



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERÍA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**“PROTOTIPO DE UN MODELO DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN ASÍ COMO
EL ANÁLISIS TÉCNICO DE SU FUNCIONAMIENTO DE RADIO DIGITAL DAB
(DIGITAL RADIO BROADCASTING)”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

PRESENTAN:

**RUBÉN GÁLVEZ MENDOZA
MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ PINEDA**

ASESOR

ING. MARIANO ARUMIR RIVAS

PACHUCA DE SOTO HGO., ABRIL 2008

INDICE

| | |
|------------------------------------|------------|
| INDICE | i |
| INDICE DE FIGURAS | iv |
| INDICE DE TABLAS | vi |
| OBJETIVO GENERAL | vii |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS | vii |

Capítulo 1 Introducción

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 1 |
| 1.1 Aspectos relevantes de la radio digital..... | 5 |
| 1.2 Estándares de la radio digital..... | 7 |
| 1.2.1 Eureka 147..... | 7 |
| 1.2.2 IBOC AM..... | 8 |
| 1.2.3 IBOC FM..... | 9 |
| 1.2.1 DRM (Digital Radio mondiale)..... | 10 |
| 1.3 Transición de la radio analógica a digital..... | 11 |
| 1.4 Uso del espectro radioeléctrico en el DAB..... | 11 |
| 1.5 Clases de servicios del DAB..... | 13 |
| 1.6 Impacto socio-económico en el DAB..... | 14 |

Capítulo 2 Introducción a los sistemas de comunicación electrónica.

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 17 |
| 2.1 El espectro electromagnético..... | 19 |
| 2.1.1 Frecuencias de transmisión..... | 19 |
| 2.2 Ancho de banda y capacidad de información..... | 22 |
| 2.3 Modulación y demodulación..... | 24 |
| 2.4 Modos de transmisión..... | 25 |
| 2.4.1 Simplex (SX)..... | 25 |
| 2.4.2 Semiduplex (HDX, half duplex)..... | 25 |
| 2.4.3 Duplex total (FDX, de full duplex)..... | 25 |
| 2.4.4 Duplex total (FDX, de full duplex)..... | 26 |
| 2.5 Multiplexado..... | 26 |
| 2.5.1 Multiplexado por división de frecuencia, FDM..... | 26 |
| 2.5.2 Multiplexado por división de tiempo, TDM..... | 27 |
| 2.5.3 Multiplexado por división de frecuencias ortogonales, OFDM..... | 28 |
| 2.6 Como se transmite la información..... | 28 |
| 2.7 Tipos de modulación..... | 30 |
| 2.7.1 Amplitud modulada, AM..... | 30 |
| 2.7.2 Frecuencia modulada, FM..... | 30 |
| 2.7.3 Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)..... | 32 |
| 2.7.4 Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)..... | 32 |
| 2.7.5 Modulación por desplazamiento de fase (PSK)..... | 33 |
| 2.7.6 Modulación digital QAM..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 2.7.7 Modulación QPSK..... | 35 |
| 2.7.8 Modulación por código de pulso PCM..... | 37 |
| 2.8 Procesamiento digital de señales..... | 38 |
| 2.8.1 Teorema de muestreo..... | 40 |
| 2.8.2 Selección de la velocidad de muestreo..... | 41 |
| 2.8.2.1 Oversampling..... | 41 |
| 2.8.2.2 Undersampling..... | 41 |
| 2.8.3 Empleo de un filtro a la señal..... | 42 |
| 2.9 Compresión digital de archivos..... | 43 |
| 2.10 MPEG-2 (Moving Pictures Experts Group 2)..... | 45 |
| 2.11 Control de errores..... | 47 |
| 2.12 Corrección de errores en sentido directo..... | 48 |

Capítulo 3 Estructura del DAB, sus servicios y aplicaciones.

