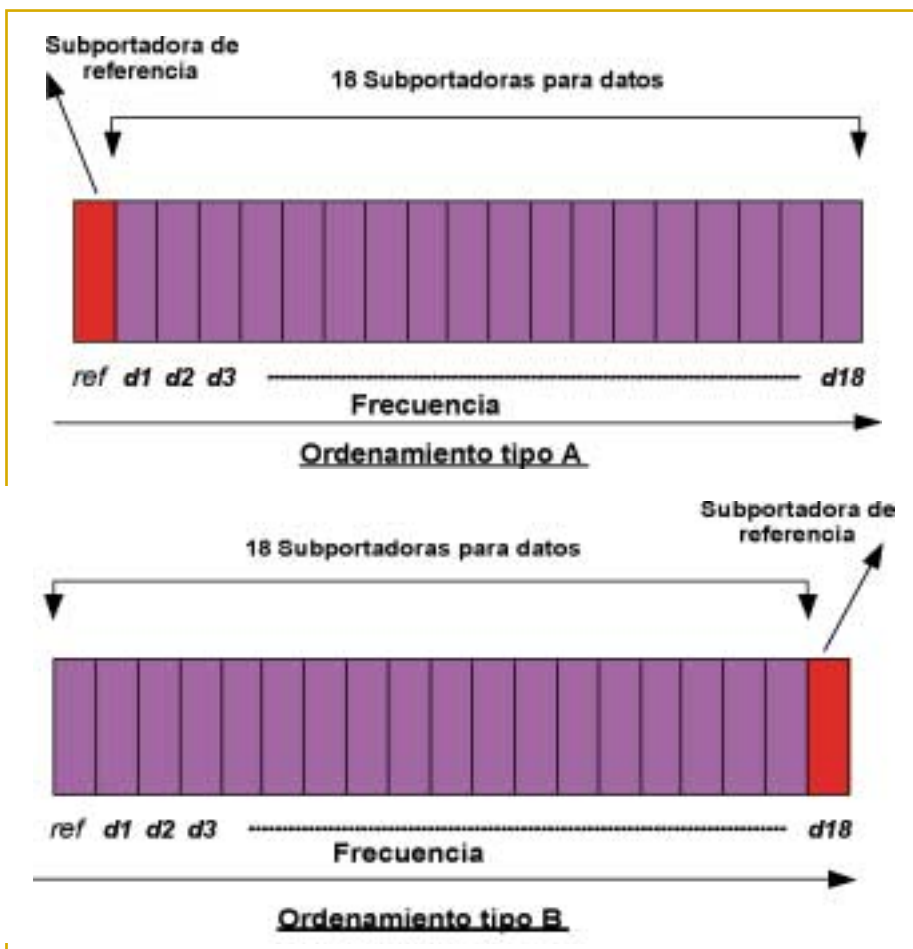


Figura 7

Las portadoras están espaciadas 363,373 Hz.

La estructura de subportadoras del canal completo para ambas bandas laterales está representado en las figuras 8 y 9. Cada cuadro corresponde a una división de frecuencia de las mostradas en la figura 7.

Espectro para el modo híbrido

La señal digital se transmite en bandas laterales principales primarias a ambos lados de la señal modulada en frecuencia. Cada banda lateral principal

primaria comprende 10 divisiones de frecuencia asignadas entre las portadoras 356 a 545 y entre las - 356 a - 545. Las portadoras 546 y - 546 son portadoras de referencia.

El nivel de las subportadoras digitales es tal que la potencia total de las mismas está 23 dB por debajo de la potencia nominal de la portadora analógica FM.

Las bandas laterales principales primarias superiores están constituidas por portadoras con ordenamiento del tipo A y las inferiores por portadoras con ordenamiento del tipo B de las mostradas en la figura 7.

La figura 10 muestra la distribución de portadoras.

