

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO DE LOS COMPONENTES DE UN RECEPTOR HÍBRIDO PARA EL ESTÁNDAR IBOC EN LA BANDA DE FM.

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**

KLEBER FABRICIO RIVERA SÁNCHEZ

(fabri_rivsa@hotmail.com)

DIRECTOR: Dr. Gualberto Hidalgo.

(gualberto.hidalgo@epn.edu.ec)

Quito, Noviembre, 2010

DECLARACION

Yo, Kleber Fabricio Rivera Sánchez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Kleber F. Rivera S.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Kleber Fabricio Rivera Sánchez, bajo mi supervisión.

Dr. Gualberto Hidalgo

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios y la Virgen del Cisne

Por mostrarme el camino y ayudarme

en la consecución de mis metas

A mis Padres

Porque me enseñaron a no

déjarme vencer y seguir luchando

hasta lograr mi objetivo en la vida

A mis amigos

Que fueron un apoyo para seguir adelante.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a

Mis Padres

Y a mi Hermana

*Por ser el apoyo incondicional que
me llevaron a concluir este trabajo*

CONTENIDO

CONTENIDO	vi
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xii
PRESENTACION	xiii
CAPITULO 1: RADIO DIGITAL	01
1.1 Introducción.....	01
1.2 La Radio Digital.....	02
1.2.1 Como funciona la Radio Digital.....	03
1.2.2 Características de la Radio Digital.....	05
1.3 Estándares de la Radio Digital.....	06
1.3.1 Estándar DAB.....	08
1.3.1.1 Codificación/ Transmisión.....	07
1.3.1.1.1 Transmisores y receptores DAB.....	11
1.3.1.2 Protocolo MOT.....	12
1.3.1.2.1 Mecanismos de Transmisión.....	18
1.3.1.3 DAB ITS.....	19
1.3.1.4 Ventajas de DAB.....	21
1.3.1.4.1 Mejoras en la Recepción.....	21

1.3.1.4.2 Calidad de Sonido.....	22
1.3.1.4.3 Servicios de Datos.....	22
1.3.1.4.4 Cobertura.....	23
1.3.1.4.5 Eficiencia en la utilización de Espectro y la Potencia.....	23
1.3.1.4.6 Rangos de frecuencias de Transmisión.....	23
1.3.1.4.7 Distribución.....	23
1.3.1.4.8 Multiplexado.....	23
1.3.1.4.9 Capacidad.....	24
1.3.1.4.10 Flexibilidad.....	24
1.3.2 Estándar DRM.....	24
1.3.2.1 Breve descripción de las etapas de Transmisión.....	27
1.3.2.1.1 Codificación de fuente.....	27
1.3.2.1.2 Multiplexación.....	28
1.3.2.1.3 Sistema DRM.....	29
1.3.2.1.4 Modulador.....	35
1.3.2.2 Modos de Operación de DRM.....	35
1.4 Radio por Internet.....	36
1.5 Ventajas y Desventajas de la Radio Digital.....	39
CAPITULO 2: ESTÁNDAR IBOC.....	41
2.1 Introducción.....	41
2.2 OFDM y COFDM.....	42
2.2.1 OFDM.....	42
2.2.2 COFDM.....	44
2.2.2.1 Modelo Simplificado del Sistema OFDM.....	46
2.2.2.2 Portadoras en COFDM.....	49

2.2.2.3 Ancho de Banda del Canal y COFDM.....	53
2.2.2.4 Intervalo de Guarda.....	55
2.2.2.5 Codificación contra Errores en COFDM.....	57
2.2.2.6 VER en COFDM.....	57
2.2.2.7 Ventajas y Desventaja de COFDM.....	59
2.2.2.7.1 Ventajas.....	59
2.2.2.7.2 Desventajas.....	61
2.3 Modelo de Capas de NRSC-5.....	62
2.4 IBOC FM.....	64
2.4.1 Ancho de Banda.....	67
2.4.2 Tolerancia de Sincronización.....	67
2.4.2.1 Retraso de la Diversidad Analógica.....	68
2.4.2.2 Precisión y Estabilidad en Tiempo y Espacio.....	68
2.4.3 Límites del espectro de FM.....	68
2.4.3.1 Límites del Espectro para el modo Híbrido.....	68
2.4.3.2 Límites del Espectro para el modo Totalmente Digital.....	69
2.4.4 Canales Lógicos.....	70
2.4.5 Codificación y Compresión de Audio.....	72
2.4.6 Codificación de Canal.....	73
2.4.7 Esquema General.....	74
CAPITULO 3: RECEPTOR HÍBRIDO.....	75
3.1 Introducción.....	75
3.2 Componentes del Receptor.....	76
3.2.1 Amplificador de RF.....	77
3.2.2 Oscilador Local Sintonizable.....	77

3.2.3 Filtro Pasa-Banda y CAG.....	77
3.2.4 Conversor Análogo-Digital.....	78
3.2.5 Subconversor Digital.....	79
3.2.6 Filtro Pasa-Banda.....	80
3.2.7 Transformada Rápida de Fourier.....	80
3.2.8 Demodulador de Subportadoras.....	80
3.2.9 Control de Recepción.....	82
3.2.10 Des-Entrelazado.....	83
3.2.11 Decodificador Convolutivo.....	83
3.2.12 Descriptora.....	87
3.2.13 Procesador de Tramas.....	88
3.2.14 Desmultiplexor.....	89
3.2.15 Decodificador de Audio.....	89
3.2.16 Mezclador.....	90
3.3 Otros Modelos de Receptor IBOC.....	92
3.4 Desafíos para los Receptores IBOC.....	93
3.4.1 Tuning.....	93
3.4.2 Ruido.....	94
3.5 Futuro para los receptores IBOC.....	95
3.5.1 Receptor Portátil a Batería.....	95
3.5.2 Receptores con Imágenes.....	95
3.5.3 Radio por Demanda.....	96
3.5.4 Desarrollo de los Organismos de Radiodifusión.....	97
3.6 Comparación entre el modo Híbrido con el Modo Totalmente Digital.....	97
CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99

4.1 Conclusiones.....	99
4.2 Recomendaciones.....	102
REFERENCIAS.....	103
ANEXOS.....	104
ANEXO A NRSC-5-B.....	
ANEXO B AUDIO TRANSPORT.....	105
ANEXO C ADVANCED APPLICATION SERVICES TRANSPORT.....	153
ANEXO D A METHOD FOR MEASURING HYBRID FM IBOC SIGNALS ON TRANSMISSION SYSTEMS WITH INDEPENDENT ANALOG AND DIGITAL SIGNAL TRANSMISSION LINES.....	181
	208

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1.1	Función de Muestreo.....	03
Figura 1.2	Señal Muestreada.....	04
Figura 1.3	Ejemplo de Cuantificación.....	04
Figura 1.4	Modulación OFDM.....	09
Figura 1.5	Generador de Señal DAB.....	12
Figura 1.6	Receptor de Señal DAB.....	12
Figura 1.7	Diagrama Decodificador MOT.....	15
Figura 1.8	Esquema DAB ITS.....	20
Figura 1.9	Diagrama de DAB ITS.....	20
Figura 1.10	Efecto Multitrayecto.....	21
Figura 1.11	Rango de Frecuencias DRM.....	25
Figura 1.12	Señal Ionosférica de DRM.....	26
Figura 1.13	Diagrama Básico de una Radio por Internet.....	38

CAPITULO 2

Figura 2.1	Transmisor de Radio Digital IBOC.....	41
Figura 2.2	Conjunto de Subportadoras que conforman OFDM	43
Figura 2.3	Comparación de COFDM con Sistema Digital.....	46
Figura 2.4	Modelo Simplificado de COFDM.....	47
Figura 2.5	Señal de salida en COFDM.....	48
Figura 2.6	Receptor para COFDM.....	49
Figura 2.7	Ancho de Banda del Canal y el de COFDM.....	53
Figura 2.8	Ancho de Banda COFDM relacionado a IFFT.....	54
Figura 2.9	Intervalo de Guarda.....	55
Figura 2.10	Caso 1 del VER en COFDM.....	58
Figura 2.11	Caso 2 del VER en COFDM.....	58
Figura 2.12	Modelo de capas del estándar IBOC.....	63
Figura 2.13	Espectro del modo Híbrido.....	65
Figura 2.14	Espectro del modo Híbrido Extendido.....	65
Figura 2.15	Espectro del modo Totalmente Digital.....	66
Figura 2.16	Espectro de Potencia del modo Híbrido.....	69
Figura 2.17	Espectro de Potencia del modo Totalmente Digital	70
Figura 2.18	Vista General del Funcionamiento de IBOC.....	74

CAPITULO 3

Figura 3.1	Diagrama de bloques Receptor Híbrido IBOC.....	76
Figura 3.2	Ejemplo de Aliasing.....	79
Figura 3.3	Constelación QPSK para FM IBOC.....	81
Figura 3.4	Ejemplo de Decodificador.....	85
Figura 3.5	Ejemplo del Proceso del Diagrama de Enrejado....	85
Figura 3.6	Ejemplo del Proceso de Decisión.....	87
Figura 3.7	Ejemplo de los Datos en paralelo en FM IBOC.....	87
Figura 3.8	Diseño de un receptor por parte de Texas Instr...	92
Figura 3.9	Diseño de un receptor para Automóvil.....	93

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1

Tabla 1.1	Modos de Transmisión DAB.....	09
Tabla 1.2	Modos de Transmisión DRM.....	32
Tabla 1.3	Condiciones de los Modos.....	32
Tabla 1.4	Tiempo de Ocupación y Ancho de Banda.....	33
Tabla 1.5	Modulación y Nivel de Protección.....	34
Tabla 1.6	Tiempos de Ocupación para A y B con 64 QAM....	34
Tabla 1.7	Tiempos de Ocupación para A y B con 16 QAM....	35

CAPITULO 2

Tabla 2.1	Ancho de Intervalos.....	56
Tabla 2.2	Servicios que IBOC presta.....	64
Tabla 2.3	Niveles dBc/KHz según la frecuencia en Híbrido....	69
Tabla 2.4	Niveles dBc/KHz según la frecuencia en T. Digital..	70
Tabla 2.5	Velocidad Teórica para cada canal Primario.....	71
Tabla 2.6	Velocidad Teórica para cada canal Secundario.....	72

CAPITULO 3

Tabla 3.1	Numero de Portadora según el Modo de IBOC.....	97
-----------	--	----

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio de los componentes de un receptor híbrido para el estándar IBOC a más de aportar alguna información extra a la ya existente.

En el primer capítulo se habla de lo que es la Radio Digital, así de como es su funcionamiento, y los estándares que se establecen para la aplicación de la misma, también se habla brevemente de la Radio por Internet que también está en la actualidad funcionando; y por último se estima las ventajas de la Radio Digital.

En el segundo capítulo la temática que se trata es sobre OFDM y COFDM, en lo que tiene que ver en como se establecen las subportadoras, así como los anchos de banda requeridos; también en este capítulo se habla un poco del estándar IBOC y algunas de sus características, pero enfocadas a FM.

El tercer capítulo nos habla de los diferentes elementos que conforman un receptor híbrido IBOC para FM, y se realiza una explicación de cada uno de los mismos, así como también los avances que se presentarían en el futuro para los receptores, así como también los problemas que tienen los actuales.

Por último las conclusiones que se tienen del trabajo así como las recomendaciones que hacen se encuentran en el último capítulo.

PRESENTACIÓN

En la actualidad todos los sistemas de telecomunicaciones se basan en sistemas digitales. Por esto todos los sistemas tradicionales como televisión y radiodifusión están migrando a nuevas tecnologías que les permitan adaptarse a esta tendencia. Los beneficios de esta migración son totalmente claros. Comenzando por la mejora de la calidad de las transmisiones, además del aumento de los servicios que se pueden brindar sobre el mismo ancho de banda.

Es por esto que en nuestro país se debe empezar ya hablar de un estándar para la Radio Digital, y el estándar IBOC es el más factible para funcionar aquí. Y el tema abordado en este trabajo nos da una mejor idea de porque esto se debe cumplir.

CAPITULO 1

RADIO DIGITAL

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la tecnología ha tenido un desarrollo bastante amplio, y se suma el hecho de que la digitalización es el paso que sigue en esta evolución, pues lo que se quiere lograr es la transición de sistemas analógicos a sistemas digitales, esta sustitución de tecnologías recibe el nombre de “apagón analógico”, en la mayoría de países en el mundo ya se ha dado esta transición, pero en países de Sudamérica aun no se da un avance en este sentido.

En el caso de Ecuador tarde o temprano se tiene que empezar a dar este cambio y puesto que se tiene más radiodifusoras que estaciones de televisión el proceso de digitalización representa un mayor tiempo y costo, por lo que ya se empieza el estudio de que estándar de Radio Digital puede beneficiar este proceso, creándose una preferencia por el estándar americano IBOC (In-Band On-Channel), la razón de esta preferencia es el hecho de que con este estándar se puede seguir funcionando o seguir radiando ondas analógicas a la par de ondas digitales dando un compás de espera para la adquisición de equipos que sean totalmente digitales.

Los equipos para la recepción de las señales digitales son diferentes, y más aun cuando deben tener la posibilidad de recibir a la par señales analógicas y hacer las transiciones entre ambas posibilidades al ir moviendo el dial, ya que estos serían manejados por usuarios comunes que están acostumbrados a la impercepción de los cambios, es por eso que el presente trabajo lo que busca es hacer un estudio de los componentes de las diferentes etapas que conforman al receptor y los procesos que presenta el mismo para la captación e interpretación de la información tanto digital como analógica, según el estándar IBOC y en una

última parte hacer un análisis de desempeño de funcionamiento de un receptor híbrido, con uno que sea totalmente digital.

1.2 LA RADIO DIGITAL

Es conocido que las ondas de radio AM como las de FM sufren de alteraciones en el transcurso de su viaje hasta llegar al receptor, a pesar de las técnicas que se han implementado para tener un rendimiento mayor, no se ha tenido un mayor éxito, hasta que en los últimos años nació un nuevo concepto llamado radiodifusión digital.

La radiodifusión digital o radio digital es la nueva forma en el transporte de las señales, también conocida como DAB por sus siglas en inglés (Digital Audio Broadcasting), que en concepto básico produce un cambio de señales analógicas por digitales, es decir que la información a transmitir es digital, y a esto se suma el hecho de que también la modulación es del tipo digital.

Al igual que en su “prima” la televisión digital se obtiene una robustez en la señal y una cobertura mayor de la que existe actualmente con ondas analógicas, eso sumado al hecho de que hace una reducción de recursos y una mejor utilización del espectro radioeléctrico la convierte en la tecnología del futuro.

Al tener modulación digital, la señal a transmitir solo necesita el 10% de la potencia de una transmisión analógica, es por esto que con la tecnología de radio digital se puede asignar una sola banda a una emisora para que funcione a nivel nacional.

La radio digital presenta un inconveniente y es el mismo que tiene la televisión digital, el hecho de que no se va a tener una compatibilidad mundial, y esto a causa de que se fabricaron varios estándares que se diferencian en mucho, lo que se apreciará un poco más adelante.

1.2.1 COMO FUNCIONA LA RADIO DIGITAL?

En la actualidad los datos que se transmiten por radio son de características analógicas, por lo cual llevan infinita información a través del transcurso del tiempo; para la radio digital en cambio se trabaja con una serie finita de datos binarios (0 o 1) en el tiempo, lo que da como resultado que se hable de bits por segundo, entonces las señales analógicas deben seguir un proceso para ser adaptadas a la transmisión digital, que implica:

- **Muestreo:** Tomando un determinado número de muestras de la señal en un cierto tiempo, el conjunto infinito de valores que se tiene en una señal analógica, se convierte en conjunto limitado de valores en el dominio digital, volviendo manejable a la señal, como se muestra en la figura 1.2; el muestreo es equivalente matemáticamente, a multiplicar la señal analógica (continua) por la señal de muestreo (discreta) indicada en la figura 1.1.

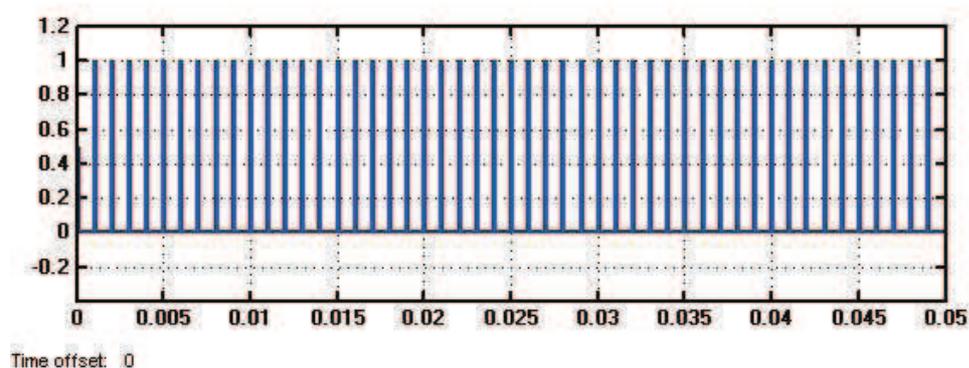


Figura 1.1 Función de Muestreo

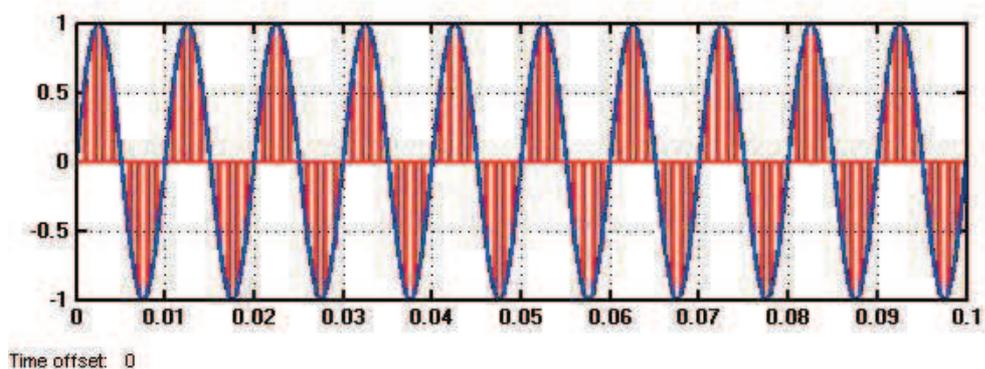


Figura 1.2 Señal Muestreada

- **Cuantificación.-** Las muestras que se tomaron nos da una señal discretizada en tiempo, lo siguiente es la discretización en amplitud, a este proceso se lo conoce como la cuantificación, y consiste en dividir la amplitud máxima de la señal en m elementos de tamaño a , un ejemplo se muestra en la figura 1.3.

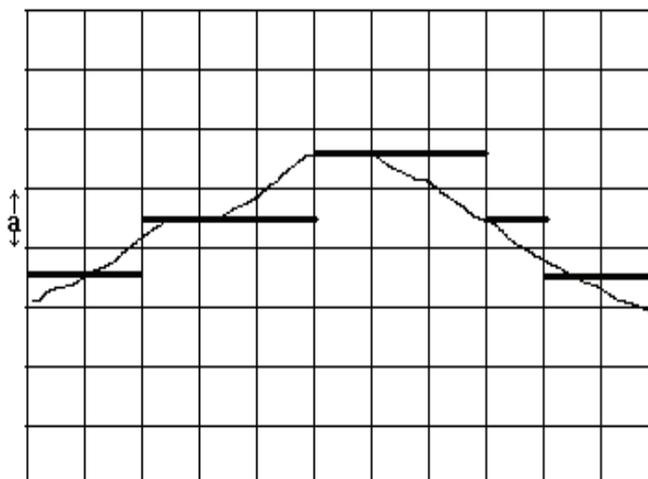


Figura 1.3 Ejemplo de cuantificación

- **Codificación.-** A cada uno de estos elementos se le asigna un número expresado en binario, dando en si un código para poder entender de qué

nivel de amplitud se está hablando, además de si este es positivo o negativo.

- **Compresión.-** Después de la codificación la señal que se obtiene es de difícil transmisión ya que contiene gran información y se necesitaría una tasa bastante alta, lo que dificultaría el proceso; es por eso que se debe comprimir la señal, eliminando la redundancia de información inútil, disminuyendo la tasa de transmisión y haciendo eficiente el proceso.

Lo siguiente en este proceso es la protección de la señal contra la interferencia y el ruido, y la inclusión de redundancia para el control de errores, todo esto de una forma sencilla para la comprensión del receptor.

Al final se procede a la modulación digital, y esta es de dependencia de cada uno de los tipos de normas que existen en los estándares que son aplicables a la radio digital, para después ser irradiados hacia los usuarios.

1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIO DIGITAL

La primera característica que presenta es la mejora notoria en la calidad del sonido, se habla de sonido digital, y se tiene señales más fuertes y más claras que las de una radiodifusión analógica, así como también la posibilidad de que en una misma banda se puedan tener varios canales de sonido.

Como se dijo la información que se transmite es digital y es esto lo que proporciona otra característica, que junto al sonido también se pueda enviar datos, que pueden ser relacionados a la programación de la emisora, como el nombre del programa, de la canción que se está escuchando, así como el artista que la interpreta, o los mensajes de los auspiciantes; o pueden ser independiente

a la programación, proporcionando servicios suplementarios a los radioescuchas, estos serían información del tráfico vehicular, o de el estado del clima. A todos estos datos se le suma la posibilidad de ser encriptados para que solo receptores con capacidad de desencriptar los puedan entender y se lo conoce como acceso condicional, y es básicamente un control de autorización que se les puede ofrecer a los usuarios en la red.

La capacidad de almacenamiento en el receptor es una característica que la radio digital brinda, y lo que significa es el poder grabar programas que no se pueden escuchar en vivo, y poderlos después reproducir.

La disponibilidad del servicio la cubre con la utilización de la diversidad espacial, temporal y de frecuencia de la señal, con lo que se logra hasta un 99% de tiempo de funcionamiento.

Una característica que no se puede dejar de mencionar es la eficiencia y eficacia espectral que nos proporciona, dando como resultado que a nivel de un país se pueda trabajar con una frecuencia única para cada emisora, se mejore el sonido y se tenga espacio en la banda para agregar información y servicios; además de eliminar la interferencia cocanal¹, por la disminución de repetidoras.

1.3 ESTANDARES DE LA RADIO DIGITAL

Para la utilización de la radio digital se han propuesto y puesto en funcionamiento los siguientes estándares:

- DAB (Digital Audio Broadcasting)

¹ Es la interferencia que se proporcionan mutuamente dos transmisores que solapan su zona de cobertura y que se encuentran transmitiendo en la misma frecuencia, y que no se encuentran alejados a mayor distancia

- DRM (Digital Radio Mondiale)
- IBOC (In Band On Channel)

Este último se explicará de una forma más extensiva en el capítulo 2, para tener una referencia y crear un conocimiento se hará una breve explicación de los otros 2 a continuación.

1.3.1 ESTÁNDAR DAB (DIGITAL AUDIO BROADCASTING)

El sistema se generó a partir del proyecto Eureka 147, el cual desarrolló el sistema de radiodifusión de audio digital denominado DAB, y es por eso que también se lo conoce con este nombre.

Digital Audio Broadcasting son las siglas del sistema de radio digital multiservicio de alta calidad que en un futuro permitirá ofrecer un servicio total en formato digital para la radiodifusión. No solamente se transmitirá audio digitalizado, también codificaciones de vídeo, gráficos, páginas HTML, datos, radio-texto, servicio de buscapersonas, etc. Mediante una pantalla gráfica se podrá visualizar toda esta información e incluso en combinación con otros sistemas podrá establecerse una interactividad en tiempo real.

Funciona tanto vía terrestre (T-DAB) como vía satélite (S-DAB) o por cable, el receptor detecta automáticamente el modo de funcionamiento.

El sistema DAB es eficiente en el uso del espectro y la potencia puesto que usa un único bloque de transmisión de baja potencia, la cobertura puede ser local, regional, nacional o supranacional. Además no tendremos las interferencias tan comunes como en AM y FM al superar reflexiones por obstáculos dado que el sistema de codificación distribuye la información en un amplio número de frecuencias que más tarde explicaremos.

Después de codificar y comprimir (método MUSICAM), la información de una señal de audio estéreo se puede transmitir a unos 192 Kbps. Dado que la señal DAB es capaz de transportar 1,2 Mbps de información se impone el multiplexar las señales comprimidas de varios MUSICAM (6 programas). Igualmente existe capacidad de transmitir otra información de servicio como puede ser el estado de carreteras, partes meteorológicos o emergencias. El resultado de toda la información empaquetada se llama "DAB ensemble" y ofrece lo que se conoce como "Multiplex" que permite seleccionar la información deseada de una serie de servicios que se ofrece, se puede conseguir un servicio a la carta.