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 51 |
| 3.1 Estructura de la trama DAB..... | 53 |
| 3.1.1 Tipos de información del DAB..... | 53 |
| 3.2 Trama de transmisión..... | 54 |
| 3.2.1 Canal de sincronización..... | 55 |
| 3.2.1.1 Canal de información rápida (FIC)..... | 55 |
| 3.2.1.2 Canal de información principal (MSC)..... | 56 |
| 3.3 Modos DAB..... | 56 |
| 3.4 Descripción del sistema de radiodifusión sonora digital..... | 58 |
| 3.4.1 Codificación de la fuente de audio..... | 61 |
| 3.4.2 Procesado de a señal..... | 65 |
| 3.4.3 Acceso condicional..... | 65 |
| 3.4.4 Dispersión de energía..... | 66 |
| 3.4.5 Codificación convolucional..... | 66 |
| 3.4.6 Entrelazado en el dominio del tiempo..... | 66 |
| 3.4.7 Generación de los símbolos QPSK..... | 67 |
| 3.4.8 Entrelazado en frecuencia..... | 67 |
| 3.4.8.1 Generación de símbolos D-QPSK. Símbolos de sincronismo..... | 68 |
| 3.4.8.2 Modulación OFDM. Generación de símbolos OFDM..... | 68 |
| 3.4.8.2.1 Multiportadoras ortogonales..... | 69 |
| 3.4.8.2.2 Sistema de modulación OFDM..... | 70 |
| 3.5 Aspectos de propagación..... | 71 |
| 3.5.1 Modelos de propagación..... | 71 |
| 3.5.2 Propagación multitrayecto..... | 71 |
| 3.5.3 Espectro de la señal OFDM..... | 72 |
| 3.5.4 Mascara DAB..... | 74 |

Capítulo 4 Modelo de la distribución de una red para el sistema DAB.

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 79 |
| 4.1 Redes de frecuencia única (SFN)..... | 81 |
| 4.1.1 Sincronización de las redes de frecuencia única..... | 82 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Descripción de la red DAB..... | 85 |
| 4.2.1 Centro de contribución. Proveedor del servicio..... | 87 |
| 4.2.1.1 Codificador..... | 87 |
| 4.2.1.2 Multiplexor (MUX)..... | 88 |
| 4.2.2 Proveedor de la trama..... | 88 |
| 4.2.3 Centro de transmisión..... | 90 |
| 4.2.3.1 Modulador COFDM..... | 90 |
| 4.2.3.2 Transmisor (TX)..... | 91 |
| 4.2.3.3 Repetidores..... | 91 |
| 4.3 Red de radiodifusión sonora digital terrestre T-DAB..... | 91 |
| 4.4.4 Posibles configuraciones de redes terrestres..... | 93 |
| 4.4.4.1 Redes SFN centralizadas y descentralizadas..... | 93 |
| 4.4.4.1.1 Redes SFN con modulación descentralizada..... | 93 |
| 4.4.4.1.2 Redes SFN con modulación centralizada..... | 95 |
| 4.4.4.2 Redes SFN con on-channel repeaters..... | 95 |
| 4.4.4.3 In-band trunking..... | 97 |
| 4.4.4.4 comparativa..... | 98 |
| 4.5 Bandas de frecuencia..... | 99 |
| 4.6 El sistema DAB en banda-L..... | 99 |
| 4.6.1 Canales de frecuencia asignados al DAB en banda-L..... | 100 |
| 4.6.2 Características generales..... | 101 |

Capítulo 5 Modelo de un transmisor y un receptor DAB.