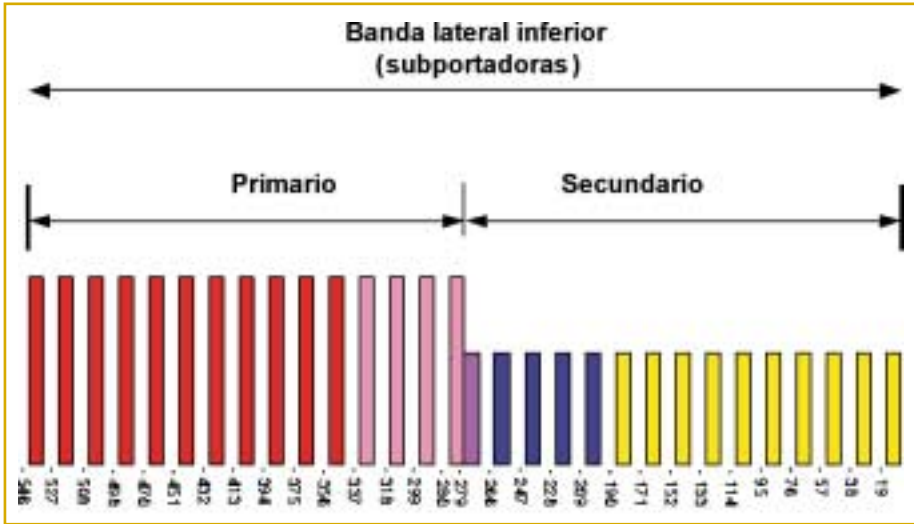


Figura 8

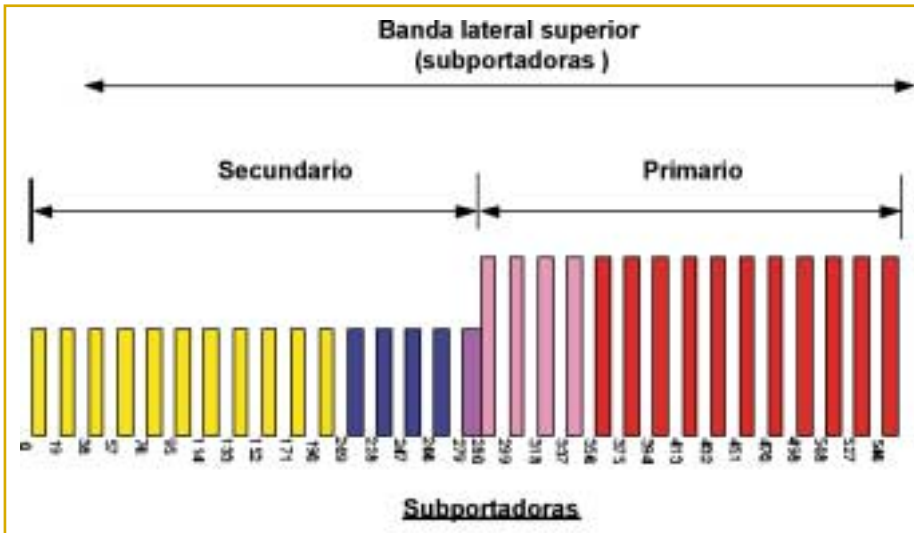


Figura 9

Espectro para el modo híbrido ampliado

En el modo híbrido ampliado se añaden bandas laterales extendidas a las bandas laterales primarias del modo híbrido como se muestra en la figura 11.

Dependiendo del modo de servicio se añaden una, dos o cuatro divisiones de frecuencia en el borde interior de la banda lateral principal primaria en detrimento del ancho de banda atribuido a la señal analógica FM.

A la estructura de subportadoras descrita en modo híbrido hay que añadir las bandas laterales extendidas que comprenden las subportadoras de - 356 a - 280 y las de 280 a 356.

La amplitud de las subportadoras de las bandas laterales extendidas tienen el mismo nivel que el de las subportadoras primarias principales.

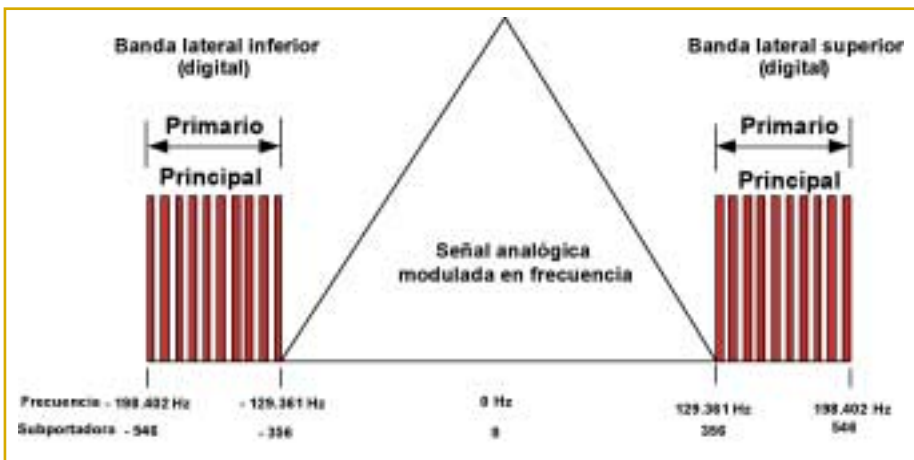


Figura 10. Espectro del modo IBOC FM híbrido

Espectro para el modo totalmente digital

En el modo totalmente digital el espectro se construye eliminando la señal analógica y utilizando todo el ancho de banda para las bandas laterales secundarias. La figura 12 muestra la estructura de portadoras para el modo totalmente digital.

Cada una de las bandas laterales secundarias está constituida por 10 divisiones de frecuencia principales y 4 divisiones de frecuencia extendida.

Se transmiten dos portadoras de refe-



rencia, las numeradas como -279 y 279 y 12 subportadoras OFDM protegidas que se encuentran en aquella zona del espectro con menos probabilidad de ser interferida por la interferencia analógica y digital.

Cada banda lateral secundaria comprende las portadoras 1 a 190 y -1 a -190 . Las bandas laterales secundarias extendidas comprenden las subportadoras 191 a 266 y las -191 a -266 . Las ban-

das laterales protegidas comprenden las subportadoras -267 a -278 y las 267 a 278 .

