



CAPÍTULO II. SISTEMA EN BANDA DENTRO DEL CANAL (IBOC, IN-BAND ON-CHANNEL)

1. Introducción

También conocida en los Estados Unidos como HD Radio (nombre comercial), es una tecnología que permite a las estaciones de radiodifusión seguir transmitiendo su contenido en su canal de frecuencia asignado, dentro de la banda asignada para radiodifusión de audio analógico (de ahí su denominación de en banda dentro del canal o IBOC, por sus siglas en inglés).

Una de las principales mejoras que ofrece este sistema es que las transmisiones en AM alcanzan una calidad de audio igual a la que se escucha actualmente en las estaciones de FM analógicas, mientras que en FM se alcanza una calidad de audio semejante a la de un disco compacto [IBIQ]; también permite la transmisión de información escrita (textos) a los receptores (título de la canción, artista, alertas de tráfico o clima, etc.) y ofrece la posibilidad de la “multidifusión” [IBIQ], que consta en permitir a las radiodifusoras ofrecer hasta 3 canales independientes de audio y datos desplegados en pantalla.

1.1. Historia del desarrollo del sistema IBOC

El desarrollo de este estándar comenzó cuando en 1990 se presentó el estándar europeo Eureka-147 en la *Muestra de Radio* anual de la Asociación Nacional de Radiodifusores (NAB, *National Association of Broadcasters*) en Estados Unidos. Este estándar maneja la migración de las radiodifusoras para un nuevo canal de frecuencias dentro de la banda III y la banda L del espectro radioeléctrico para poder comenzar con las transmisiones digitales; esto en Estados Unidos constituyó un problema debido a que, en este país, la banda L del espectro está reservada para uso militar, además de que los radiodifusores no estaban dispuestos a cambiar la frecuencia en la que transmiten actualmente, ya que esto generaría confusión en los radioescuchas.

Por esta razón, la FCC estableció que el sistema “ideal” para realizar una transición de tecnología analógica a digital, debía ser aquel que permitiera una transmisión híbrida, en banda y dentro del canal (IBOC, por sus siglas en inglés); es decir, un sistema que realice la transmisión digital en la banda asignada para la radiodifusión analógica y que no requiera de un cambio de canal de frecuencia y, dado que para entonces aún no existía una tecnología que cubriera estas necesidades, en 1994 tres compañías estadounidenses; USA Digital Radio Partners, Lucent Digital Radio y Digital Radio Express crearon cada una un estándar IBOC.

Como estos estándares no eran compatibles entre sí, el Comité Nacional de Sistemas de Radio (NRSC, *National Radio Systems Committee*) formó el Subcomité de Radio Digital para evaluar cada uno de los sistemas emergentes y poder emitir una opinión acerca de cuál era el mejor para ser adoptado. Los primeros resultados de las pruebas realizadas por dicho sub comité fueron entregados a la NRSC en el otoño de 1999.



Sin embargo, el 12 de julio de 2000 las compañías USA Digital Radio Partners (ya entonces llamada USA Digital Radio, Inc.) y Lucent Digital Radio decidieron unirse para formar la “iBiquity Digital Corporation”, donde se utilizó lo mejor de cada sistema desarrollado por cada una de las empresas para crear una nueva tecnología.

Para abril de 2001, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*ITU, International Telecommunications Union*) aprobó al sistema IBOC AM como estándar universal (llamándolo Sistema digital C) [BS.1514], y en agosto de 2002, aprobó al sistema IBOC FM [BS.1114]. El 10 de octubre de 2002 la FCC adoptó la tecnología IBOC como el estándar de radio digital para los Estados Unidos; para entonces, las estaciones de AM y FM podían realizar transmisiones digitales únicamente mediante un permiso provisional por parte de la FCC, y solo se permitieron las transmisiones diurnas en AM; en este mismo año, la compañía iBiquity lanzó la marca comercial *HD Radio*.

En septiembre de 2005 la NRSC publicó el estándar NRSC-5A que define los parámetros técnicos para la tecnología HD Radio, y para el 2007 la FCC decidió eliminar la necesidad de que las radiodifusoras tramitaran una autorización temporal para poder realizar transmisiones digitales y autorizó la multidifusión y las transmisiones nocturnas de AM utilizando IBOC.

A partir de entonces, miles de radiodifusoras a lo largo de Estados Unidos comenzaron a migrar de tecnología, y para 2008 iBiquity informó que ya se contaban con 1,750 estaciones de HD Radio al aire y en 2009 anunció el lanzamiento del primer receptor portátil.

Actualmente, según cifras publicadas por iBiquity [IBOC-10], en los Estados Unidos existen más de 3.5 millones de receptores digitales en el mercado. Además, 16 de los más importantes fabricantes de automóviles (Audi, BMW, Ford, Jaguar, VW, Volvo, entre otros) anunciaron que instalarán receptores digitales en 87 modelos, de los cuales en 36 el receptor digital será el equipo estándar. Los principales fabricantes de dichos receptores son Eclipse, JVC Kenwood, Panasonic, y Sanyo; en cuanto a receptores fijos, los principales fabricantes son Boston Acoustics y Yamaha.

El número de emisoras en Estados Unidos, que transmiten utilizando la tecnología HD Radio aumentó de 1,750 (2008) a más de 2,200 (noviembre de 2010), mientras que el número de canales de multidifusión al aire es de más de 1,400 [IBOC-10].

En el ámbito internacional [IBIQ], el sistema de radiodifusión digital IBOC ha sido adoptado por varios países como Estados Unidos, Puerto Rico y las Filipinas que ya tienen una operación a nivel nacional; México y Panamá cuya operación es regional; Jamaica, República Dominicana, Ucrania, Tailandia e Indonesia con operación limitada; por último Canadá, Colombia, Chile, Uruguay, Argentina, China, India, Brasil y Vietnam se encuentran en etapa de pruebas (figura II.1.1).

Por último, el anuncio más reciente de iBiquity es el lanzamiento de una nueva característica del sistema HD Radio: “*Experiencia Acústica*” [IBOC-10], la cual permite la transmisión de imágenes (portadas de discos, logotipos de las emisoras, imágenes de patrocinadores, etc.); el primer receptor capaz de soportar esta nueva característica es el Insignia NS-HD02.



Figura II.1.1. Adopción del sistema IBOC a nivel mundial [IBIQ]

1.2. Ventajas del sistema IBOC (HD RADIO)

A continuación se enlistan las principales mejoras que ofrece este sistema en comparación con la tecnología de radiodifusión sonora analógica terrestre que se utiliza actualmente:

- Transmisión digital en la misma frecuencia que las transmisiones analógicas: La nueva señal digital es transmitida como una banda lateral de la señal analógica actual; el uso de la misma frecuencia permite que los radioescuchas no tengan que memorizar una nueva frecuencia de sus estaciones favoritas.
- Capacidad de ofrecer canales multidifusión en la banda de FM: La multidifusión es la capacidad que tiene el sistema para difundir varios programas sobre una misma frecuencia. Las estaciones de FM tienen un ancho de banda disponible de 150 kbps [IBIQ], de los cuales 96 kbps son utilizados para la programación de audio y a su vez, estos se pueden dividir en diferentes canales para transmitir diferentes programas. Esto permite a las estaciones de FM expandir la variedad de contenido que ofrecen sin necesidad de ocupar más canales de frecuencias dentro del espectro radioeléctrico.
- Transmisión libre de interferencias: La interferencia por trayectoria múltiple y fuentes de ruido son eliminadas a través de la codificación y técnicas de combinación de potencia. Por otro lado, el uso de la corrección de errores utiliza procesadores digitales para comparar constantemente la calidad de transmisión de las dos bandas laterales digitales, combinándolas para obtener una mayor ganancia en potencia cuando sea posible, o eligiendo la que tenga mayor potencia.
- Las transmisiones de FM tienen una calidad de audio igual a la de un disco compacto.
- Las transmisiones de AM tienen una calidad de audio igual a la del FM estéreo analógico actual.



- El sistema ofrece una variedad de servicios de datos referentes al programa de audio (nombre del artista, título de la canción, etc.) o que contengan información totalmente independiente a la programación de audio (alerta del clima, tráfico, noticias, etc.).
- El receptor tiene la capacidad de almacenar la señal recibida para poder realizar una transición “invisible” entre la señal analógica y la digital o viceversa.
- Sintonización más rápida de estaciones: La selección inicial de la estación se realiza con la señal analógica, y una vez seleccionada la estación deseada, se hace el cambio a la señal digital.

1.3. Características y servicios en desarrollo

Actualmente la compañía iBiquity se encuentra desarrollando nuevas características para mejorar la tecnología HD Radio [IBIQ], entre ellas se encuentran las siguientes:

- Reportes de tráfico locales en tiempo real que serán desplegados en la pantalla del receptor.
- Sonido envolvente.
- Almacenamiento y reproducción: Permitirá al radioescucha repetir una canción que acaba de escuchar o grabar un programa entero para poder reproducirlo en otro momento.
- Capacidad bajo demanda: Dará al usuario acceso inmediato a noticias e información de su interés.
- Botón de “compra”: Transformará al radio en un dispositivo interactivo que permitirá la compra automática de los productos anunciados en ese momento.
- Servicios de audio principal controlados por el usuario: Permitirá pausar, almacenar, adelantar, marcar y repetir la programación de audio mediante una guía de programación integrada.
- Guía de Programación Electrónica (*EPG, Electronic Program Guide*): Es una lista de estaciones, servicios, programas e información detallada de los mismos, entregada por las estaciones para mejorar su identificación, selección del programa y sintonización; también permitirá colocar recordatorios de programación, así como el almacenamiento y reproducción de contenido.
- Acceso Condicionado (*CA, Conditioned Access*): Esquema encriptado que permitirá a las estaciones la entrega de audio y datos complementarios, bajo suscripción.
- “Large Object Transfer” (*LOT*): Permitirá la transferencia de archivos de datos; ya sea texto, audio o imágenes.



1.4. Definición de términos

A continuación se presenta una breve explicación de algunos términos que facilitarán la comprensión de los temas que se exponen más adelante.

1. **Aleatorización:** Es el proceso de “revolver” en tiempo el flujo de bits de datos, esto para evitar periodicidades en la señal y permitir que una sincronización más rápida del receptor.
2. **Canal lógico:** Es una trayectoria que conduce las tramas de transferencia de la capa 2 a través de la capa 1 con un grado de servicio específico.
3. **Capa 1:** Es la capa inferior dentro de la pila de protocolos IBOC. También conocida como la capa de forma de onda y transmisión, es donde se lleva a cabo la transmisión de datos a lo largo del canal de comunicaciones. Incluye procesos como la codificación de canal, entrelazado, modulación, etc.
4. **Capa 2:** Es la capa de multiplexación del canal de la pila de protocolos IBOC. Multiplexa los datos provenientes de las capas superiores dentro de los canales lógicos para su procesamiento en la capa 1.
5. **Código madre:** Es la secuencia de código completa generada por un codificador convolucional.
6. **Entrelazado:** Es el reordenamiento de los bits de un mensaje para distribuirlos en tiempo (a lo largo de diferentes símbolos OFDM) y frecuencia (a lo largo de diferentes sub portadoras OFDM) para mitigar los efectos negativos causados en la señal por desvanecimientos e interferencias.
7. **Factor de escala de amplitud:** Factor que multiplica los componentes en banda base de una sub portadora OFDM en particular dentro del espectro transmitido, con el objetivo de mantener la potencia radiada dentro de un nivel ya establecido.
8. **Latencia:** Es el retraso en tiempo que un canal lógico impone a una trama de transferencia mientras esta atraviesa la capa 1. Es uno de los tres parámetros de caracterización de un canal lógico.
9. **Modo de servicio:** Es una configuración específica de los parámetros de operación para especificar velocidades de salida, nivel de funcionamiento y los canales lógicos activos.
10. **Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia (OFDM):** Esquema paralelo de multiplexación que modula un flujo de datos dentro de un gran número de sub portadoras ortogonales que son transmitidas de forma simultánea.
11. **Perforación:** Es el proceso mediante el cual se remueven ciertos bits específicos de una palabra código madre, esto para incrementar la tasa de codificación FEC.
12. **Retraso por diversidad:** Imposición de un retraso en tiempo fijo en uno o dos canales que transportan la misma información para evitar problemas como ruido y desvanecimientos.
13. **Robustez:** Es la habilidad de un canal lógico para resistir las adversidades del canal como ruido, interferencia y desvanecimiento. Existen 8 niveles de robustez diseñados para IBOC AM y 6 niveles de robustez diseñados para IBOC FM. Es uno de los tres parámetros de caracterización de un canal lógico



14. **Trama de transferencia:** Es una colección unidimensional, ordenada, y de longitud específica de bits de datos agrupados para su procesamiento dentro de un canal lógico.
15. **Transferencia:** Es una medida de la salida de datos de un canal lógico. Es uno de los tres parámetros de caracterización de un canal lógico.

En las secciones siguientes se presentan varios aspectos técnicos y económicos del sistema IBOC; primeramente se hace una breve descripción de los servicios de datos que maneja el sistema IBOC, posteriormente se muestra cómo es que está estructurado el sistema y se explican las funciones de las capas consideradas como importantes para el desarrollo del presente trabajo; entre estas están la capa 4, la capa 2 y la capa 1.

Posteriormente se describe la función de los canales lógicos, y se muestra la manera en que se obtienen las diferentes velocidades de transmisión con las que trabajan los diferentes sistemas IBOC. A continuación se presenta la composición de la capa 1, encargada de la generación y transmisión de la señal IBOC, así como una descripción de cada uno de sus bloques funcionales. Después, se presentan las diferentes formas de onda con las que trabaja el sistema así como sus características espectrales y requerimientos.

Finalmente, se presentan todos los aspectos relacionados con la conversión de los sistemas analógicos de transmisión actuales; se explican las diferentes configuraciones para realizar tanto las transmisiones híbridas como las digitales, y las características con las que deben contar los equipos de transmisión actuales para lograr una señal híbrida de calidad. Por último, se presenta el proceso para obtener la licencia necesaria para comenzar con las transmisiones digitales con el sistema IBOC.

2. Servicios de datos

Como ya se mencionó, el sistema IBOC es capaz de manejar, además de los datos de audio, otros tipos de información que puede estar relacionada o no con la programación. Estos datos pueden ser *metadatos*, que es texto asociado a los servicios de audio (como título del programa o canción, autor, nombre de la estación, etc.), o puede ser información que será utilizada por el receptor para la sintonización rápida de estaciones, o para ofrecer anuncios de servicios que se encuentren cerca de donde se localiza el usuario.

A continuación se presentan los dos grupos de datos que maneja el sistema IBOC durante la transmisión. El primer de ellos son los datos del servicio de programa, donde se agrupa toda la información relacionada con el programa de audio que se está escuchando; el segundo de ellos son los datos del servicio de información de la estación, que abarca la información utilizada por el receptor para la sintonización, para ofrecer servicios locales, o para el envío de datos independientes a la programación.



2.1. Descripción de los datos del servicio de programa

Los Datos de Servicio del Programa (*PSD, Program Service Data*) se transmiten junto con el audio del programa, y están destinados a describir o complementar el programa de audio que está escuchando el usuario [NRSC-5B]. La PSD consiste de un conjunto de categorías que describen los diferentes contenidos de un programa, estos campos incluyen:

- Título del programa o canción
- Artista
- Nombre del álbum
- Comentarios
- Información de comerciales
- Género o descripción de contenido del programa

2.2. Servicios de información de estación

El Servicio de Información de Estación (*SIS, Station Information Service*) provee la identificación de la estación y la información de control [NRSC-5B]. A continuación se presenta una breve explicación de cada tipo de mensaje que puede transportar el SIS, así como su Identificador de Mensaje (*MSG ID, Message Identification*) correspondiente. El campo de MSG ID consta de 4 bits, por lo que las combinaciones no mostradas son consideradas como reservadas para futura expansión.