1.3.1.1 Codificación / Transmisión

La salida del multiplexor "DAB ensemble" también se llama ETI (Ensemble Transport Interface). Este ETI es un interface de 2 Mbps.

En la transmisión analógica de audio la señal que llega al receptor en un canal multicamino se altera por diversos efectos físicos. Por ejemplo las diferencias de retardos provocados por la propagación multicamino producen interferencias entre símbolos transmitidos sucesivamente. Adicionalmente, en los receptores en movimiento se producen cambios de frecuencia y fase (efecto Doppler).

Para compensar estos problemas a la transmisión y otros se desarrolla la modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex). El principio de la modulación ortogonal se basa en que los máximos de cada portadora se hacen coincidir con los ceros de las otras, como se puede apreciar en la figura 1.4.

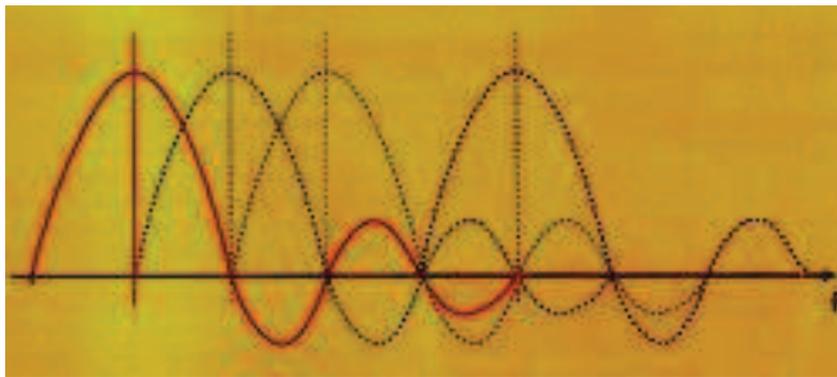


Figura 1.4 Modulación OFDM

La trama ETI se distribuye en 1536 portadoras (en modo 1), que cada una de ellas con modulación QPSK a la correspondiente baja velocidad. Las portadoras están colocadas de forma que una no influya en las demás. Como resultado el periodo de cada símbolo transmitido es considerablemente superior a cualquier retardo de señal. Existen distintos modos de transmisión que quedan reflejados en la tabla 1.1.

TRANSMISSION MODE				
System Parameter	I	II	III	IV
Frame duration	96 ms	24 ms	24 ms	48 ms
Null symbol duration	1297 us	324 us	168 us	648 us
Guard interval duration	246 us	62 us	31 us	123 us
Nominal frequency range	< 375 MHz	< 1.5 GHz	< 3 GHz	< 1.5 GHz
Useful symbol duration	1 ms	250 us	125 us	500 us
Total symbol duration	1246 us	312 us	156 us	623 us
No. of radiated carriers	1536	384	192	768

Tabla 1.1 Modos de transmisión

Técnicamente el sistema DAB puede ser utilizado en la banda de 30MHz y los 3 GHz. Este amplio rango de frecuencias incluye las bandas VHF I, II y III, las bandas UHF IV y V y la banda-L (que es la que está alrededor de los 1.5 GHz).

Dado que las condiciones de propagación varían con la frecuencia, se definen cuatro modos de transmisión en DAB. Estos modos proporcionan una buena relación entre la distancia de separación del transmisor y la degradación por el efecto Doppler y son detectados automáticamente por el receptor siendo totalmente transparentes al usuario.

Expliquemos estos modos:

- El Mode I está indicado para operaciones SFN a frecuencias por debajo de los 300 MHz.
- El Mode II fue diseñado para servicios locales y regionales con frecuencias por debajo de los 1.5 GHz.
- El Mode III está disponible para transmisión vía satélite por debajo de los 3 GHz.
- El Mode IV permite a los transmisores proveer una óptima cobertura en áreas extensas operando en Banda-L. Sus parámetros están entre el Mode I y Mode II.

En cuanto a la señal se introduce un intervalo de guarda para eliminar interferencias entre símbolos adyacentes. El receptor entonces encuentra una señal libre de interferencias. Además, como la información se distribuye entre varias portadoras, sólo algunas partes de la información se destruirán si existen desvanecimientos selectivos de frecuencia, mientras que en métodos de portadora única toda la información se perdería. Esta información perdida se podría recuperar por la información recibida con la ayuda de los métodos de corrección de errores.

Como se ha dicho anteriormente, una ventaja adicional de la señal COFDM es que se puede transmitir en redes de una sola frecuencia un número determinado de programas. Esto es posible porque el máximo de retardo de la señal resultante de la distancia del transmisor es más corto que el intervalo de guarda.

Por ejemplo, para transmisión en modo 1 la distancia máxima entre transmisores es de 90 Km; los receptores recibirán las señales de otros transmisores como ecos inocuos y por tanto no provocarán interferencias.

1.3.1.1.1 Transmisores y receptores de DAB

Teniendo presente que la señal modulada en COFDM consiste en un gran número de portadoras espaciadas por intervalos de guarda y a su vez moduladas en QPSK o QAM, vista en un osciloscopio la señal COFDM es muy parecida a una señal de ruido con una gran amplitud de pico resultado de la suma de las portadoras individuales. La relación entre la potencia de pico y la potencia media de la señal está, por ejemplo, entre 8 a 10 dB para DAB.

El amplificador del transmisor debe ser capaz de transmitir una potencia de pico con una extremada linealidad, si no fuera así aparecerán productos de intermodulación (P.I.) dentro y fuera de la señal DAB. Los P.I. dentro de banda degradarían la relación Señal / Ruido y fuera provocarían interferencias con otros servicios.

Veamos el diagrama descriptivo del proceso técnico de la generación en la figura 1.5 y recepción de la señal DAB en la figura 1.6.

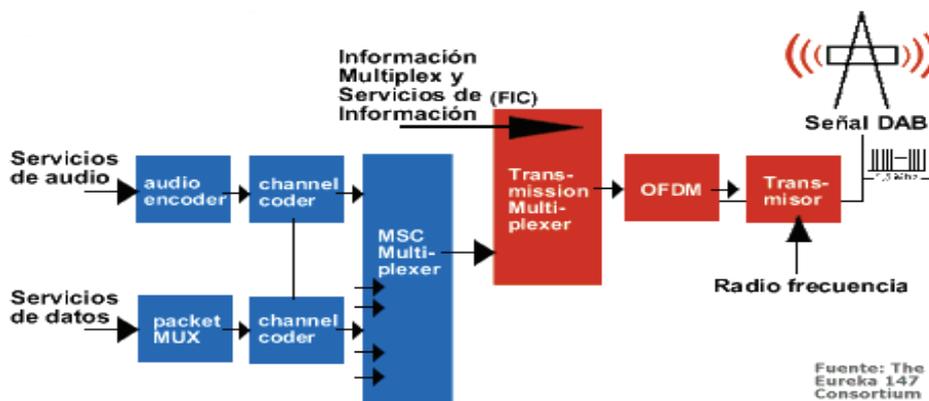


Figura 1.5 Generación de la señal

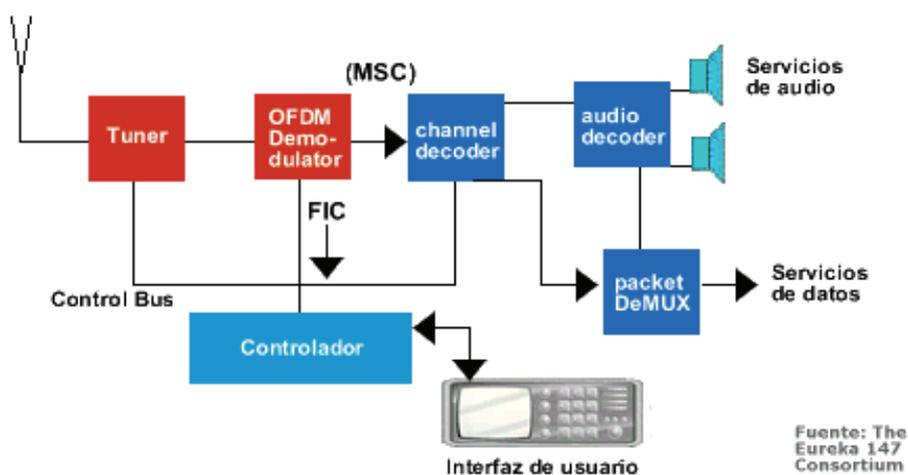


Figura 1.6 Recepción de la señal

1.3.1.2 Protocolo MOT (RO MOT)

Rules of Operation for the Multimedia Object Transfer Protocol

MOT es un protocolo de transporte para la transmisión de contenido multimedia en canales de datos DAB a varios tipos de receptores con capacidades multimedia. El propósito es transmitir objetos de longitud finita de una fuente de información (un proveedor de contenidos o servicios) a un destino (un terminal).

Las ventajas del protocolo MOT son:

- No aplica restricciones al contenido a ser transmitido.
- Tanto la segmentación como la transmisión de paquetes es transparente a la aplicación del usuario.
- El estándar MOT existente puede ser ampliado de manera que sea compatible con el anterior.

Hay que señalar que el protocolo MOT se ocupa del nivel de transporte y no del nivel de aplicación, aunque contiene información básica de la administración de objetos y de la presentación del contenido multimedia. Tampoco se ocupa del direccionamiento de los receptores ni del acceso condicional (CA).

El tamaño de los objetos que pueden ser transmitidos usando MOT está limitado por el tamaño máximo del cuerpo cuya limitación real es igual a 255 MB.

El tamaño de cualquier información que pudiera ser llevada en la cabecera está limitada por el tamaño del campo Tamaño-Cabecera (Header-Size) que va desde 1 Byte a 8 Kbytes.

Los métodos de transmisión DAB que puede utilizarse para transportar objetos MOT son el modo paquete y el PAD (Datos asociados al programa).

Ahora vamos a describir las diferentes operaciones necesarias para transmitir un archivo o un conjunto de archivos (por ejemplo un directorio) en formato MOT sobre DAB.

- El primer paso consiste en identificar el archivo y crear la cabecera MOT que contendrá tanto la identificación pura del fichero como la información adicional. El fichero o archivo está referido como el cuerpo MOT. Así pues

obtenemos un objeto MOT como la cabecera más el cuerpo y ya está listo para la segmentación.

- El segundo paso consiste en la segmentación. La estructura de datos que se usará por los mecanismos de transporte son los grupos de datos MSC (Canal de Servicio Principal). La cabecera MOT y el cuerpo son transportados en diferentes tipos de grupos MSC por lo que el cuerpo MOT será separado en segmentos de igual tamaño y el último tendrá los bytes restantes. El tamaño de los segmentos de la cabecera y el tamaño de los segmentos del cuerpo son independientes. Las consideraciones que se toman para realizar la segmentación son: Proveer robustez a la transmisión, minimizar la cabecera y facilitar la administración de los segmentos en el decodificador de datos DAB. Este proceso se considera dentro del nivel de transporte. Después, en el nivel de red, se formarán paquetes de dos maneras diferentes: modo paquete (Packet Mode) o X-PAD, es decir, en grupos de datos X-PAD.

Los parámetros de la cabecera:

- La cabecera básica (cualquier objeto debe tenerlos como mínimo) contiene importante información sobre el cuerpo, así pues los campos Tipo-Contenido y Sub-TipoContenido especifican el tipo exacto de información que lleva el cuerpo (Texto, Imagen, Audio, Vídeo, Transporte MOT, Sistema, Datos generales o Tabla propietaria); la cabecera básica se completa con los campos Tamaño-Cuerpo y Tamaño-Cabecera.
- La cabecera de extensión consiste en una serie de parámetros ParamId, indicación del tamaño (Data-FieldLength) y el valor del campo (Data-Field). De los más significativos destacan el Start-Validity y el Expire-Time cuyos valores indican al decodificador MOT a partir de qué momento podrá ser

presentado un objeto MOT o invalidado respectivamente. Con el parámetro TriggerTime se especifica en qué momento exacto se debe mostrar el objeto después de la recepción.

Cabe destacar que no está permitido transmitir simultáneamente dos versiones del mismo objeto. Hay sólo una versión de un objeto identificado en Nombre-Contenido al mismo tiempo, de hecho, una curiosidad relacionada está en la etiqueta Nombre-Contenido (este parámetro es obligatorio pero no está en la cabecera básica) que identifica a todos los objetos MOT, si un objeto es recibido con el mismo Nombre-Contenido, reemplaza al antiguo.

El modelo de un decodificador MOT y sus interfaces se muestra en la figura 1.7

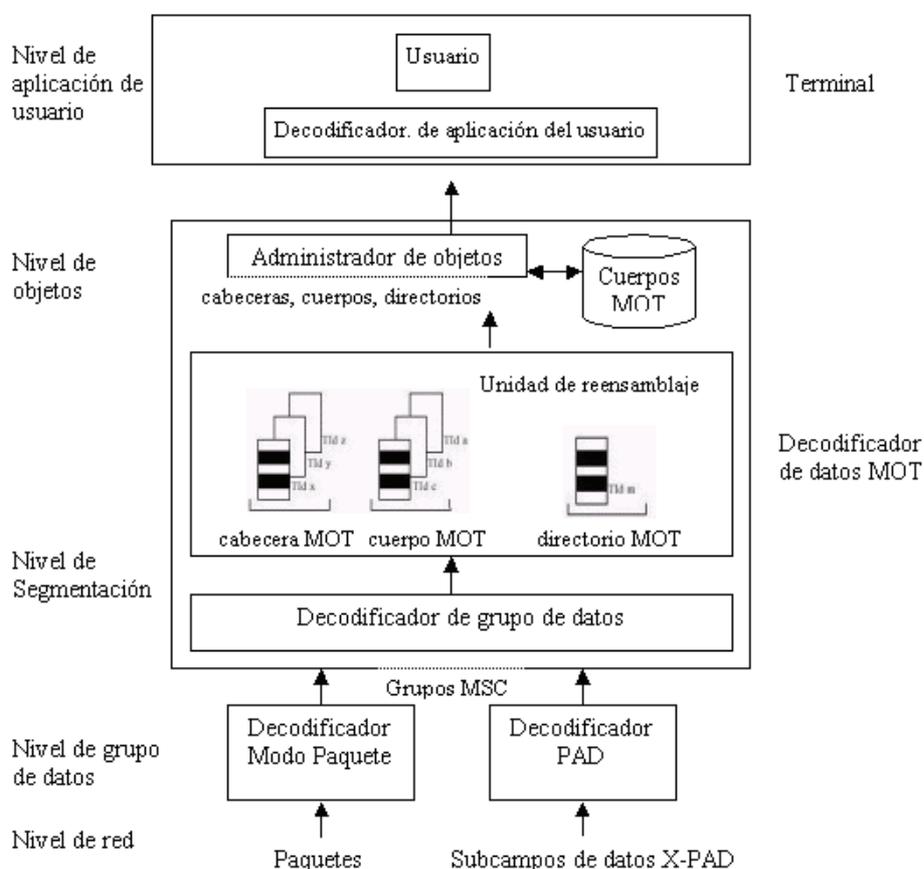


Figura 1.7 Diagrama de un decodificador MOT

Nivel de red En el modo paquete, la dirección del paquete debe usarse para identificar el servicio en particular dentro del subcanal. La validación de cada paquete se verifica evaluando el CRC (Suma de comprobación) del paquete. En el modo X-PAD, el tamaño del grupo de datos MSC viene del indicador Tamaño (Length) del grupo de datos inmediatamente precedido del comienzo del grupo de datos MOT.

Nivel de grupo de datos La validación de cada grupo de datos MSC se verifica evaluando su CRC. El campo de datos del grupo MSC contiene un segmento completo. El correspondiente número de segmento y el TransportId los aporta la cabecera de sesión del grupo de datos.

Nivel de segmentación y nivel de objetos Un decodificador de datos MOT está formado por dos partes: la unidad de re-ensamblaje que re-ensambla cabeceras, cuerpos y directorios MOT; y el administrador de objetos que controla a la unidad de re-ensamblaje, guardando los objetos recibidos y maneja las peticiones de la aplicación del usuario. Es necesario explicar los tipos de grupos: tipo 3 son de cabecera MOT, tipo 4 son los cuerpos MOT, tipo 5 son un cuerpo MOT y los parámetros CA, tipo 6 son directorios MOT y tipo 1 son mensajes CA. CA es el Acceso Condicional, es decir, servicios de pago.

Se describen, además, dos modos de operación para el decodificador: el modo cabecera MOT en donde son procesados tanto cabeceras como cuerpos, y el modo directorio MOT que procesa directorios y cuerpos. Si un flujo de datos contiene tanto cabeceras como directorios, el decodificador deberá trabajar en los dos modos. Tanto la unidad de re-ensamblaje como el administrador de objetos están en el mismo modo.

La unidad de re-ensamblaje continuamente evalúa los grupos de datos que llegan. Debe estar preparada para que muchos objetos se transmitan aplicando intervalos, por lo tanto se codifican casi en paralelo.

Esta unidad mantiene una lista con los TransportId de las cabeceras MOT que se envían al administrador de objetos para que sepa que el resto de cabeceras con el mismo TransportId deben ser descartadas. Si el administrador de objetos MOT quita una cabecera MOT de su memoria se lo dice a la unidad de reensamblaje. Entonces ésta eliminará este TransportId de su lista y continuará aceptando cabeceras MOT con sus TransportId.

El modo directorio MOT es similar al anterior. El re-ensamblaje de cuerpos MOT es independiente del modo en que esté la unidad de re-ensamblaje. Si el administrador pide un cuerpo, la unidad obtiene una petición, indicando que los cuerpos están siendo re-ensamblados. La petición incluirá el TransportId y el tamaño de los cuerpos y quizá también el Tamaño-Segmento (si se da en un directorio MOT). La unidad de re-ensamblaje puede entonces asignar memoria para los cuerpos requeridos.

La unidad de administración almacena objetos y permite que la aplicación los pida, por ejemplo, a través de su Nombre-Contenido o por la etiqueta MOT. Intenta reducir el tiempo de acceso e incluye algunas estrategias de caché. Evalúa los parámetros MOT y hace que estos parámetros estén disponibles a la aplicación del usuario. Si un objeto expira debido al parámetro Expire-Time, se quita de la memoria y se advierte a la aplicación de esto.

Nivel de aplicación El nivel de aplicación pide objetos al decodificador MOT y los presenta. La especificación del nivel de aplicación de usuario no es parte de MOT.

1.3.1.2.1 Mecanismos de transmisión

Se definen los Mecanismos de transmisión para permitir al receptor recuperar grupos de datos perdidos y objetos para asegurar la recepción correcta, para ello se usan uno o más de los siguientes métodos: repetición en el nivel de grupo de datos, repetición en el nivel de objetos, retransmisión de objetos e inserción de cabeceras MOT.

Generalmente se utiliza un mecanismo para permitir la transmisión / recepción de objetos en paralelo, este mecanismo es el intercalado de objetos en el flujo MOT. Esta transmisión puede ser cíclica o no cíclica.

La transmisión no cíclica se usa cuando un objeto se necesita sólo durante un periodo de tiempo. El problema surge cuando se realiza esta transmisión con repeticiones y un receptor sintoniza después del inicio de esta transmisión ya que no podrá recibir los datos al no tener el inicio.

La transmisión cíclica evita el problema anterior ya que está orientada a las aplicaciones de usuario que necesitan tener objetos disponibles en el terminal durante mucho tiempo. Cada objeto se transmite muchas veces de manera cíclica con un periodo entre cada transmisión. Cuando se solicita un objeto MOT que no está en memoria, se espera al siguiente ciclo. Incluso dentro de un ciclo también se puede repetir el mismo objeto.

Los diferentes objetos en un flujo cíclico MOT son identificados por su Nombre-Contenido. Se recomienda transmitir los objetos más importantes con más frecuencia que el resto para mejorar el acceso al servicio.

Repetición en el nivel de grupo de datos MSC: Los grupos de datos MSC contienen segmentos MOT que son transmitidos más de una vez con el mismo contenido de datos.

Repetición en el nivel de objetos: Es más fiable que la anterior. El objeto se transmite más de una vez con el mismo TransportId, la misma segmentación y el mismo contenido en cabecera y cuerpo.

Retransmisión de objetos: Un objeto conserva el mismo Nombre-Contenido en todas las retransmisiones asignando un nuevo TransportId si cambia algún parámetro.

Inserción de cabeceras MOT: Si hacemos transmisiones adicionales de la cabecera MOT junto a las repeticiones permitimos a los decodificadores que pierdan la cabecera y la parte inicial de un objeto, empezar a recoger las subsecuentes partes del objeto.

1.3.1.3 DAB ITS

Merece la pena destacar un proyecto que se está desarrollando basado en servicios interactivos multimedia para terminales móviles, este proyecto utiliza una combinación de DAB, GSM y GPS para establecer la interactividad y el comité que lo conduce y promueve es el ERTICO. Este comité tiene como objetivos promover el desarrollo e implementación de servicios ITS (Intelligent Transport Systems – Europe) para DAB por lo que surge un nuevo concepto llamado Aplicaciones DAB ITS que consisten en ofrecer información bajo demanda de todo lo relacionado con el tráfico, rutas a seguir, posicionamiento, meteorología, etc., un esquema sería el mostrado en la figura 1.8.

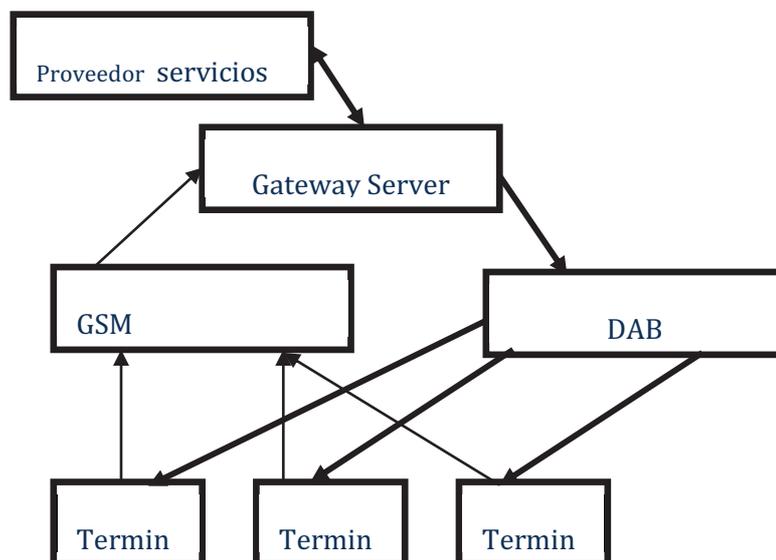


Figura 1.8 Esquema de DAB ITS

Más concretamente podemos establecer el siguiente esquema-resumen, en la figura 1.9, donde se pone de manifiesto todas las aplicaciones DAB ITS .

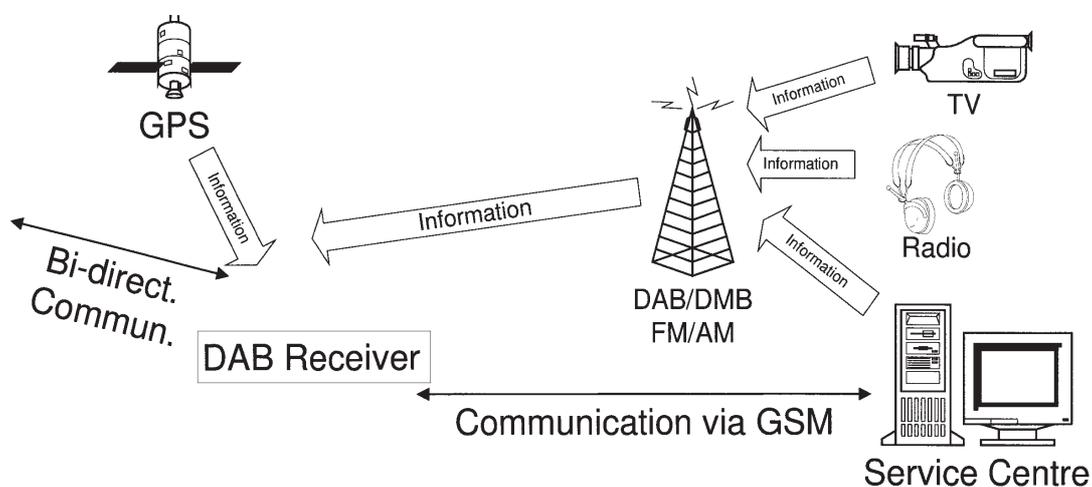


Figura 1.9 Diagrama de DAB ITS

Gracias a la tecnología GSM podemos establecer la interactividad entre el emisor y el centro de servicios que se encarga de proporcionarnos todo aquello que demandamos.