| | |
|---|-----|
| Introducción..... | 107 |
| 5.1 Transmisores DAB..... | 109 |
| 5.1.1 Aspectos generales..... | 109 |
| 5.1.1.1 Bloques del procesamiento de señales de un modulador COFDM..... | 109 |
| 5.1.1.2 Conversión digital a analógica..... | 111 |
| 5.1.1.3 Conversión RF..... | 114 |
| 5.1.1.4 Amplificación y filtrado..... | 114 |
| 5.2 Arquitectura del receptor..... | 117 |
| 5.2.1 Estructura de los bloques del receptor..... | 117 |
| 5.2.1.1 RF FRONT-END..... | 117 |
| 5.2.1.2 ADC (Conversor analógico digital)..... | 117 |
| 5.2.1.3 DIGITAL FRONT-END..... | 118 |
| 5.2.1.4 FFT (Transformada Discreta de Fourier)..... | 118 |
| 5.2.1.5 Demodulación DQPSK..... | 119 |
| 5.2.1.6 Proceso Deinterleaving..... | 119 |
| 5.2.1.7 Proceso Viterbi..... | 119 |
| 5.2.1.8 Decodificador de Audio y Datos..... | 120 |
| 5.3 Comparativa de la radio digital – analógica..... | 120 |
| CONCLUSIONES..... | 123 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 125 |
| GLOSARIO..... | 129 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Situación de la radio DAB en el mundo..... | 6 |
| Fig. 1.2 Receptor Interactive Data Bosch Hannover..... | 7 |
| Fig. 2.1 Espectro espectro electromagnético..... | 19 |
| Fig. 2.2 Multiplexación FDM..... | 27 |
| Fig. 2.3 Multiplexación FDM..... | 27 |
| Fig. 2.4 Modulación ASK..... | 32 |
| Fig. 2.5 Modulación FSK..... | 33 |
| Fig. 2.6 Modulación PSK..... | 33 |
| Fig. 2.7 Diagrama a bloques de un modulador QAM..... | 34 |
| Fig. 2.8 Diagrama a bloques de un demodulador QAM..... | 35 |
| Fig. 2.9 Diagrama a bloques de un modulador QPSK..... | 36 |
| Fig. 2.10 Diagrama a bloques de un demodulador QPSK..... | 37 |
| Fig. 2.11 Diagrama básico de un convertidor ADC a DAC..... | 39 |
| Fig. 2.12 Ejemplo de un DSP de telefonía celular..... | 40 |
| Fig. 2.13 Espectro de sobre muestreo de una seña musical..... | 41 |
| Fig. 2.14 Espectro de bajo muestreo de una seña musical..... | 42 |
| Fig. 2.15 Filtro Anti-aliasing en una entrada analógica..... | 43 |
| Fig. 2.16 Diagrama a bloques codificador MPEG-2..... | 47 |
| Fig. 2.17 Diagrama a bloques decodificador MPEG-2..... | 47 |
| Fig. 3.1 Trama de transmisión..... | 54 |
| Fig. 3.2 Trama de transmisión y arquitectura para cada modo..... | 59 |
| Fig. 3.3 Descripción del sistema de radiodifusión sonora digital DAB..... | 60 |
| Fig. 3.4 Trama de audio..... | 63 |
| Fig. 3.5 Codificador de audio..... | 63 |
| Fig. 3.6 Decodificador de audio..... | 64 |
| Fig. 3.7 Modulador-Demodulador OFDM..... | 70 |
| Fig. 3.8 Espectro del modo I..... | 72 |
| Fig. 3.8 Espectro del modo II..... | 73 |
| Fig. 3.9 Espectro del modo III..... | 73 |
| Fig. 3.10 Espectro del modo IV..... | 74 |
| Fig. 3.11 Mascara para banda III..... | 75 |
| Fig. 3.12 Mascara para banda L..... | 76 |
| Fig. 3.13 Espectro de la seña radiada..... | 77 |
| Fig. 4.1 Esquema de una red SFN..... | 82 |
| Fig. 4.2 Retardos del sistema..... | 84 |
| Fig. 4.3 Sincronización dinámica..... | 84 |
| Fig. 4.4 Posible topología de una red DAB..... | 86 |
| Fig. 4.5. Esquema general simplificado de una red de difusión T-DAB..... | 92 |
| Fig. 4.6 Esquema de una red SFN descentralizada..... | 94 |
| Fig. 4.7 Esquema de una red SFN centralizada..... | 96 |
| Fig. 4.8. In-band trunking..... | 97 |
| Fig. 4.9 Equipamiento necesario en el transmisor principal..... | 98 |
| Fig. 4.10. Equipamiento necesario en un transmisor no principal (repetidor o transmisor adyacente de una SFN)..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 4.11. Disposición de los bloques T-DAB en la Banda-L..... | 101 |
| Fig. 5.1 Diagrama de bloques de un trasmisor DAB..... | 109 |
| Fig. 5.2 Diagrama de bloques de un modulador COFDM..... | 110 |
| Fig. 5.3 Ejemplo de un diagrama de bloques de un trasmisor DAB con una entrada DIQ en banda base..... | 112 |
| Fig. 5.4 Diagrama de bloques de un trasmisor DAB usando una IF baja..... | 113 |
| Fig. 5.5 Espectro de una señal DAB con un amplificador no lineal..... | 115 |
| Fig. 5.6 Diagrama a bloques de un receptor DAB..... | 117 |
| Fig. 5.7 Diagrama de la Interfaz I/Q..... | 118 |
| Fig. 5.8 Diagrama de la Interfaz IF..... | 118 |
| Fig. 5.9 Diagrama del proceso Deintervaling..... | 119 |
| Fig. 5.10 Diagrama del decodificador de audio y datos..... | 120 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2.1 Designaciones de banda CCIR..... | 21 |
| Tabla 3.1 Modos DAB..... | 56 |
| Tabla 3.2 Modos DAB..... | 57 |
| Tabla 4.1 Canalización frecuencial de los bloques T-DAB en la banda-L..... | 101 |
| Tabla 4.2 Modos de transmisión DAB para la Banda-L..... | 103 |
| Tabla 5.1 Comparativa de la radio digital –analógica..... | 121 |

Objetivo general:

“Realizar el análisis técnico del proceso de transición que sufrirán los sistemas analógicos convencionales de radiodifusión AM y FM para convertirlos en el nuevo sistema de radiodifusión digital denominado Digital Audio Broadcasting”

Objetivos específicos:

- Dar a conocer los beneficios tecnológicos de la radio digital.
- Realizar un material para el aprendizaje de la tecnología de radio digital.
- Estimar el impacto tecnológico que tendrá la transición de la radio analógica convencional a la radio digital.
- Dar pauta a la generación de ideas y creación de nuevas tecnologías acerca de la radio.