1. **Número de identificación de la estación (MSG ID=0000):** Este tipo de mensaje está asignado de manera única para cada una de las radiodifusoras. Es un mensaje compuesto por 32 bits, de los cuales 10 bits están destinados para el envío del código del país (dos letras), 3 bits reservados con valor de 0, y 19 bits utilizados para el identificador asignado por la FCC en los Estados Unidos (estos últimos bits solo son utilizados en Estados Unidos).
2. **Nombre de la estación:** Este tipo de mensaje tiene dos formatos, uno corto (MSG ID=0001) y uno largo (MSG ID=0010). El formato corto se multiplexa con otros mensajes y así se puede repetir frecuentemente. El formato largo puede usarse para identificar estaciones mediante una cadena larga de texto.
3. **Localización de la estación (MSG ID=0100):** Este tipo de mensaje reserva un espacio de carga útil de 27 bits donde se transporta la información de la locación tridimensional (altitud, latitud y longitud) del punto donde se está generando la señal radiodifundida. Esta información puede ser usada por el receptor para la determinación de su posición.
4. **Mensaje de la estación (MSG ID=0101):** Este tipo de mensaje permite a la estación enviar un mensaje de texto con información arbitraria. Ejemplos de esto pueden ser anuncios, reportes del clima o teléfonos para comunicarse a cabinas.
5. **Mensaje de parámetro SIS (MSG ID=0111):** Tipo de mensaje utilizado para transportar diferentes parámetros del sistema, dentro de los cuales están los datos del tiempo local que permiten la modificación del horario dependiendo de si en la región se implementa el horario de verano o no.



3. Componentes principales del sistema IBOC

En esta sección del capítulo II se presenta, primero que nada, la composición del sistema IBOC, posteriormente se describen las funciones de las capas esenciales para el desarrollo de este trabajo; éstas son la capa 4, encargada de la codificación de fuente, la capa 2, que es donde se lleva a cabo la multiplexación de los servicios y, por último, la capa 1, última capa del sistema IBOC encargada de la generación y transmisión de la señal HD. Posteriormente se describe la función de los canales lógicos y su capacidad de transmisión, para dar paso a la presentación y explicación de cada uno de los diagramas funcionales que componen a la capa 1.

Finalmente, se presentan las formas de onda que el sistema IBOC es capaz de generar, tanto para AM como para FM, así como su composición, características de potencia y ocupación del espectro.

El funcionamiento del sistema IBOC está diseñado en base al modelo ISO OSI (*International Standards Organization Open System Interconnection*) [NRSC-5B], el cual es un modelo basado en capas diseñadas para realizar funciones específicas durante la generación, transmisión y recepción de información dentro de los sistemas de comunicación (figura II.3.1).

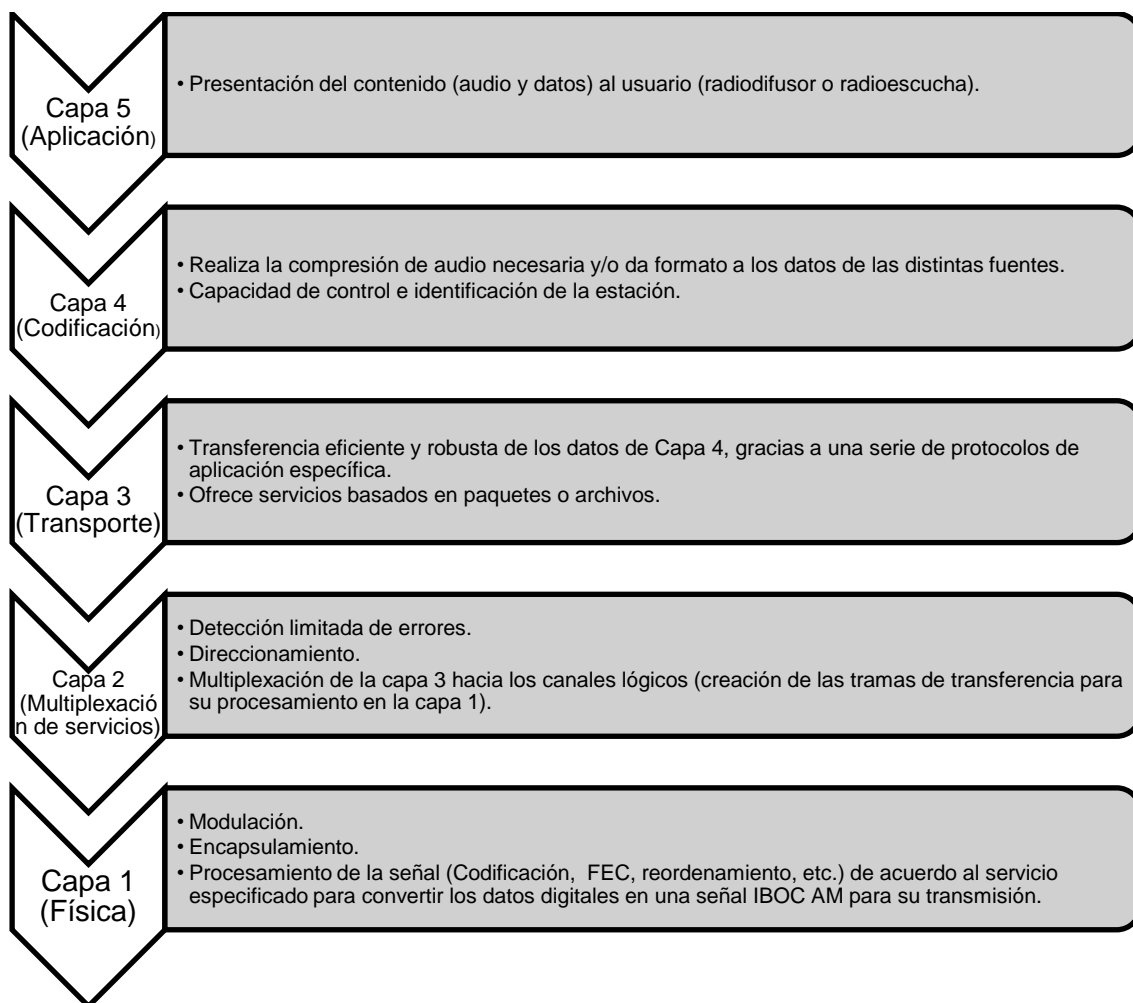


Figura II.3.1. Capas del sistema IBOC [NRSC-5B]



Las capas que interesan para efectos de este trabajo son la Capa 4, que es la encargada de la codificación de audio, la Capa 2, que es la encargada de recibir los datos y el audio que serán radiodifundidos y darles el formato adecuado, y la Capa 1, que es la encargada de la generación y transmisión de la señal IBOC. Estas capas serán descritas con más detalle a continuación.

3.1. Capa 4. Codificación de fuente

El sistema IBOC utiliza un codificador HE-AAC [WBU_DRG] de flujo múltiple, usado para proveer una cobertura más robusta y tiempos de sintonización menores. El codificador de flujo múltiple esparce el contenido de audio codificado dentro de flujos de bits diferentes; los bits más importantes son colocados en los flujos básicos para que puedan ser decodificados de manera independiente, mientras que los bits restantes son colocados en un flujo mejorado que, combinado con el flujo básico en el decodificador, produce la salida de audio con una calidad parecida a la obtenida si únicamente se trabajara con un solo flujo de bits codificados.

La tabla II.3.1 muestra los modos de códec de audio tanto para AM como para FM de acuerdo a la configuración de flujo, tramas y velocidades de transferencia de bits, así como la cantidad promedio de bits de datos por PDU. Los modos de códec que aún no se encuentran definidos están reservados para futura expansión; dichos modos deberán ser compatibles con aquellos ya definidos.

Tabla II.3.1. Modos de códec de audio [NRSC-5B]

Modo de códec de audio	Uso	Número de flujos	Tipo de flujo	PDU's por trama L1	Número promedio de paquetes de audio por PDU	Velocidad de transmisión [kbps]	Velocidad de PSD [bytes/PDU]
0000	FM híbrido	1	Básico	1	32	96	128
0001	FM digital	2	Básico	8	4	48	7
			Mejorado	1	32	48	0
0010	AM híbrido	2	Básico	8	4	20	7
			Mejorado	1	32	16	0
	AM digital	2	Básico	8	4	20	7
			Mejorado	1	32	20	0
0011	FM digital	2	Básico	8	4	24	7
			Mejorado	1	32	72	0
1010	FM	2	Básico	1	32	22	7
			Mejorado	8	4	24	0
1101	FM	1	Básico	8	4	24	7
0100-1001 1011-1100 1110-1111	Reservado	----	----	----	----	----	----



3.2. Capa 2. Multiplexación de servicios

La función principal de la capa 2 es recibir el audio y los datos provenientes de las capas superiores del sistema de radio digital IBOC, multiplexar esta información dentro de las Unidades de Datos de Protocolo (*PDU, Protocol Data Unit*) y enviarla al Canal Lógico (*LC, Logical Channel*) apropiado, dentro de la capa 1.

La capa 2 le permite al sistema IBOC proporcionar cuatro tipos de servicios de transporte [NRSC-5B]:

1. **Servicio del Programa Principal (*MPS, Main Program Service*):** Incluye el Audio del Servicio del Programa Principal (*MPSA, Main Program Service Audio*) y los Datos del Servicio del Programa Principal (*MPSD, Main Program Service Data*). Las Unidades de Datos de Protocolo (*PDU, Protocol Data Unit*) del MPS son generados por el Transporte de Audio y encapsulan tanto la información del MPSA como del MPSD.
2. **Servicio del Programa Complementario (*SPS, Supplemental Program Service*):** Este servicio da al radiodifusor la opción de multiplexar información de programas adicionales junto con la información del MPS. Al igual que los PDU's del MPS, los PDU's del SPS incluyen el Audio del Servicio del Programa Complementario (*SPSA, Supplemental Program Service Audio*) y los Datos del Servicio del Programa Complementario (*SPSD, Supplemental Program Service Data*).
3. **Servicios de Aplicación Avanzada (*AAS, Advance Application Services*):** Junto con el MPS, provee el mecanismo de transporte de paquetes de información de contenido adicional, diferente al SPS. Existen dos métodos para multiplexar los datos del AAS dentro de una PDU de capa 2: fija y oportunista. Los datos fijos tienen asignado un ancho de banda específico que se obtiene reduciendo el ancho de banda asignado al MPS; los datos oportunistas, por su parte, hacen uso de cualquier ancho de banda que no sea utilizado por el MPS o el SPS.
4. **Servicio de Información de Estación (*SIS, Station Information Service*):** Es una conexión especializada para transmitir los datos del SIS en el canal lógico del Servicio de Datos Primarios IBOC (*PIDS, Primary IBOC Data Service*) de la capa 1. Para este canal lógico, la capa 2 no realiza la función de multiplexaje, simplemente envía los PDU's del SIS directamente, sin agregar cabeceras; esto debido a que aquí se transporta la información de las características de transmisión de la señal.

3.3. Capa 1. Capa física

La Capa 1 (*L1, Layer 1*) del sistema IBOC AM convierte la información proveniente de la Capa 2 (*L2, Layer 2*) y la información del control del sistema, proveniente del administrador de configuración, en una forma de onda AM de Alta Definición (*HD, High Definition*) que es transmitida dentro del canal ya asignado en la banda de Frecuencia Media (*MF, Medium Frequency*) [NRSC-5B] o en una forma de onda FM también de alta definición que será transmitida en la banda de Frecuencias Muy Altas (*VHF, Very High Frequency*). Estos datos de información y control son transportados en tramas de transferencia discretas, las cuales son llamadas Unidades de Datos de Protocolo de Capa 2 (*PDUs, Protocol Data Units*).



La información de control del sistema que se añade a la señal IBOC, a través del Canal de Control del Sistema (*SCCH, Service Control Channel*), es la siguiente:

1. **Control de Modo de Servicio (*SMC, Service Mode Control*):** Determina la configuración y funcionamiento de los Canales Lógicos (*LC, Logical Channel*). El sistema IBOC AM trabaja con dos Modos de Servicio (*SM, Service Mode*) diferentes; MA1 y MA3, donde MA1 es un modo híbrido y MA3 es un modo totalmente digital. Para IBOC FM existen diez modos de servicio divididos en dos tipos básicos:
 - a. Modos de servicio primarios: Definidos por el Control de Modo de Servicio Primario (*PSM, Primary Service Mode Control*) y son MP1, MP2, MP3, MP11, MP5 y MP6.
 - b. Modos de servicio secundarios: Definidos por el Control de Modo de Servicio Secundario (*SSM, Secondary Service Mode Control*) y son MS1, MS2, MS3 y MS4.

Todas las formas de onda disponibles para FM necesitan que ambos SM's sean definidos; sin embargo, no todas las combinaciones son posibles. Únicamente los SM's primarios MP5 y MP6 pueden ser combinados con cualquiera de los SM's secundarios; los modos MP1 a MP3 y MP11 son solo para las formas de onda híbrida e híbrida extendida.

2. **Control de Nivel de Potencia (*PL, Power Level Control*):** Usado por el sistema IBOC AM, define en la forma de onda híbrida únicamente, el nivel nominal de potencia relativo a la portadora analógica, de las bandas laterales secundarias, las bandas laterales terciarias y el Canal Lógico de Servicio de Datos Primarios (*PIDS, Primary IBOC Data Service Logical Channel*).

El PL tiene dos posibles valores, bajo o alto. Cuando PL toma el valor de un cero lógico (bajo nivel de potencia), las sub portadoras híbridas son escaladas por los factores CH_{S1} , CH_{I1} y CH_{T1} para aumentar la cobertura digital. Cuando PL toma el valor de un uno lógico (alto nivel de potencia), las sub portadoras híbridas son escaladas por los factores CH_{S2} , CH_{I2} y CH_{T2} para reducir la interferencia analógica [NRSC-5B] (tabla II.3.2). Cuando se transmite la forma de onda digital, el PL es ignorado, ya que solo está presente la señal digital.



Tabla II.3.2. Factores de escala de amplitud de las sub portadoras OFDM (IBOC AM) [NRSC-5B]

Forma de onda	Modo de servicio	Bandas laterales	Factor de escala	Tipo de modulación	Densidad espectral de potencia máx. [$\frac{dBc}{sub\ portadora}$]	Densidad espectral de potencia máx. en un A.B. de 300 Hz [dBc]
Híbrida	MA1	Primaria	CH _p	64-QAM	-30	-27.8
		Secundaria	CH _{S1}	16-QAM	-43	-40.8
			CH _{S2}	16-QAM	-37	-34.8
		Terciaria	CH _{T1} [0]	QPSK	-44	-41.8
			CH _{T1} [1]	QPSK	-44.5	-42.8
			CH _{T1} [2]	QPSK	-45	-42.8
			CH _{T1} [3]	QPSK	-45.5	-43.3
			CH _{T1} [4]	QPSK	-46	-43.8
			CH _{T1} [5]	QPSK	-46.5	-44.3
			CH _{T1} [6]	QPSK	-47	-44.8
			CH _{T1} [7]	QPSK	-47.5	-45.3
			CH _{T1} [8]	QPSK	-48	-45.8
			CH _{T1} [9]	QPSK	-48.5	-46.3
			CH _{T1} [10]	QPSK	-49	-46.8
			CH _{T1} [11]	QPSK	-49.5	-47.3
			CH _{T1} [12:24]	QPSK	-50	-47.8
		CH _{T2} [0:24]	QPSK	-44	-41.8	
Referencia	CH _B	BPSK	-26	-23.8		
PIDS	CH _{I1}	16-QAM	-43	-40.8		
	CH _{I2}	16-QAM	-37	-34.8		
Totalmente digital	MA3	Primaria	CD _p	64-QAM	-15	-12.8
		Secundaria	CD _E	64-QAM	-30	-27.8
		Terciaria	CD _E	64-QAM	-30	-27.8
		Referencia	CD _B	BPSK	-15	-12.8
		PIDS	CD _I	16-QAM	-30	-27.8

3. **Control del Ancho de Banda del Audio Analógico (AAB, Analog Audio Bandwidth Control):** También transportado en la señal IBOC AM, este especifica, en la forma de onda híbrida, el ancho de banda que será utilizado por la señal analógica. Cuando el AAB toma el valor de un cero lógico, el ancho de banda seleccionado es de 5 kHz, mientras que si el AAB toma el valor de un uno lógico, el ancho de banda seleccionado es 8 kHz [NRSC-5B]. En la forma de onda digital, como no existe señal analógica, el AAB es ignorado.