Así pues, se puede hacer una navegación dinámica con un mapa digital procedente del satélite o de un CD-ROM, ofrecer servicios de emergencia, información del tráfico, guía de rutas, diagnosis remota del vehículo, etc.

1.3.1.4 Ventajas de DAB

Las características y ventajas que destacan en el sistema DAB son:

1.3.1.4.1 Mejoras en la recepción

Mediante el sistema DAB se superan los efectos que la propagación multitrayecto (debida a las reflexiones en edificios, montañas,...) produce en los receptores estacionarios, portátiles y móviles y se protege la información frente a interferencias y perturbaciones (figura 1.10). Estas mejoras se logran mediante la transmisión COFDM (lo veremos en el siguiente punto) que utiliza un sistema de codificación para distribuir la información entre un elevado número de frecuencias.

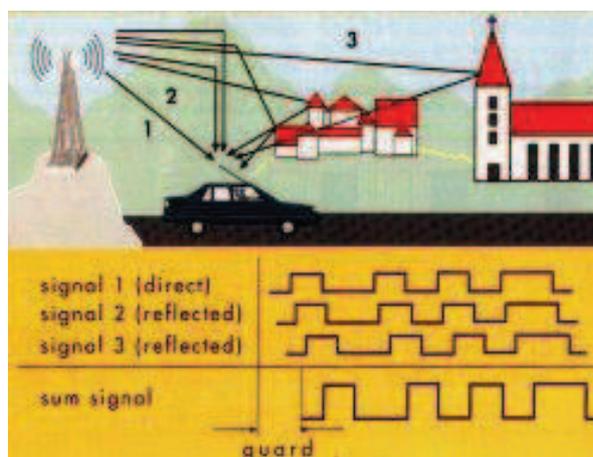


Figura 1.10 Efecto multitrayecto

1.3.1.4.2 Calidad de sonido

Es equivalente a la del disco compacto (CD). En el sistema DAB se aprovecha el efecto de enmascaramiento que se produce debido a las características psicoacústicas del oído humano, ya que no es capaz de percibir todos los sonidos presentes en un momento dado y, por lo tanto, no es necesario transmitir los sonidos que no son audibles. El sistema DAB utiliza un sistema de compresión de sonido llamado MUSICAM para eliminar la información no audible, consiguiendo así reducir la cantidad de información a transmitir.

1.3.1.4.3 Servicios de Datos

Además de la señal de audio digitalizada, se pueden transmitir otras informaciones:

El canal de información transporta la configuración del múltiplex, información de los servicios, fecha y hora, servicios de datos generales como: radio búsqueda, sistema de aviso de emergencia, información de tráfico, sistema de posicionamiento global, etc.

Los datos asociados al programa se dedican a la información directamente relacionada con los programas radiofónicos: títulos musicales, autor, texto de las canciones en varios idiomas, etc.

Los servicios adicionales son servicios que van dirigidos a un grupo reducido de usuarios, como por ejemplo: cancelación de tarjetas de crédito robadas, envío de imágenes y textos a tableros de anuncios electrónicos, etc.

Todos estos datos se reciben a través de una pantalla incorporada en el receptor.

1.3.1.4.4 Coberturas

La cobertura puede ser local, regional, nacional y supranacional. El sistema es capaz de añadir constructivamente las señales procedentes de diferentes transmisores en el mismo canal, lo que permite establecer redes de frecuencia única para cubrir un área geográfica determinada en la que es posible utilizar pequeños transmisores para cubrir las zonas de sombra dejadas por aquellos.

1.3.1.4.5 Eficiencia en la utilización del espectro y la potencia

Se utiliza un único bloque para una Red nacional, territorial o local terrenal, con transmisores de baja potencia.

1.3.1.4.6 Rango de frecuencias de transmisión

El sistema DAB está diseñado para poder funcionar en el rango de frecuencias de 30 MHz a 3.000 MHz

1.3.1.4.7 Distribución

Se puede realizar por satélite y/o por transmisiones terrenales o de cable utilizando diferentes modos que el receptor detectará automáticamente.

1.3.1.4.8 Multiplexado

De manera análoga a como se entra en un multicine donde se exhiben varias películas y el usuario selecciona una de ellas, es posible "entrar" en un múltiplex DAB y seleccionar entre varios programas de audio o servicios de datos. El sistema DAB permite multiplexar varios programas y servicios de datos para formar un bloque y ser emitidos juntos, obteniéndose la misma área de servicio para todos ellos.

1.3.1.4.9 Capacidad

Cada bloque (múltiplex) tiene una capacidad útil de aproximadamente 1,5 Mbit/s, lo que por ejemplo permite transportar 6 programas estéreo de 192 kbit/s cada uno, con su correspondiente protección, y varios servicios adicionales.

1.3.1.4.10 Flexibilidad

Los servicios pueden estructurarse y configurarse dinámicamente. El sistema puede acomodar velocidades de transmisión entre 8 y 380 kbit/s incluyendo la protección adecuada.

1.3.2 ESTÁNDAR DRM (DIGITAL RADIO MONDIALE)

DRM es un sistema creado por el consorcio del mismo nombre cuya misión fue establecer un sistema digital para las bandas de radiodifusión con modulación AM, onda larga, onda media y onda corta. Es un estándar para la radiodifusión que inicialmente operaba a frecuencias por debajo de 30 MHz, actualmente se ha ampliado hasta los 120 MHz.

En la figura 1.11 se muestra una grafica del rango de frecuencia que abarca el estándar

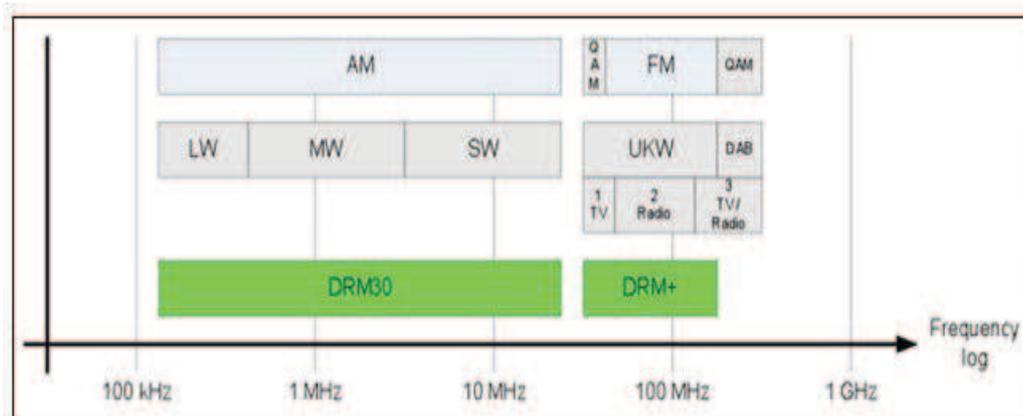


Figura 1.11 Rango de frecuencia de DRM

El sistema DRM ha sido diseñado para ser utilizado en canales de 9 ó 10 KHz o múltiplos de estos anchos de banda de canal. Además se pretende que en un futuro exista la posibilidad de utilizar canales múltiplos con 18 KHz ó 20 KHz, por ejemplo, para soportar una mejor calidad o realizar transmisiones en estéreo. Las diferencias detalladas de cómo parte el tren de bits disponibles para estos canales, utilizados para audio, protección contra errores, corrección de errores y para datos, dependen de la banda asignada (ondas kilométricas, hectométricas o decamétricas) y del uso previsto (por ejemplo, onda de superficie, onda ionosférica a corta distancia u onda ionosférica a larga distancia). En otras palabras hay compromisos modales disponibles de modo que el sistema pueda satisfacer las diversas necesidades de los organismos de radiodifusión a escala mundial.

Con este estándar se trata de recuperar para la radiodifusión de calidad una banda de frecuencias históricamente destinada a radiodifusión en AM y que no resulta apetecible a los operadores telefónicos, tampoco puede ser utilizada por los sistemas móviles razón por la cual no ha podido ser ocupada por estos poderosos operadores.

DRM emplea codificación de audio avanzada (AAC, advanced audio coding), complementada con replicación de banda espectral (SBR, spectral band replication) como su codificación digital principal. Para la codificación y modulación de canal se utiliza multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM) y modulación de amplitud en cuadratura (QAM), junto con entrelazado temporal y corrección de errores sin canal de retorno (FEC), basada en un código convolucional. La combinación de estas técnicas resulta en un sonido de más alta calidad con recepción más robusta dentro de la zona de cobertura prevista, en comparación con la calidad de la AM utilizada actualmente.

El sistema DRM, permite la utilización de redes de frecuencia única (SFN). Así mismo, el sistema funciona bien en condiciones de propagación difíciles, tales como la propagación de la onda ionosférica por múltiples trayectos a larga distancia en la banda de ondas decamétricas y también en condiciones más fáciles como la propagación de la onda de superficie en la banda de ondas hectométricas.

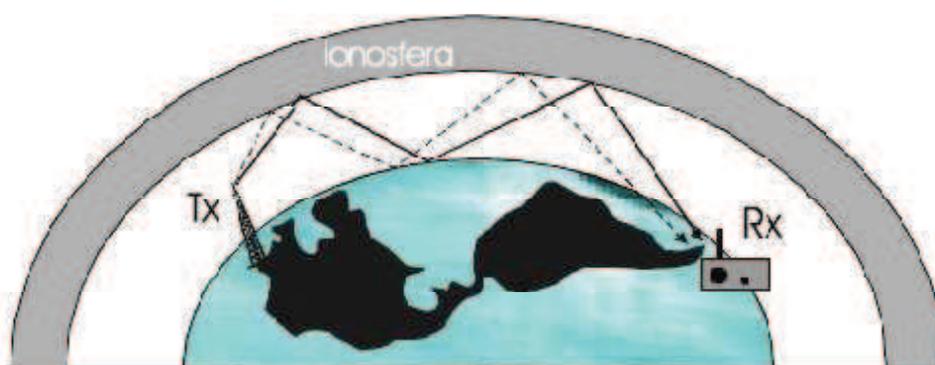


Figura 1.12 Señal en la Ionósfera

En la figura 1.12 se muestra el caso en que el receptor recibe la onda principal, dibujada en línea gruesa y una secundaria indicada en trazo discontinuo, donde la diferencia de longitud entre ambos trayectos hace que los retardos sean también diferentes.

1.3.2.1 Breve descripción de las etapas de transmisión

Los sistemas de radiodifusión digital comprenden conceptualmente distintas etapas de transmisión

- Codificación de la fuente:
 - La señal de audio se convierte en digital, normalmente con una reducción de la velocidad binaria conforme a las características de la señal. Esto se conoce como codificación de la fuente.
 - El audio codificado se multiplexa con otras señales de datos que conforman la señal a transmitir.

- Codificación del canal:
 - Los datos multiplexados se someten a la codificación del canal para incrementar su robustez y adaptarse al medio de transmisión.
 - Los datos codificados se convierten en una señal de radiofrecuencia para su transmisión

1.3.2.1.1 Codificación de Fuente

En la codificación de la fuente el sistema ofrece tres opciones

- MPEG 4 AAC + SBR: hasta 72 kbit/s estéreo
- MPEG 4 CELP+SBR: entre 4 y 20 kbit/s sólo voz
- MPEG 4 HVXC+SBR: entre 2 y 4 kbit/s sólo voz

Codificación de audio AAC (Advanced Audio Coding) para radiodifusión en mono o estéreo, con protección frente a errores. Por ejemplo, para OM se puede utilizar la configuración estándar de 23'6 Kbit/s ó 10 Kbit/s para OC.

Codificación de voz CELP (Code Excited Linear Prediction) para radiodifusión en mono, cuando se requiere baja velocidad binaria o alta protección frente a errores.

Codificación de voz HVXC (Harmonic Vector eXcitation Coding) cuando se requiere muy baja velocidad binaria y protección frente a errores.

Además, con cualquiera de estas opciones puede utilizarse un método para la reconstrucción de las bandas altas (SBR, Spectral Band Replication), con el fin de mejorar la calidad percibida del audio, utilizando de forma dinámica el contenido espectral de la información en la banda baja, para simular en la recepción la información de la banda alta, eliminada previamente a la transmisión.

1.3.2.1.2 Multiplexación

El multiplexor transporta tres componentes, que juntos suministran la información necesaria para que el receptor sincronice la señal y determine qué parámetros se han utilizado en la codificación para, de esta forma, poder decodificar los canales de audio y datos contenidos en el múltiplex. Estos tres componentes son:

- Audio, datos o audio y datos, que se combinan en el multiplexor de servicio principal formando un flujo denominado canal de servicio principal (MSC, Main Service Channel).

Además del canal de servicio principal, el multiplexor transporta dos canales subsidiarios de información, cuya función es que el receptor pueda identificar los parámetros de transmisión y de decodificación, y que se denominan:

- canal de acceso rápido (FAC, Fast Access Channel) y

- canal de descripción de servicio (SDC, Service Description Channel).

- El canal de servicio principal contiene la información de todos los servicios contenidos en el múltiplex. El múltiplex puede contener de 1 a 4 servicios, y cada servicio puede, a su vez, ser bien de audio o de datos. Por ejemplo, si contamos con suficiente capacidad, podemos optar por un servicio de alta calidad conteniendo música y voz, junto con un servicio de voz de baja velocidad binaria transportando un servicio de noticias continuo, o bien un grupo de cuatro canales de voz simultáneos de baja velocidad transportando servicios de noticias en cuatro lenguas diferentes.

- La velocidad binaria del canal de servicio principal depende del ancho de banda del canal y del modo de transmisión.

- El canal de acceso rápido se utiliza para la selección rápida de la información del servicio. Contiene información sobre parámetros del canal, por ejemplo, ancho de banda, qué tipo de modulación se utiliza por el canal de servicio principal y el canal de descripción del servicio, la profundidad del entrelazado, y el número de servicios que contiene el canal de servicio principal junto con el nombre de esos servicios. También contiene información sobre los servicios y el múltiplex.

- El canal de descripción del servicio contiene la información para decodificar el canal de servicio principal.

1.3.2.1.3 Sistema DRM

El sistema DRM utiliza modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Múltiplex), es decir, una codificación que se inserta en un múltiplex por división de frecuencia, con la particularidad de que estas frecuencias están uniformemente espaciadas de forma que son ortogonales, para transmitir los datos del múltiplex (MSC, FAC y SDC) descrito anteriormente. Se compone de una combinación de técnicas que combaten los efectos adversos de la propagación que se producen en la bandas de OM, OL y OC. El sistema OFDM utiliza un gran número de subportadoras, moduladas individualmente, espaciadas en frecuencia de forma uniforme, que transportan la información. En el sistema DRM el número de subportadoras varía desde 88 a 458, dependiendo de modo y del ancho de banda ocupado.

En la codificación del canal COFDM encontraremos los siguientes parámetros:

- ✓ 4 modos de transmisión: A, B, C y D o Modulación con 3 tipos de modulaciones
 - 4-QAM y 16-QAM para el SDC
 - 16-QAM y 64-QAM para el MSC o Modulación jerárquica

- ✓ 4 niveles de protección: 0, 1, 2 y 3

- ✓ 2 profundidades de entrelazado

- ✓ Capacidad de transmisión hasta 72 kbit/s

- ✓ 6 anchos de banda: 4,5; 5; 9; 10; 18; 20 kHz

- ✓ Protección de error: par e impar

Las subportadoras se modulan con modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

En la codificación del canal de servicio principal se puede utilizar 64 QAM, que proporciona mayor eficiencia espectral, y 16 QAM que proporciona las características más robustas para protección de errores. En cada uno de los casos se pueden utilizar diferentes niveles de protección frente a errores.

En la codificación del canal de acceso rápido se utiliza modulación 4 QAM, con una relación de protección fija.

El canal de descripción del servicio puede utilizar 16 QAM ó 4 QAM. La modulación 16 QAM proporciona mayor capacidad, mientras que la 4 QAM proporciona una característica más robusta frente a errores. En este último caso se aplica una relación de protección fija.

Cada símbolo OFDM está constituido por un conjunto de subportadoras que se transmiten durante un tiempo TS. La duración del símbolo es la suma de dos partes: una parte útil con duración T_u (el espacio en frecuencia entre portadoras adyacentes es $1/T_u$ para conseguir que sean ortogonales) y un intervalo de guarda con duración TG. El intervalo de guarda consiste en una continuación cíclica de la parte útil, T_u , que se inserta delante de la misma. Esto permite diseñar redes de frecuencia única y evitar los problemas de la recepción multitrayecto, consiguiendo que la mayor parte de las señales que entran en el receptor se sumen, es decir, que contribuyan positivamente a la recepción.

Parámetros relevantes de la codificación del canal:

- Modos del sistema DRM
- Ocupación del espectro
- Modulación y niveles de protección

Están definidos cuatro modos de transmisión, A, B, C y D, con distintos parámetros, que son útiles tanto en condiciones de propagación favorables como es la propagación de onda de superficie en la banda de ondas hectométricas, como en condiciones de propagación desfavorables, como es la propagación por onda ionosférica con trayectos múltiples a larga distancia en la banda de ondas decamétricas.

Para los diferentes modos de transmisión la duración de los símbolos se da en la siguiente tabla.

Modo de transmisión	Duración T_U	Duración intervalo de guarda T_G	Duración símbolo T_s = $T_U + T_G$
A	24 ms	2,66 ms	26,66 ms
B	21,33 ms	5,33 ms	26,66 ms
C	14,66 ms	5,33 ms	20 ms
D	9,33 ms	7,33 ms	16,66 ms

Tabla 1.2 Modos de Transmisión

La propagación en las bandas de OM, OL y OC se produce mediante onda de superficie, donde el ruido eléctrico es el factor adverso predominante, y onda ionosférica, con canales variables con distintos grados de complejidad, donde los factores adversos son: el retardo diferencial y los efectos Doppler. En algunas circunstancias, la señal llega al área de cobertura con ambos tipos de

propagación; en estos casos la señal recibida será la suma de las señales que lleguen por diferentes caminos más el ruido presente en el lugar de recepción.

Para superar estos factores adversos, el sistema DRM ha sido diseñado con 4 modos distintos, según el tipo de propagación, y en cada uno de estos modos es posible elegir el tipo de modulación y la velocidad binaria de codificación. Es necesario seleccionar la combinación óptima de los parámetros, dependiendo de las condiciones de propagación particulares, que permita asegurar que la señal es recibida con la calidad más alta posible para cumplir con la calidad del servicio y cobertura deseadas (tabla 1.3).

Modo de transmisión	Condiciones típicas de propagación	Bandas de frecuencias
A	Canales de onda de superficie con desvanecimiento reducido	Ondas kilométricas y hectométricas
B	Canales selectivos en tiempo y frecuencia con dispersión de retardo superior	Ondas hectométricas y decamétricas
C	Como el modo de robustez B pero con dispersión Doppler superior	Sólo ondas decamétricas
D	Como el modo de robustez B pero con retardo y efecto Doppler superior	Sólo ondas decamétricas

Tabla 1.3 Condiciones de los Modos

El modo A está diseñado para entregar la velocidad de codificación binaria más alta posible con cobertura por onda de superficie. El modo B será generalmente la primera opción para los servicios con cobertura por onda ionosférica. Cuando las condiciones de propagación son más duras, tales como en trayectos largos, con saltos múltiples o incidencia casi vertical, donde se producen fuertes y varias reflexiones, puede ser necesario emplear los modos C o D.

En todos los casos existe la opción de escoger, bien 64 QAM o bien 16 QAM para el MSC, y esta elección tendrá influencia en la relación señal/ruido esperada en el área de servicio.

Cuando empleando 64 QAM obtenemos una relación señal/ruido muy baja, y nos interesa que sea más alta, la sustituiremos por una modulación 16 QAM.

Los modos más robustos tienen el efecto de reducir la velocidad binaria disponible y, por tanto, la calidad de audio.

Para cada modo de transmisión, la anchura de banda ocupada de la señal puede elegirse en función de la banda de frecuencia (OM, OL, OC) y de la aplicación deseada

Modo de transmisión	Tipo de ocupación del espectro			
	0	1	2	3
A	4,208	4,708	8,542	9,542
B	4,266	4,828	8,578	9,703
C	-	-	-	9,477
D	-	-	-	9,536
Anchura de banda nominal (kHz)	4,5	5	9	10

Tabla 1.4 Tiempo de ocupación y Ancho de Banda

En la modulación, los niveles de protección están definidos por los siguientes valores:

Esquema de modulación	N = nivel de protección	Índice de codificación medio
QAM-16	0	0,5
	1	0,62
QAM-64	0	0,5
	1	0,6
	2	0,71
	3	0,78

Tabla 1.5 Modulación y nivel de Protección

Los niveles de protección frente a errores se consiguen mediante una codificación convolucional que introduce redundancia en la señal.

En las tablas siguientes se muestra la capacidad de transmisión, que depende del ancho de banda de la señal, del modo y del nivel de protección.

Para el canal de servicio principal, con modulación 64 QAM y nivel de protección 1

Modo de transmisión	Tipo de ocupación del espectro	
	1	2
A	12'8 Kbit/s	23'6 Kbit/s
B	10 Kbit/s	18'4 Kbit/s

Tabla 1.6 Tiempos de ocupación para A y B con modulación 64QAM

Para el canal de servicio principal, con modulación 16 QAM y nivel de protección 1

Modo de transmisión	Tipo de ocupación del espectro	
	1	2
A	8'9 Kbit/s	16'4 Kbit/s
B	6'9 Kbit/s	12'8 Kbit/s

Tabla 1.7 Tiempos de ocupación para A y B con modulación 16QAM

- mínimo absoluto (nivel de protección 0, 16 QAM, modo B, 4'5 KHz) 4'8 Kbit/s
- máximo absoluto (nivel de protección 3, 64 QAM, modo A, 20 KHz) 72 Kbit/s.

1.3.2.1.4 Modulador

El modulador convierte la representación digital de la señal OFDM en una señal analógica, que es transmitida, después de la correspondiente amplificación, a la antena.

Si se utiliza un transmisor no lineal de alta potencia, antes de modular la señal OFDM se divide en dos componentes: amplitud y fase, que se inyectan al modulador.

En el caso de que se utilicen transmisores con modulación lineal, la señal compuesta OFDM se aplica directamente a la entrada del modulador.

1.3.2.2 Modo de operación de DRM

DRM puede trabajar en 2 modos

- Modo "DRM30", que están específicamente diseñados para utilizar las bandas de radiodifusión AM por debajo de 30 MHz, y
- Modo "DRM+", que utilizan el espectro de 30 MHz a VHF banda III, centrado en la radiodifusión FM de banda II
-

1.4 RADIO POR INTERNET

La primera "estación de radio" por Internet (online), "Internet Talk Radio", fue desarrollada por Carl Malumud en 1993. La estación de Malumud usaba una tecnología llamada MBONE (IP Multicast Backbone on the Internet). En febrero de 1995, surgió la primera estación de radio exclusiva por internet de tiempo completo, llamada Radio HK, emitiendo música de bandas independientes. Radio HK fue creado por Norman Hajjar y el laboratorio mediático Hajjar/Kaufman New

Media Lab, una agencia de publicidad en Marina del Rey, California. El método de Hajar fue usar un reflector de conferencia web CU-SeeMe conectado a un CD de audio personal corriendo en un lazo infinito. Después, Radio HK fue convertido a uno de los servidores de Real-Audio. Hoy en día, las estaciones de radio por internet como Voyager-Radio, YRadio.fm, Cyberexitos.com, RadioFresno.Net, entre otros utilizan la tecnología de servicios web de proveedores como Live365 para hacer webcast 24 horas al día. En el año 2003, Windows que ya había incursionando con éxito con su serie de servidores Windows 2000 en materia de multimedia, lanza Windows 2003 server, permitiendo con suficiente ancho de banda un manejo inteligente de "unicast" y la posibilidad de que miles de oyentes puedan conectarse a una transmisión única, en forma estable y con calidad de sonido que puede alcanzar hasta 128 kbps, lo que iguala el sonido de una radio por Internet a una radio FM tradicional.

La radio en internet es un Streamcasting² de audio, en otras palabras es similar a una radio normal solo que su señal es transmitida a través del internet. Propiamente dicho, consiste en la exhibición de contenido auditivo dotado de las características propias del medio radiofónico a través del internet mediante streaming.

A partir de finales del 2004, el uso de Streamcasting de audio ha ido declinando a favor del Podcasting, método alterno basado sobre RSS (Really Simple Syndication) que ofrece múltiples beneficios imposibles previamente. Sin embargo, es pertinente aclarar que los podcasts están limitados al uso de música "royalty free" o libre de regalías, porque de no ser así, se incurre en violación de los derechos de autor. Por esa razón, los podcast no son más que una forma de hacer "talk-shows" descargables. Muchos de los podcasts de audio también son a su vez disponibles como streamcasts de audio.