Capítulo 1

Introducción

Introducción

Desde los inicios de la humanidad el hombre se ha visto siempre en la necesidad de mantenerse comunicado e informado del mundo que lo rodea. Gracias a los avances tecnológicos el ser humano disfruta en la actualidad de los servicios de comunicación electrónica como son la radio, la televisión, la telefonía, el Internet, etc. que lo mantiene informado a diario de los sucesos que ocurren en el mundo.

De los sistemas de comunicación antes mencionados, destaca principalmente la radio como uno de los servicios más utilizados a nivel mundial. Se define como radio al sistema de comunicación mediante ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio. Con la colaboración de Maxwell y Hertz se marcaron los inicios de la radio.

La teoría Electromagnética de James Clerk Maxwell en 1873 predecía la posibilidad de crear ondas electromagnéticas y su propagación en el espacio; quince años más tarde, el físico alemán Heinrich Hertz confirmó experimentalmente dicha teoría, radiando y estudiando las ondas electromagnéticas con su oscilador y un resonador, realizó la primera transmisión sin hilos, de lo que a partir de entonces se denominarían en su honor ondas hertzianas [3].

El ingeniero electrotécnico e inventor italiano Guglielmo Marconi, está considerado universalmente el inventor de la radio. En 1896, consiguió transmitir señales desde una distancia de 1,6 km. En 1897 transmitió señales desde la costa hasta un barco a 29 km. en alta mar. Dos años más tarde logró establecer una comunicación comercial entre Inglaterra y Francia. A principios de 1901 consiguió enviar señales a más de 322 km. de distancia, y a finales de ese mismo año transmitió una carta entera de un lado a otro del océano Atlántico.

En 1902 ya se enviaban de forma regular mensajes transatlánticos y en 1905 muchos barcos llevaban equipos de radio para comunicarse con emisoras de la costa. Como reconocimiento a sus trabajos en el campo de la telegrafía sin hilos.

Aunque no fue ésta su finalidad original, pronto se pensó en la posibilidad de utilizar la radio como medio de comunicación de masas. Su capacidad comercial se puso a prueba en 1920, cuando las estaciones de radio comenzaron a emitir señales de amplitud modulada (AM), y en 1933 el mayor Edwin Howard Armstrong invento la modulación de frecuencia (FM). La emisión comercial en FM comenzó en 1936.

Los avances en la electrónica hicieron posible la fabricación de nuevos y más baratos aparatos de radio. Su extensión y el éxito del medio como vehículo de comunicación dieron paso a una nueva actividad empresarial, la radio comercial. En 1925 había unas 600 emisoras repartidas por todo el mundo y en la década de 1960 su número llegaba a las 10,000.

Aunque los conceptos y principios fundamentales de las comunicaciones electrónicas han cambiado poco desde su introducción los métodos y circuitos con que se realizan han sufrido grandes cambios. En los años recientes los transistores y circuitos integrados lineales han simplificado el diseño de los circuitos de comunicación electrónica, permitiendo así la miniaturización, mejor eficiencia y confiabilidad y costos generales menores. En los años recientes ha habido una necesidad abrumadora de comunicación entre cada vez mas personas. Esta urgente necesidad ha estimulado un crecimiento gigantesco de la industria de comunicaciones electrónicas. Los sistemas electrónicos modernos de comunicación incluyen los de cable metálico, por microondas y los satélites, así como los sistemas de fibra óptica e infrarrojo [4].

Sin embargo los sistemas tradicionales de comunicaciones electrónicas, que usan técnicas convencionales de modulación analógica como los de modulación en amplitud (AM),

modulación en frecuencia (FM) y modulación de fase (PM) se están sustituyendo rápidamente por sistemas de comunicación digital, más modernos, que tienen varias y notables ventajas sobre los sistemas analógicos tradicionales: facilidad de procesamiento, facilidad de multiplexado e inmunidad al ruido.

El término comunicaciones digitales abarca una gran área de técnicas de comunicaciones, que incluyen la transmisión digital o la radio digital. Se aplica a la transmisión de pulsos digitales entre dos o más puntos de comunicaciones. La radio digital es la transmisión de portadoras analógicas moduladas digitalmente entre dos o más puntos de un sistema de comunicación. Los sistemas digitales de transmisión requieren una instalación física entre el transmisor y el receptor, como un par de hilos metálicos, un cable coaxial o un cable de fibra óptica. En los sistemas digitales de radio, el medio de transmisión podría ser el de espacio libre, la atmósfera terrestre o una instalación física, como un cable metálico o de fibra óptica.