Sin embargo, cuando se transmite con un ancho de banda de audio analógico de 8 kHz, la cobertura digital de una estación híbrida (solo las sub portadoras primarias) se ve afectada por las transmisiones híbridas adyacentes [NRSC-5B] (sección 3.5.1.1).

4. **Selección del Factor de Escala de Amplitud (ASF, Amplitude Scale Factor Select):** Las bandas laterales primarias y secundarias de la señal IBOC FM son escaladas en amplitud de manera independiente. Los factores de escala de las bandas laterales primarias (a_0 y a_1) son determinados al momento de elegir el SM, mientras que el factor de escala de amplitud para las bandas laterales secundarias (a_2 hasta a_5) es elegido por el usuario y es indicado mediante el ASF (tabla II.3.3) [NRSC-5B].

Tabla II.3.3. Factores de escala de las sub portadoras OFDM (IBOC FM) [NRSC-5B]

Forma de onda	Modo de servicio	Bandas laterales	Factor de escala de amplitud	Densidad espectral de potencia [$\frac{dBc}{sub\ portadora}$]	Densidad espectral de potencia en un A. B. de 1 kHz [dBc]
Híbrida	MP1	Primarias	a_0	-45.8	-41.4
Híbrida extendida	MP2- MP6	Primarias	a_0	-45.8	-41.4
Totalmente digital	MP5- MP6	Primarias	a_1	-27.3	-22.9
	MS1-MS4	Secundarias	a_2	-32.3	-27.9
		Secundarias	a_3	-37.3	-32.9
		Secundarias	a_4	-42.3	-37.9
		Secundarias	a_5	-47.3	-42.9

3.3.1. Canales lógicos (LC, Logical Channel)

Un canal lógico es una trayectoria que conduce a las L2 PDU's, en tramas de transferencia, dentro y fuera de la L1 con un grado de servicio específico determinado por el SM.

La L1 de la interfaz aérea del sistema IBOC AM provee tres canales lógicos a las capas de protocolos superiores: P1, P3 y PIDS [NRSC-5B]. Los canales lógicos P1 y P3 están diseñados para audio de propósito general y transferencia de datos; sin embargo, P1 es más robusto que P3, lo que permite una transferencia de información que puede ser adaptada a diversas aplicaciones. Por su parte, el canal lógico PIDS está diseñado para transportar los datos del SIS.

La L1 de la interfaz de aire de FM provee once LC's a las capas de protocolos superiores; sin embargo, no todos los LC's son utilizados en cada SM [NRSC-5B].

- a. **Canales lógicos Primarios:** Existen 5 canales lógicos primarios que pueden ser utilizados con las tres formas de onda (híbrida, híbrida extendida y totalmente digital) y son; P1, P2, P3, P4 y PIDS. Los canales P1 a P4 están diseñados para transportar paquetes de datos y audio, mientras que el canal PIDS, al igual que en AM, transporta la información del SIS.
- b. **Canales lógicos Secundarios:** Existen 6 canales lógicos secundarios que son utilizados únicamente con la forma de onda totalmente digital y son; S1, S2, S3, S4, S5 y el canal lógico de Servicio de Datos Secundarios IBOC (SIDS, Secondary IBOC Data Service),



donde los canales S1 a S5 también son utilizados para transportar paquetes de audio y datos, y el canal SIDS está diseñado para transportar información del SIS.

El funcionamiento de cada canal lógico, en ambos sistemas, está completamente determinado por tres parámetros de caracterización; transferencia, latencia y robustez. La codificación de canal, mapeo del espectro, profundidad de entrelazado y retraso por diversidad, son los componentes de dichos parámetros (tablas II.3.4 y II.3.5).

Tabla II.3.4. Caracterización de los canales lógicos de acuerdo al modo de servicio (IBOC AM) [NRSC-5B]

Modo de servicio	Canal Lógico	Transferencia		Latencia L1 [s]**	Robustez relativa
		Tamaño de la trama [bits]	Velocidad de la trama [Hz]**		
MA1	P1	3,750	R_b	$T_f + T_{dd}$	5
	P3	24,000	R_f	T_f	6 (PL=alto) u 8 (PL=bajo)
	PIDS	80	R_b	T_b	3 (PL=alto) ó 7 (PL=bajo)
MA3	P1	3,750	R_b	$T_f + T_{dd}$	1
	P3	30,000	R_f	$T_f + T_{dd}$	4
	PIDS	80	R_b	T_b	2

**Consultar tabla A

Tabla A. Parámetros del sistema IBOC AM [NRSC-5B]

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor exacto	Valor aproximado
Espaciado entre Sub portadoras OFDM	Δf	Hz	$\frac{1,488,375}{8,192}$	181.7
Ancho Cíclico Predefinido	α	Ninguna	$\frac{7}{128}$	5.469×10^{-2}
Duración del símbolo OFDM	T_s	s	$\frac{(1 + \alpha)}{\Delta f} = \left(\frac{135}{128}\right) \cdot \left(\frac{8,192}{1,488,375}\right)$	5.805×10^{-3}
Velocidad del símbolo OFDM	R_s	Hz	$= \frac{1}{T_s}$	172.3
Duración de la Trama L1	T_f	s	$\frac{65,536}{44,100} = 256 \cdot T_s$	1.486
Velocidad de la Trama L1	R_f	Hz	$= \frac{1}{T_f}$	6.729×10^{-1}
Duración del Bloque L1	T_b	s	$= 32 \cdot T_s$	1.858×10^{-1}
Velocidad del Bloque L1	R_b	Hz	$= \frac{1}{T_b}$	5.383
Tramas de Retraso por Diversidad	N_{dd}	Ninguna	3	3
Tiempo de Retraso por Diversidad	T_{dd}	s	$= N_{dd} \cdot T_f$	4.458



Tabla II.3.5. Caracterización de los canales lógicos de acuerdo al modo de servicio (IBOC FM) [NRSC-5B]

Modo de servicio	Canal Lógico	Transferencia			Latencia L1 [s]**	Robustez relativa
		Tamaño de la trama [bits]	Velocidad de la trama [Hz]**	Módulo de trama		
MP1	P1	146,176	R_f	1	T_f	2
	PIDS	80	R_b	16	T_b	3
MP2	P1	146,176	R_f	1	T_f	2
	P3	2,304	R_p	8	$2 \cdot T_f$	3
	PIDS	80	R_b	16	T_b	3
MP3	P1	146,176	R_f	1	T_f	2
	P3	4,608	R_p	8	$2 \cdot T_f$	3
	PIDS	80	R_b	16	T_b	3
MP11	P1	176,176	R_f	1	T_f	2
	P3	9,216	R_p	8	$2 \cdot T_f$	3
	P4	9,216	R_p	8	$2 \cdot T_f$	3
	PIDS	80	R_b	16	T_b	3
MP5	P1	4,608	R_p	8	$T_p + T_{dd}$	1
	P2	109,312	R_f	1	T_f	2
	P3	4,608	R_p	8	$2 \cdot T_f$	3
	PIDS	80	R_b	16	T_b	3
MP6	P1	9,216	R_p	8	$T_p + T_{dd}$	1
	P2	72,448	R_f	1	T_f	2
	PIDS	80	R_f	16	T_b	3
MS1	S4	18,272	R_p	8	T_p	7
	S5	512	R_b	16	T_b	6
	SIDS	80	R_b	16	T_b	8
MS2	S1	4,608	R_p	8	$T_p + T_{dd}$	5
	S2	109,312	R_f	1	T_f	9
	S3	4,608	R_p	8	T_p	11
	S5	512	R_b	16	T_b	6
	SIDS	80	R_b	16	T_b	10
MS3	S1	9,216	R_p	8	$T_p + T_{dd}$	5
	S2	72,448	R_f	1	T_f	9
	S5	512	R_b	16	T_b	6
	SIDS	80	R_b	16	T_b	10
MS4	S1	4,608	R_p	8	T_p	11
	S2	146,176	R_f	1	T_f	9
	S3	4,608	R_p	8	T_p	11
	S5	512	R_b	16	T_b	6
	SIDS	80	R_b	16	T_b	10

**Consultar tabla B



Tabla B. Parámetros del sistema IBOC FM [NRSC-5B]

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor exacto	Valor aproximado
Espaciado entre Sub portadoras OFDM	Δf	Hz	$\frac{1488375}{4096}$	363.4
Ancho Cíclico Predefinido	α	Ninguna	$7/128$	5.469×10^{-2}
Duración del símbolo OFDM	T_s	s	$\frac{(1+\alpha)}{\Delta f} = \left(\frac{135}{128}\right) \cdot \left(\frac{4096}{1488375}\right)$	2.902×10^{-3}
Velocidad del símbolo OFDM	R_s	Hz	$= \frac{1}{T_s}$	344.5
Duración de la Trama L1	T_f	s	$\frac{65536}{44100} = 512 \cdot T_s$	1.486
Velocidad de la Trama L1	R_f	Hz	$= \frac{1}{T_f}$	6.729×10^{-1}
Duración del Bloque L1	T_b	s	$= 32 \cdot T_s$	9.288×10^{-2}
Velocidad del Bloque L1	R_b	Hz	$= \frac{1}{T_b}$	10.77
Duración del Bloque par L1	T_p	s	$= 64 \cdot T_s$	1.858×10^{-1}
Velocidad del Bloque par L1	R_p	Hz	$= \frac{1}{T_p}$	5.383

El SM es el encargado de configurar de manera única estos componentes para cada LC activo, permitiendo así la asignación de los parámetros de caracterización apropiados, además de que especifica la sincronización y tamaño de las tramas de transferencia dentro de cada canal lógico.

1. **Transferencia:** La salida de los canales lógicos, también llamada transferencia, está definida en términos del tamaño de la trama de transferencia (en bits) y la velocidad de la trama de transferencia (en Hz o número de tramas transferidas por segundo) [NRSC-5B]. El mapeo del espectro y la codificación de canal son los componentes que determinan la transferencia de un LC, ya que el mapeo del espectro limita la capacidad, mientras que la cabecera de la codificación limita la cantidad de información de salida.
2. **Latencia:** Se le denomina latencia al retraso impuesto por el LC a una trama de transferencia mientras esta atraviesa la L1 [NRSC-5B]. La latencia de un LC está definida como la suma de su profundidad de entrelazado y su retraso por diversidad. Las capas superiores de la pila de protocolos del sistema IBOC asignan la información a cada LC con la latencia solicitada a través de la selección del modo de servicio.
3. **Robustez:** La robustez es la capacidad de un LC para resistir las adversidades del canal como ruido e interferencias. Existen ocho niveles [NRSC-5B] relativos de robustez diseñados dentro de la L1 de la interfaz de aire AM; una robustez de 1 indica un nivel muy alto de resistencia, mientras que una robustez de 8 indica una tolerancia menor a los errores provocados por el canal. Por su parte, el sistema IBOC FM ofrece 11 niveles de robustez para la L1 [NRSC-5B]; una robustez de 1 indica un nivel muy alto de resistencia a las adversidades del canal, mientras que una robustez de 11 indica una baja tolerancia a los errores inducidos por el canal.
Los factores que determinan la robustez de un canal lógico son; el mapeo del espectro (que afecta a la robustez estableciendo el nivel de potencia relativo, la



protección contra la interferencia espectral y la diversidad de frecuencia de un LC), la codificación de canal (que incrementa la robustez añadiendo redundancia al LC), la profundidad de entrelazado (que influye en el desempeño ante atenuaciones) y el retraso por diversidad (que mitiga los efectos del canal de radio móvil).

3.3.2. Capacidad de transmisión del sistema

Para calcular la salida de información de un LC, teniendo en cuenta la información anterior (tablas II.3.4 y II.3.5), se utiliza la siguiente fórmula [NRSC-5B]:

$$\text{Salida} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] = \text{Tamaño de la trama de transferencia} [\text{bits}] \cdot \text{Velocidad de la trama de transferencia} [\text{Hz}]$$

Entonces, por ejemplo, en el modo de servicio MA1 la salida para el canal lógico P1 es:

$$\text{Salida} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] = 3750 \cdot \left(\frac{8 \cdot 44100}{65536} \right) \approx 20.2 \left[\frac{\text{kbits}}{\text{s}} \right]$$

Y para el caso del modo de servicio MP1, la salida del canal lógico P1 es:

$$\text{Salida} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] = 146,176 \cdot \frac{44,100}{65,536} \approx 98.4 \left[\frac{\text{kbits}}{\text{s}} \right]$$

Los valores aproximados de la velocidad de información de salida de los canales lógicos para cada SM, tanto de AM como de FM, se muestran en las tablas II.3.6 a II.3.8. Para el caso de AM, el modo MA3 es el que ofrece la mayor velocidad de transmisión, 40 kbps, mientras que el modo MA1 ofrece una velocidad de 36 kbps. En FM, la unión de los modos de servicio MP5 y MS4 (transmisión de la forma de onda híbrida o totalmente digital) ofrece la mayor velocidad de transmisión con 278 kbps, mientras que el modo de transmisión híbrido MP1 ofrece la mínima velocidad con solo 98 kbps.

Tabla II.3.6. Velocidad de información de salida aproximada para cada canal lógico de IBOC AM [NRSC-5B]

Modo de Servicio	Velocidad de información de salida aproximada del canal			Forma de onda
	P1	P3	PIDS	
MA1	20	16	0.4	Híbrida
MA3	20	20	0.4	Totalmente digital



Tabla II.3.7. Velocidad aproximada de transferencia de información de los LC's primarios de IBOC FM [NRSC-5B]

Modo de Servicio	Velocidad aproximada de transferencia de información $\left[\frac{kbits}{s}\right]$					Forma de onda
	P1	P2	P3	P4	PIDS	
MP1	98	N/A	N/A	N/A	1	Híbrida
MP2	98	N/A	12	N/A	1	Híbrida Extendida
MP3	98	N/A	25	N/A	1	Híbrida Extendida
MP11	98	N/A	25	25	1	Híbrida Extendida
MP5	25	74	25	N/A	1	Híbrida Extendida, Totalmente Digital
MP6	50	49	N/A	N/A	1	Híbrida Extendida, Totalmente Digital

Tabla II.3.8. Velocidad aproximada de transferencia de información de los LC's secundarios de IBOC FM [NRSC-5B]

Modo de Servicio	Velocidad aproximada de transferencia de información $\left[\frac{kbits}{s}\right]$						Forma de onda
	S1	S2	S3	S4	S5	SIDS	
MS1	0	0	0	98	6	1	Totalmente Digital
MS2	25	74	25	0	6	1	Totalmente Digital
MS3	50	49	0	0	6	1	Totalmente Digital
MS4	25	98	25	0	6	1	Totalmente Digital

3.4. Componentes funcionales de la capa 1 del sistema IBOC

En esta sección se presenta un diagrama a bloques (figura II.3.2) de la capa 1 del sistema IBOC, que es donde se lleva a cabo el procesamiento de la información proveniente de las capas superiores para poder generar la señal digital HD que será transmitida, tanto para AM como para FM.