² Se refiere a ver u oír un archivo directamente en una página web sin necesidad de descargarlo antes al ordenador. El Streaming se compone de códecs, Protocolos Ligeros, Precargas, y una red de distribución de contenido. Y se usa para radio y tv por internet, Interlacing, Virtual Network Computing, etc.

La gran diferencia de una radio normal es que en la radio por Internet, su señal es transmitida por el internet por medio del World Wide Web (www) y esto significa que puede ser escuchada en cualquier parte del mundo. Los beneficios socio culturales de la misma es que es un servicio popular para emigrantes en el extranjero.

Para un correcto funcionamiento de una Radio por Internet se deben tener los siguientes componentes: una fuente auditiva, que puede ser micrófonos, cds, WAV, mp3 y este es el que va a formar parte del contenido de la radio y un software que manipule el audio. Además de un servidor de stream auditivo, que es el servidor, el cual codifica y envía los bits del contenido a través de un torrente de datos; y por último un reproductor de stream auditivo, en el lado del cliente o radio escucha virtual, que reensambla y decodifica los bits y reproduce la señal auditiva. Actualmente algunos reproductores con tales capacidades son Winamp para Microsoft Windows, iTunes para la Apple Macintosh y Microsoft Windows, así como XMMS y Amarok para Gnu/linux. También se utiliza para reproducción Windows Media Player, tal vez el más difundido de los reproductores en los usuarios de Windows y otra serie de reproductores muy comunes, todo esto según la compatibilidad en la tecnología utilizada.

En la figura 1.13 se puede apreciar la estructura básica de una radio que se encuentre transmitiendo en Internet.



Figura 1.13 Diagrama básico de una Radio en Internet

Para los países desarrollados donde la penetración y el acceso a internet es mayor este tipo de radio puede convertirse en una seria competencia para la radio digital, ya que los costos que representa este tipo de emisión es menor a tener que cambiar equipos transmisores y receptores para el estándar que se adopte. Para países con poca penetración y donde no se tenga un acceso a internet están en igualdad de condiciones, puesto que empezar a enviar su señal por este medio le representaría que se pierda audiencia, es preferible invertir en un estándar y comenzar a captar más radioescuchas, con una especificación particular a países comparables con Ecuador donde el estándar que se debe acoger debe dar un compás de espera ya que una mayoría de usuarios es de escasos recursos y no podrán adquirir nuevos receptores y mantendrán los antiguos, así que la señal tendrá que combinar simultáneamente una emisión digital y analógica.

1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA RADIO DIGITAL

Las ventajas que presenta la radio digital con respecto a la radio analógica son:

- Poder utilizar una frecuencia única en todo el país, eliminando el hecho de tener que pedir varias concesiones y armar repetidoras de tal forma que no se interfieran con las otras emisoras; lo que nos da un uso adecuado del espectro radioeléctrico y la posibilidad si se quiere de ampliar el número de estaciones que transmitirán su contenido, dando así al usuario un menú variado de programación complaciéndose de esta manera el gusto variado de los oyentes.

- La utilización de varios canales digitales en una misma banda para mejorar la programación y ampliarla a más de proporcionar servicio de datos e información que ayude al usuario y al radiodifusor, puesto que le permite vender espacios para los auspiciantes o para prestar un servicio social, con la característica de que no se va a tener que interrumpir la locución a menos que así sea requerido.
- Una gran robustez de la señal hacia las interferencias, ruido y desvanecimiento, por la utilización de sistemas de corrección de errores, lo que permite que se tenga igual calidad de servicio en toda el área de cobertura del transmisor, esto también facilita el poder hacer un registro y almacenamiento de los datos, además de un eficiente transporte, lo que mejora el sonido y la recepción del mismo.
- Se debe anotar también que por la compresión de la información se reduce de gran manera el ancho de banda requerido, lo que nos permite transmitir varios canales de información digital en un solo canal de información que se utilizaría en la radio analógica, por lo que la separación entre canales se reduce.

La única desventaja que presenta la radio digital es el valor alto que tienen los equipos para transmisión y recepción de la misma, y es lo que a los dueños de emisoras los detiene de poder implementar el servicio y si no se cambia esto no va a haber atracción para este tipo de radio, dándole así mas campo y posibilidad de posicionarse a la radio en la web, puesto que es de menor costo.

CAPITULO 2

ESTÁNDAR IBOC

2.1 INTRODUCCIÓN

El estándar y la tecnología IBOC fue creado y desarrollado por la empresa Ibiquity Digital Corporation, lo que permite a las emisoras tener transmisiones de señales digitales, en simultaneo con señales analógicas, sin tener que utilizar otra banda de frecuencias, y sin que haya ninguna interferencia entre ambas, lo que se conoce como un modo hibrido del estándar, el otro modo es el de totalmente digital.

El modo hibrido de IBOC representa una ventaja ante los otros estándares existentes, porque si es adoptado en países donde el poder adquisitivo no es alto, una radioemisora puede seguir trabajando por un tiempo hasta poder cambiar todos sus equipos; es lo mismo para los usuarios que por ese mismo tiempo pueden seguir utilizando su viejo receptor, hasta que se vean obligados a cambiarlo por uno que tenga recepción digital, como se puede apreciar en la figura 2.1.

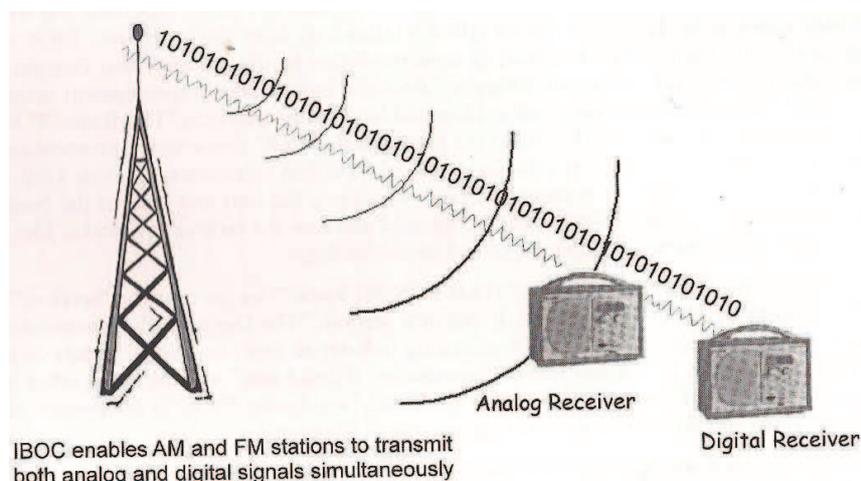


Figura 2.1 Transmisión de radio digital IBOC

A diferencia de los estándares DAB y DMR que son iniciativas de radiodifusoras públicas europeas, el estándar IBOC nace como una propuesta de las radiodifusoras privadas de Estados Unidos, convirtiéndose en el único aprobado y requerido para funcionar en dicho país. Otro factor que los contrapone es el hecho de la no utilización de otra banda de frecuencia (IBOC) como se propone en DAB.

IBOC también es conocido como NRSC-5, en virtud de la entidad que lo ha estandarizado, la NRSC (National Radio Systems Committee), junto con la NAB (National Association of Broadcasters), a nivel comercial la Ibiqity lo denominó como HD Radio, donde HD tiene como significado Hybrid Digital.

Antes de hablar un poco del estándar NRSC-5 y en especial de las recomendaciones para las transmisiones en FM y el tipo híbrido, hablaremos de la modulación COFDM y todo lo que involucra para luego tener una mejor comprensión para lo relacionado a IBOC.

2.2 OFDM Y COFDM

2.2.1 OFDM

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una tecnología de modulación digital avanzada que consiste en transmitir múltiples señales simultáneamente sobre un solo medio de transmisión, como puede ser un cable o el aire. Cada símbolo viaja con su propio rango de frecuencia (subportadora), el cual posteriormente es modulado.

Nombramos algunos de los sistemas que usan la modulación OFDM:

- La televisión digital terrestre DVB-T, que es un estándar de TDT
- La radio digital DAB

- □ La radio digital de baja frecuencia DRM
- □ El protocolo de enlace ADSL
- □ El protocolo de red de área local IEEE 802.11a/g, también conocido como Wireless LAN
- El sistema de transmisión de datos basados en PCL HomePlug AV
- 3GPP-LTE
- El sistema de transmisión inalámbrica de datos IEEE 802.16-2004 WiMAX

Las principales características de la modulación OFDM son, la robustez frente a la propagación multicamino (la señal llega a recepción con distintas amplitudes y fases por la presencia de obstáculos en el medio), frente a los desvanecimientos selectivos en frecuencia y frente a las interferencias de RF.

En OFDM las subportadoras utilizadas para transmitir se escogen de modo que sean ortogonales entre sí. La ortogonalidad se logra haciendo coincidir los picos del espectro de las subportadoras con los valores nulos del espectro de las otras subportadoras que pertenecen al mismo canal, obteniendo como resultado un perfecto alineamiento y espaciado de las señales subportadoras, lo podemos apreciar en la figura 2.2.

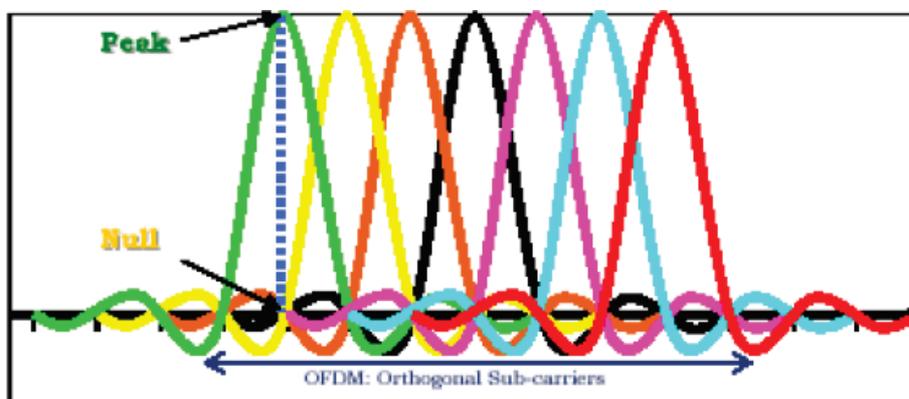


Figura 2.2 Conjunto de sub-portadoras ortogonales que forman la señal OFDM

La ortogonalidad tiene una ventaja al realizar la modulación y es que puede ser realizada por una simple Transformada IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform), la cual puede ser implementada muy eficientemente mediante una IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) en concordancia con el receptor, que sólo necesita una FFT para invertir esta operación.

Tal y como hemos comentado anteriormente las señales viajan en subportadoras que son moduladas y demoduladas de forma independiente e individual. Si una o dos subportadoras se ven afectadas por el desvanecimiento selectivo en frecuencia (señales a diferentes frecuencias se propagan y viajan a velocidades diferentes), el impacto es mínimo una vez que la información se ensancha.

2.2.2 COFDM

Es una técnica compleja de modulación de banda ancha utilizada para transmitir información digital a alta velocidad, es a través de un canal de comunicaciones, que combina potentes métodos de codificación más el entrelazamiento para la corrección de errores en el receptor. Además del empleo de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), donde cada portadora es traslapada una con otra logrando así tener una alta eficiencia espectral.

Obteniendo de esta manera una modulación específicamente diseñada para combatir los efectos del multitrayecto y otros tipos de interferencias que afectan a receptores fijos y móviles.

COFDM es una mejora de OFDM para canales muy selectivos o variantes ya que puede soportar multitrayecto severo, la presencia de interferencias de banda estrecha de cocanal, la cancelación de la señal, el ruido de impulsos y la reducción rápida de la amplitud de la señal. La codificación es el ingrediente clave. Sin embargo, los resultados deseados solo se logran cuando la codificación

se integra estrechamente con el sistema de OFDM junto con el entrelazamiento de portadoras.

Las características comunes de COFDM y OFDM son:

- La ortogonalidad.
- Los esquemas de modulación de las portadoras.
- La adición del intervalo de Guarda.
- La sincronización.
- La ecualización.

Aunque la ortogonalidad y los esquemas de modulación de las portadoras son propios de OFDM, la adición del intervalo de guarda, la sincronización y la ecualización ya son mejoras pertenecientes de OFDM.

Las mejoras de COFDM sobre OFDM son:

- La codificación contra errores.
- El entrelazamiento de las portadoras de datos en frecuencia o en tiempo y frecuencia.
- La información de estado del canal (Channel State Information) combinado con la decodificación con decisión Flexible (Soft-Decision Decoding) para incrementar el desempeño del decodificador de Viterbi.

Al comparar COFDM con el modelo de un sistema de telecomunicaciones digitales como se ve en la figura 2.3, se obtiene que COFDM comparte los bloques de modulación y codificación del canal.

En lo referente a la información que se va a transmitir llamada fuente de la información en COFDM son típicamente solo audio, audio y datos, video y audio, etc. El bloque de la codificación de la fuente en COFDM es un sistema de compresión de datos digitales (por ejemplo: MPEG-2) en donde la fuente de información se adapta para el codificador del canal debido a que COFDM es un sistema de telecomunicaciones que acepta tramas de k Bytes a su entrada.

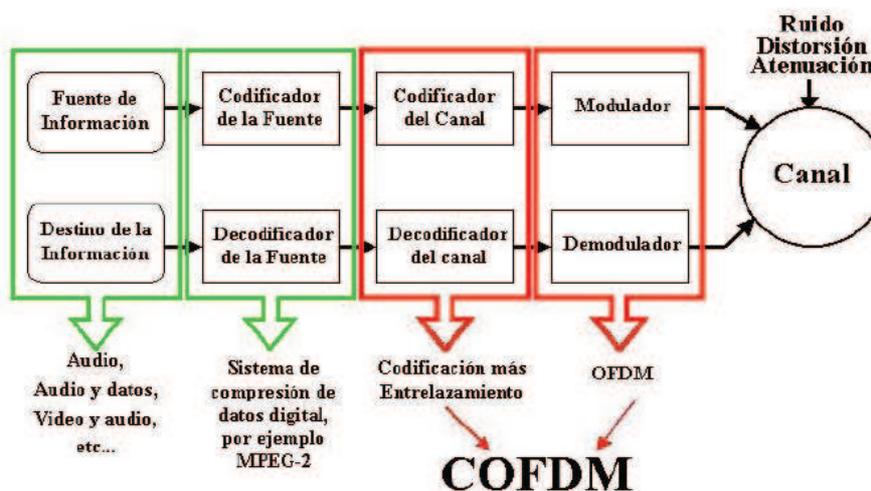


Figura 2.3 Comparación de COFDM con un Sistema Digital

2.2.2.1 Modelo simplificado del sistema COFDM

Basándose en un modelo simplificado, explicaremos como funciona un sistema COFDM. Se asume que el canal de comunicaciones no sufre de ningún tipo de interferencia u otro tipo de degradación que podría afectar la señal transmitida.

En la figura 2.4 se muestra el modelo simplificado de un transmisor COFDM con el que se desea transmitir unos bits que se ingresan al codificador FEC (Forward Error-Correction: Corrector de error Frontal) en este caso es el codificador convolucional que da redundancia a los bits transmitidos posibilitando la corrección de errores en el demodulador, luego se agrupan varios bits en el entrelazador de frecuencia para causar un desorden pseudoaleatorio con lo que se consigue distribuir los bits de datos entre las portadoras dentro de un símbolo

OFDM para así mejorar el desempeño del decodificador de Viterbi en el demodulador COFDM. Posteriormente los bits de datos codificados y entrelazados en frecuencia ingresan al modulador OFDM que tiene como función ir tomando de a dos bits para modularlos con QPSK sucesivamente pasando de bits a símbolos de datos, después se realiza la IFFT (Transformada rápida de Fourier inversa) que consiste en agrupar 8 símbolos que corresponden a 8 puntos que va procesar la IFFT a la vez, para luego generar un símbolo útil formado por 8 muestras con duración T_u constituido por 8 portadoras ortogonales entre sí (separadas en frecuencia en múltiplos de $1/T_u$) y finalmente se inserta un intervalo de guarda que tiene como función eliminar la ISI, este último es una extensión cíclica de IFFT que es solo una copia de un determinado número de las últimas muestras de la salida de la IFFT que son muestras agregadas al comienzo del símbolo útil, es decir, la IFFT genera un solo símbolo que es llamado símbolo OFDM. El cual está formado por un símbolo útil y un intervalo de guarda. Ahora la señal a transmitir se debe ajustar debido a que está en banda base, la salida Q-I es todavía digital para ello es necesario convertirla a una señal análoga usando dos conversores digital-análogo (DAC), para luego ser modulada en RF usando un modulador en cuadratura. La señal COFDM de salida se aprecia que hay 8 portadoras que son ortogonales entre sí que están centradas a una frecuencia central f_c en un ancho de banda (BW), donde una trama OFDM está constituida por 4 símbolos OFDM generados por la IFFT, esto se aprecia en la figura 2.5.

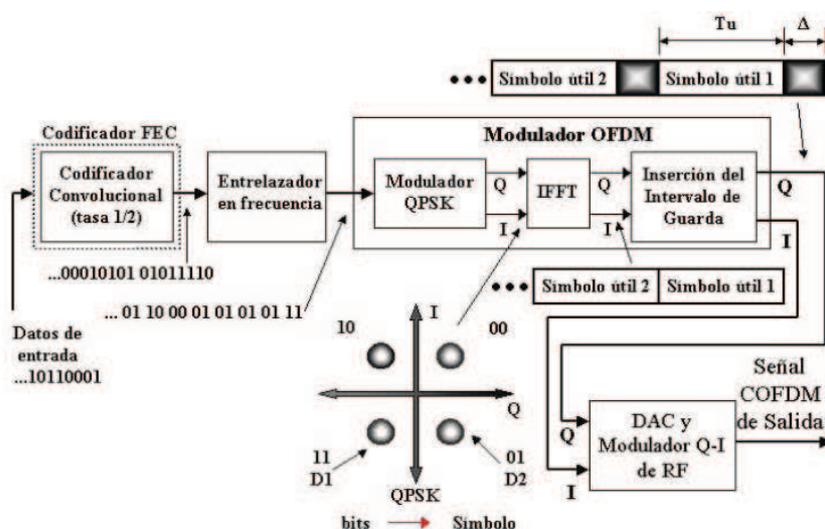


Figura 2.4 Modelo Simplificado COFDM

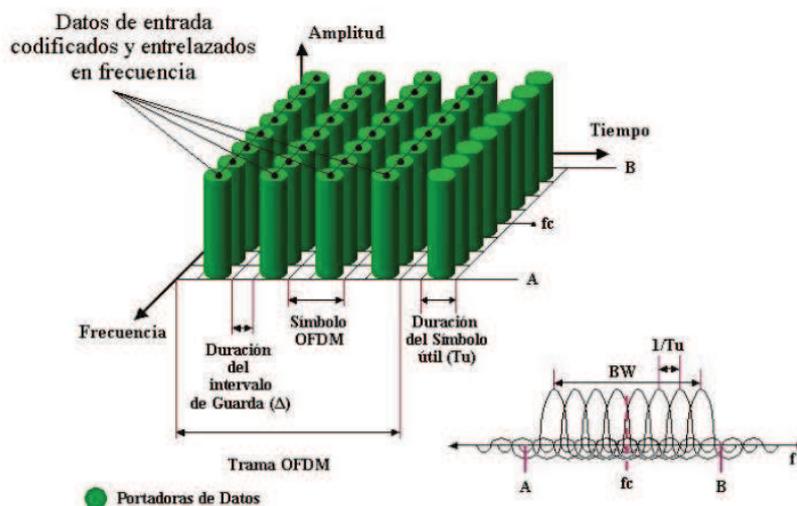


Figura 2.5 Señal de Salida COFDM

El ancho de banda (BW) es el cociente entre el número de portadora (N_p) y la duración del símbolo útil (T_u) que está representada por la siguiente expresión:

$$BW = \frac{N_p}{T_u} (\text{Hz})$$

La tasa binaria a transmitir (T_b) es:

$$T_b = \frac{N_p}{T_u + \Delta} \times N_{bm} \times T_c \text{ (bits/seg)}$$

N_p es el número de portadoras de datos, N_{bm} es el número de bit por símbolo del esquema de modulación empleadas por las portadoras de datos (por ejemplo 6 bit para de QAM-64), T_u es la duración del símbolo útil, T_c es la tasa del codificador FEC y Δ es la duración del intervalo de guarda

El receptor COFDM se puede apreciar en la figura 2.6, se asume que la señal transmitida llega en forma íntegra, es decir, no sufre de ningún tipo de degradación o interferencia y arriba en fase al receptor para así obviar la parte de sincronización en el receptor y ecualización. La señal recibida ingresa al demodulador de RF y las salidas Q-I análogas son convertidas a Q-I digitales

usando dos ADC (conversor análogo digital) para ello se hace un muestreo de la señal COFDM con un periodo de muestreo T_u/N_p , luego ingresan las señales Q-I en banda base al demodulador OFDM que tiene como función eliminar el intervalo de guarda con lo que se elimina las primeras muestras que contienen el intervalo de guarda, después se realiza FFT donde se agrupan 8 muestras que se procesan para entregar 8 símbolos que son demodulados cada uno finalmente por el demodulador QPSK pasando de símbolo a bits. Posteriormente un conjunto de bits es agrupado en el desentrelazador en frecuencia para reordenarlos y pasarlos al decodificador de Viterbi que tiene como función habilitar la corrección de errores en el receptor, recuperando así los bits de datos transmitidos.

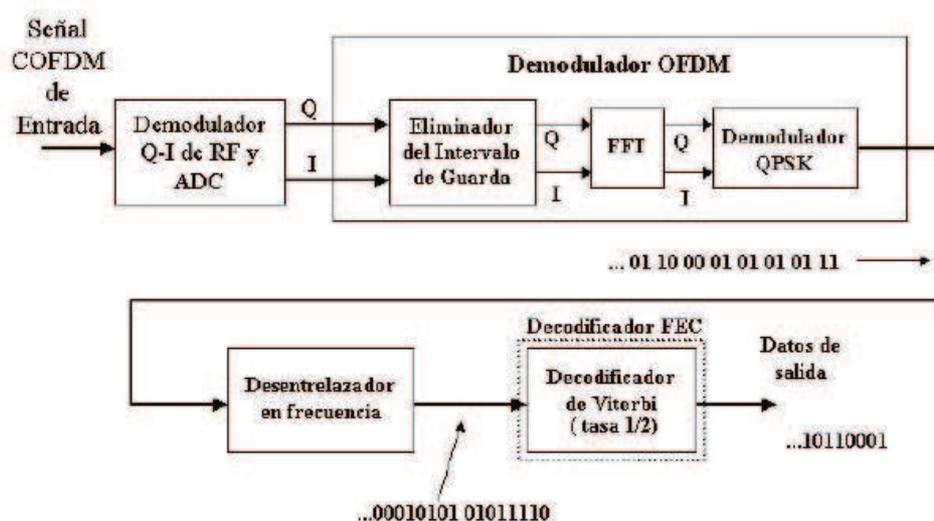


Figura 2.6 Receptor para COFDM

2.2.2.2 Portadoras en COFDM

Existen cuatro tipos de portadoras en COFDM:

1. Portadoras de Datos:
 - a. Se utilizan para transmitir la información requerida por el o los usuarios.
 - b. Se transmiten con un nivel de potencia normalizado, es decir $E=1$.

- c. Su esquema de modulación es comúnmente DBPSK, DQPSK, BPSK, QPSK, QAM-16 o QAM-64.

2. Portadoras Pilotos:

- a. Se utilizan para realizar la sincronización en tiempo y frecuencia, y además para la ecualización y la corrección del error de fase común en el receptor.
- b. Se transmiten con un nivel de potencia reforzado, es decir, $E=16/9$.
- c. Llevan información de referencia.
- d. Su esquema modulación es BPSK o DBPSK.
- e. La información de referencia es generada por un aleatorizador de energía.
- f. Existen dos tipos de portadoras pilotos:
 - i. Portadoras Pilotos Fijas (siempre están en la misma posición dentro de un símbolo OFDM). Usadas para la sincronización en tiempo y frecuencia, la ecualización y la corrección del error de fase común en el receptor.
 - ii. Portadoras Pilotos Dispersas (su posición varía dentro de un símbolo OFDM pero siguiendo un patrón predeterminado por ejemplo, cada 4 símbolos OFDM). Usadas para un fino sincronismo en tiempo y frecuencia, y para la ecualización en el receptor.