La radio digital es la transmisión y recepción del sonido que ha sido procesado, es decir, un transmisor de radio digital procesa los sonidos en patrones de números, o dígitos de ahí el término "radio digital". Por el contrario, la radio analógica tradicional procesa los sonidos en patrones de señales eléctricas que asemejan ondas de sonido.

El nuevo sistema de Radio Digital llamado "Digital Audio Broadcasting" (DAB, por sus siglas en inglés o radiodifusión de audio digital), es un sistema de difusión multimedia muy innovador y universal el cual está reemplazando al existente servicio de radiodifusión de AM y FM en muchas partes del mundo. Fue desarrollado en los 90's por el proyecto Eureka 147/DAB. DAB es muy apropiado para recepción móvil y provee alta robustez contra recepción multirrayecto. Permite el uso de redes de una sola frecuencia (SFNs) para mayor eficiencia en alta frecuencia.

En la transmisión de radio digital se consigue un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, ya que se reduce a una sola frecuencia la cobertura nacional por cadena. Hasta ahora la señal analógica, que conocemos AM y FM puede sufrir alteraciones en el transcurso de su ruta hasta el receptor. Sin embargo, el DAB tiene una capacidad de eludir estas interferencias. La clave de la radio digital radica en la manera de transmitir la señal. Al ser comprimida en el espacio, donde antes cabía una sola frecuencia ahora puede ofrecerse hasta un total de seis.

Las ventajas más relevantes que ofrece la radio digital son: Una mayor calidad de sonido comparable a la de un CD, un mejor uso de las ondas radiofónicas lo que implica la posibilidad de añadir más servicios y programas en el aparato (Se envían datos generales, como la fecha y la hora, radiobúsqueda, información de tráfico, sistema de posicionamiento global. También datos adicionales de los programas: títulos musicales, autor, texto de las canciones en varios idiomas. Además de el envío de imágenes y textos a tableros electrónicos, gracias a una pantalla incorporada en el receptor lo que la convierte en un sistema de transmisión multimedia) y la desaparición de las interferencias, Además de no ser necesario cambiar de sintonía para seguir escuchando una emisora mientras se viaja, ya que las radios emiten una frecuencia que puede sintonizarse de un sólo toque y de la que no hay que moverse aunque se cruce un país de punta a punta. La radio digital se puede emitir de 3 maneras: la radio digital por satélite, la radio digital terrena y la radio Web.

Estas grandes ventajas han hecho que los sistemas de transmisión broadcast existentes en el mundo tiendan a cambiar de transmisión analógica convencional a digital. El primer paso en la introducción de servicios de difusión digital fueron tomados por los sistemas NICAM 728 (Near Instantaneously Comanded Audio Múltiplex, desarrollado por la BBC para televisión con sonido estereo en las bandas VHF/UHF), DSR (Digital Satellite Radio) o ADR (Astral Digital Radio), pero ninguno fue apropiado para reemplazar completamente los servicios convencionales existentes, especialmente para recepción móvil. Por esta razón el sistema universal de radiodifusión multimedia digital Eureka 147/DAB fue desarrollado y está siendo introducido alrededor del mundo. En paralelo otros sistemas de radiodifusión como es DRM (Digital Radio Mondiale) y IBOC (In Band On Channel) están siendo introducidos en algunos países del mundo como complemento de la radio digital, aunque el sistema Eureka 147/DAB ha demostrado hasta el momento ser el más eficiente.

Ahora bien surgen interrogantes de cómo se llevara a cabo el proceso de transición de la radio convencional analógica a la radio digital. Este proyecto de tesis presenta un amplio panorama de cómo se llevara a cabo dicho proceso.

1.1 Aspectos relevantes de la radio digital.

Primero llegó la televisión digital, llamada "el último adelanto en televisión" Ahora, la Unión Internacional de Comunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) ha dado otro paso adelante para llevar la radio digital a convertirse en un sistema de comunicación con más y mejores características que la convierten en una radio más eficiente. La radio digital ha sido hasta el momento el avance más importante en la tecnología de la radio desde la implementación de la radio FM, la radio digital proporciona a los radio escuchas recepción libre de interferencias con sonido de alta calidad y deja de ser un sistema unimedia (sólo audio) para convertirse a un sistema multimedia (audio, datos, imágenes y servicios adicionales).