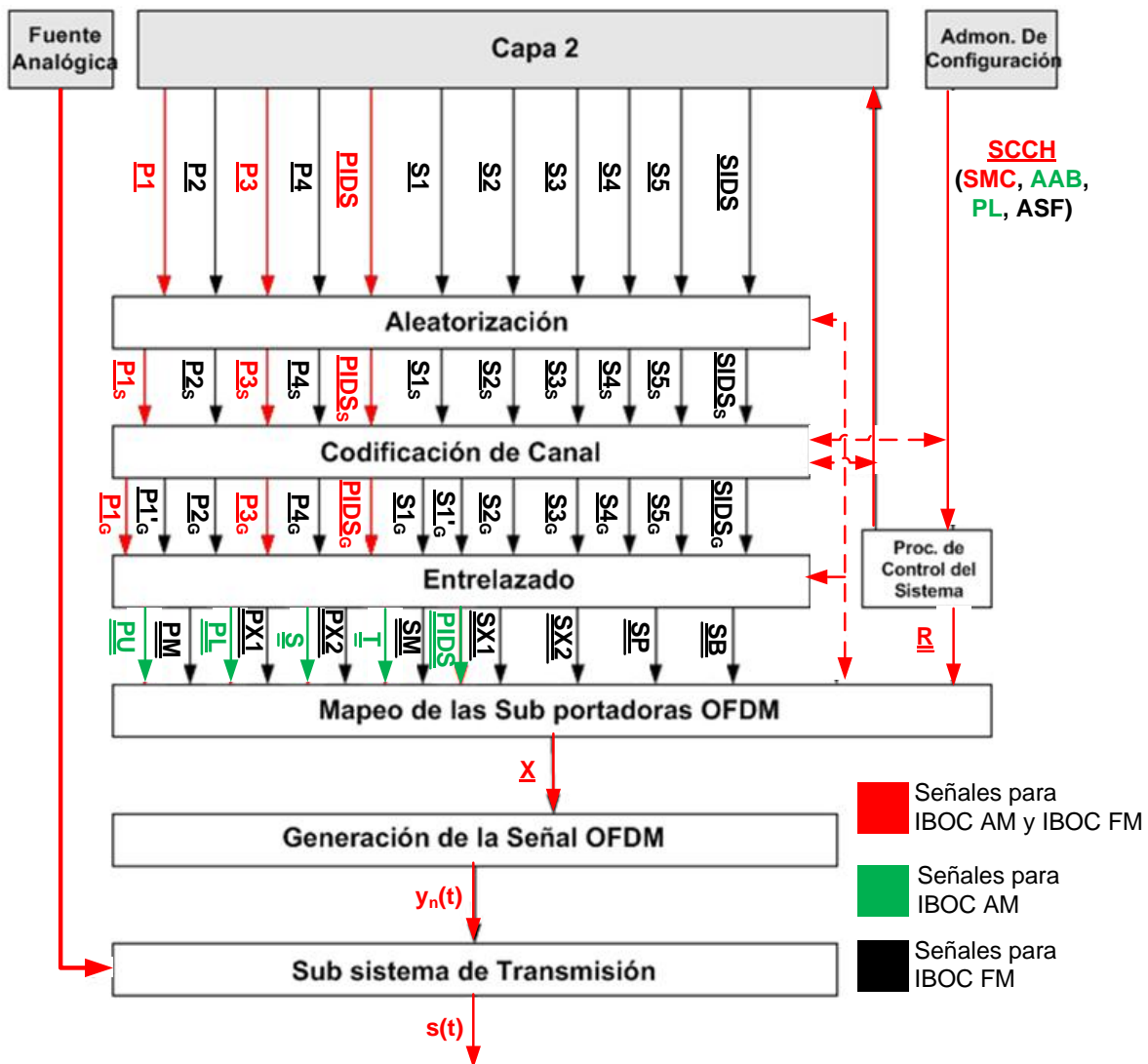


Figura II.3.2. Diagrama a bloques de la interfaz de aire (capa 1) del sistema IBOC [NRSC-5B]

A continuación, se presenta una explicación [NRSC-5B] de las funciones de cada uno de los bloques que componen a la capa 1.

3.4.1. Aleatorización

Este es el primer proceso dentro de la L1; los bits provenientes de la L2 (encapsulados en las PDU's) a través de los LC's, son revueltos de manera independiente para aleatorizar la información en el dominio del tiempo y reducir así [NRSC-5B] las periodicidades dentro de la señal y poder facilitar la sincronización del receptor.

A la salida de este primer bloque tenemos tramas de transferencia de bits aleatorizados que son enviados al proceso de codificación de canal para aplicarles la Corrección de Errores Hacia Adelante (FEC, Forward Error Correction).



3.4.2. Codificación de canal

La información de entrada a este proceso son tramas de transferencia de bits aleatorizados, provenientes del bloque de la aleatorización. Este proceso de codificación de canal utiliza [NRSC-5B] la codificación convolucional para añadir redundancia a los datos digitales en cada uno de los LC's para mejorar su confiabilidad y resistencia ante interferencias y adversidades del canal. Las técnicas de codificación [NRSC-5B] son configuradas dependiendo del SM activo.

Debido a lo anterior, el sistema IBOC AM cuenta con tres [NRSC-5B] codificadores convolucionales; el codificador E1 (usado por ambos SM's) utiliza una tasa madre de $1/3$ la cual es perforada para obtener una tasa de $5/12$, el codificador E2 (usado solo por el SM MA1) también utiliza una tasa madre de $1/3$ perforada para obtener una tasa de $4/6$; finalmente, el codificador E3 (usado por ambos SM's) utiliza la misma tasa madre, sin perforar.

Por su parte, el sistema IBOC FM utiliza [NRSC-5B] cuatro tasas de código diferentes, de $2/6$ (usado por los SM's secundarios), $2/5$ (usado por todos los SM's excepto MS1) y $2/4$ (usado por todos los SM's excepto MP1 y MS1), todos generados a partir de una tasa madre de $1/3$, y un código con tasa $2/7$ (usado por el SM MS1), generado a partir de una tasa madre de $1/4$.

Lo anterior significa que el tamaño de los vectores de cada LC se incrementa de forma inversamente proporcional a la tasa de código; por ejemplo, si el sistema IBOC AM utiliza el codificador E1, por cada 5 bits aleatorizados de entrada, se obtendrán a la salida 12 bits codificados.

Finalmente, a la salida del bloque de codificación de canal tenemos tramas de transferencia de bits codificados, asociados a cada LC activo.

3.4.3. Entrelazado

Un entrelazador es una función que toma un vector de bits como entrada y genera una matriz de bits reordenados; este reordenamiento antes de la transmisión mitiga el impacto de los errores de ráfaga causados por el desvanecimiento de la señal e interferencias.

Como ya se mencionó, la salida del entrelazador está estructurada en forma de matriz; cada matriz de salida contiene información completa o parcial de los LC's y se asocia con una porción específica del espectro transmitido. Dichas salidas son luego dirigidas al bloque de mapeo de sub portadoras OFDM, donde se mapea un renglón de cada matriz de entrelazado a su respectiva banda lateral superior e inferior. Este mapeo depende del SM seleccionado para la transmisión.

3.4.4. Procesamiento del control del sistema

El procesamiento del control del sistema recibe los datos de control del sistema (SMC, PL, AAB, ASF) provenientes del administrador de configuración a través del SCCH [NRSC-5B]. Estos datos son combinados con bits de sincronización, paridad y reservados dentro de la L1 para crear, bajo la dirección de las capas superiores, una matriz de secuencias de datos de control del sistema denominada como R.



Esta matriz es transmitida en las llamadas sub portadoras de referencia (figuras II.3.7 a II.3.9 y II.3.12 a II.3.14) [NRSC-5B], que en el caso de la señal IBOC AM están localizadas a ambos lados de la portadora analógica principal, mientras que en la señal IBOC FM, el número de sub portadoras de referencia radiodifundidas en una forma de onda dada, depende del SM.

3.4.5. Mapeo de las sub portadoras OFDM

En este bloque se asignan las matrices de entrelazado y el vector de control del sistema a las sub portadoras OFDM correspondientes. Dependiendo del sistema (IBOC AM o IBOC FM) y de la posición de las sub portadoras dentro del espectro [NRSC-5B], es el tipo de modulación utilizada para el mapeo de la información.

Para el caso del sistema IBOC AM [NRSC-5B], en la forma de onda híbrida, los renglones de las matrices de entrelazado que están destinados a las bandas laterales primarias, son mapeados utilizando una modulación 64QAM, aquellos destinados a las bandas laterales secundarias y la información del PIDS utilizan una modulación 16QAM, finalmente, los renglones destinados a las bandas laterales terciarias utilizan modulación QPSK. Para la forma de onda totalmente digital, la información de las bandas laterales secundarias y terciarias utilizan modulación 64QAM, mientras que la información del PIDS usa modulación 16QAM. En ambos casos, para las sub portadoras de referencia se utiliza la modulación BPSK.

Para el sistema IBOC FM [NRSC-5B], independientemente del SM seleccionado y de la forma de onda transmitida (híbrida, híbrida extendida o totalmente digital), las sub portadoras de datos utilizan una modulación QPSK y las sub portadoras de referencia utilizan la modulación BPSK.

3.4.6. Generación de la señal OFDM

El módulo de generación de la señal OFDM recibe símbolos complejos OFDM en el dominio de la frecuencia, provenientes de la salida del módulo de mapeo de las sub portadoras OFDM, y genera pulsos en el dominio del tiempo que representan la porción digital de la señal de radio IBOC AM o IBOC FM.

3.4.7. Sub sistema de transmisión

El sub sistema de transmisión da formato a la forma de onda de radio AM HD o FM HD en banda base para su transmisión a través del canal de MF o VHF respectivamente.

Sus funciones principales son la concatenación de símbolo y la conversión de frecuencia hacia arriba; además, cuando se transmite la forma de onda híbrida, el sub sistema también filtra y modula la señal en banda base de audio analógico antes de combinarla coherentemente con la porción digital de la forma de onda (figuras II.3.3 a II.3.6).

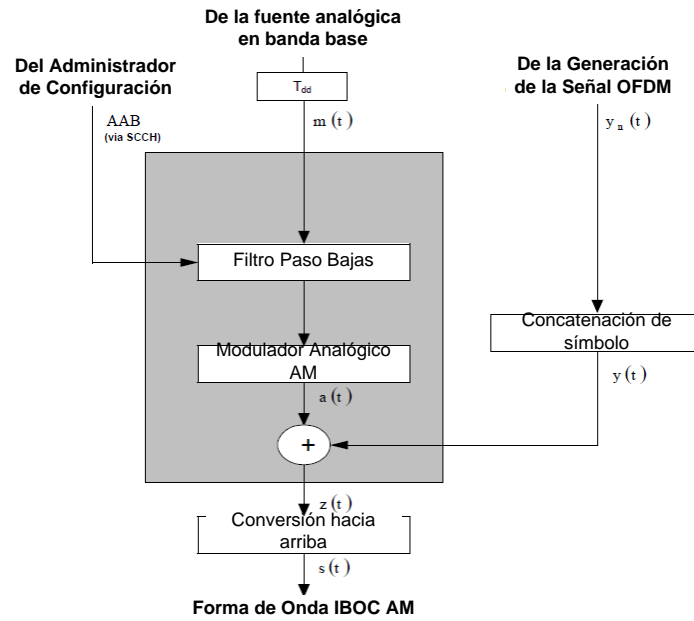


Figura II.3.3. Diagrama a bloques del sub sistema de transmisión híbrido (IBOC AM) [NRSC-5B]

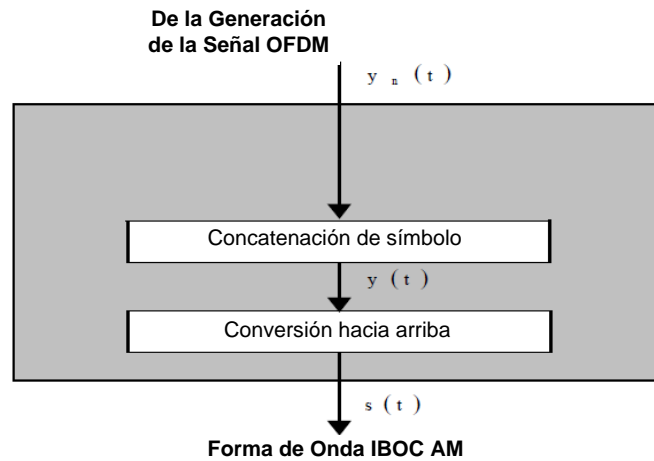


Figura II.3.4. Diagrama a bloques del sub sistema de transmisión totalmente digital (IBOC AM) [NRSC-5B]

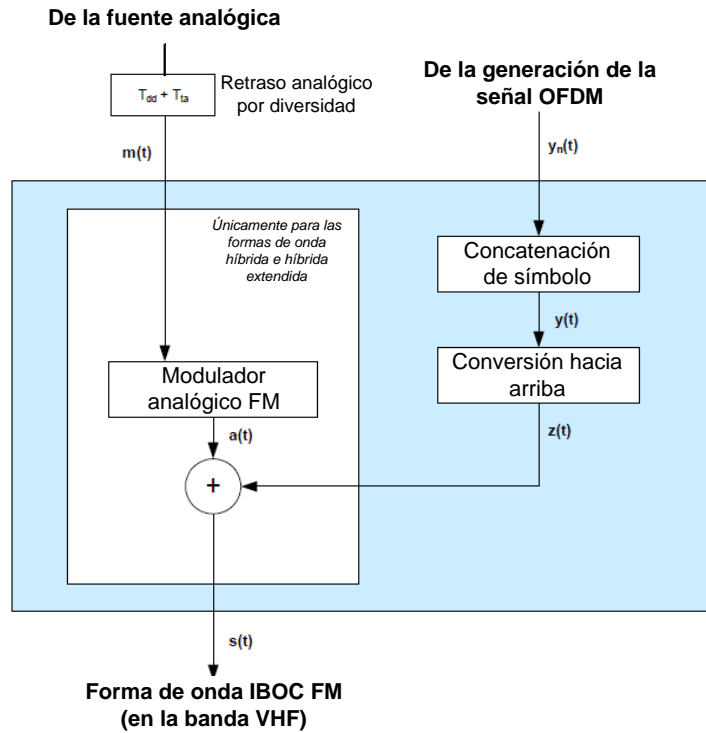


Figura II.3.5. Diagrama a bloques del sub sistema de transmisión híbrido e híbrido extendido (IBOC FM) [NRSC-5B]

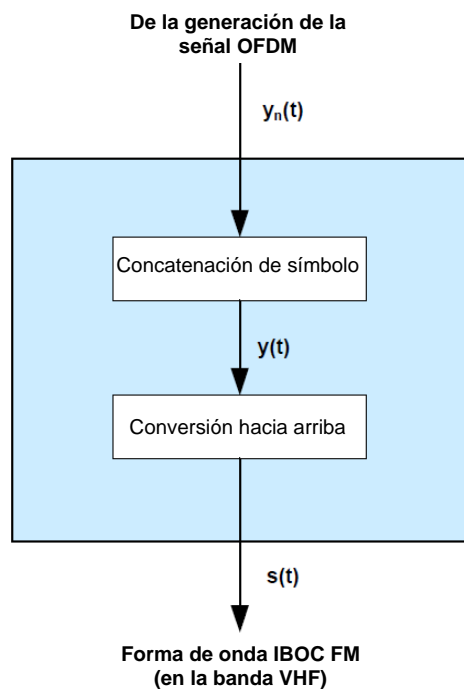


Figura II.3.6. Diagrama a bloques del sub sistema de transmisión totalmente digital (IBOC FM) [NRSC-5B]



3.5. Formas de onda y características espectrales de las señales IBOC

En esta sección se presentan las características espectrales de las señales IBOC AM y IBOC FM. Para ambos casos se presentan los espectros de todas las modalidades de señal existentes, así como su composición y las máscaras de transmisión definidas [NRSC-5B].

3.5.1. Amplitud modulada

El diseño del sistema IBOC provee los medios necesarios para permitir una transición gradual hacia un sistema de radiodifusión digital; para esto, cuenta con dos nuevos tipos de forma de onda, la forma de onda híbrida, que mantiene la señal analógica y añade la digital, y la forma de onda totalmente digital, usando como tipo de modulación de la señal digital (en ambas formas de onda) la Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia (*OFDM*, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), ya que es un esquema de multiplexación flexible que permite el mapeo de los LC's en diferentes grupos de sub portadoras [NRSC-5B].

Ambos tipos de forma de onda cumplen con la máscara de emisiones espectrales [FCC-73] aprobada por la FCC en Estados Unidos para AM.

3.5.1.1. Forma de onda híbrida

Como se explicó anteriormente, el ancho de banda del audio analógico en la forma de onda híbrida puede ser de 5 kHz u 8 kHz. Para el primer caso, la señal digital es transmitida en las bandas laterales primarias y en las bandas laterales secundarias, a ambos lados de la señal analógica anfitriona, así como en las bandas laterales terciarias, por debajo de la señal analógica (figura II.3.7). En el segundo caso, además de las bandas laterales terciarias, las bandas laterales secundarias están también por debajo de la señal analógica anfitriona (figura II.3.8).