3. Portadoras de Información del sistema:

- a. Se utiliza para configurar el receptor

- b. Se transmiten con un nivel de potencia normalizado, es decir $E=1$.
- c. Su esquema de modulación es DBPSK.
- d. La información del sistema es codificada con el código BCH.
- e. La información transmitida en estas portadoras es típicamente:
 - i. El modo de transmisión: Donde el receptor confirma el número de puntos utilizado por la IFFT, T_u y Δ en el proceso de escaneo del receptor, después comienza a configurarse con la información de las portadoras de información de sistema.
 - ii. La tasa de codificación del primer codificador.
 - iii. La tasa de codificación del segundo codificador.
 - iv. Tipo de modulación utilizadas en las portadoras de datos, además del factor α .

4. Portadoras de referencias de fase:

- a. Se utilizan para llevar la referencia de fase necesaria para demodular los símbolos de datos o los símbolos de información del sistema que usan el esquema de modulación diferencial de fase.
- b. Los símbolos de referencia de fase OFDM entregan información al AFC para realizar la sincronización en frecuencia en el receptor.
- c. También se utilizan para mejorar la sincronización en Tiempo en el receptor.

- d. Las portadoras de referencia de fase se transmiten comúnmente con el mismo nivel potencia que de las portadoras de datos, pero también se pueden transmitir a un nivel de potencia mayor.
- e. Su esquema de modulación es diferencial de fase por ejemplo DBPSK, DQPSK.
- f. Llevan información de referencia.

En OFDM como en COFDM al utilizar cientos o miles de portadoras se logra reducir la ISI hasta un valor pequeño, pero hay que tomar en consideración otro ámbito que es el ancho de banda y el número de portadoras que se podría tener:

1. Si las portadoras son menores por ejemplo a 1500:
 - a. Hay una mayor separación entre las portadoras lo que disminuye los efectos de la interferencia.
 - b. No se requiere necesariamente la corrección del CPE (Error de Fase Común).
 - c. El entrelazamiento en Frecuencia pierde desempeño, requiriendo obligatoriamente el entrelazamiento en Tiempo o entrelazamiento en Tiempo y Frecuencia.
 - d. La ecualización no se utiliza prácticamente, incluso es eliminada por la utilización de la demodulación diferencial.
 - e. Son para sistema COFDM que utiliza un solo transmisor, para SFN pequeñas con limitada distancia de transmisión y hasta apropiada para ambiente interior.
2. Si las portadoras son mucho mayores a 1500:

- a. Hay una menor separación entre las portadoras lo que incrementa los efectos de la interferencia.
- b. Se requiere necesariamente la corrección del CPE.
- c. El entrelazamiento en Frecuencia tiene un alto desempeño, siendo optativo el entrelazamiento en Tiempo y Frecuencia.
- d. La ecualización es necesaria para tratar de revertir la influencia del canal sobre las portadoras de datos, además se ve simplificada por un mayor uso de portadoras pilotos.
- e. Son para sistema COFDM que utiliza un solo transmisor y para SFN pequeñas y grandes.

2.2.2.3 Ancho de Banda del Canal y COFDM

El ancho de banda del canal (BW_c) siempre es mayor al ancho de banda de COFDM (BW) para evitar así interferencia de banda estrecha de cocanal y por condiciones de diseño del sistema COFDM (ver figura 2.7). Con respecto a lo anterior se tiene la siguiente expresión:

$$BW_c > BW$$

Para obtener el ancho de banda de COFDM se debe asumir una constante A_c que está entre 0,8 a 0,95 típicamente, obteniéndose la siguiente expresión:

$$BW_c = BW / A_c \text{ (Hz)}$$

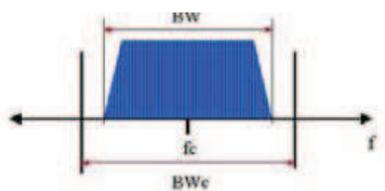


Figura 2.7 El ancho de banda del canal y el ancho de banda de COFDM.

Como el ancho de banda de COFDM (BW) está en función del número de portadoras (N_p) y el número de puntos de IFFT (N) está en función de un número exponencial en base 2, la mayoría de las veces por efecto de diseño del sistema COFDM resulta que el número de portadoras (N_p) es menor al número de puntos de la IFFT, por lo tanto, hay algunos puntos de la IFFT que no se utilizan debiéndose entonces distribuir frecuencialmente los datos a la entrada de la IFFT para así evitar la interferencia de banda estrecha de cocanal, esto se aprecia en la figura 2.8.

También se requiere que $N_p < N$ porque algunos sistemas COFDM tienen modulador y demoduladores de RF analógicos, para aquellos sistemas se necesita una frecuencia de muestreo $f_m = N/T_u$ para el DAC y el ADC donde el filtro pasa bajo del transmisor y receptor requiere una banda de guarda entre la frecuencia mínima y máxima de corte.

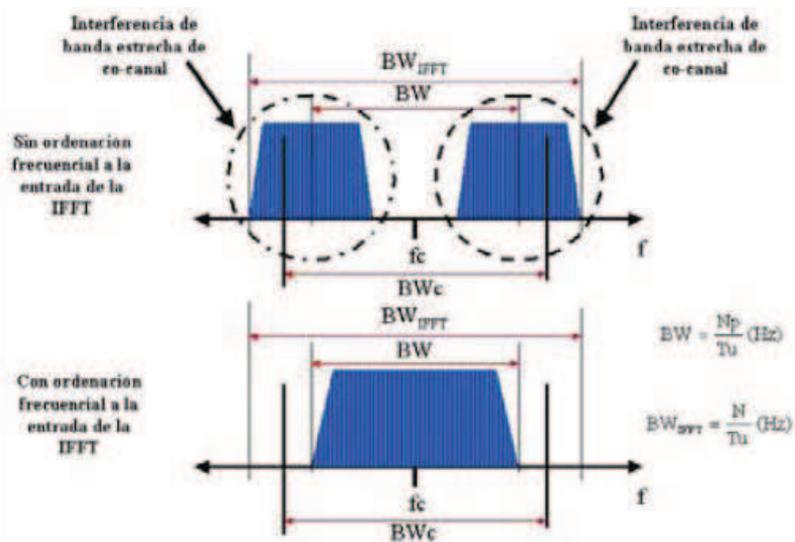


Figura 2.8 Ancho de Banda COFDM con relación a IFFT

2.2.2.4 Intervalo de Guarda

El intervalo de guarda " Δ " es una banda temporal añadida al símbolo útil de OFDM que es una extensión cíclica de la IFFT en el Transmisor, es decir, es la copia de las últimas muestras de salida de la IFFT y colocadas al principio.

La figura 2.9 muestra la adición de un intervalo de guarda. El periodo del símbolo OFDM está extendido para que exceda el periodo de integración de la FFT del receptor. Puesto que todas las portadoras son cíclicas dentro de T_u , así también es el conjunto de la señal modulada. De esta manera el segmento agregado al principio del símbolo OFDM para formar el intervalo de guarda es idéntico al segmento de la misma longitud al final del símbolo OFDM.

Con tal de que el retraso de cualquiera trayectoria con respecto a la trayectoria principal sea menor que el del intervalo de guarda, todas las componentes dentro del periodo de integración de la FFT vienen desde el mismo símbolo OFDM y el criterio de ortogonalidad está satisfecho.

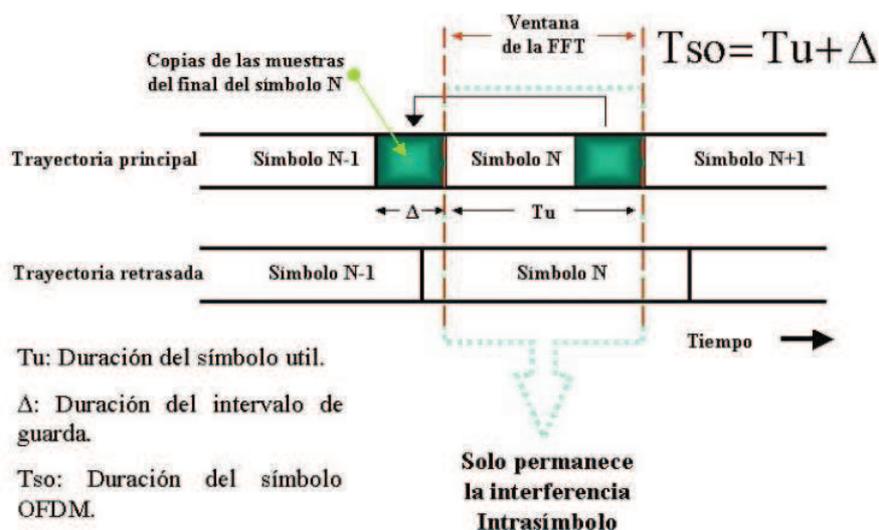


Figura 2.9 Intervalo de Guarda

El propósito del intervalo de guarda es evitar la interferencia de intersímbolo (ISI) y la interferencia interportadora (ICI) que trae como consecuencia la pérdida de la ortogonalidad, que es provocada por el efecto del multitrayecto, lográndose así mejorar la sincronización en tiempo en el receptor. Pero todavía queda la interferencia de intersímbolo que es eliminada totalmente o parcialmente por el receptor usando ecualización del canal o por modulación diferencial. La ICI y ISI solo ocurrirá cuando el retraso relativo exceda el intervalo de guarda.

El intervalo de guarda trae como consecuencia la pérdida de la eficiencia espectral y un mayor requerimiento de potencia en el transmisor. La pérdida de eficiencia espectral es causada al transmitir muestras duplicadas que no aportan nueva información. El número de muestras que contiene el Intervalo de Guarda para algunos casos están en la tabla 1.2, donde el ancho del Intervalo de Guarda (Δ) es $A \times T_u$ y $2n A = 1$ para $n = 2, 3, 4, 5$ y 6 .

Un intervalo de guarda nulo, es decir, sin muestras del símbolo no proporciona protección contra la ICI pero si proporciona protección contra la ISI.

Número de puntos de la FFT	Ancho del Intervalo de Guarda				
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
64	16	8	4	2	1
128	32	16	8	4	2
256	64	32	16	8	4
512	128	64	32	16	8
1024	256	128	64	32	16
2048	512	256	128	64	32
4096	1024	512	256	128	64
8192	2048	1024	512	256	128

Tabla 2.1 Ancho de los Intervalos

2.2.2.5 Codificación contra errores en COFDM

Conocida como Corrección de error Frontal (FEC: Forward Error Correction), el cual agrega bits de redundancia a los datos de entrada para ser transmitido con lo que es posible corregir varios o todos los bits los cuales se recibieron incorrectamente en el receptor debido al ruido y la interferencia.

En COFDM se utiliza como código principal del canal el código convolucional y para incrementar aún más la redundancia se utiliza un codificador secundario en conjunto con un entrelazador, el código utilizado es Reed-Solomon.

2.2.2.6 Tasa de Error de Bits (BER) en COFDM

Al utilizar la codificación en la corrección de error frontal (forward error correction coding) en casi cualquier sistema de comunicación digital práctico es necesario entregar una aceptable tasa de error de bit (BER) a una razonablemente baja razón de portadora a ruido (CNR), es decir, en un sistema COFDM se debe especificar la razón portadora a ruido mínima requerida por el receptor COFDM para varias condiciones de escalabilidad del receptor que está en relación directa con la constelación en uso del esquema de modulación de las portadoras de datos y tasa binaria útil que se desea transmitir, con esto se logra que la detección y corrección de errores sea más fácil de realizar obteniéndose una comunicación libre de errores. En COFDM para obtener un BER adecuado para una CNR fija se distinguen dos casos:

- Caso I: En la figura 2.10 se muestra que con una CNR fija se obtiene varios BER en donde se observa el efecto de la codificación y entrelazamiento de portadoras con respecto al esquema de la modulación de las portadoras utilizadas, que es satisfactorio para la utilización en canales menos selectivos. Además se ve como se mejora el BER al cambiar el entrelazamiento en frecuencia al entrelazamiento en tiempo y frecuencia.

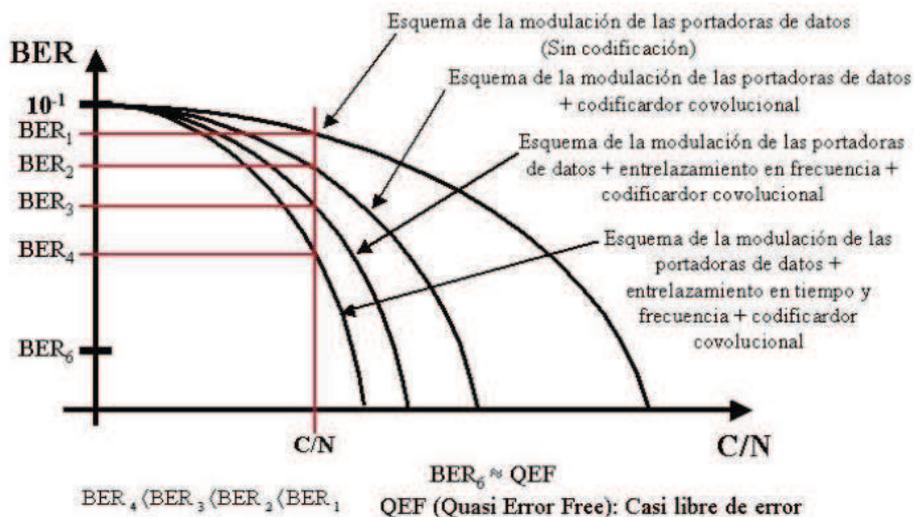


Figura 2.10 Caso I, Tasa de error de bits (BER) en COFDM.

- Caso II: Al no poder obtener un BER adecuado en el receptor que sea igual o próximo a un BER casi libre de error (QEF) (ver figura 2.11) es necesario utilizar un codificador secundario combinado con el entrelazamiento binario para dispersar más errores, esta configuración es satisfactoria para la utilización en canales extremadamente selectivos.

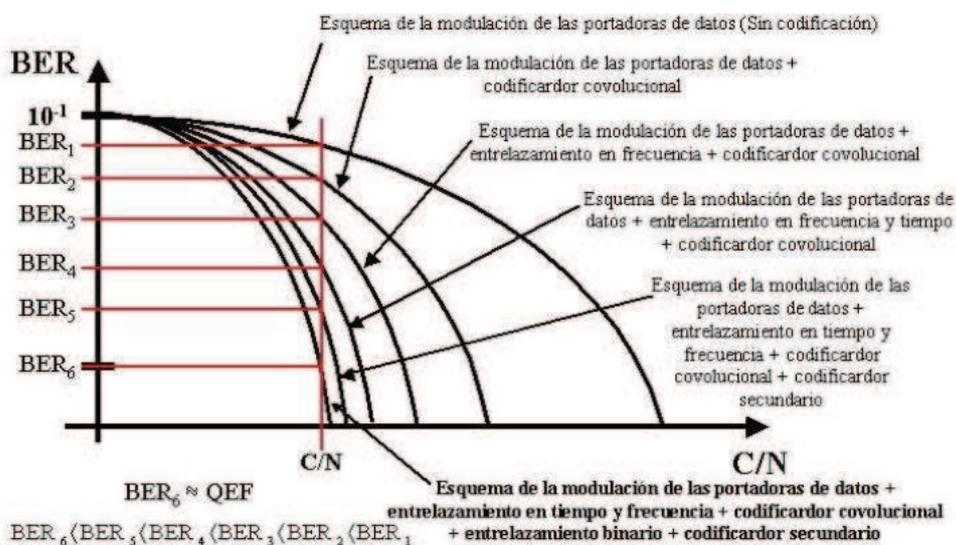


Figura 2.11 Caso II, Tasa de error de bits (BER) en COFDM.

En el caso I y II todo depende de la tasa de codificación del codificador FEC y de la calidad del entrelazamiento de las portadoras utilizado. Además agregar la información del estado del canal (CSI) para la decodificación con decisión flexible (Soft-Decision Decoding) es otra forma que tiene el receptor para obtener un BER aceptable a la salida del receptor.

Los gráficos mostrados en la figura 2.10 y la figura 2.11 son ejemplos teóricos del BER en COFDM que representa la tendencia del incremento del mejoramiento del BER para una C/N fija.

2.2.2.7 Ventajas y Desventajas de COFDM

2.2.2.7.1 Ventajas

Protección contra desvanecimiento selectivo de las portadoras: Un desvanecimiento es una distorsión provocada por las variaciones de las características físicas del canal que tiene como resultado una disminución de la potencia recibida que es la desventaja de OFDM. Como solución se agrega a la modulación OFDM un codificador de canal compuesto de dos elementos: un código convolucional y un entrelazador de portadoras ya sea al nivel de bits o símbolos. El efecto conjunto del código convolucional y del entrelazador puede verse como un promediado de los desvanecimientos locales sobre todo el espectro de la señal.

Modulación Jerárquica: La modulación jerárquica permite integrar la modulación QPSK dentro de la constelación de QAM de 16 o más niveles permitiendo transmitir dos servicios al mismo tiempo y hace que la transmisión de QPSK sea menos susceptible a las interferencias que en el caso de QAM de 16 o de más niveles no jerárquicos. Bajo este criterio se puede transmitir en un flujo de datos de baja prioridad el servicio de HDTV y en el flujo de alta prioridad el servicio de SDTV.

Alta eficiencia espectral: Debido a que cada portadora es traslapada una con otra con la técnica o esquema de modulación por multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) se logra incrementar notablemente la tasa binaria útil a transmitir comparada con la técnica de FDM.

Simplificación de la ecualización: Una de las características de este esquema de modulación es que facilita la ecualización en el receptor, debido a que distribuye una serie de portadoras llamadas portadoras pilotos a lo largo de todo el ancho de banda que se va a usar en la transmisión, por lo tanto, es muy fácil hallar la respuesta en frecuencia del canal mediante la transmisión de una secuencia de entrenamiento, es decir, una serie de portadoras pilotos con lo que se consigue eliminar o reducir la influencia del canal sobre los datos transmitidos.

Protección contra interferencias de intersímbolo (ISI): La utilización del intervalo de guarda provee la tolerancia contra la interferencia de intersímbolo. Mientras el retardo de las señales que llegan al receptor COFDM sea menor que el intervalo de guarda se consigue con esto evitar que unos símbolos OFDM se vean afectados por otros, solo permaneciendo de este modo la interferencia intersímbolo.

La tasa binaria de datos puede escalarse para diferentes condiciones: El sistema COFDM se puede adaptar al canal de comunicaciones variando la tasa binaria útil a transmitir perforando el código base del codificador convolucional para canales menos selectivos o de baja interferencia, también se puede reducir cuando se requiere ajustar la distancia máxima entre el transmisor y un receptor ajustando la duración del intervalo de guarda. Los dos métodos anteriores se pueden usar en conjunto pero todo depende del sistema COFDM.

Ampliaciones en Redes de Frecuencia Única (SFN: Single-Frequency Networks): La posibilidad de crear una red de SFN constituye una de las grandes ventajas de un sistema basado en COFDM. Dada la utilización del intervalo de guarda la señal que se utiliza para reducir los efectos del multitrayecto ya sea natural o artificial pudiendo así utilizar varios transmisores separados a una distancia adecuada generando así multitrayecto artificial, entonces se produce una suma de todas las señales de la red que llegan al receptor COFDM. Así, este efecto, produce lo que se llama ganancia de red consiguiendo así una reducción de la potencia del transmisor, logrando una mejor cobertura y reduciendo los costos de la infraestructura.

2.2.2.7.2 Desventajas

Muy sensible a la sincronización en tiempo y frecuencia: Para el receptor le es difícil encontrar el comienzo del símbolo OFDM para así establecer la sincronización en tiempo y para establecer la sincronización en frecuencia le es difícil también encontrar la posición de las portadoras dentro del símbolo OFDM pero todo depende del método de sincronización y del sistema de sincronización escogido.

Mayor complejidad del sistema: Los requerimientos de la corrección del error de fase común, la alta linealidad del amplificador de potencia para el transmisor, la utilización de un codificador secundario más entrelazamiento para mejorar el BER en el receptor y otros requerimientos adicionales, son funciones que incrementan la complejidad del sistema.

Transmisores y receptores más costosos: Al incrementar la complejidad del sistema en COFDM el costo del transmisor aumenta pero aun más el costo del receptor repercutiendo en este último, la relación de costo desempeño dando lugar a receptores de baja, mediana o alta calidad.

Perdida de eficiencia espectral: Es causada por la duración del intervalo de guarda y tasa de codificación utilizadas ya que se necesita ajustar de este modo el sistema COFDM para varias condiciones de funcionamiento.

Más sensible al ruido de fase y al desplazamiento en frecuencia en las portadoras: El ruido de fase es causado por todos los osciladores locales que hay desde la salida de la IFFT del transmisor hasta la entrada de la FFT en el receptor que trae como consecuencia la rotación de la constelación del esquema de la modulación de las portadoras, que da lugar a veces a la ICI. El desplazamiento de frecuencia causa ICI y una reducción en la potencia en las portadoras.

Tiene una alta razón de potencia pico – promedio (peak to average power ratio): Por ser una modulación multiportadora que causa una gran fluctuación en la envolvente de la señal transmitida reduciendo de esta manera la eficiencia del amplificador de potencia de RF del transmisor causando a la vez productos de intermodulación en la señal transmitida, este efecto es reducido por filtros.

2.3 MODELO DE CAPAS DE NRSC-5

En la actualidad todo debe ser basado en el modelo OSI, e IBOC no es la excepción para esto, en la figura 2.12 se puede apreciar como está establecido el modelo del estándar.

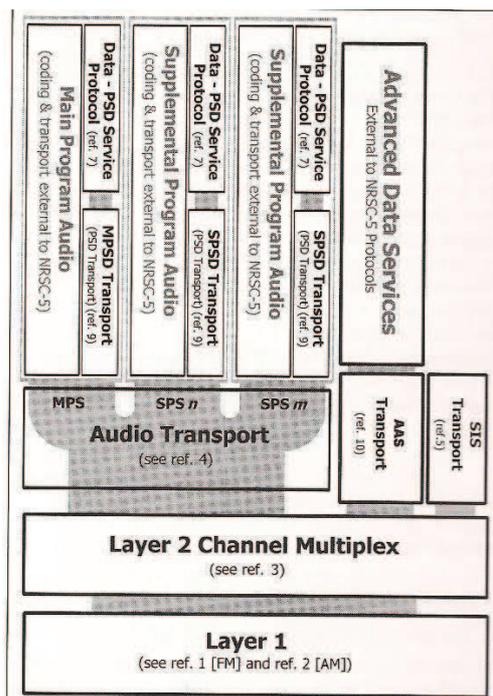


Figura 2.12 Modelo de Capas de IBOC

La capa 1 de este modelo, cubre la capa física y la capa de enlace del modelo OSI, en lo referente ya a la modulación y la forma en que los bits van a ser enviados por el medio, en esta capa, el estándar hace dos referencias, una para FM y otra para AM.

La capa 2 cubre la función que se tiene en la capa de transporte en el modelo OSI, aquí se hace la multiplexación del canal y la asignación de cada slot según la naturaleza de la información, también se establece la QoS (Calidad de Servicio), así como la prioridad la robustez y la protección contra errores.

En este modelo se suprime la capa de red que se establece en OSI, ya que no hay que manejar direcciones, ya que es de difusión para todos los usuarios que puedan captar la señal.

En si las 2 son las capas importantes, en la parte de arriba se consideran ya las aplicaciones y las interfaces o puntos de conexión entre éstas y la capa 2 son las que hacen los PDU de transporte de audio y de servicios avanzados.

En la tabla 2.2 se puede apreciar varios de los servicios que en IBOC se puede llevar.

Service	Service Name	Service Description	Related Transport
MPS	Main Program Service (one service per IBOC station) [Has no independent protocol and consists of the merging of MPA and MPSD in the Audio Transport]	The provision of audio and related data	Audio Transport combines audio and related data
MPA	Main Program Audio	Audio from coder	Outside NRSC-5
MPSD*	Main Program Service Data	Data, primarily text, related to the audio	Program Service Data Transport (PSD)
SPS	Supplemental Program Service (Up to 7 services per IBOC station) [Has no independent protocol and consists of the merging of SPA and SPSD in the Audio Transport]	The provision of audio and related data	Audio Transport combines audio and related data
SPA	Supplemental Program Audio	Audio from coder	Outside NRSC-5
SPSD*	Supplemental Program Service Data	Data, primarily text, related to the audio	Program Service Data Transport (PSD)
SIS*	Station Information Service	Information about the station and the IBOC signal conveyed on OFDM reference subcarriers	SIS also performs the transport function
ADS	Advanced Data Service	All manner of data can be transported, whether or not related to any programming on the station.	AAS Transport

** Only these Services have service protocols included in NRSC-5.*

Tabla 2.2 Servicios varios de IBOC

2.4 IBOC FM

Como ya se ha explicado anteriormente en este trabajo, el estándar maneja en si dos modos de transmisión que son: híbrido, y totalmente digital.