La creciente necesidad de desarrollar un sistema digital de radiodifusión hizo que diversas empresas con el final del siglo XX, principios del siglo XXI, se lanzarán a la búsqueda de un sistema que pudiera ser útil y rentable, basándose en distintas filosofías de creación. Mientras que Europa iniciaba sus estudios mediante el proyecto Eureka 147 tratando de ganar calidad, Estados Unidos mediante la empresa Ibiquity se buscaba un sistema muy adaptativo que permitiera un cambio gradual de los receptores (IBOC) [1].

La radio digital es la transmisión y la recepción de sonido que ha sido procesado. En síntesis, un transmisor de radio digital convierte sonidos en series de números, "dígitos" de ahí el término "radio digital". En cambio, las radios analógicas tradicionales convierten los sonidos en series de señales eléctricas que se asemejan a ondas de sonido.

En comparación con la radio analógica tradicional, la radio digital ofrece a los oyentes una serie de ventajas que incluyen:

- La radio digital es capaz de proporcionar un sonido claro de calidad comparable a la de los CD's. Los receptores digitales proporcionan un sonido significativamente más claro que las radios analógicas convencionales, así como los CD's tienen un sonido más claro que los discos de álbum.
- La recepción de la radio digital es más resistente a las interferencias, y elimina muchas imperfecciones de la transmisión y recepción de la radio analógica.
- Mejor calidad de audio, señales más fuertes, y nuevos servicios auxiliares, tales como canales múltiples de programación de audio, servicios de audio a petición, y funciones interactivas.

- Radios de diseño avanzado con funciones simplificadas.
- Potencial para introducir nuevos servicios de datos e información que serán indicados en la pantalla de la radio cuando se introduzcan funciones exclusivamente digitales. Por ejemplo, una estación podría transmitir información de fondo sobre un grupo musical cuando la música de ese grupo se está oyendo. Los anunciantes podrían enviar información sobre descuentos y ofertas. Los oyentes podrían programar sus radios para recibir cambios meteorológicos personalizados, noticias, o cotizaciones de bolsa.

Actualmente, el DAB está entrando en la fase de implementación en varios países, en la *fig. 1.1* se muestra la distribución en el mundo del DAB es sus etapas operativas, pre-operativas, en prueba, alto índice de interés, países interesados y sin datos.

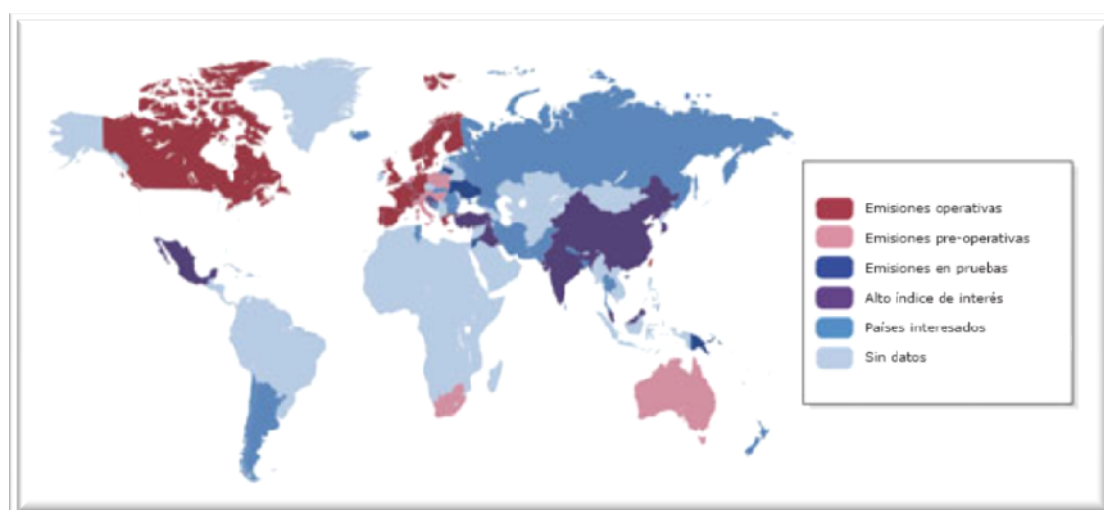


Fig. 1.1 Situación de la radio DAB en el mundo.

Existen más de 500 millones de personas en todo el mundo que pueden ahora recibir casi 1000 diferentes servicios DAB y tales estadísticas están cambiando rápidamente a medida que más licencias se conceden y más países adopten DAB como el futuro de la radio.

Para recibir la nueva señal de radio digital se necesita un nuevo receptor digital actualmente ya existen una gran gama de diferentes receptores que ofrecen variadas aplicaciones [14].