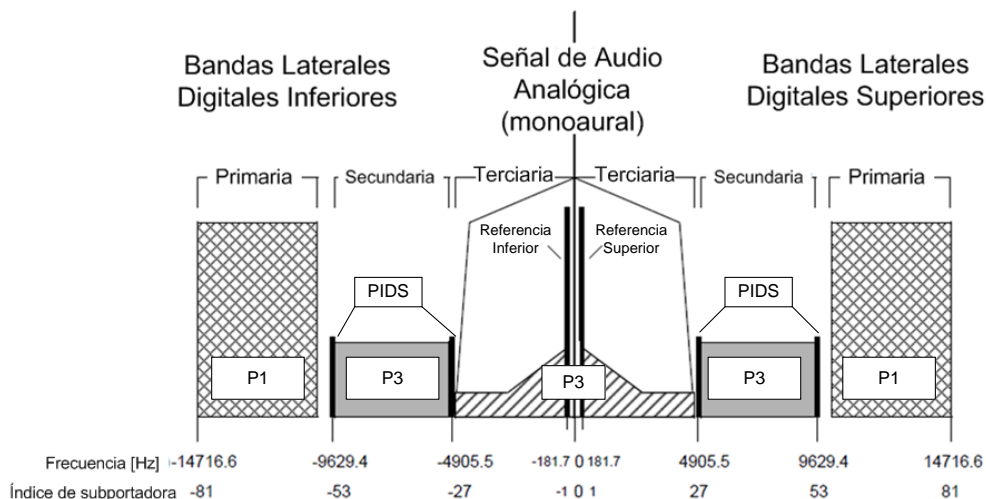


Figura II.3.7. Espectro de la forma de onda híbrida IBOC AM (ancho de banda de audio analógico de 5 kHz) [NRSC-5B]

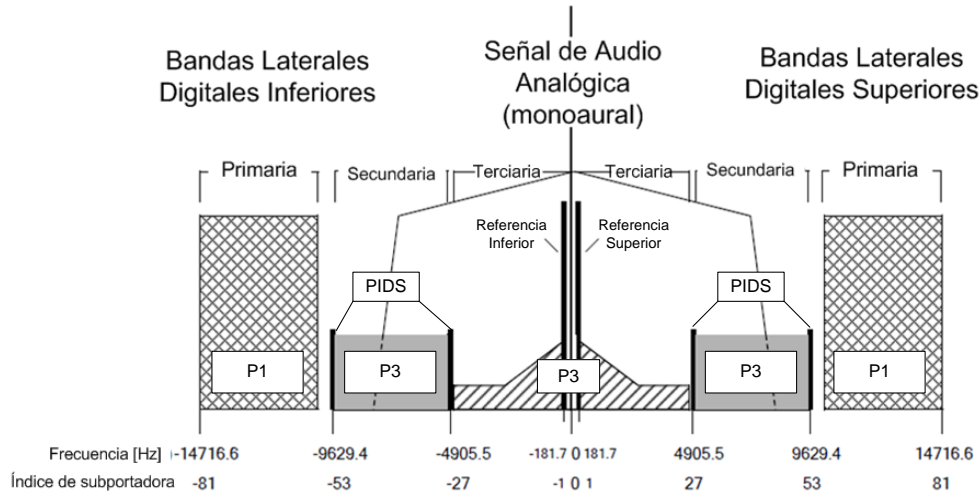


Figura II.3.8. Espectro de la forma de onda híbrida IBOC AM (ancho de banda de audio analógico de 8 kHz) [NRSC-5B]

El motivo de que existan dos configuraciones de ancho de banda para el audio analógico es que, al transmitir con un ancho de banda analógico de 8 kHz, la cobertura analógica de esa estación se mejora, pero se pueden causar interferencias a la señal digital de las transmisiones híbridas adyacentes. Por lo tanto, para evitar interferencias a las estaciones que utilizan canales adyacentes, se utiliza un ancho de banda analógico de 5 kHz, aunque la desventaja es que se reduce la cobertura analógica [NRSC-5B].

Además de las señales de audio, también se transmite la información de estado y control a través de sub portadoras de referencia localizadas a ambos lados de la portadora principal, y cada banda lateral tiene una componente superior e inferior. El canal lógico PIDS se transmite en sub portadoras individuales justo por arriba y por abajo de los límites de las bandas laterales secundarias superiores e inferiores (figuras II.3.7 y II.3.8). El nivel de potencia de cada una de las sub portadoras OFDM se fija de acuerdo al nivel del resto de las sub portadoras dentro de la misma banda lateral, mientras que los niveles de potencia de todas las bandas laterales, son ajustables de acuerdo al nivel de la portadora analógica principal sin modular [NRSC-5B] (tabla II.3.2).

En cada uno de los espectros mostrados en las figuras II.3.7 y II.3.8, se indica el número y frecuencia central de las sub portadoras OFDM principales; la frecuencia central de una sub portadora se calcula multiplicando el número de sub portadora por el espacio entre sub portadoras OFDM Δf (tabla A). El centro de la sub portadora cero está localizado en 0 Hz, pero este es relativo al canal de Radio Frecuencia (RF, Radio Frequency) asignado para la transmisión.

3.5.1.2. Forma de onda totalmente digital

En la forma de onda totalmente digital, la señal analógica es reemplazada por bandas laterales primarias de alta potencia, mientras que la portadora AM analógica sin modular es mantenida; la banda lateral superior secundaria es trasladada a frecuencias mayores por encima de la banda lateral superior primaria y la banda lateral inferior terciaria es trasladada a frecuencias más bajas, por debajo de la banda lateral inferior primaria. Las bandas laterales superiores secundaria y terciaria ya no se utilizan y la potencia de las bandas laterales secundaria y terciaria remanentes es incrementada.



Además, al igual que en la forma de onda híbrida, las sub portadoras de referencia están localizadas a ambos lados de la portadora AM sin modular, pero con un mayor nivel, y el nivel de potencia de cada una de las sub portadoras OFDM dentro de cada banda lateral se determina de acuerdo a la portadora analógica principal sin modular [NRSC-5B] (figura II.3.9 y tabla II.3.2).

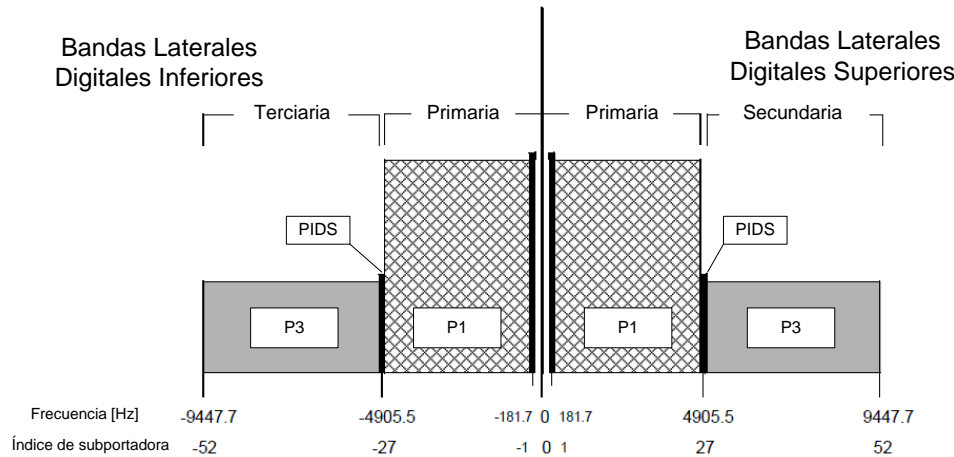


Figura II.3.9. Espectro de la forma de onda totalmente digital IBOC AM [NRSC-5B]

Todos los cambios anteriores dan como resultado una reducción en el ancho de banda, haciendo que la forma de onda totalmente digital sea menos susceptible a la interferencia por canal adyacente [NRSC-5B].

Finalmente, La forma de onda de radio AM HD [NRSC-5B] es radiodifundida en las bandas de radio AM actuales, y sus niveles de potencia y contenido espectral están limitados por la máscara espectral definida por la FCC [FCC-73] para AM (figuras II.3.10 a II.3.12 y tablas II.3.9 a II.3.11).

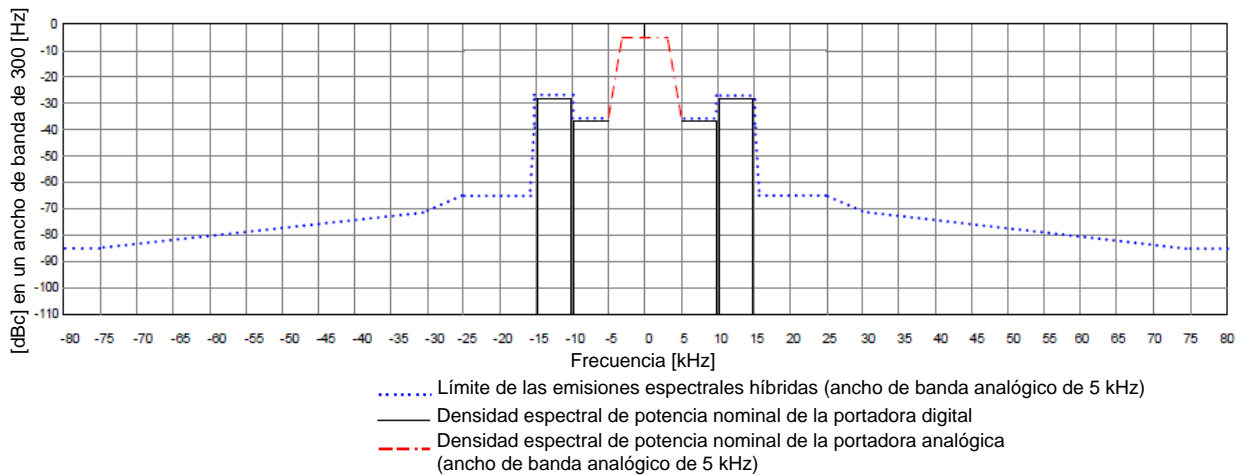


Figura II.3.10. Máscara espectral para la señal IBOC AM híbrida (ancho de banda de audio analógico de 5 kHz) [NRSC-5B]

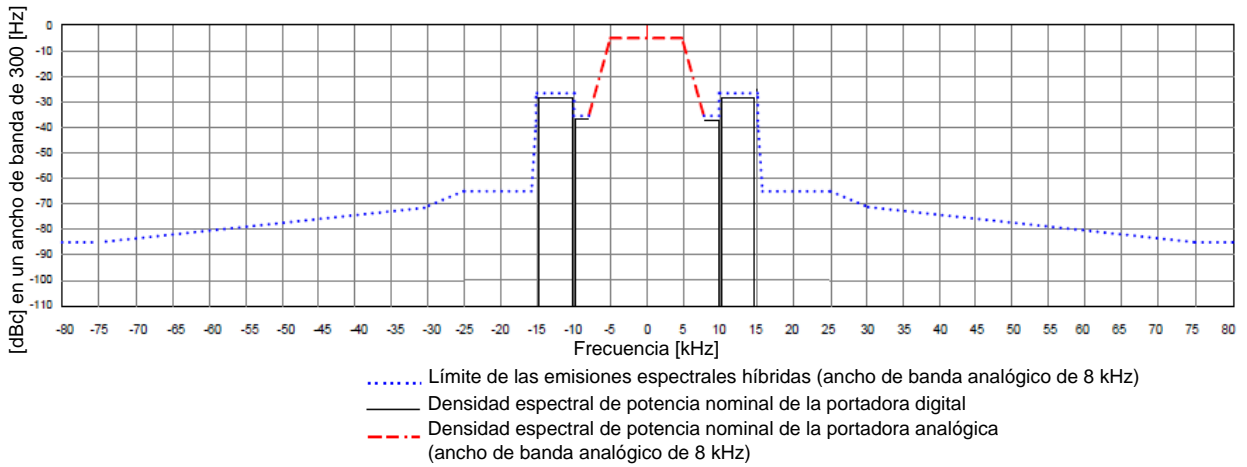


Figura II.3. 11. Máscara espectral para la señal IBOC AM híbrida (ancho de banda de audio analógico de 8 kHz) [NRSC-5B]

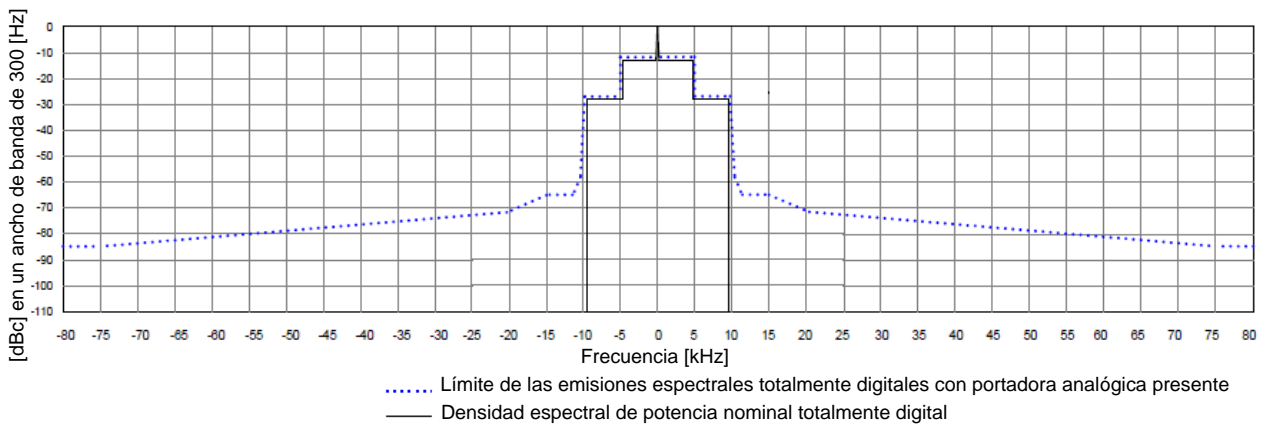


Figura II.3. 12. Máscara espectral para la señal IBOC AM totalmente digital [NRSC-5B]

Tabla II.3.9. Límites para las emisiones espectrales de la señal IBOC AM híbrida (ancho de banda analógico de 5 kHz) [NRSC-5B]

Frecuencia respecto a la portadora central	Nivel relativo a la portadora sin modular ([dBc] por 300 [Hz])
5 a 10 kHz de distancia	-34.3
10 a 15 kHz de distancia	-26.8
15 a 15.2 kHz de distancia	-28
15.2 a 15.8 kHz de distancia	$-39 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 15.2) \cdot 43.3$
15.8 a 25 kHz de distancia	-65
25 a 30.5 kHz de distancia	$-65 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 25) \cdot 1.273$
30.5 a 75 kHz de distancia	$-72 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 30.5) \cdot 0.292$
> 75 kHz de distancia	-85



Tabla II.3.10. Límites para las emisiones espectrales de la señal IBOC AM híbrida
(ancho de banda analógico de 8 kHz) [NRSC-5B]

Frecuencia respecto a la portadora central	Nivel relativo a la portadora sin modular ([dBc] por 300 [Hz])
8 a 10 kHz de distancia	-34.3
10 a 15 kHz de distancia	-26.8
15 a 15.2 kHz de distancia	-28
15.2 a 15.8 kHz de distancia	$-39-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -15.2) \cdot 43.3$
15.8 a 25 kHz de distancia	-65
25 a 30.5 kHz de distancia	$-65-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -25) \cdot 1.273$
30.5 a 75 kHz de distancia	$-72-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -30.5) \cdot 0.292$
> 75 kHz de distancia	-85

Tabla II.3.11. Límites para las emisiones espectrales de la señal IBOC AM totalmente digital [NRSC-5B]

Frecuencia respecto a la portadora central	Nivel relativo a la portadora sin modular ([dBc] por 300 [Hz])
181.7 a 4,814.65 Hz de distancia	-12.3
4,814.65 Hz a 9.8 kHz de distancia	-27.3
9.8 a 10.5 kHz de distancia	$-28-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -9.8) \cdot 42.86$
10.5 a 11.5 kHz de distancia	$-58-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -10.5) \cdot 7.0$
11.5 a 15 kHz de distancia	-65
15 a 20.5 kHz de distancia	$-65-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -15) \cdot 1.273$
20.5 a 75 kHz de distancia	$-72-(\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} -20.5) \cdot 0.239$
> 75 kHz de distancia	-85

El espaciado entre frecuencias portadoras y los esquemas de numeración de canal son también compatibles con los establecidos por la FCC [FCC-73]; los canales están centrados a intervalos de 10 kHz en el rango de frecuencias de 540 kHz a 1700 kHz. Tanto la parte analógica como la digital de la forma de onda híbrida están centradas en la misma frecuencia portadora [NRSC-5B].