El modo híbrido es aquel que combina las señales analógicas y digitales simultáneamente, estableciéndose la señal analógica en el centro y en las bandas laterales la señal digital, y cuyo espectro podemos apreciar en la figura 2.13

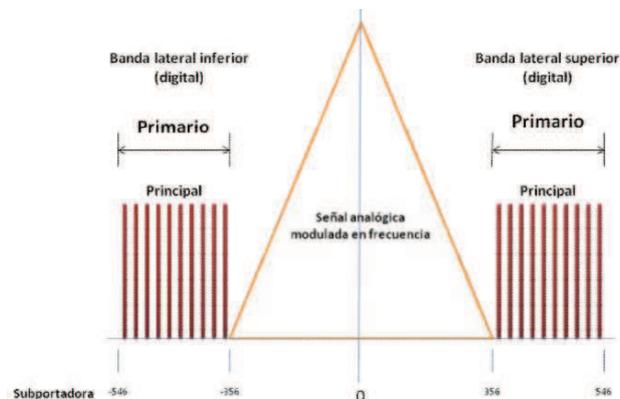


Figura 2.13 Espectro del modo Híbrido

En este modo existe una variante, que algunos consideran que se podría estar hablando de otro modo llamado *híbrido extendido*, pero es una mejora que se hace al híbrido, lo que se hace es aumentar el ancho de banda en la señal digital, asignando más subportadoras y reducir el de la señal analógica, el espectro lo podemos apreciar en la figura 2.14

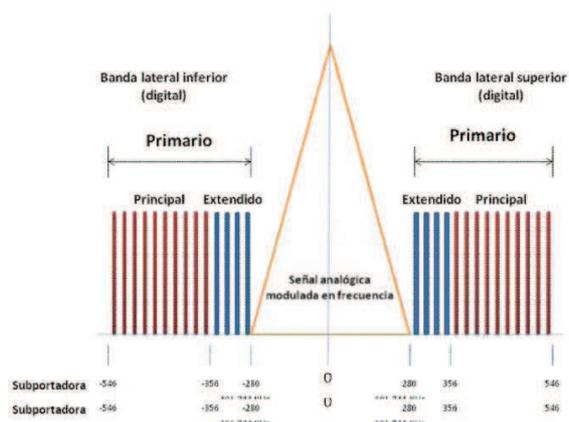


Figura 2.14 Espectro de Híbrido Extendido

El modo totalmente digital, ya no existe ninguna señal analógica, aquí todo el ancho de banda es utilizado con señales digitales, en este modo se incrementa la potencia de transmisión en un 10%, en la figura 2.15 se aprecia el espectro

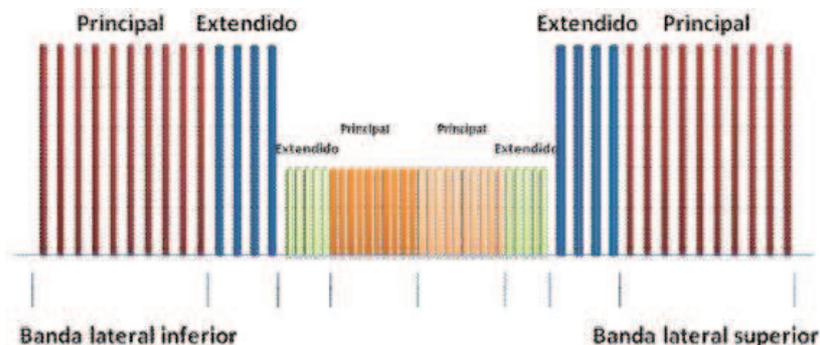


Figura 2.15 Espectro modo Totalmente Digital

El modo Híbrido puede llegar a 100, 112, 125, o 150 Kbps de datos *lossy*³, esto dependiendo de la potencia empleada y el alcance deseado.

Para el modo totalmente digital el estándar habla de una tasa de 270 a 300 Kbps máximo, pero con adicionales como sonido surround, además en este modo también se presenta la condición “fall back⁴” lo que significa que en caso de interferencia, el equipo receptor puede registrar una señal de calidad baja como por ejemplo 20 o 25 Kbps

Las emisoras en modo totalmente digital permiten dividir en 4 canales de baja potencia y 3 de potencia total, lo que nos da un total de 7 por estación; y definido en HD Radio estos canales pueden tener calidad de 100 Kbps que corresponde a un CD, o de 25- 50 Kbps que es FM, o de 12 Kbps lo que es considerado AM, o simplemente con calidad de 5 Kbps que es la de la voz.

³ Datos comprimidos que al descomprimirse son distintos a los originales

⁴ Condición de regresar a un estado anterior de una menor calidad

2.4.1 ANCHO DE BANDA

Hay que recalcar que el estándar IBOC fue la respuesta de EE UU a la propuesta europea, porque esta última habla de un cambio de bandas y frecuencias y las que se eligieron son las que son usadas por el ejército americano y son consideradas de seguridad nacional, en cambio IBOC utiliza la misma banda en la que se encontraba funcionando la banda analógica, la canalización que utiliza EEUU es la misma del país, 400KHz, 200 para la separación y evitar la interferencia y los otros 200 para la señal.

En el modo híbrido la señal analógica toma ± 130 KHz y para la señal digital $\pm(130$ a $200)$ KHz, en la variación de híbrido extendido la señal analógica se reduce hasta más o menos ± 92 KHz y así se hace un incremento de portadoras digitales de información y destinadas a subcanales para suplantar los servicios que se descontinúan, para este decremento también se debe eliminar la codificación estéreo analógica; lo óptimo sería la utilización de todo el ancho de banda para una señal digital, pero considerando que existen aun receptores analógicos, este escenario es un poco lejano.

2.4.2 TOLERANCIA DE SINCRONIZACION

El sistema soporta 2 niveles de sincronización para las emisoras

- Nivel 1: Redes sincronizadas, un ejemplo es GPS
- Nivel 2: Redes no sincronizadas

Lo recomendable es que para los sistemas de transmisión se opere el nivel 1 ya que soporta las características de los nuevos sistemas avanzados.

2.4.2.1 Retraso de la Diversidad Analógica

La precisión absoluta del retraso en la diversidad analógica para la transmisión de señales y que se encuentra definida para ambos niveles de sincronización, está dentro de los $\pm 68 \mu\text{s}$.

2.4.2.2 Precisión y Estabilidad en Tiempo y Frecuencia

El error absoluto en la modulación de símbolos a la frecuencia de reloj en el sistema HD Radio debe cumplir lo siguiente:

± 0.01 ppm como máximo para medios con nivel de sincronización 1

± 1.0 ppm como máximo para medios con nivel de sincronización 2

El error en la frecuencia en la portadora digital cumplirá los siguientes requerimientos:

Para el nivel 1 de sincronización, el error en la portadora a la salida de RF (Radio Frecuencia) debe ser de ± 1.3 Hz como máximo.

Para el nivel 2 de sincronización, el error en la portadora a la salida de RF (Radio Frecuencia) debe ser de ± 130 Hz como máximo.

2.4.3 LIMITES DEL ESPECTRO DE FM

2.4.3.1 Limites del Espectro para el modo Híbrido

Los valores a considerar serán un promedio de las mediciones del espectro de potencia de la señal combinada analógica y digital, tomando un ancho de banda de 1KHz por un espacio de tiempo de 30 segundos, conforme a esto se tiene 0 dBc, se define como la potencia total de la portadora analógica FM no modulada; como base.

Un resumen de las mediciones y los rangos de frecuencias se puede apreciar en la tabla 2.3

Frequency Offset Relative to Carrier	Level, dBc/kHz
100-200 kHz offset	-40
200-215 kHz offset	$[-61.4 - (\text{frequency in kHz} - 200 \text{ kHz}) \cdot 0.867]$
215-540 kHz offset	-74.4
540-600 kHz offset	$[-74.4 - (\text{frequency in kHz} - 540 \text{ kHz}) \cdot 0.093]$
>600 kHz offset	-80

* The requirements for noise and spurious emission limits defined in this subsection reflect acceptable performance criteria. In certain circumstances, additional measures (filtering, active emissions suppression, etc.) may be needed to reduce the spectral emissions below the limits given in this subsection in order to reduce mutual interference between broadcast stations.

Tabla 2.3 Niveles de dBc/KHz según la frecuencia para el modo híbrido

La figura 2.16 nos muestra la gráfica donde se aprecia la densidad espectral.

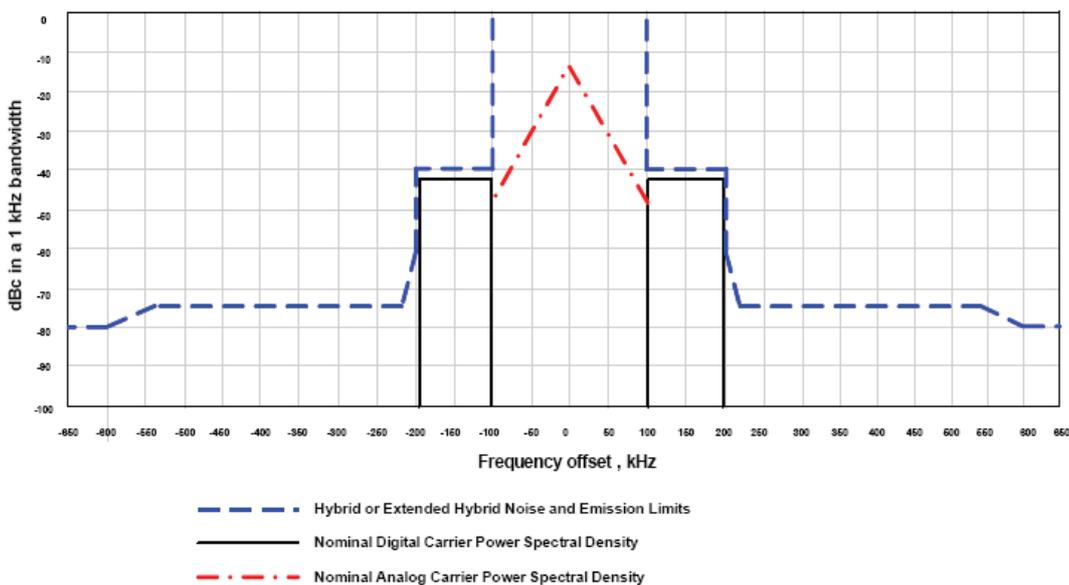


Figura 2.16 Espectro de Potencia Híbrido

2.4.3.2 Límites del Espectro para el modo Totalmente Digital

Los valores a considerar serán un promedio de las mediciones del espectro de potencia de la señal totalmente digital, en un ancho de banda de 1KHz por un espacio de tiempo de 30 segundos a la entrada de la antena, conforme a esto se

tiene 0 dBc en este caso se define como la potencia nominal en 1KHz de la banda primaria principal lateral.

Un resumen de las mediciones y los rangos de frecuencias se puede apreciar en la tabla 2.4

Frequency Offset Relative to Carrier	Level, dBc/kHz
200-207.5 kHz offset	$[-20 - (\text{frequency in kHz} - 200 \text{ kHz}) \cdot 1.733]$
207.5-250 kHz offset	$[-33 - (\text{frequency in kHz} - 207.5 \text{ kHz}) \cdot 0.2118]$
250-300 kHz offset	$[-42 - (\text{frequency in kHz} - 250 \text{ kHz}) \cdot 0.56]$
300-600 kHz offset	-70
>600 kHz offset	-80

† The requirements for noise and spurious emission limits defined in this subsection reflect acceptable performance criteria. In certain circumstances, additional measures (filtering, active emissions suppression, etc.) may be needed to reduce the spectral emissions below the limits given in this subsection in order to reduce mutual interference between broadcast stations.

Tabla 2.4 Niveles de dBc/KHz según la frecuencia para el modo totalmente digital

La figura 2.18 nos muestra la gráfica donde se aprecia la densidad espectral.

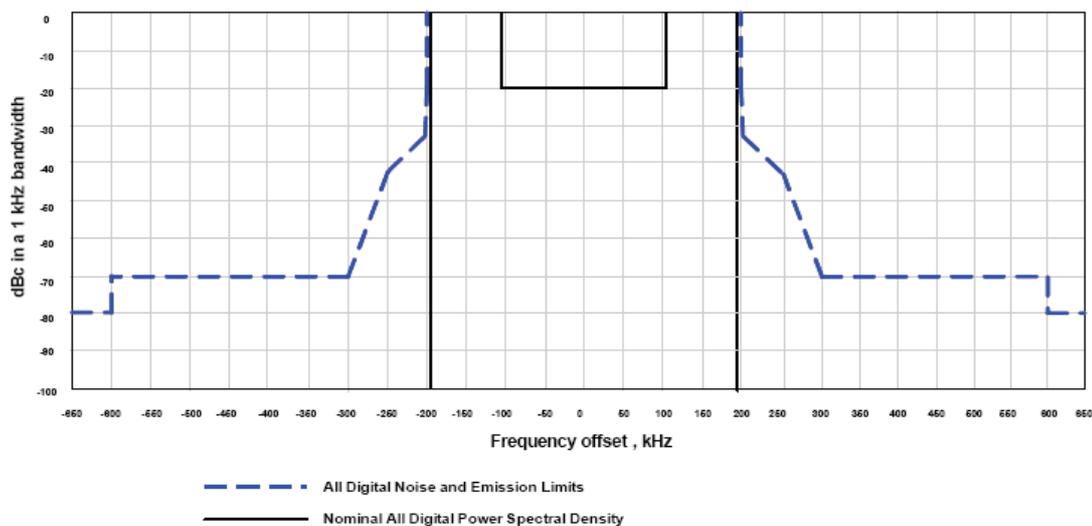


Figura 2.17 Espectro de Potencia Totalmente Digital

2.4.4 CANALES LOGICOS

El canal lógico es un trayecto de la señal que transporta las tramas de datos. Para los modos de servicio en las ondas de modo híbrido y totalmente digital existen 4 canales lógicos Primarios y 6 canales Secundarios, estos últimos son solo utilizados en el modo totalmente digital.

Los canales principales P1, P2 y P3 son utilizados para la configuración de servicios de audio primario y el canal PIDS para configurar datos primarios e información de la estación emisora; en la tabla 2.5 se puede apreciar las velocidades teóricas de cada uno de estos canales para el modo de servicio requerido.

Modo de Servicio	Velocidad de transmisión de la información teórica (Kbps)				Forma de Onda
	P1	P2	P3	PIDS	
MP1	25	74	0	1	Hibrida
MP2	25	74	12	1	Hibrida ampliada
MP3	25	74	25	1	Hibrida ampliada
MP4	25	74	50	1	Hibrida ampliada
MP5	25	74	25	1	Hibrida ampliada, completamente digital
MP6	50	49	0	1	Hibrida ampliada, completamente digital
MP7	25	98	25	1	Hibrida ampliada, completamente digital

Tabla 2.5 Velocidades Teóricas para cada Canal Primario según su modo de servicio

Los canales secundarios son utilizados ya para las transmisiones en totalmente digital, aquí se ocupan los canales S1, S2, S3, S4 y S5 para la configuración de audio secundario y complementario al principal, por ejemplo el sonido ambiental; el canal SIDS es el encargado de contener los datos e información de la emisora; en la tabla 2.6 se muestra las velocidades teóricas que cada uno de estos canales contiene para los servicios que pueden prestar

Modo de Servicio	Velocidad de transmisión de la información aproximada (Kbps)						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

Tabla 2.5 Velocidades Teóricas para cada Canal Secundario según su modo de servicio

2.4.5 CODIFICACION Y COMPRESION DE AUDIO

El objetivo de este bloque es lograr reducir la cantidad de bits de información que sean necesarios para la transmisión, manteniendo una calidad de audio alta, tanto es así que con una velocidad de 96Kbps se logra una calidad de audio igual a la de un Disco Compacto.

IBOC establece para cada modo de funcionamiento velocidades nominales y mínimas de los codificadores, aunque no se define un codificador en específico para la fuente, pero trabaja muy bien para los codificadores:

- **AAC** (Advanced Audio Coding) es un formato informático de señal digital audio basado en el Algoritmo de compresión con pérdida, un proceso por el que se eliminan algunos de los datos de audio para poder obtener el mayor grado de compresión posible, resultando en un archivo de salida que suena lo más parecido posible al original.

AAC codifica el espectro de audio hasta 6 KHz y mediante técnicas SBR (Spectral Band Replication) se transmiten y reconstruyen los sonidos situados en la banda superior del audio.

- **PAC** (Perceptual Audio Coding) es un algoritmo como el estándar MP3 de MPEG usado para comprimir audio digital removiendo información extraña no perceptible por la mayoría de la gente. Éste es usado en el Satélite de Radio Sirius para su servicio de DARS (Radio Digital por Satélite). PAC es muy similar a AAC, con el cual comparte muchos elementos de diseño. Permite una alta compresión de la señal fuente, utiliza una frecuencia de muestreo de 44,1 KHz, donde la calidad de un canal de 6-8 Kbps es similar a una señal de AM, la de un canal de 16-24 Kbps es similar a una FM y la de un canal de 32 Kbps es próxima a la del disco compacto 64 Kbps.

2.4.6 CODIFICACION DE CANAL

La codificación de canal no es más que el aumento de bit para crear redundancia y así poder detectar y eliminar en un mayor grado los errores que se producen por las interferencias en las bandas de frecuencia y a fin de que no afecten la información que llega al receptor. Para IBOC los códigos que se utilizan son los códigos de Viterbi.

Cuando se establece la redundancia, sale a flote un problema, si se tienen errores tipo ráfaga, se dificultaría el poder corregirlos, pudiéndose así dejar pasar datos erróneos, cosa que no se quiere, es por eso que se suma el entrelazado de los símbolos en tiempo, logrando así en el caso de presentarse errores, dispersarlos y corregirlos de forma independiente y sencilla, en el receptor todos estos símbolos se reordenan y se leen correctamente; este principio también es utilizado en las portadoras para evitar que por desvanecimiento existan errores, se hace un entrelazado pero ya en frecuencia.

2.4.7 ESQUEMA GENERAL

Para tener una visión general del funcionamiento del estándar para FM, podemos dar un vistazo a la figura 2.18

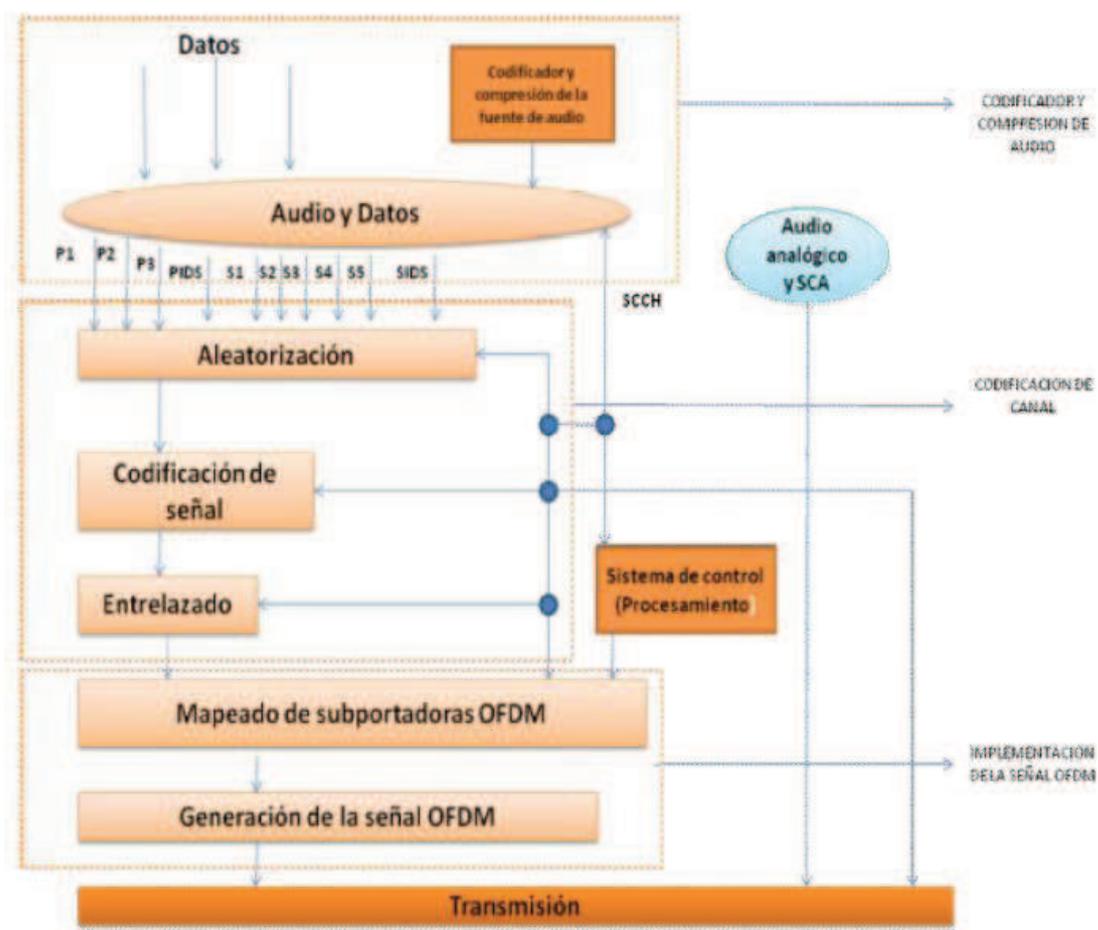


Figura 2.18 Visión General de Funcionamiento de IBOC FM

CAPITULO 3

RECEPTOR HIBRIDO PARA EL ESTÁNDAR IBOC

3.1 INTRODUCCIÓN

El estándar NRSC-5 es fundamentalmente considerado un estándar para transmisión, es por esto que existen pocos criterios y especificaciones para los receptores. Para la realización de los equipos receptores no hay un modelo determinado, pues esto depende de cada uno de los fabricantes que tienen asignada licencia dada por iBiquity que es la empresa dueña de los derechos del estándar IBOC, y también de la marca HD Radio™ que se considera el nombre comercial para el estándar pero que ya definen normas específicas y es lo que hacen las diferencias entre ambos, una clara y muy importante es en los códecs de audio que se utilizan, mientras en NRSC-5 puede ser cualquiera el códec utilizado, en HD Radio debe ser obligatoriamente el códec HDC⁵ (Hybrid Digital Coding) que es de propiedad de iBiquity; tal es así que transmisores y receptores definidos y fabricados para otros códecs distintos al de iBiquity no son considerados productos de HD Radio™, pero si son catalogados como equipos para NRSC-5 o IBOC.

También es posible para los fabricantes producir receptores que no lleven la marca HD Radio™, pero que si son capaces de recibir las señales de transmisiones que se hagan con equipos que sean certificados por esta marca. Este es el caso para los productos que utilizan el códec HDC propiedad de iBiquity, pero que no utilizan el circuito integrado de software desarrollado por esta misma empresa. Algunas empresas fabricantes se encuentran discutiendo esta opción para que estos productos sean también certificados; y ellos poder desarrollar su propio software mejorando el rendimiento de algunas aplicaciones, como por ejemplo el ahorro de energía.

⁵ HDC junto con SBR (Replicación de Banda Espectral) es una propiedad con pérdida de compresión de audio desarrollado por iBiquity para su uso con HD Radio. Se sustituye el anterior PAC. Se cree que es una forma modificada de MPEG-4 HE-AAC

3.2 COMPONENTES DEL RECEPTOR

Como se describió en los párrafos anteriores se tiene diferentes fabricantes y no hay una especificación clara para el desarrollo de los equipos receptores, así es que para explicar el proceso y la conformación de un receptor básico híbrido, lo haremos con la ayuda de un diagrama de bloques. En la figura 3.1 se puede apreciar los componentes que se consideran en un receptor para así captar señales que se hayan transmitido con el estándar IBOC.