A continuación en la *fig 1.2* muestra un ejemplo de un receptor Interactive Data Bosch Hannover, el receptor incorpora las funciones mínimas de un navegador:



Fig. 1.2 Receptor Interactive Data Bosch Hannover.

1.2 Estándares de la radio digital.

1.2.1 Eureka 147.

El primer desarrollo tecnológico para lanzar la radio digital a nivel mundial fue creado por la unión europea de radiodifusión (UER) a través del proyecto Eureka 147. Europa comenzó a desarrollar éste sistema en 1986 y sus primeras experimentaciones fueron en 1988. Actualmente el proyecto está acabado y aprobado y ahora en proceso de difusión bajo el nombre comercial de DAB (Digital Audio Broadcasting). DAB permite emitir programas radiofónicos a través de tecnologías digitales mejorando la calidad del audio.

Una de las ventajas más sobresalientes del DAB es la mejora de la recepción del sonido porque se superan los efectos de la propagación multitrayecto (Debida a los edificios o montañas) que es producida en los aparatos receptores estacionarios, portátiles y móviles, protegiendo la información de interferencias. Estas mejoras se consiguen mediante la modulación COFDM, que utiliza un sistema de codificación para distribuir la información entre muchas frecuencias.

La cobertura del sistema DAB puede ser local, regional, nacional y supranacional. El sistema utiliza un único bloque mejorando la eficacia del espectro y de la potencia. DAB está diseñado para poder funcionar en el rango de frecuencias de 30 MHz a 3,000 MHz. La distribución se puede realizar por satélite o por transmisiones terrenales o de cable utilizando distintos modos que el receptor detecta automáticamente.

DAB permite entrar en un múltiplex del sistema y seleccionar entre varios programas de audio o servicios de datos. Cada bloque (múltiplex) tiene una capacidad de 1.5 Mbits, lo que permite, por ejemplo, transportar seis programas estéreo de 192 Kbits cada uno y su correspondiente protección, y varios servicios adicionales.

El sistema DAB nos proporciona grandes ventajas, la cuales han hecho del sistema DAB uno de los más eficientes [13].

1.2.2 IBOC AM.

Como es bien sabido en los últimos años se han realizado estudios y probado sistemas en todo el mundo para la introducción de la radiodifusión sonora digital, tanto en las bandas de frecuencias ya atribuidas a estos servicios o bien en nuevas bandas de frecuencias atribuidas a los servicios de radiodifusión sonora (caso del DAB). Un caso particular son los sistemas que utilizan las bandas de ondas menores de 30 MHz (onda corta y onda media, fundamentalmente). En los EEUU han optado por desarrollar un sistema propio denominado IBOC (In-Band On- Channel).

En abril de 2005 el Comité Nacional de Sistemas de Radio (NRSC) de la Administración de EEUU aprobó el estándar sistema IBOC AM. Con el fin de facilitar una migración gradual de los actuales sistemas de radiodifusión sonora analógicos a los sistemas digitales se han investigado sistemas que permiten realizar (simulcast), esto es transmitir en el mismo canal la señal analógica y la señal digital, sin que se originen interferencias entre ellas. La señal analógica es recepcionada por los antiguos receptores analógicos y la señal digital por los modernos receptores digitales.

Los modos de funcionamiento del IBOC AM son *por canal dentro de banda (in-band on-channel, IBOC)* puede funcionar en los modos (*híbrido*) y (*totalmente digital*). En el modo *híbrido* se transmite la señal analógica y la señal digital en el canal asignado a la señal analógica. En el modo *totalmente digital* todo el ancho de banda asignado a la estación se utiliza para la transmisión de las señales digitales la cual nos da grandes beneficios.

Los componentes básicos comprenden cinco componentes básicos:

- Codificador y compresión de la fuente de audio.
- Codificación de canal.
- Entrelazado en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

- Generador OFDM.
- Mezclador señal principal.

Algunas de las ventajas que ofrece dicho estándar son:

- Capacidad para la transmisión de audio y datos.
- Calidad de la señal de radio en recepción similar a FM.
- Alta compresión de audio.
- Buena relación entre robustez y calidad.
- Eficiencia del uso del espectro radioeléctrico.

El sistema IBOC AM tiene gran similitud con el estándar IBOC FM que a continuación se explica [15].

1.2.2 IBOC FM.

Al igual que IBOCAM, IBOCFM (In-band On-channel) o Canal dentro de banda es un sistema de broadcast digital desarrollado por Ibiqity Digital Corporation. La principal característica de éste sistema de radiodifusión digital es la permisividad de envío híbrido, es decir, la convivencia de señal analógica y digital, lo que permita una transición gradual de sistema analógico a digital en la zona geográfica dónde se aplique.