3.5.2. Frecuencia Modulada

El diseño del sistema IBOC FM provee [NRSC-5B] tres nuevos tipos de forma de onda; híbrida, híbrida extendida y totalmente digital. Tanto la forma de onda híbrida como la híbrida extendida mantienen la señal analógica de FM, mientras que la señal totalmente digital no.

Al igual que en el sistema IBOC AM, los tres tipos de forma de onda utilizan la modulación OFDM [NRSC-5B] para la señal digital y cumplen con la máscara de emisiones espectrales aprobada por la FCC en Estados Unidos para FM [FCC-73].

3.5.2.1. Particiones de frecuencia

Para las tres formas de onda, las sub portadoras OFDM son agrupadas en particiones de frecuencia [NRSC-5B]; cada partición contiene 18 sub portadoras de datos y una sub portadora de referencia. La posición de dicha sub portadora de referencia varía de acuerdo a la localización de la partición de frecuencia dentro del espectro, puede ser el orden A (figura II.3.13) o el orden B (figura II.3.14).

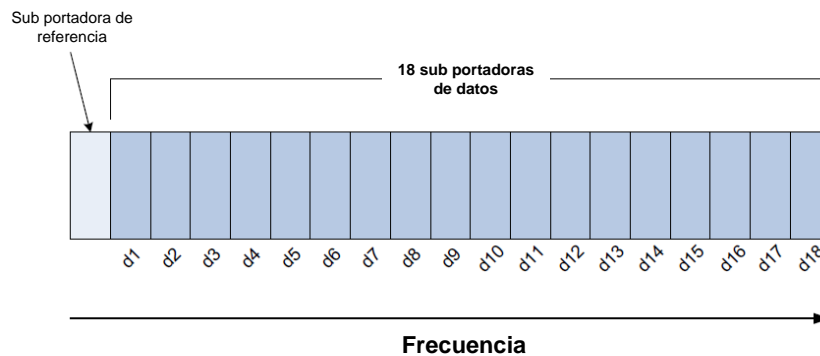


Figura II.3.13. Partición de frecuencia (orden A) [NRSC-5B]

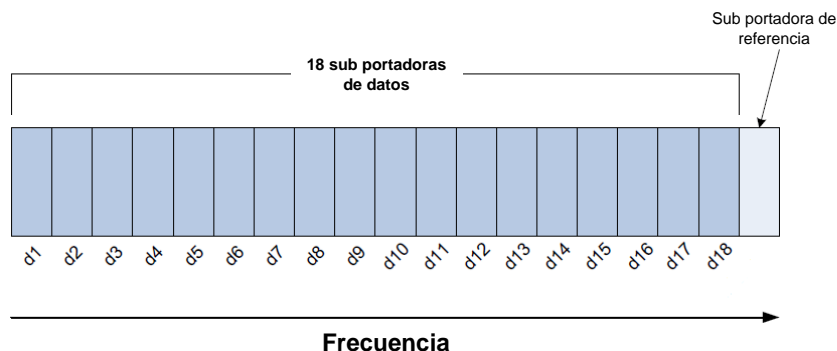


Figura II.3.14. Partición de frecuencia (orden B) [NRSC-5B]

Para cada partición de frecuencia, las sub portadoras de datos d1 a d18 transportan la carga útil (datos o audio codificado) proveniente de la L2, mientras que la sub portadora de referencia transporta la información de control del sistema [NRSC-5B]. Las sub portadoras están numeradas de -546 a 0 (frecuencia central) a +546 a lo largo del canal de frecuencia asignado.

Además de las sub portadoras de referencia contenidas en cada partición de frecuencia, dependiendo del SM [NRSC-5B], se pueden añadir hasta cinco sub portadoras de referencia adicionales dentro del espectro en las posiciones -546, -279, 0, +279 y +546, lo que ocasiona una distribución regular de sub portadoras de referencia a lo largo del espectro.

3.5.2.2. Forma de onda híbrida

Para la forma de onda híbrida, la señal digital es transmitida en las bandas laterales Primarias Principales (PM, Primary Main) a ambos lados de la señal analógica de FM. El nivel de potencia de cada banda lateral es menor a la potencia total de la señal analógica de FM (tabla II.3.3), la cual puede ser monofónica o estéreo [NRSC-5B].



Cada banda lateral PM está compuesta por 10 particiones de frecuencia que abarcan de la sub portadora +356 a la +545 y de la -356 a la -545; las sub portadoras +546 y -546 (también incluidas en las bandas laterales PM) son sub portadoras de referencia adicionales. Todo lo anterior, se muestra en la figura II.3.15, mientras que los factores de escala de amplitud de cada banda lateral se muestran en la tabla II.3.3.

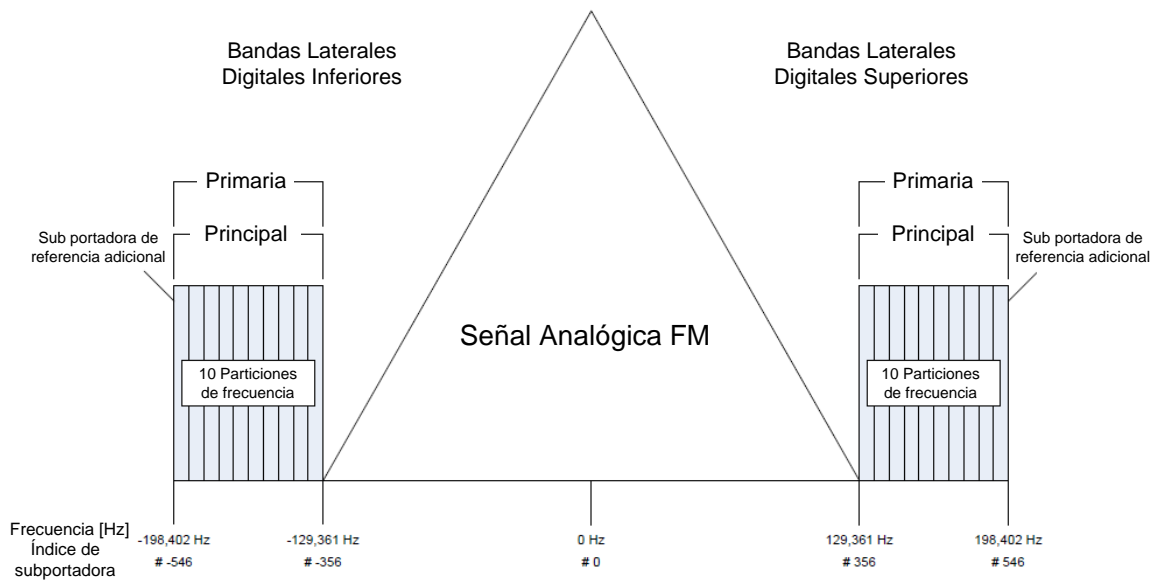


Figura II.3.15. Espectro de la forma de onda híbrida IBOC FM [NRSC-5B]

3.5.2.3. Forma de onda híbrida extendida

En la forma de onda híbrida extendida, el ancho de banda de las bandas laterales híbridas se extiende hacia la señal analógica de FM para incrementar la capacidad digital. Este espectro adicional, localizado en el borde interno de cada banda lateral PM es denominado banda lateral Primaria Extendida (PX, Primary Extended) figura II.3.16. Esta forma de onda es utilizada para mejorar la capacidad de transmisión y cobertura digitales, la desventaja es que la cobertura analógica se verá afectada, ya que el ancho de banda analógico se reduce.

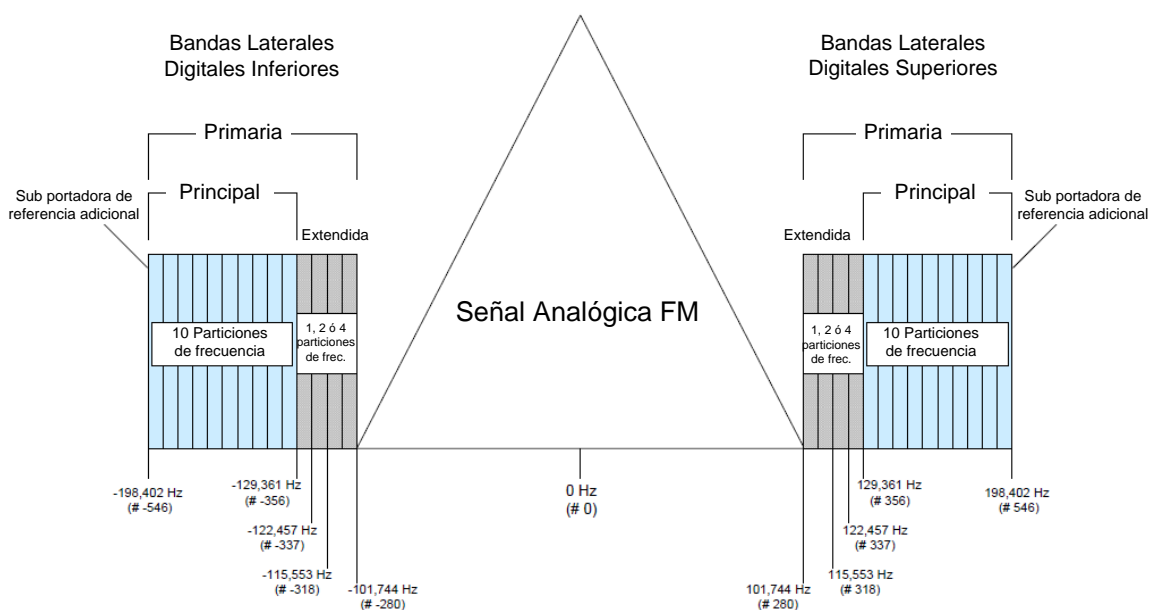


Figura II.3.16. Espectro de la forma de onda híbrida extendida IBOC FM [NRSC-5B]

El SM activo define la extensión de las bandas laterales PX (una, dos o cuatro particiones de frecuencia) así como el mapeo de los LC's a cada partición de frecuencia. Para el modo MP1 no se usan las bandas PX, el modo MP2 utiliza 1 partición de frecuencia, el modo MP3 utiliza 2 particiones de frecuencia y los modos MP11, MP5 y MP6 usan las 4 particiones.

3.5.2.4. Forma de onda totalmente digital

Las principales mejoras que ofrece el sistema IBOC se realizan con la forma de onda totalmente digital [NRSC-5B], en la que la señal analógica es retirada y en su lugar se colocan bandas laterales secundarias de baja potencia, además, el ancho de banda de las bandas laterales digitales primarias es extendido completamente (como en el caso de la forma de onda híbrida extendida). Con lo anterior, se logra un ancho de banda total del espectro totalmente digital de 396,804 Hz.

Como se muestra en la figura II.3.17, además de las 10 particiones de frecuencia principales, en cada banda lateral primaria de la forma de onda están presentes las cuatro particiones de frecuencia extendidas. Por otro lado, cada banda lateral secundaria también tiene 10 particiones de frecuencia Secundarias Principales (*SEM, Secondary Main*) y cuatro Secundarias Extendidas (*SX, Secondary Extended*). Sin embargo, a diferencia de las bandas laterales primarias, las particiones de frecuencias SEM están mapeadas más cerca del centro del canal mientras que las particiones de frecuencia extendidas están más alejadas del centro.

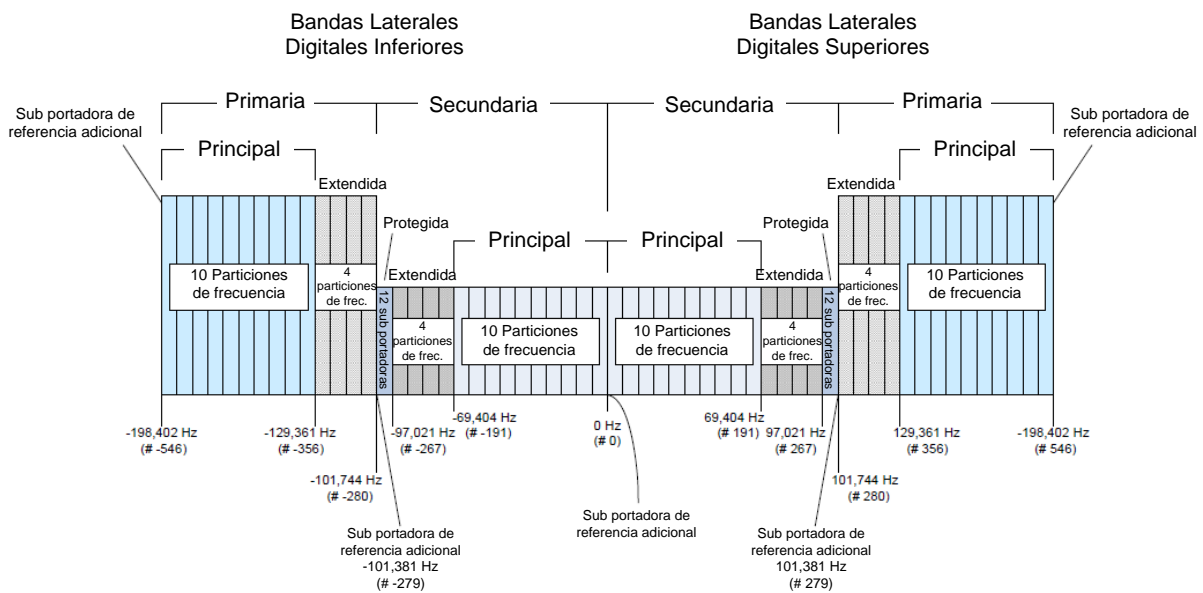


Figura II.3.17. Espectro de la forma de onda totalmente digital IBOC FM [NRSC-5B]

Además, cada banda lateral secundaria cuenta con una pequeña región Secundaria Protegida (*SP, Secondary Protected*) formada por 12 sub portadoras OFDM y las sub portadoras de referencia +279 y -279. Estas bandas laterales son llamadas “protegidas” porque están localizadas en el área del espectro menos afectada por interferencias analógicas o digitales [NRSC-5B].

Finalmente, el espaciado entre frecuencias portadoras, así como el esquema de numeración de canales, son compatibles con lo establecido por la FCC en los Estados Unidos para la



radiodifusión en FM [FCC-73]; las portadoras retienen su espaciado de 200 kHz en el rango de frecuencias de 88.0 a 108.0 MHz y los canales están numerados de 201 a 300, donde el canal 201 está centrado en 88.1 MHz y el canal 300 está centrado en 107.9 MHz. También, al igual que en AM, tanto la señal analógica como la digital se transmiten dentro del canal ya asignado y cumpliendo con las máscaras de transmisión aprobadas por la FCC [FCC-73] en Estados Unidos (figuras II.3.18 y II.3.19 y tablas II.3.12 y II.3.13).