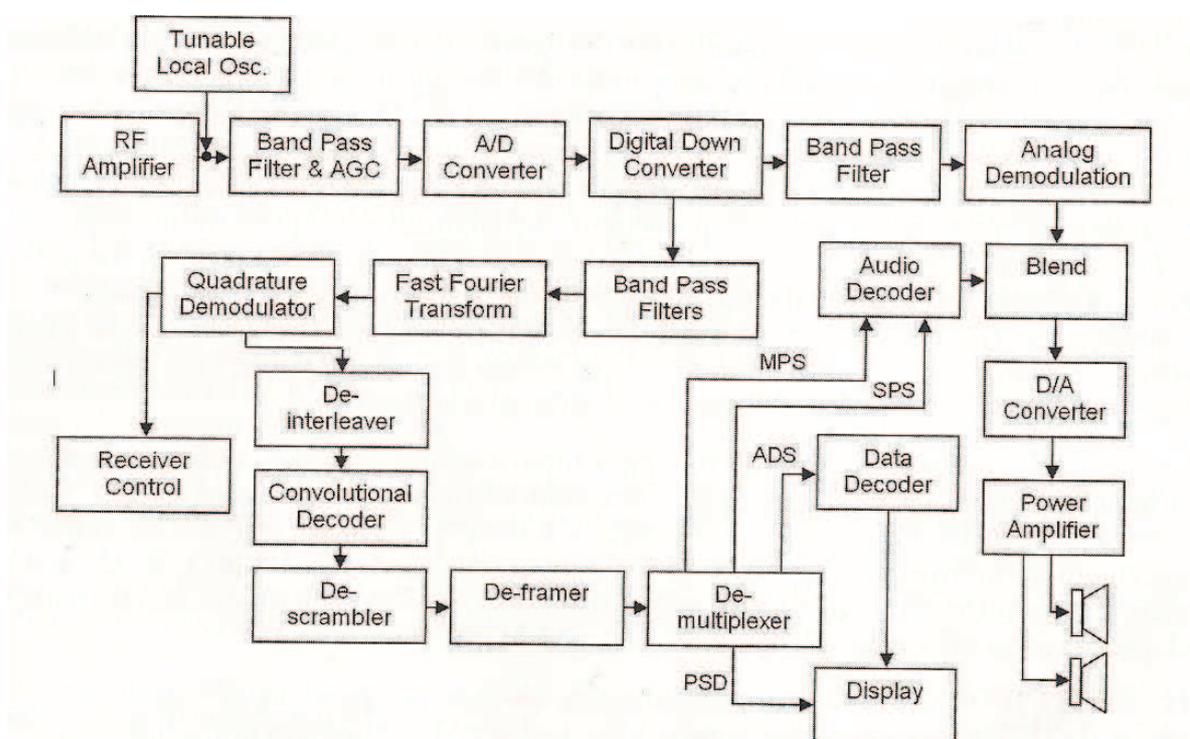


Figura 3.1 Diagrama de Bloques de un Receptor Híbrido IBOC

Como se puede identificar los tres primeros bloques no son variantes a lo que se tiene en un receptor analógico tradicional, así que no se va a hondar en una explicación un poco más específica como con los otros componentes.

3.2.1 AMPLIFICADOR DE RADIO FRECUENCIA

Es el encargado de tomar la señal que ha sido captada por la antena y aumentarla de valor para que el nivel de la misma este sobre el umbral mínimo requerido para su procesamiento

3.2.2 OSCILADOR LOCAL SINTONIZABLE

En este bloque se cumple una doble función, la primera como su nombre lo indica, es la encargada por medio de un circuito oscilador variable y sintonizable de crear una onda que tiene que interactuar con la que sale del amplificador de RF; la segunda función es la de servir como mezclador, y es la encargada de la combinación e interacción de ambas ondas y así poder obtener la frecuencia intermedia característica de FM cuyo valor es de 10.7MHz. Después de esto se realiza un primer filtrado para eliminar y atenuar las señales no deseadas alrededor del centro de la IF.

3.2.3 FILTRO PASA-BANDA Y CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA

Por algunos años fue una práctica común en este bloque el hacer un filtro pasa-banda para eliminar el problema de la interferencia adyacente que se originaba por el filtro en la FI, pero se obtenía un estrechamiento de las bandas de sonido y en otros casos también la información del estéreo; ahora existen ciertas mejoras.

Para receptores con estándar IBOC se tienen que hacer ciertas adecuaciones, esencialmente porque no solo se tiene una señal analógica, sino también en las bandas laterales información en forma digital que se encuentran $\pm 198.4\text{KHz}$ de la frecuencia central, y si se aplica los mismos principios se la pierde; es por eso que el primer filtro que se encuentra en el bloque anterior debe estar a $\pm 275\text{KHz}$ de la IF.

En este bloque se cumple otra función que se conoce como el control automático de ganancia (AGC), y se trata de un circuito de amplificación y una realimentación, lo que se pretende con esto es que se incremente o disminuya la señal para mantenerla en forma constante para ser usada en el resto de los componentes del receptor. La función AGC tiene una mayor importancia en los receptores de radio digital IBOC porque para descifrar en forma correcta las bandas laterales digitales el receptor debe estar trabajando en su rango lineal de operación; las variaciones no lineales en la señal de las bandas laterales pueden dañar la información y producir un incremento de la tasa de error en la señal decodificada.

3.2.4 CONVERSION ANÁLOGO-DIGITAL

Este es el bloque donde los receptores para IBOC se empiezan a distanciar de los receptores analógicos tradicionales. Aquí la señal filtrada es convertida íntegramente en digital con el conversor A/D, lo que podría resultar confuso porque siempre se ha considerado en la onda híbrida a la señal FM tradicional como la porción analógica y a la información digital IBOC que se encuentra en las bandas laterales modulada en OFDM como la porción digital, pero se la considera como una señal analógica que contiene valores específicos asociados con cada instante de tiempo, estos valores son el resultado de la combinación de la señal de FM con la de OFDM en ese instante.

La conversión que se le hace a la señal híbrida en este conversor debe ser a una frecuencia lo bastante alta para poder evitar el aliasing; el aliasing es lo que pasa cuando las muestras periódicas de una señal pueden ser interpretadas como las muestras de dos señales muy diferentes y por lo tanto son ambiguas, esto se puede dar por que la frecuencia de muestreo de una señal sinusoidal es demasiado baja, en la figura 3.2 se puede apreciar un ejemplo de esta condición donde se puede ver que según la velocidad de muestreo la señal recuperada es la señal original o una señal de una frecuencia más baja.

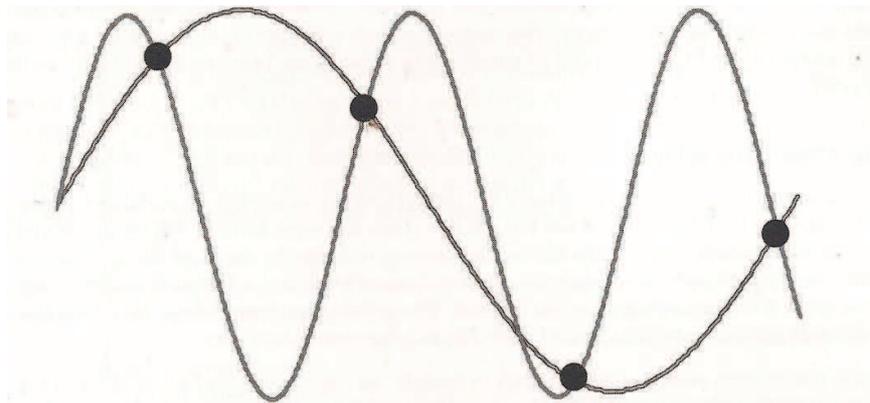


Figura 3.2 Ejemplo de Aliasing

Para evitar el aliasing lo prudente sería hacer un filtrado antes del muestreo y luego utilizar una frecuencia del doble de ancho de banda con la que se muestrea (FM por lo menos 1100KHz), resultando en un rango dinámico suficiente.

La información digital que caracteriza el modo híbrido puede ser procesada por el resto de los componentes del receptor. La gran pregunta es para que hacer una digitalización de la porción analógica y obtener una equivalente digital; existen dos razones; la primera es que con esto se crea oportunidades de utilizar el procesamiento computacional y tener un mejoramiento en esta porción de la señal, y la segunda es porque se hace necesario para la implementación de la función de mezclado que se discutirá más adelante en este capítulo.

3.2.5 SUBCONVERSION DIGITAL

Tiene como función eliminar la IF y pasar la señal a banda base, lo realiza tomando la señal que sale del ADC y la mezcla con una versión generada internamente de la frecuencia intermedia una vez hecho esto la señal se puede dividir.

Con esta división se produce dos salidas una donde se sigue tratando con la porción analógica y la otra que es la información de las bandas laterales. Para la porción analógica se sigue el proceso parecido al de los receptores analógicos FM hasta llegar a su demodulación, y es por eso que los bloques que cubren ese proceso no serán descritos y seguiremos nuestro desarrollo en dirección a los bloques que procesan la información que se tiene en las bandas laterales.

3.2.6 FILTRO PASA BANDA

Este filtro es el encargado de remover cualquier energía extraña que se encuentre dentro de los límites de frecuencia de la banda base. La FFT realiza también este filtrado, por lo que la existencia de este filtro no es absolutamente necesaria y se puede obviar, pero esta decisión está a cargo de los fabricantes que lo pueden utilizar para hacer una optimización al diseño del circuito.

3.2.7 TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER (FFT)

La FFT toma la señal que se encuentra en banda base y combinada de cada banda lateral para re-expresarla en términos de códigos de bits complejos que fueron impuestos en las subportadoras, las cuales son divididas de forma individual para reducir la potencia y facilitar su procesamiento.

La salida de este bloque es un grupo de bits en forma paralela, y cada uno representa una subportadora individual.

3.2.8 DEMODULADOR DE SUBPORTADORAS

También llamado demodulador de cuadratura, y es así como aparece en el diagrama de bloques que se aprecia en la figura 3.1.

Cada una de las subportadoras está constituida por la combinación de dos señales que se encuentran separadas 90 grados, la primera señal se la designa con la letra I (In-phase) y a la segunda por Q (Cuadratura), con lo que el conjunto de ambas se nominara I-Q, y se encuentra después de la modulación en forma de números complejos, donde la parte imaginaria existe y se encuentra representando la señal Q.

En la señal FM IBOC las subportadoras que se encuentran en las bandas laterales y en las que se lleva información de audio, información auxiliar y la información de la estación transmisora están usando QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) y las subportadoras que sirven para referencia se encuentran en BPSK (Binary Phase Shift Keying).

Para la decodificación de las señales que se encuentran con QPSK se establece que si se tiene un uno real este corresponde a un uno digital, si este valor real es negativo es un cero digital; mientras que con un valor imaginario de j se tiene un uno digital y con $-j$ el valor sería de cero digital, esto se aprecia mejor en la figura 3.3. En el caso de las señales en BPSK el valor real positivo y un valor imaginario de j representan al uno digital, siendo el cero representado por un valor negativo junto con un valor imaginario de $-j$; es así que en la versión de IBOC dos símbolos BPSK son los usados para el código de un bit de información.

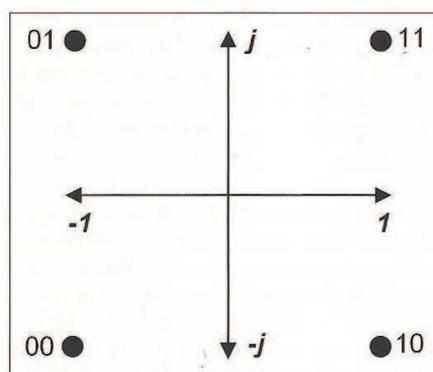


Figura 3.3 Constelacion de QPSK para FM IBOC

Cada subportadora sea QPSK o BPSK transmite 344.5 símbolos cada segundo, lo que nos significa 649 bit de código por segundo para las QPSK y los mismos 344.5 bit de código por segundo en las BPSK. En el modo Híbrido (ejemplo el MP1) se tiene por banda lateral a: 180 subportadoras que llevan información de audio y datos, y 11 subportadoras de referencia, lo que significaría el doble de 180QPSK + 11BPSK y aplicando se tendría $2 * ((180 * 689) + (11 * 344.5)) = 255.619 Kbps$. De aquí los bits de código son utilizados para la corrección de errores en la información, por lo que la velocidad real de los datos en el sistema del modo híbrido esta alrededor de los 96 Kbps

Los datos aun no están listos para entrar al decodificador de audio, porque la mayoría se encuentran revueltos, entrelazados y codificados de forma convolucional, ya que todo esto es lo que se aplica para minimizar las imperfecciones que pueden presentarse en el canal.

Este bloque tiene dos salidas una pasa al bloque de control, y la otra sigue para que tenga efecto el proceso de des-entrelazado y de decodificación convolucional.

3.2.9 CONTROL DE RECEPCIÓN

Este bloque está dedicado a la revisión de las subportadoras de referencia para conocer y determinar en el modo (híbrido, totalmente digital, etc.) en que se encuentra la estación propagando la información. Para las estaciones que funcionan en el modo híbrido, las subportadoras de referencia son utilizadas por este bloque para determinar si la señal consta de bandas laterales extendidas.

Los datos de las subportadoras de referencia son usados inmediatamente por el receptor por medio de este bloque y es por esto que no pasan al des-entrelazador y siguen el proceso de decodificación.

3.2.10 DES-ENTRELAZADO

El entrelazado es realizado en el transmisor para agregar diversidad en tiempo y frecuencia para mitigar los efectos de errores en la señal.

Las subportadoras restantes son divididas en particiones de frecuencia y el des-entrelazador toma los símbolos de estas particiones de frecuencia y los inserta en las filas de una matriz bidimensional; una vez que esta matriz está llena los símbolos se empiezan a leer de una forma diferente a la que ingresaron a la misma, esto es siguiendo un patrón ya específico, que es inverso al que se siguió en el transmisor. Este patrón a seguir depende del modo de transmisión que se usó sea este híbrido, extendido o totalmente digital.

El resultado final del des-entrelazado son series que se encuentran en paralelo, de símbolos que estaban codificados convolucionalmente y revueltos entre sí; el número de serie de símbolos está en relación al modo de servicio del transmisor; un ejemplo sería para FM híbrido se tiene dos serie de símbolos, una que es la que lleva información de audio y/o datos auxiliares, y la otra serie que lleva la información de la estación transmisora.

3.2.11 DECODIFICADOR CONVOLUCIONAL

Se conoce también comúnmente como FEC (corrección de error hacia adelante).

Al igual que el entrelazado, la codificación convolucional es un proceso que se realiza en el transmisor para minimizar los errores que se puedan presentar en el viaje de la señal, pero no solo de esta similitud gozan ambos, sino también que el método específico de la codificación depende del modo de servicio que se vaya a emplear. Sin embargo en todos los modos de servicio la operación de codificación

es muy similar, una cadena serial de bits entra al codificador y se crean tres nuevas cadenas, con los bits que se encuentran muy cerca unos de otros.

La última salida del codificador es una cadena serial de datos que contiene más bits que la cadena entrante. La cadena que sale del codificador no contiene el mismo número de bits como la cadena entrante; el valor de cada uno de los códigos está en función de varios bits que fueron introducidos en el codificador, expandiendo esta cadena de bits ayudamos al receptor a corregir los errores que se pueden presentar.

Para deshacer toda la codificación convolucional se utiliza un decodificador Viterbi; este decodificador analiza los símbolos de entrada en grupos que los denomina palabras de rama(branch words), a cada una las comparan con las posibles palabras que pudieron ser transmitidas para determinar con cual tiene una mayor probabilidad de concordancia, un ejemplo se puede apreciar en la figura 3.4 donde cada palabra de rama está constituida por 2 bit, por lo que las posibles palabras a comparar serian: 00, 01, 10 y 11, ahora se debe recordar que el símbolo que se recibe y entra al decodificador no tiene la misma amplitud con la que salió del transmisor, es así que se tiene que hacer una cuantificación para determinar valores entre cero y uno y hacer una correcta interpretación del símbolo, empiezan las comparaciones haciendo mediciones a los valores de cada código y se escoge a la menor distancia, estas distancias son llamadas métricas de la rama(branch metric).

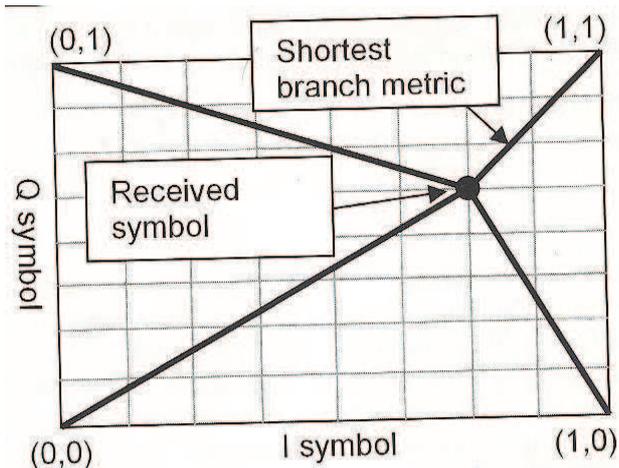


Figura 3.4 Ejemplo de Decodificador

A continuación las palabras las utiliza el decodificador para armar una matriz llamada diagrama de enrejado (trellis diagram), y una vez que este diagrama se llena, en este se empieza a buscar el camino a través del cual el número de discrepancias sea el menor, conduciéndonos al valor del símbolo que es el más probable y correcto, este valor sería también considerado como “error corregido”; en la figura 3.5 podemos apreciar un ejemplo del proceso. Hay que tener presente que la decodificación en los receptores IBOC es más compleja y complicada a la que en el ejemplo se muestra, pero nos sirve como concepto general del proceso.

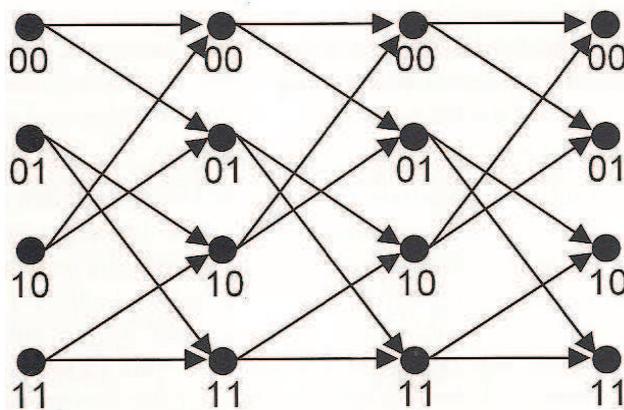


Figura 3.5 Ejemplo del proceso del diagrama de enrejado

El diagrama empieza con 00 y espera al siguiente símbolo que entre para determinar cuál es el camino donde se tiene una discrepancia y cual el correcto, es de aquí de donde nace la menor acumulación de discrepancias a la que hace alusión el párrafo anterior.

La estimación por parte del decodificador de los símbolos transmitidos se basa en los símbolos recibidos y en la comprobación en varias ocasiones de estas estimaciones mediante el análisis de los símbolos sucesivos recibidos y la relación existente con los que les precedieron. Si un símbolo erróneo llega al decodificador del receptor este puede detectarlo y corregirlo usando este método.

En el modo híbrido para FM la velocidad a la salida del decodificador es de 40 por ciento de la velocidad que entró, resultando en una velocidad de salida total de $255.619 \text{ Kbps} * 0.4 = 102247.6 \text{ bps}$. Esta velocidad no es la de payload que se envía a través del sistema, más bien es la velocidad combinada de los datos de audio, auxiliares y la información de la estación, así como también los bits utilizados para organizar los datos dentro de las tramas. Cuando la señal se codificó, el transmisor adicionó un total del 150 por ciento de bits a los que se tenía en la entrada, todo esto para evitar errores, resultando en una tasa dos y media veces superior a la tasa de entrada al codificador.

El codificador y decodificador convolucional son la razón de que la velocidad de audio sea mucho más baja a la velocidad de datos que se tiene en los datos sin procesar que se recibe de las subportadoras OFDM. Pero también son los elementos importantes del sistema que ayuda a una recepción sin errores en los ambientes móviles.

3.2.12 DESENCRIPTADORA

Después de pasar el proceso de des-entrelazado y la decodificación convolucional los datos aun siguen revueltos, y es en este bloque donde se realiza esta desenscripción; se debe recordar que en el transmisor existe un generador de secuencias de encripción, para que con los datos que se tiene, se aplique la operación XOR bit a bit. Cuando se vuelve aplicar la XOR en el receptor repitiendo el generador de las secuencias, lo que se obtiene es la trama de bits, esto se aprecia en la figura 3.6

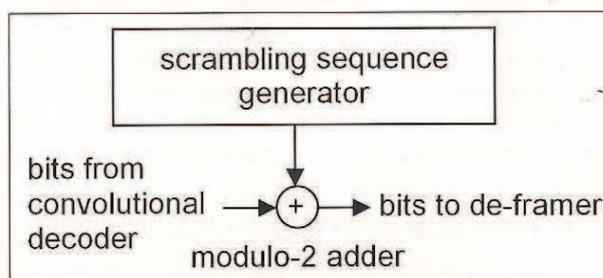


Figura 3.6 Proceso de Desenscripción

Desde el bloque de des-entrelazado para FM híbrido se tienen dos series de datos que se encuentran en paralelo, una donde está la información de la estación y en la otra los datos de audio y auxiliares, para entender mejor este concepto nos remitimos a la figura 3.7, donde ya se puede dar una idea clara de lo que se está hablando.

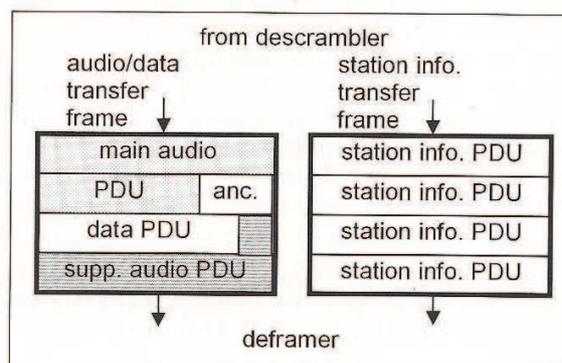


Figura 3.7 Ejemplo de los datos paralelos en FM Híbrido

3.2.13 PROCESADOR DE TRAMAS

Después de la descodificación lo que se tiene son cadenas de tramas que contienen la información de la estación y los datos auxiliares y de audio. Las cadenas que contienen la información de la estación consisten en bloques de datos que llamaremos SIS (Station Information Service) PDU (Protocol Data Units), y cada una de estas SIS tiene una longitud de 80 bits, y contiene la información referente como la localización geográfica del transmisor, la hora del día, lemas, etc.

En el caso de las que contienen los datos auxiliares y de audio, se incluye información de control la cual indica si la trama contiene PDUs del canal principal de audio, de audio suplementario, o de los datos auxiliares; además esta información de control contiene el tamaño de las PDUs ya que no es constante como en el caso de las SIS, y se propaga a través de las tramas en pequeños trozos entre los PDUs de audio y datos auxiliares.

Los tipos de PDUs de los datos de audio y auxiliares son:

- Main Program Service (MPS), las cuales transportan lo principal del servicio de audio.
- Supplemental Program Service (SPS), las que se encargan de transportar lo suplementario del servicio de audio.
- Main Program Service Data (MPSD), transporta datos asociados con las MPSs de audio, como título de la canción y la información del artista.
- Supplemental Program Service Data (SPSD), transporta datos que se encuentran asociados con las SPSs

- Advanced Application Service (AAS)

Después de que se hace la extracción de las PDUs y la eliminación de la información de control la velocidad en el modo híbrido FM es menor a 102.523 Kbps.

3.2.14 DEMULTIPLEXOR

Este bloque se encarga de dirigir y enrutar las PDUs hacia la localización adecuada y correcta para su proceso. Las PDUs MPS son dirigidas hacia el decodificador principal del canal principal de audio, las PDUs SPS deben ir en dirección del canal secundario de audio, que podría estar en el decodificador del canal principal de audio; las PDUs MPSD y SPSD son dirigidas hacia un decodificador para que sean mostrados en el display del receptor. Las PSD (P puede ser M o S) se usan con asociación a los paquetes de audio, para que haya una concordancia con la programación que el usuario ha elegido.

Las PDUs SIS son decodificadas e insertadas en una memoria para que puedan ser publicadas por el receptor en su display.

Las PDUs AAS se direccionan a un lugar apropiado, un ejemplo serían pantallas donde se podría mostrar imágenes, pero hasta la fecha en el mercado los receptores IBOC no tienen la capacidad de manejar este tipo de datos AAS.

3.2.15 DECODIFICADOR DE AUDIO

Es uno de los mayores aspectos en controversia, puesto que en NRSC-5 no hay una definición para un códec de audio específico, y esto se debe a los derechos legales y de propiedad de la empresa iBiquity obtenidos por el desarrollo del códec HDC. Aunque también se puede implementar cualquier otro códec y seguir cumpliendo con lo que se establece en la norma, lo que si queda claro es que

transmisor y receptor deben utilizar el mismo códec para poderse entender y tener comunicación.

Aunque no se defina un códec por parte de NRSC-5, si se define como debe los bits de audio dividirse en dos niveles de importancia, estos niveles son llamados “core” y “enhanced” (anexo A). Los bits de audio más importantes que se han codificado, son incluidos en el core; estos se pueden decodificar por si mismos, pero dan como resultado una calidad menor a la que se obtendría con la decodificación de los bits que se encuentran en enhanced, pero estos no se pueden decodificar por si mismos. Hacer una división como la que se presenta aquí ayuda a aumentar la cobertura de la señal y lograr que los tiempos de ajuste sean más rápidos, porque el receptor puede regresar al core cuando las deficiencias del canal están causando errores en los datos y los receptores son capaces de sintonizar en el core la adquisición de la señal inicial un poco más rápido.