La potencia media de las subportadoras primarias principales estará al menos 10 dB por encima a las que le correspondía en el sistema híbrido.

La potencia media de las subportadoras secundarias estará entre 5 y 20 dB por debajo de las subportadoras primarias.

CONCLUSIONES

El sistema IBOC FM se muestra en la actualidad como el sistema idóneo para la migración de las estaciones de radiodifusión sonora que trabajan en la banda de ondas métricas (frecuencia modulada) a un sistema digital.

Permite transmitir conjuntamente la señal analógica y la digital en la canalización atribuida a la señal analógica. La migración de los sistemas analógicos de modulación de frecuencia (FM) es fácil ya que no requiere nuevos recursos de espectro radioeléctrico para la radio digital.

Durante el tiempo de transición se transmiten señales analógicas y digitales en el mismo canal, permitiendo la recepción del programa tanto para los actuales receptores analógicos de modulación de frecuencia como los modernos digitales. Los modernos receptores digitales dispondrán de facilidades que permitan que la señal analógica sirva de respaldo de la señal digital cuando el porcentaje de bits erróneos sean elevados.

Las modernas técnicas de modulación (OFDM) y los sistemas de entrelazado mejoran sustancialmente la recepción en situaciones de ruido, desvanecimientos y propagación multirrayecto. ●

REFERENCIAS

- [1] The structure and generation of robust waveforms for FM In-Band On-Channel Digital Broadcasting. Paul J. Peyla. *iBiquity Digital Corporation*.
- [2] In - Band/On - Channel Digital Radio Broadcasting Standard NRSC - 5 April, 2005. *National Radio Systems Commitee*.
- [3] Test results of iBiquity Digital's In - Band On - Channel (IBOC) Technology for Digital Audio Broadcasting. S. Stull. *iBiquity Digital Corporation*.
- [4] Recomendación UIT - R BS. 1114.
- [5] Further notice of proposed rulemaking and notice of inquiry. *Federal Communication Comisión*.
- [6] Bitstream Description for the Perceptual Audio Coder (PAC). *Deepen Sinha. Lucent Technologies*.
- [7] Evaluation of the iBiquity Digital Corporation IBOC System. Part 1 - FM IBOC. *Nacional Radio Systems Comité*.

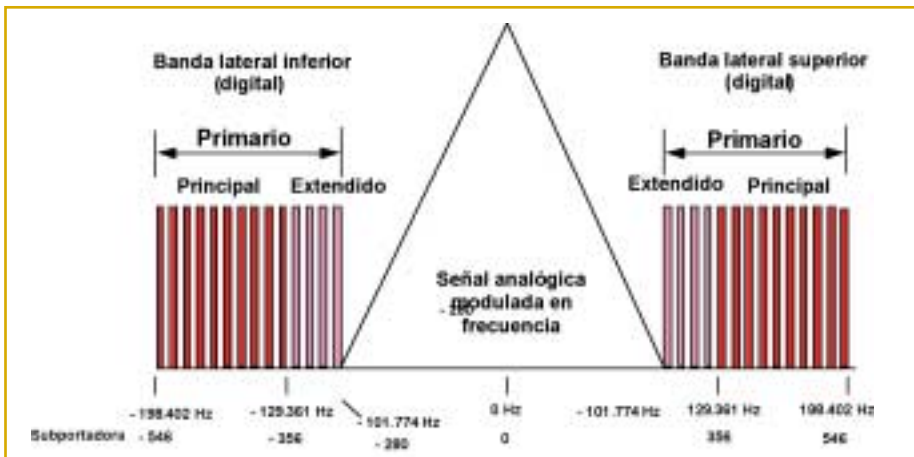


Figura 11. Espectro del modo IBOC FM híbrido extendido

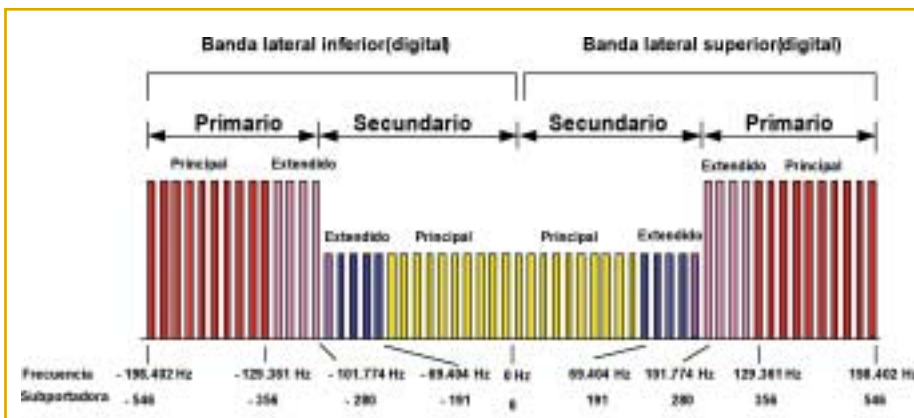


Figura 12. Espectro del modo totalmente digital