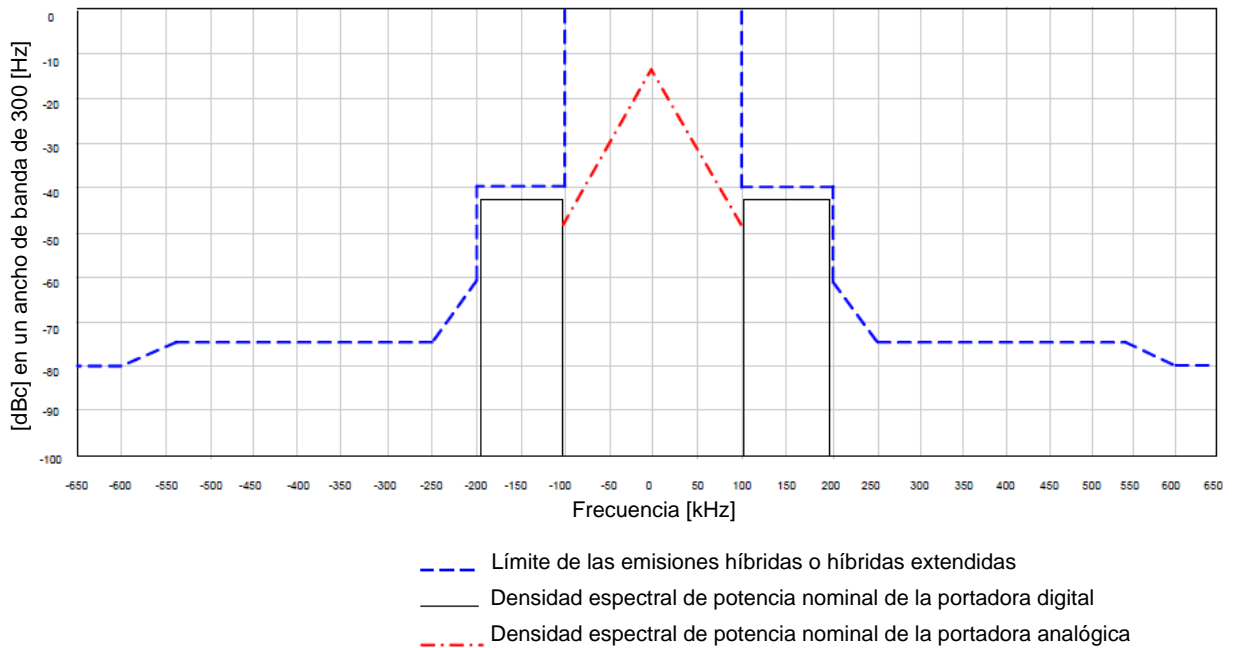


Figura II.3. 18. Máscara espectral para la señal IBOC FM híbrida o híbrida extendida [NRSC-5B]

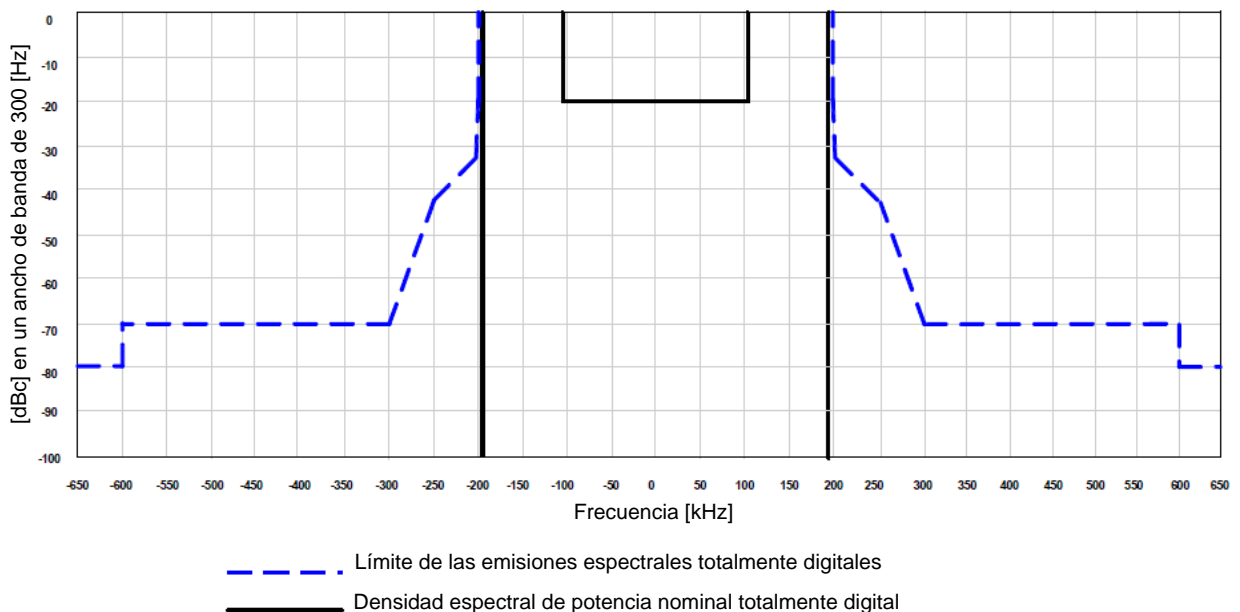


Figura II.3. 19. Máscara espectral para la señal IBOC FM totalmente digital [NRSC-5B]



Tabla II.3.12. Límites para las emisiones espectrales de la señal IBOC FM híbrida [NRSC-5B]

Frecuencia respecto a la portadora central	Nivel relativo a la portadora sin modular ($[dBc]$ por 300 [Hz])
100 a 200 kHz de distancia	-40
200 a 250 kHz de distancia	$-61.4 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 200) \cdot 0.260$
250 a 540 kHz de distancia	-74.4
540 a 600 kHz de distancia	$-74.4 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 540) \cdot 0.093$
> 600 kHz de distancia	-80

Tabla II.3.13. Límites para las emisiones espectrales de la señal IBOC FM totalmente digital [NRSC-5B]

Frecuencia respecto a la portadora central	Nivel relativo a la portadora sin modular ($[dBc]$ por 300 [Hz])
181.7 a 4,814.65 Hz de distancia	$-20 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 200) \cdot 1.733$
4,814.65 Hz a 9.8 kHz de distancia	$-33 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 207.5) \cdot 0.2118$
9.8 a 10.5 kHz de distancia	$-42 - (\text{distancia respecto a la portadora central en kHz} - 250) \cdot 0.56$
10.5 a 11.5 kHz de distancia	-70
> 75 kHz de distancia	-80

4. Requerimientos de conversión para la transmisión de la señal IBOC

Como ya se explicó en las secciones anteriores de este capítulo, el sistema IBOC provee la oportunidad a los radiodifusores de poder realizar una transición gradual de las transmisiones analógicas a las digitales, sin necesidad de interrumpir el servicio, gracias a que cuenta con 3 formas de onda (híbrida, híbrida extendida y digital) [NRSC-5B] y la transmisión de la señal digital se hace junto con la señal analógica, dentro del mismo canal de frecuencia ya asignado.

Por su parte, los usuarios no están obligados a cambiar sus equipos receptores de forma inmediata, gracias a la capacidad del sistema IBOC de generar señales híbridas tanto de AM como de FM. Por esta razón, los radioescuchas pueden continuar sintonizando la señal analógica de sus estaciones favoritas, y una vez adquirido el nuevo receptor, no tendrán necesidad de aprenderse nuevas frecuencias de recepción y serán capaces de sintonizar las estaciones de AM y FM con una calidad digital, libre de estática y desvanecimientos [IBIQ], además de recibir información como nombre del artista, tipo de programa, avisos de tráfico, clima, etc. [NRSC-5B]

A pesar de lo anterior, una parte muy importante que los radiodifusores también deben considerar al momento de optar por una tecnología de radiodifusión digital terrestre, es el costo que implica la migración de tecnología; es decir, deben considerar la inversión que deberán realizar para adecuar las instalaciones y el equipo que usan actualmente para la generación y transmisión de la señal analógica de audio, o en su defecto, la que representa el adquirir nuevos equipos de transmisión para poder comenzar a realizar transmisiones



digitales. Además, es importante tener en cuenta las cuotas que deben cubrirse para poder utilizar la tecnología HD Radio.

En esta sección se presentan los requerimientos, en cuanto a equipos e instalaciones, para poder realizar la transición de tecnología. Además, se presentan las características principales con las que deben contar los equipos tanto de AM como de FM para poder generar una señal digital de buena calidad.

Por último, se presentan los costos de las cuotas que los radiodifusores deben cubrir antes de poder hacer uso de la tecnología IBOC.

4.1. Requerimientos de conversión para estaciones de AM

En el caso de las estaciones de AM, el sistema IBOC presenta un tipo de configuración para poder transmitir la señal híbrida del sistema, dicha configuración se muestra en la figura II.4.1 y consiste simplemente en añadir al sistema de transmisión ya existente (conformado por el transmisor analógico de AM y la antena transmisora de AM) un excitador que será el encargado de generar la señal híbrida IBOC AM.

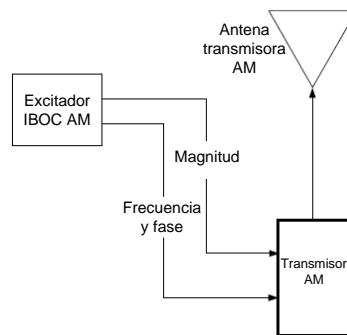


Figura II.4.1. Implementación para la transmisión de la señal IBOC AM [JEDE]

Sin embargo, los equipos analógicos deben contar con ciertas características para garantizar la generación de una señal de buena calidad. Dichas características se mencionan a continuación.

4.1.1. Características de los equipos de transmisión

Como ya se mencionó, tanto el transmisor como la antena pueden ser los mismos con los que cuenta actualmente una radiodifusora; los únicos requisitos para obtener una señal híbrida de buena calidad es que el transmisor debe proveer [JEDE] un ancho de banda amplio, provocar una mínima distorsión de fase (ambas características para permitir el paso de la forma de onda IBOC) y que la respuesta en frecuencia no decaiga al aumentar los niveles de modulación y al aumentar la frecuencia.

Según las pruebas realizadas por iBiquity [JEDE], los transmisores multifase de estado sólido y que usan la Modulación digital por Duración de Pulso (*PDM, Pulse Duration Modulation*), son los transmisores compatibles con la tecnología híbrida IBOC, ya que requieren de muy pocas modificaciones para la introducción de la señal digital.

Otro de los factores que debe tomarse en cuenta dentro de las adaptaciones para comenzar a transmitir la señal IBOC de AM, es el funcionamiento de la antena. El sistema IBOC AM fue probado por iBiquity con varios tipos de antenas [JEDE], incluyendo antenas



omnidireccionales, direccionales y antenas de cable largo; durante estas pruebas, se observó que en zonas oscuras (zonas donde la recepción es mínima o nula debido a características del terreno), tanto la recepción de la señal analógica como la digital no es posible; sin embargo, las zonas oscuras para la transmisión digital se reducen cuando se utilizan antenas direccionales. Además, para obtener características óptimas de transmisión, la impedancia de la antena debe mantenerse lo más cercana posible a los 50 Ω .

4.2. Requerimientos de conversión para estaciones de FM

Para las estaciones de FM, el sistema IBOC ofrece tres métodos para producir la señal híbrida IBOC FM [JEDE]; cada uno de estos métodos ofrece la posibilidad de hacer adaptaciones a las conexiones y equipos utilizados por las radiodifusoras actualmente; sin embargo, cada uno trabaja con eficiencias diferentes [JEDE].

Estos métodos son: combinación de alto nivel o amplificación separada, combinación de bajo nivel o amplificación común e implementación de antenas separadas, y cada uno de ellos se explica a continuación.

1. **Combinación de alto nivel o amplificación separada:** En este método, el transmisor analógico tendrá su salida combinada con la salida de un transmisor digital independiente, compatible con la tecnología IBOC y la señal híbrida resultante es enviada a la antena transmisora actual (figura II.4.2).

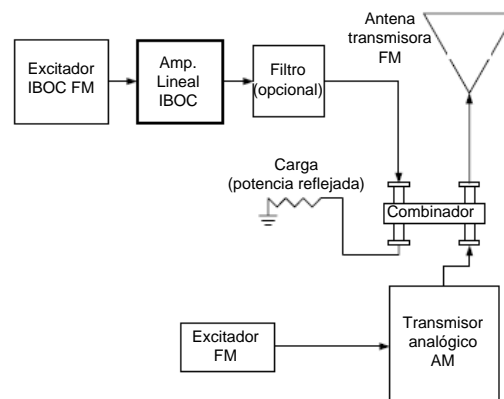


Figura II.4.2. Combinación de alto nivel o amplificación separada para la señal IBOC FM [JEDE]

En el método de combinación de alto nivel, llamado así porque las señales son primero amplificadas y luego combinadas, la mayor pérdida de potencia se presenta debido a la diferencia de potencia entre las señales combinadas. Los combinadores utilizados durante las pruebas que realizó iBiquity al sistema IBOC [JEDE], mostraron una pérdida de aproximadamente 0.5 dB (10%) de la potencia analógica y 10 dB (90%) de la potencia digital. Sin embargo, dado que los requerimientos de potencia de la tecnología IBOC son menores a -20 dB (relativos a la potencia analógica) [NRSC-5B], esta pérdida es tolerable.

Por ejemplo, para una estación de FM con un transmisor que genera una potencia de salida de 10 KW, la potencia de la portadora digital de la señal IBOC sería de 100 W y asumiendo las pérdidas del combinador arriba mencionadas, la potencia del transmisor analógico FM tendría que ser incrementada a 11.1 KW para superar las



pérdidas de inserción del combinador. De la misma manera, la potencia de salida del transmisor digital debe ser aumentada a 1 kW para superar la pérdida de 10 dB causada por el combinador.

2. **Combinación de bajo nivel o amplificación común:** La combinación de bajo nivel se muestra en la figura II.4.3; en este caso, la salida del excitador analógico FM se combina con la salida del excitador IBOC; después, las salidas combinadas son alimentadas a un amplificador lineal de banda ancha para aumentar la potencia de la señal a la potencia de transmisión deseada.

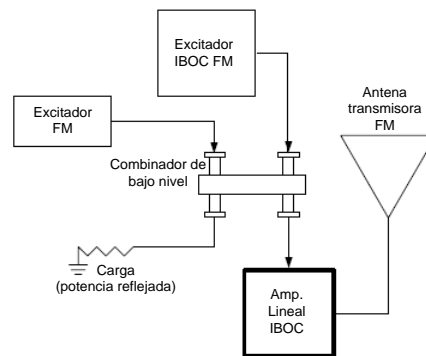


Figura II.4.3. Combinación de bajo nivel o amplificación común para la señal IBOC FM [JEDE]

Este método reduce el número de elementos independientes necesarios dentro de la cadena de radiodifusión y, por lo tanto, reduce los requerimientos de espacio dentro del sitio de transmisión, así como la potencia consumida.

3. **Implementación de antenas separadas:** Las pruebas realizadas al sistema IBOC por parte de iBiquity [JEDE] muestran que la señal digital IBOC también puede ser transmitida utilizando una antena independiente a la utilizada para la transmisión de la señal analógica (figura II.4.4). Las condiciones que deben cumplir ambas antenas para obtener una señal de buena calidad, es que deben tener el mismo patrón de radiación, y que no exista una diferencia de fase mayor a 30 cm entre ambas señales, ya que esto puede causar un deterioro en la señal analógica (semejante al deterioro causado por multitrayectoria) recibida cerca de la torre (figura II.4.5) [JOSC-10]. La ventaja de este método es que se elimina la pérdida de potencia ocasionada por el combinador, lo que permite el uso de un transmisor IBOC más pequeño para la generación de la señal IBOC [JEDE].

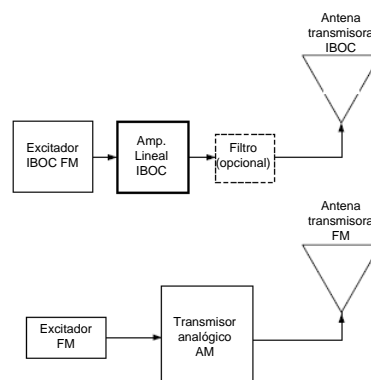


Figura II.4.4. Implementación de antenas separadas para la señal IBOC FM [JEDE]

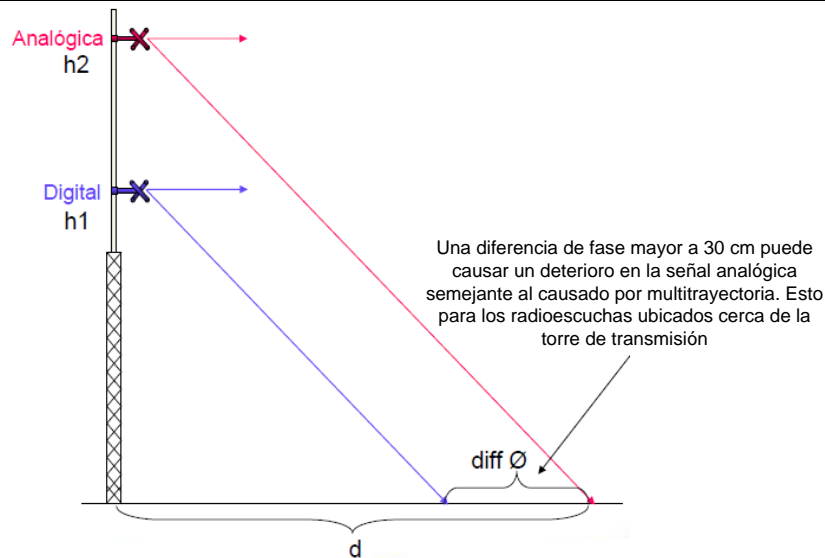


Figura II.4.5. Distancia entre la antena analógica y la digital [JOSC-10]

4.2.1. Ventajas y desventajas de cada método de generación de la señal híbrida IBOC FM

A continuación se presentan las principales ventajas y desventajas de cada uno de los 3 posibles métodos de adaptación del sistema de transmisión analógico actual de los radiodifusores para poder transmitir la señal de radio digital IBOC FM [JOSC-10].