Una señal PCM de audio, es lo que se obtiene a la salida de este bloque y que va directo al mezclador del que hablaremos a continuación.

3.2.16 MEZCLADOR

Algo que no se mencionó en la parte del subconversor digital es que a la porción analógica de la señal híbrida de FM después de ser desmodulada se la convierte en una señal PCM, al igual que la salida del decodificador de audio para la porción digital, de aquí en adelante sabemos que las dos señales que tenemos son digitales, pero para hacer una diferencia hablaremos de parte analógica y digital, para un mejor entendimiento de que señal se está procesando.

Cuando las señales que entran son la porción analógica y el audio MPS, el mezclador no tiene ningún problema, ya que se trata del mismo audio, para este

efecto las señales son alineadas en tiempo y así son mezcladas produciendo que el oyente no pueda detectar ningún eco, clic, etc., lo único que se puede notar es una mejora en calidad de audio cuando se mezcla de análogo a digital. En el caso de que la mezcla se la pretenda con el audio SPS, esta no se puede dar porque en la señal analógica no existe este tipo de datos.

En la cabecera de cada PDU MPS existen 5 bits que son utilizados para definir la ganancia que el receptor puede aplicar a la señal de audio de IBOC híbrido, con el fin de que el oyente no pueda notar diferencias en el nivel, entre las señales analógicas y digitales, cuando este se encuentra mezclando; estos bits definen un rango que va desde -8dB a 7dB.

En el mezclador se cumplen dos funciones importantes; la primera permitir el ajuste de un flujo de audio MPS y hacerlo instantáneo para el oyente, porque la señal analógica puede enviarse inmediatamente al altavoz después del ajuste, pero el usuario puede oír después del procesamiento y almacenamiento de la porción digital de la señal IBOC hasta que se complete y se encuentre disponible en la salida del decodificador; la segunda función es que en señales híbridas donde la porción digital cuenta con una baja potencia y la porción analógica que la acompaña cuenta con una potencia alta, el mezclador activa en el receptor el desvanecimiento de esta señal analógica en el borde de la cobertura digital.

Es por causa de este bloque que en la estación transmisora se debe retrasar el audio analógico, si no se hiciera así el audio analógico entraría muy por delante del audio digital que sale del decodificador, dificultando el hacer la mezcla; si el sistema se diseñaba sin considerar el retardo entre señales, no le creaba problemas a los receptores que aun sean analógicos, pero para los receptores digitales se hubiera presentado un silencio de unos segundos antes de obtener audio, cada vez que sintonizaban la emisora deseada. El tener este retardo entre las señales analógicas y digitales nos crean la posibilidad de tener diversidad en

la recepción, y cuando una de ellas este sufriendo interrupciones la otra tomara el relevo.

A la salida de este bloque ya se sigue la parte tradicional con un convertidor digital-analógico que prepara la señal para un amplificador de potencia para que pueda ser oída por medio de los altavoces que se incluyen, estos bloques no contienen especificaciones diferentes y distintas a lo ya establecido con anterioridad.

Acotando algo más, se sabe que la mayor parte de los tiempos de procesamiento en los receptores IBOC son fijos, a excepción de los que se involucran en la decodificación del audio, y esto es por lo que ya se expuso antes, que la longitud de los paquetes que contienen el audio es variable.

3.3 OTROS MODELOS PARA EL RECEPTOR IBOC

En la figura 3.8 apreciamos el primer desarrollo de microchip que fabrico la Texas Instruments para lo que es el proceso en banda base de la señal, este proceso lo hace de forma indiferente para AM y FM.

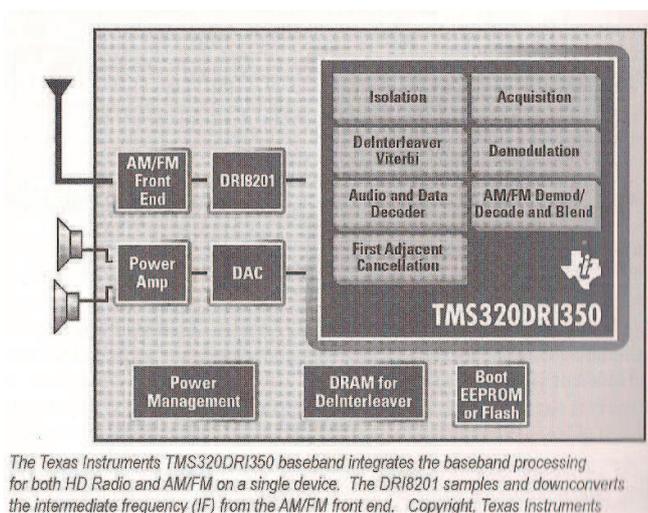


Figura 3.8 Diseño de Texas Instruments

En la figura 3.9 se aprecia el diseño de un equipo de recepción para automotores, unas de las primeras empresas en desarrollar estos prototipos fue KENWOOD Corporation.

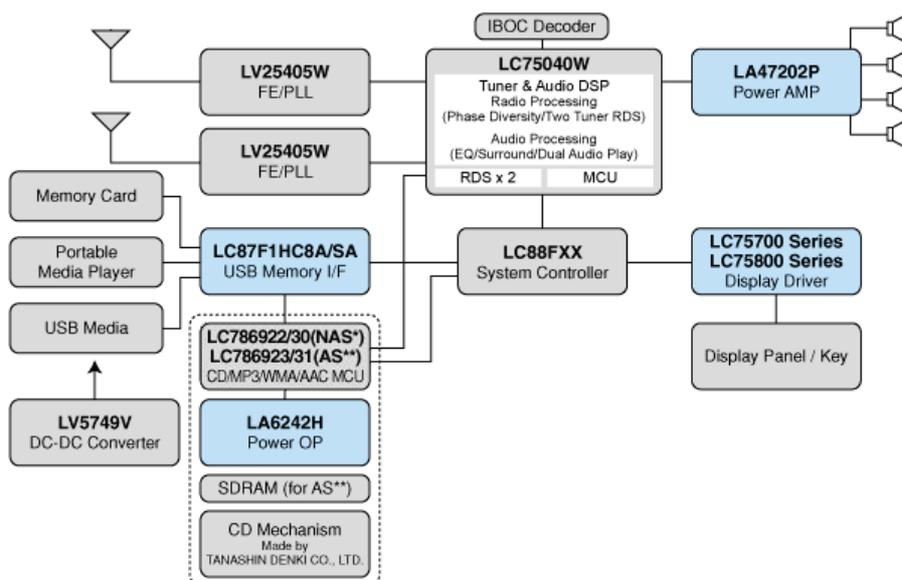


Figura 3.9 Diseño de Receptor para Automóvil

3.4 DESAFÍOS PARA LOS RECEPTORES IBOC

3.4.1 TUNING

Cuando una estación ya se encuentra sintonizada el cambio entre las PDUs de MPS y de SPS se realiza instantáneamente, lo único que se hace es en el desmultiplexador es seleccionar las PDUs SPS en lugar de las de MPS.

Cuando se quiere mover la sintonía hacia otra estación emisora que se encuentra en una frecuencia mayor a la actual, no se crea ningún problema porque la adquisición de los SPS se puede volver casi instantánea, puesto que hasta que se procese la información digital se puede alimentar los altavoces con la señal analógica. El problema se presenta en el caso de que no se haga un avance en el

dial, sino un retroceso porque la emisora que se busca se encuentra en una frecuencia anterior a la actual, y en esta búsqueda hacia atrás lo que el receptor procura es encontrar la portadora de RF y decodificar los datos que contienen la información de la estación antes que el audio secundario, por ejemplo si estamos fijados a una estación a 103.5 MHz y se quiere dirigir a una estación en 101.3 MHz, el receptor debe primero localizar la portadora a esta frecuencia, después decodificar y analizar la información digital para determinar si hay información complementaria, y luego de esto si se determinó que hay información complementaria, decodificarla y enviarla hacia los altavoces.

El proceso de sintonía para las estaciones (audio SPS, o MPS) es el desafío que deben cumplir los receptores IBOC.

3.4.2 RUIDO

La FCC (Comisión Federal de Comunicaciones) ha publicado reglamentaciones para evitar que pueda haber interferencia en las transmisiones permitidas a causa de las transmisiones no permitidas, también hablan de que los equipos electrónicos no deben estar a menos de 3 metros, para que no se produzcan estas interferencias. En los receptores IBOC los circuitos digitales se encuentran muy próximos a la detección y decodificación de la señal analógica, es por eso que los fabricantes deben prestar mucha atención para que no se presenten estas interferencias, por lo que deben incluir salvaguardas para evitar que suceda.

Los circuitos digitales para IBOC no son la única fuente donde se puede generar ruido, este puede estar presente también en el microprocesador, en la pantalla, de la fuente de alimentación conmutada, etc.; todos estos componentes de los receptores IBOC.

En estos últimos años también se han producido tarjetas para que el ordenador pueda funcionar como receptor, pero estas se han elaborado exclusivamente para FM, puesto que en AM se hace más complicado repeler interferencia creada por los circuitos computacionales.

También se tiene que considerar que para el demodulador de la parte analógica, la energía en las bandas digitales laterales que terminan de conformar la señal híbrida, es considerada ruido.

3.5 EL FUTURO DE LOS RECEPTORES IBOC

Los posibles avances de los receptores digitales IBOC están encaminados hacia los siguientes objetivos.

3.5.1 RECEPTOR PORTATIL A BATERIA

El siguiente paso es el desarrollo de un chipset que permita un ahorro de energía, volviendo así a los receptores portátiles a batería en un dispositivo más práctico y con mayor rentabilidad; ya existen propuestas de fabricantes que han solicitado usar el NRSC-5 para crear sus propios chipsets y lograr este fin.

3.5.2 RECEPTORES CON IMAGENES

Además de tener receptores portátiles que ahorren energía, hay que considerar también la posibilidad de tener datos auxiliares en la señal IBOC, siendo en las señales híbridas FM las que tienen el mayor potencial de utilización de estos datos auxiliares.

Se encuentra bien documentado que el rendimiento de una señal digital de FM IBOC es suficiente como para sostener dos señales de audio estéreo con una calidad aceptable, por lo que muchas estaciones FM emplean o tienen pensado emplear lo que se conoce como emisiones HD2, que es a la vez una característica importante y crítica para los difusores de radio terrestre en un corto plazo para crear un entusiasmo por IBOC. Pero en última instancia los difusores

dedicarían algo del ancho de banda para tener imágenes ya sean fijas o en movimiento, lo que les aseguraría un futuro exitoso.

Ahora bien si le dedicamos una parte del ancho de banda a las imágenes, no quiere decir que el audio complementario y la programación HD2 podrían ser abandonados, la clave para el uso exitoso de imágenes en la radio digital IBOC es el almacenado en caché de las mismas, o lo que se entendería como una descarga de la imagen al receptor y sin transmisión en vivo al oyente, pero este si las podrá ver cuando él lo requiera. Por ejemplo para este tipo de operación el difusor puede dedicar de 6:00 AM hasta la medianoche el ancho de banda para HD2 y de medianoche a 6:00 AM para el envío de datos de la imagen hacia el receptor; si el radiodifusor dedicara 48Kbps por 6 horas cada día se tendría aproximadamente 130 MB de datos que se transmitieron toda la noche.

Hay que acotar que demostraciones que se han podido hacer nos muestran como una estación con impulsos de radio nos puede proveer multimedia en tiempo real con más o menos de 2 a 3 Kbps para datos.

Para poder tener imágenes, dos cosas se hacen necesarias, la primera que para las imágenes fijas exista una estandarización del códec que se debe utilizar, y la segunda sería una estandarización pero en este caso para imágenes con movimiento. Las PDUs AAT que son las que podrían transportar la información de las imágenes, para lo cual se necesitaría incluir bits de cabecera que indiquen si la imagen está ligada a un SPS/MPS específico, o si se puede almacenar en la memoria del receptor para ser mostrada en un instante de tiempo o simplemente hasta que el usuario así lo disponga o demande,

3.5.3 RADIO POR DEMANDA

La capacidad para datos auxiliares podría ser utilizada para almacenar archivos de audio que se han transmitido y guardado para cuando el usuario así lo demande. Como en las imágenes, el receptor puede tener información del tipo de archivo de audio que va a ser transmitido y el cómo y cuando este va a estar disponible para ser reproducido, es así que se puede decir que lo principal de la disponibilidad para el usuario, sea noticias, clima o estado del tránsito; otro uso sería el que las empresas lancen su publicidad o los mensajes de los auspiciantes, que podrían almacenarse de forma que puedan ser vistos en ciertos espacios de tiempo.

Dentro del mercado de consumidores electrónicos, hace unos cuantos años que se hizo popular la utilización de equipos de audio portables y pequeños, también empezó la costumbre de poder descargar contenidos a estos dispositivos y así poder personalizarlos; si la industria de radiodifusión tuviera un método que esté estandarizado para almacenar contenido en estos dispositivos, se podría tener millones de consumidores que estarían usándolo.

3.5.4 DESARROLLO DE LOS RECEPTORES JUNTO CON LOS ORGANISMOS DE RADIODIFUSIÓN

Según datos del CEA (Asociación de Consumidores Electrónicos) los ingresos por venta de receptores son menores al 0,5 % de los ingresos totales de la industria de consumo electrónico, por lo que las retribuciones en la industria son modestas a la hora de incluir nuevas aplicaciones a la radio terrestre; pero si la radiodifusión quiere agregar imágenes, video y otros nuevos servicios, su desarrollo debe ser dirigido hacia ese propósito, con lo que lograría ponerse a la par con el creciente mercado de dispositivos multimedia, en los que ya incursionaron compañías de teléfonos celulares, de radio satelital, y de equipos portables de audio.

3.6 COMPARACIÓN DEL MODO HIBRIDO CON EL MODO TOTALMENTE DIGITAL

Para esta comparación tomaremos como referencia la información que llega en las portadoras, como se escribió anteriormente en este capítulo las portadoras con QPSK transmiten 689 bit de código por segundo y 344.5 bits de código por segundo en las BPSK. Teniendo en cuenta la siguiente tabla

MODO	MP	PORTADORAS	
		Principal.	Secundar.
Híbrido	1	180	11
Híbrido Extendido	2,3,4	252	15
Totalmente Digital	5,6	504	29

Tabla 3.1 Numero de portadoras

Se tiene:

$$\text{Híbrido: } 2 * [(180 * 689) + (11 * 344.5)] = 255619 \text{ bps}$$

$$\text{Híbrido Extendido: } 2 * [(252 * 689) + (15 * 344.5)] = 357591 \text{ bps}$$

$$\text{Totalmente Digital: } 2 * [(504 * 689) + (29 * 344.5)] = 714493 \text{ bps}$$

Tomaremos como la máxima tasa de transmisión la del modo totalmente digital, para comparar las tasas de los otros modos, con lo que se tendría los porcentajes referidos al modo totalmente digital:

$$\text{Híbrido: } n = \frac{n_H}{n_{TD}} = \frac{255619 \text{ bps}}{714493 \text{ bps}} = 0.35776$$

$$\text{Híbrido Extendido: } n = \frac{n_{HE}}{n_{TD}} = \frac{357591 \text{ bps}}{714493 \text{ bps}} = 0.50048$$

Con esto se entendería que para un modo híbrido la tasa de la información sería el 35.77 %, de la tasa que se tendría en un modo totalmente digital, y si lo hacemos extendido tendríamos un incremento de 14.23 % de la tasa.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Del desarrollo del presente trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El sistema RDS(Radio Data System) se puede considerar como un principio de lo que hoy ya se considera la Radio Digital, ya desde hace algunos años atrás se empieza en Europa con el envío de pequeños datos digitales a la par con la señal analógica de FM, donde se tiene cierta información como el nombre de la emisora y/o de la canción que se encuentra sonando, después este sistema se fue diseminando alrededor del mundo, pero en Ecuador son pocas las emisoras que tienen implementado este servicio, a las cuales el sistema IBOC les resultaría beneficioso.
- El sistema IBOC en la actualidad es la opción más adecuada para que sea implementado por las radiodifusoras del país, porque permite la realización de transmisiones simultáneas de señales analógicas y digitales, lo que permite que el “apagón analógico” del que se habla en el mundo se pueda ir dando paso a paso, disminuyendo o prorrateando los costos que representaría una migración inmediata, proveyendo así plazos para que tanto los usuarios como las pequeñas radiodifusoras (radios locales) puedan adquirir los equipos correspondientes.
- La implementación del estándar IBOC en nuestro país, ayudaría a preservar y hacer una optimización del espectro radioeléctrico, porque las radiodifusoras deberían pagar por la concesión por el Estado de una sola frecuencia y así operar en todo el territorio nacional, pudiéndose

implementar un sistema de frecuencia única, provocándose así que nuevos radiodifusores se sumen a competir con los ya presentes.

- La mayor ventaja que presenta IBOC sobre el estándar europeo existente, a más de que puede transmitir en simultaneo las señales digitales y analógicas, es que la canalización que usa es la misma que está considerada en nuestro país por lo que no se tendría que hacer mayores modificaciones a lo actual.
- Aunque la Radio por Internet (Radio on-line) transmite imágenes, y datos no se puede considerar como Radio Digital, lo que se podría es considerar que es un paso de la evolución de la Radio tradicional a la Digital y a la elaboración de los diferentes estándares. En nuestro país por la poca penetración del internet no se ha podido establecer y consolidar este tipo de radio, pero aun así si han existido ciertas empresas de radiodifusión que la implementaron, pero más como una estrategia para captar oyentes en su emisión normal y no de portal web, es por esto que para la implementación de IBOC presenta ventajas.
- COFDM vuelve compleja la transmisión y por tanto los equipos necesarios para la misma, lo que se traduce en mayores costos para los fabricantes, que se revierten en los usuarios, si bien en este campo se tiene una gama de productos y equipos que van desde la no implementación de COFDM hasta los que si la implementan, es por eso que se tiene que hacer un análisis por parte de las entidades encargadas en el país para que las emisoras puedan adquirir los equipos correctos para un óptimo desempeño.
- La división que se hace en la codificación de audio en el transmisor le provee al receptor esa capacidad de “fall back” que es la de poder retroceder a una capacidad menor, pero lo que hace el receptor es recuperar solo el “core” o núcleo de la información, pero como se explico la

calidad del mismo es baja en relación a la total que se puede tener con el audio completo.

- La corporación iBiquity como única reguladora y aprobadora de los equipos para la transmisión y recepción con IBOC, obliga a los fabricantes a estar con las manos atadas sin poder hacer un desarrollo de nuevas aplicaciones, y el hecho es tal que si no se compra la autorización para utilizar el códec de audio de su propiedad, así como el chip y el software que se desarrolló en la corporación, los fabricantes no pueden ser aprobados y tampoco comercializar equipos o dispositivos con sello IBOC.
- Las tarjetas insertables en las computadoras son una forma de ayudar al ahorro en los usuarios, en la actualidad la mayoría de hogares han adquirido un computador, y es así que no tienen que comprar un equipo nuevo de recepción, sino una tarjeta a un menor precio para poder escuchar las emisoras mediante el computador.
- El uso de otros códecs de audio en vez de HDC que es el de propiedad de iBiquity, puede facilitar el desarrollo e implementación del envío de imágenes, cosa que se puede apreciar en las canciones que tienen la información y portada del disco del autor al que pertenecen.

4.2 RECOMENDACIONES

- Al igual que se hizo el consenso y el análisis de los diferentes estándares de Televisión Digital para luego tomar la decisión y hacer la elección de uno a implementarse en el país, también se debe ya empezar a hacer pruebas de un estándar para Radio Digital, la Asociación de Radios del Ecuador ya debería empezar a proponer y a hacer presión para incentivar al gobierno para que también se haga una elección para la Radio.
- Con la implementación de el estándar IBOC y el hecho de que se tiene varios canales para programación en la misma banda que se ha asignado a cada emisora, se podría hacer una campaña para recuperar la identidad de país mestizo que es Ecuador, lanzando emisiones en canales independientes de programaciones en nuestro idioma Quichua, impartiendo al mismo tiempo cursos para poderlo hablar y entender.
- Se recomienda también que se haga una investigación para llegar a imitar la propuesta de ITS que tiene DAB, proveyendo así más formas de poder llegar al público oyente, y disminuyendo así la compra de receptores, porque se podría realizar la captación de señales mediante celulares de última generación cuyo uso crece en nuestro país.
- Con la implementación de IBOC se podría vender paquetes de información por cada emisora a sus oyentes, pudiendo así empezar a crear un concepto de fidelidad de los oyentes y teniendo mayores ingresos que el representado por el patrocinio de los auspiciantes que tienen actualmente.
- Se recomienda también que haya una estructuración clara de la ley que rija sobre lo que serían las nuevas emisoras digitales y que además también se cuente con una reglamentación de servicios avanzados o especiales que puedan prestar las mismas.

REFERENCIAS

- [01] "THE IBOC HANDBOOK", David P. Maxson, Elsevier, 2007
- [02] <http://www.iquity.com>
- [03] <http://www.nrcstandards.org/SG.asp>
- [04] <http://www.nab.org/>
- [05] http://www.amarc.org/documents/articles/Radio_TV_en_era_digital.pdf
- [06] http://www.radiodigitalterrestre.com/radio/radio_ppal.htm
- [07] http://es.wikipedia.org/wiki/Radio_Digital_Terrestre
- [08] http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_radio
- [09] <http://duberpp.hostoi.com/TC/LABO%2002.pdf>
- [10] http://www.elnuevoempresario.com/noticia_1278_radio-y-tv-por-internet.php
- [11] LA RADIO EN INTERNET: El reclamo de un nuevo producto radiofónico diseñado para la red, Emma Rodero Antón
- [12] http://es.wikipedia.org/wiki/Radio_por_Internet
- [13] <http://chasqui.comunica.org/girard70.htm>
- [14] <http://www.ipsterraviva.net/TV/tunis/viewstory.asp?idnews=427>
- [15] <http://tecnicaudiovisual.kinoki.org/radio/dab.htm>
- [16] <http://www.docstoc.com/docs/25211237/DAB-RADIO-DIGITAL-TERRENAL-%28DIGITAL-AUDIO-BROADCASTING%29/>
- [17] http://es.wikipedia.org/wiki/Digital_Audio_Broadcasting
- [18] http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev_279-kozamernik.pdf
- [19] http://es.wikipedia.org/wiki/Digital_Radio_Mondiale

- [20] http://www.drm.org/index.php?p=summary&curr_language=es
- [21] http://www.rtve.es/drm/doc/sistema_drm.pdf
- [22] <http://www.drm.org/>
- [23] <http://www.tmbroadcast.es/index.php/la-modulacion-cofdm/>
- [24] <http://www.digitalradiotech.co.uk/cofdm.htm>
- [25] <http://www.acronymfinder.com/Coded-Orthogonal-Frequency-Division-Multiplexing-%28COFDM%29.html>
- [26] <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfci37m/doc/bmfci37m.pdf>
- [27] http://es.wikipedia.org/wiki/Advanced_Audio_Coding
- [28] http://es.wikipedia.org/wiki/Codificacion_perceptual
- [29] http://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_intermedia
- [30] <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/fmtema.htm>
- [31] <http://html.rincondelvago.com/receptor-mono-de-fm.html>
- [32] "IBOC DIGITAL RADIO FUNDAMENTALS", Dave Wilson, CEA, USA
- [33] "DISEÑO DE LA RADIODIFUSORA RADIO LÍDER 90.1 FM CON TECNOLOGÍA EN BASE AL STANDARD NORTEAMERICANO IBOC (IN-BAND ON CHANNEL)", CÉSAR FERNANDO ORTEGA PINTADO, E.P.N., Julio 2009
- [34] "ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE REDES DE FRECUENCIA ÚNICA (ISOFRECUENCIA), Y SU APLICACIÓN EN LA RADIODIFUSIÓN EN LAS BANDAS DE AM Y FM PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO EN LA CIUDAD DE QUITO", HECTOR JAVIER ERAZO CHULDE, E.P.N., Abril 2009.
- [35] "Estudio comparativo de los aspectos técnicos de los estándares de radiodifusión digital terrestre IBOC (In-band-on-channel), DAB (Digital Audio Broadcasting), ISDB-TSB (Japan's Digital Radio Broadcasting) y DRM (Digital Radio Mondiale) a considerarse, para su posible implementación en el país", CHRISTIAN RAMIRO CADENA RAMÍREZ, DARÍO GABRIEL TACURI GUEVARA, E.P.N., Septiembre 2009.