1. **Combinación de alto nivel o amplificación separada:**

- a. Sistema ineficiente debido a la pérdida de potencia de transmisión en el combinador en forma de calor.
 - i. 90% de pérdida de la potencia digital generada en el transmisor (10 dB).
 - ii. 10% de pérdida de la potencia analógica generada en el transmisor (0.5 dB).
- b. Tiene un alto costo de operación ya que es necesario aumentar la potencia de salida del transmisor para poder superar las pérdidas en el combinador y poder así obtener la potencia de transmisión deseada.
- c. Provee redundancia, ya que el transmisor analógico puede funcionar como respaldo en caso de que el transmisor digital falle.

2. **Combinación de bajo nivel o amplificación común:**

- a. Es una implementación eficiente ya que las pérdidas de potencia en forma de calor en el combinador son menores.
- b. Reduce la cantidad de equipos necesarios para generar la señal híbrida y, por lo tanto, los requerimientos de espacio y energía eléctrica son menores.
- c. El amplificador lineal es poco eficiente, lo que ocasiona que se tenga que utilizar un transmisor de mayor potencia.

3. **Implementación de antenas separadas:**

- a. La antena digital puede ser registrada como una antena auxiliar analógica.
- b. El utilizar dos antenas de transmisión independientes requiere de mayor espacio en la torre de transmisión.



- c. Ofrece redundancia al sistema, ya que la antena digital puede funcionar también como antena de respaldo.
- d. Pueden existir problemas para igualar el área de cobertura de ambas antenas (patrones de radiación).

4.2.2. Repetidores en la transmisión de FM

El uso de la modulación OFDM en el sistema IBOC, permite el uso de repetidores digitales dentro del canal para cubrir las áreas donde la señal se pierde debido a las condiciones del terreno.

Para eliminar la interferencia entre símbolos, la cobertura efectiva en la dirección de mayor cobertura de la antena principal, debe ser limitada a 14 mi (22.53 km). Además, la relación entre la señal proveniente del transmisor principal y la señal generada por el repetidor debe ser de al menos 10 dB en zonas localizadas a más de 14 mi (22.53 km) del repetidor, en la dirección de mayor cobertura de la antena principal. Fuera de la dirección de mayor cobertura, la cobertura no está limitada; sin embargo, debe cumplir con lo establecido por la FCC para cada estación [FCC-73].

4.2.3. Características de los equipos de transmisión

Como ya se mencionó, el método de combinación de alto nivel (ofrecido por el sistema IBOC FM), utiliza dos transmisores para producir la señal híbrida que será transmitida; por lo tanto, requiere de la adición de un transmisor digital IBOC, un excitador digital, un combinador y un filtro (opcional), y dado que ambos transmisores (analógico y digital) operarán en el mismo sitio, las demandas de consumo de energía eléctrica aumentan y, por lo tanto, deben hacerse las adecuaciones necesarias de los servicios eléctricos. Además, la carga de calor también se verá incrementada, lo que demanda un sistema de enfriamiento adicional para mantener la temperatura de los equipos dentro de los límites aceptables.

Por su parte, el método de combinación de bajo nivel utiliza un transmisor común para combinar la señal digital IBOC con la señal analógica anfitriona, lo que reduce la demanda de espacio en el sitio así como el consumo de energía eléctrica. Por lo tanto, el sitio donde se encuentra actualmente el transmisor analógico puede utilizarse sin necesidad de aplicar cambios considerables en la estructura, aunque es necesario comprar el transmisor híbrido [JEDE].

Dado que las implementaciones del sistema IBOC FM pueden variar tanto en exigencias de espacio como en configuración, el sitio de transmisión debe ser analizado para poder adquirir los equipos adecuados, dependiendo de la cantidad de espacio disponible dentro del mismo.

Por último, las pruebas de campo realizadas por iBiquity [JEDE] al sistema IBOC FM muestran que las antenas utilizadas para la radiodifusión de la señal IBOC únicamente deben cumplir con los requerimientos de ancho de banda del sistema.



4.3. Costos adicionales del sistema

Una de las características más importantes que los radiodifusores deben tomar en cuenta al momento de adoptar un estándar es el costo que implica la migración de tecnología. Dentro de estos costos, como ya se explicó, se encuentra el generado por el cambio de equipos así como el acondicionamiento de los sitios de transmisión y de las antenas. Sin embargo, en el caso del sistema IBOC, dado que es un sistema propietario [IBIQ], es necesario que todos los radiodifusores que deseen adoptarlo como nuevo sistema de radiodifusión digital paguen una cuota establecida para poder obtener una licencia que los acredite como usuarios.

La compañía iBiquity cuenta con un programa de acreditación [IBIQ] que permite a los radiodifusores interesados en adoptar el sistema IBOC, obtener la licencia que les permitirá obtener las herramientas y el soporte necesarios para iniciar sus transmisiones digitales.

Para las radiodifusoras que se encuentran en Estados Unidos, el procedimiento de acreditación es el siguiente:

1. **Adquirir la licencia de tecnología de iBiquity Digital:** Las estaciones de AM y FM que se encuentran dentro de los Estados Unidos y planean adoptar la tecnología HD Radio, deben obtener su licencia directamente de iBiquity Digital. Esta licencia garantiza a la estación el derecho a utilizar las patentes, software y marcas registradas de HD Radio; dicha licencia debe estar en regla antes de que una estación pueda adquirir equipo que contenga material intelectual propiedad de iBiquity. Los términos que abarca la licencia son los siguientes:
 - a. **Duración:** La duración de la licencia es permanente.
 - b. **Cuotas para el audio de canal principal:** iBiquity Digital define la radiodifusión de la señal analógica existente como “audio de canal principal”, y para el derecho a radiodifundirlo es necesario realizar un único pago. Los derechos para la radiodifusión de datos asociados al audio de canal principal (datos primarios del canal principal) como son nombre del artista, nombre de la canción, título del álbum y programa, se cubren también con la cuota correspondiente a los derechos por el audio de canal principal. El costo de la licencia para la radiodifusión del audio de canal principal es de \$25,000 USD [IBIQ].
 - c. **Cuotas para el audio de canal complementario para los canales de multidifusión:** Esta cuota está basada en un modelo de repartición de ventas. Las estaciones deberán pagar el 3% del incremento de las ventas netas producido por la transmisión de servicios de audio complementario, teniendo como cuota anual mínima \$1,000 USD por canal de audio [IBIQ].
 - d. **Cuotas de datos:** Cualquier otra información independiente a los datos primarios del canal principal, son considerados como datos auxiliares. La cuota para la transmisión de estos datos auxiliares está también basada en un modelo de incremento de las ventas netas; las estaciones deberán pagar el 3% del incremento de las ventas netas producido por la transmisión de datos auxiliares, esta cuota es cuatrimestral.
 - e. **Requerimientos operacionales:** Para promover la aceptación de esta tecnología, las estaciones deben sincronizar el audio analógico y digital de canal principal retrasando el audio analógico.



- f. **Asignación:** La licencia se puede asignar a otra estación solo cuando la estación sea transferida o asignada a otra compañía.
 - g. **Revisiones y actualizaciones:** Todas las revisiones de software (programas que tienen por objetivo corregir errores en el funcionamiento del software) están libres de cualquier tipo de cuota; sin embargo, las actualizaciones deberán registrarse, ya sea pagando una cuota anual o pagando el costo de la actualización al momento de ser emitida.
2. **Notificar a la FCC del inicio de las transmisiones digitales:** Las estaciones que comienzan a transmitir HD Radio pueden iniciar sus transmisiones digitales en cuanto tengan la licencia y el equipo necesarios, no se requiere de ningún permiso especial por parte de la FCC. Sin embargo, la estación está obligada a avisar a la FCC del inicio de sus transmisiones digitales dentro de los 10 días siguientes al inicio de la radiodifusión de la señal digital.

Por su parte, las radiodifusoras que se encuentran fuera de Estados Unidos y que desean adoptar el estándar IBOC para la radiodifusión digital terrestre, es necesario que se pongan en contacto directo con los representantes de iBiquity Digital en su país.

Para el caso de México en particular, de acuerdo al Ing. John Schneider, Director de Desarrollo de Negocios para América Latina, ninguna de las cuotas mencionadas anteriormente aplican para las radiodifusoras mexicanas que deseen adoptar al sistema IBOC para las transmisiones digitales. Además el método para notificar a la COFETEL del inicio de las transmisiones digitales es el siguiente:

1. Pedir a la COFETEL el permiso necesario para poder comenzar con la transmisión de la señal híbrida de audio.
2. Una vez aprobadas las transmisiones, la radiodifusora puede comenzar a transmitir la señal híbrida; para la transmisión en multicasting, bastará con notificar a la COFETEL del número de canales adicionales que serán transmitidos.



5. Resumen del capítulo

El sistema de radiodifusión sonora digital terrestre IBOC (HD Radio) es una tecnología propietaria que permite a las estaciones de radiodifusión seguir transmitiendo su contenido en el canal de frecuencia ya asignado, dentro de la banda destinada para radiodifusión (de ahí su nombre de *en banda dentro del canal*, IBOC, por sus siglas en inglés). La principal ventaja que ofrece este sistema es una recepción de audio de mayor calidad; en AM se alcanza una calidad semejante a la de FM actual, mientras que en FM se obtiene una calidad de audio parecida a la del disco compacto. Además, en FM, IBOC permite la transmisión de datos asociados al audio y la multidifusión (transmisión de hasta 3 programas diferentes dentro del mismo canal).

El desarrollo de este estándar comenzó en Estados Unidos en 1990, cuando se dio a conocer el estándar europeo de radiodifusión sonora digital terrestre Eureka-147. La FCC estableció que este estándar no era adecuado para su uso en Estados Unidos, ya que la transmisión digital se realiza en la banda "L" (banda asignada para uso militar), además de que los radiodifusores no estaban dispuestos a cambiar su frecuencia actual de transmisión, ya que esto generaría confusión en los radioescuchas. Es así como el 25 de octubre de 2000 la ITU aprueba el sistema IBOC AM como estándar universal, y el 10 de octubre de 2002 se establece como el estándar para la radiodifusión digital en Estados Unidos.

A partir de entonces, el sistema IBOC ha tenido gran aceptación a nivel mundial. Países como Estados Unidos, Puerto Rico, México, Panamá y Filipinas ya adoptaron este sistema a nivel nacional; Brasil, Canadá, Chile, Uruguay, Argentina, Colombia, Nigeria, Polonia y China, por su parte, muestran un gran interés por la adopción del mismo.

El sistema IBOC utiliza la modulación OFDM, con lo que se genera una señal más resistente a las interferencias ocasionadas por canales adyacentes y por el efecto de trayectoria múltiple. Además, este sistema está diseñado para ofrecer cuatro tipos de servicios; servicio de programa principal (que incluye el audio y los datos del programa principal), servicio de programa complementario (que incluye el audio y los datos de los programas complementarios), servicios de aplicación avanzada (datos fijos y oportunistas) y el servicio de información de estación (datos relacionados con la identificación de la estación). Estos cuatro servicios permiten ofrecer al radioescucha datos como alertas de clima, tráfico, noticias, nombre del programa, artista, nombre de la canción o programa, y la capacidad de ofrecer contenido local. Cabe mencionar que tanto los cuatro tipos de servicios de datos como la multidifusión, aplican únicamente para el sistema IBOC FM, ya que el canal de transmisión para FM tiene un ancho de banda mayor al de AM, lo que permite la transmisión de una mayor cantidad de información.

Para lograr una transición gradual hacia la tecnología digital, el sistema IBOC está diseñado para generar dos tipos de formas de onda, tanto para AM como para FM. La *forma de onda híbrida* es aquella que está compuesta por la señal analógica y la señal digital, ambas señales son transmitidas al mismo tiempo y dentro del mismo canal de transmisión asignado, esto con el fin de que las radiodifusoras puedan ofrecer tanto los servicios analógicos como los digitales al mismo tiempo, y poder realizar una transición gradual de tecnología. Por su parte, la *forma de onda totalmente digital* es aquella que se genera eliminando la señal



analógica y extendiendo el ancho de banda de la señal digital a lo largo del ancho de banda total del canal.

En el caso de la forma de onda híbrida para el sistema IBOC AM, la señal analógica puede tener dos anchos de banda posibles, 5 u 8 kHz. Este ancho de banda puede ser establecido dependiendo de las necesidades del radiodifusor, ya que algunas veces, al utilizar el ancho de banda de 8 kHz, la recepción digital se ve afectada, por lo que es necesario reducir el ancho de banda de la señal analógica a 5 kHz.

En cuanto a la capacidad de transmisión de datos del sistema, esta depende directamente del modo de servicio seleccionado (MA1 y MA3 para AM y MP1 a MP3, MP11, MP5, MP6 y MS1 a MS4 para FM), ya que este es el que define los canales lógicos que estarán activos. Cada canal lógico tiene una capacidad de salida específica en la que serán distribuidos los datos y el audio.

Para las adecuaciones que los radiodifusores deben realizar en el sitio de transmisión, el sistema IBOC ofrece diferentes alternativas para que, haciendo algunas adecuaciones, se puedan seguir utilizando los equipos de transmisión actuales para generar y transmitir la señal híbrida de radio. En el caso de AM, es importante que el transmisor analógico utilizado sea de estado sólido y que cuente con un ancho de banda amplio y una buena respuesta en frecuencia; a este transmisor solo es necesario agregarle un excitador digital para poder comenzar a generar y transmitir la señal híbrida. Por su parte, para FM, el sistema IBOC ofrece tres métodos para la generación y transmisión de la señal híbrida, estos son:

1. Combinación de alto nivel: Aquí se requiere de un transmisor analógico y uno digital, la salida de ambos se combina y la señal resultante se transmite. La ventaja de este sistema es que el transmisor digital ofrece redundancia al sistema en caso de que el transmisor analógico falle; la principal desventaja es que, dado que primero se amplifican las señales y luego se combinan, existe una pérdida de potencia de transmisión considerable (0.5 dB de la potencia analógica y 10 dB de la potencia digital).
2. Combinación de bajo nivel: En este método las señales analógica y digital son primero combinadas, luego amplificadas y finalmente transmitidas; esto permite que las pérdidas de potencia sean menores, por lo que es más eficiente y requiere de un menor consumo de energía. Sin embargo, es difícil conseguir un amplificador lineal eficiente.
3. Implementación de antenas separadas: Como su nombre lo indica, en este caso cada transmisor cuenta con su antena transmisora independiente. La ventaja de este sistema es que, al contar con dos antenas, la antena digital ofrece redundancia al sistema de transmisión; sin embargo, es necesario contar con el suficiente espacio para su colocación en la torre (ya que ambas señales deben estar en fase), y asegurarse de que ambos patrones de radiación deben coincidir.

Por último, es importante tomar en cuenta que, dado que IBOC es un sistema propietario, los radiodifusores que adopten esta tecnología, antes de poder comprar el equipo y software necesarios, deben cubrir con las cuotas necesarias que les permitan obtener el derecho a utilizar dicha tecnología.



Dentro de las cuotas establecidas por iBiquity están; cuota para la radiodifusión del audio de canal principal (incluye la señal analógica existente y los datos asociados a la misma), cuota para el audio de canal complementario (comprende los canales de multidifusión) y las cuotas de datos (incluye todos los datos transmitidos que son independientes al canal principal). El costo de estas cuotas está sujeto al plan de pagos que se adopte, el número de estaciones que serán registradas y de la cantidad de canales de multidifusión que se tengan. Sin embargo, todas estas cuotas podrían no aplicar para las radiodifusoras mexicanas, esto como parte de los acuerdos realizados por iBiquity para lograr la adopción de la tecnología IBOC por parte de México.