El modo del funcionamiento del sistema IBOC FM puede funcionar en los modos híbrido, híbrido ampliado y totalmente digital. En el modo híbrido la señal digital se transmite en bandas laterales primarias a ambos lados de la señal analógica, en el modo ampliando el funcionamiento va en decremento de la señal analógica FM ya que consume un pedazo de su ancho de banda y se añaden nuevas particiones frecuenciales. En el modo digital todo el ancho de banda se utiliza para la transmisión de las señales digitales por lo que aporta capacidades mejoradas de funcionamiento. La estructura básica funcional del sistema, que comprende los siguientes componentes:

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

- Subsistema de transmisión.

El sistema IBOC FM permite la migración de las estaciones de radiodifusión sonora que trabajan en la banda de ondas métricas (frecuencia modulada) a un sistema digital. También transmitir conjuntamente la señal analógica y la digital en la canalización atribuida a la señal analógica.

No hay diferencias notables entre éstas dos modalidades del sistema IBOC, salvo de que uno está creado para convivir con señales de ondas métricas (FM) y ondas cortas (AM) y reciben la misma señal digital [15].

1.2.2 DRM (Digital Radio Mondiale).

DRM es un estándar de radiodifusión sonora de radio digital desarrollado por el consorcio Digital Radio Mondiale, para mejorar la calidad de las transmisiones analógicas de la radio en las bandas de Amplitud Modulada. Hay que destacar que ningún país es propietario de éste sistema de radio digital, por lo cual dicho sistema desarrollado por el Consorcio DRM (Digital Radio Mondiale) se considera mundial.

En el sistema DRM se comprenden conceptualmente distintas etapas de transmisión:

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

Por su funcionamiento y características este sistema trabaja similarmente que los sistemas IBOC [16].

1.3 Transición de la radio analógica a digital (DAB).

La radio digital DAB, es el avance más importante en la tecnología de la radio desde la implementación de la radio FM, porque ha sido el estándar que mejores resultados ha dado por sus características innovadoras y eficientes. DAB es una tecnología en desarrollo para la difusión de audio en formato digital.

Debido a las necesidades de requerir más y mejores comunicaciones, así como también tecnología en el ámbito de la radio se ha optado por la transición analógica-digital, ya que la radio digital comparada con la analógica, tiene una infinidad de mejoras y características la cual nos da la pauta para una mejor radio, con DAB por sus siglas en inglés (Digital Audio Broadcasting) se tiene una radio con mejoras en la recepción la cual es inmune al ruido esto se logra mediante la transmisión COFDM, la cual proporciona características que provocan que el sonido sea de mayor calidad, DAB se caracteriza por la eficiencia en la utilización del espectro radioeléctrico y la potencia, ya que se utiliza un único bloque para una red nacional, territorial o local, con transmisores de baja potencia, El sistema DAB permite multiplexar varios programas y servicios de datos para formar un bloque y ser emitidos juntos, obteniéndose un área única de servicio para todos ellos. El DAB ha sido provisto de grandes características que transforman a la radio convencional y hacen del DAB la mejor alternativa para transformar la radio.

1.4 Uso del espectro radioeléctrico en el DAB.

Hablar de DAB es hablar de transmisión de datos de manera digital. Hay que olvidarse de modulaciones como la AM o la FM. En concreto se usa una modulación denominada OFDM (orthogonal Frequency Division Multiplexing), en el cual se transmiten un número generalmente bastante elevado de subportadoras (entre varios cientos a varios miles) muy próximas unas de otras, todas ellas dentro del mismo canal. La anchura del canal DAB es de 1,536MHz, aproximadamente unas 6 veces la de un canal de FM estéreo, o una cuarta parte de un canal de TV. Cada una de dichas subportadoras se modula en fase, (DQPSK, Differential Quadrature Phase Shift Keying). Pero ¿Por qué en vez de una única portadora aquí se usan tantas subportadoras? La razón es imaginarse qué es lo que ocurre cuando con una sola portadora ésta se ve interferida. Cuando esto ocurre, toda la información transmitida por esa portadora se ve afectada por ruido o en el peor de los casos se pierde irremisiblemente. En cambio cuando se usa OFDM, la información a transmitir se reparte

entre todas las subportadoras, y si una de ellas es interferida, sólo se perderá la información enviada a través de ella, pero no el resto. Es decir, el sistema se hace más robusto.

Además debido a ciertas características técnicas adicionales de la modulación OFDM, es posible la creación de lo que se denominan Redes Isofrecuencia o de Frecuencia Única. Estas redes consisten en un conjunto de emisores que transmiten la misma señal (programas) todos en la misma frecuencia. OFDM garantiza que incluso en los sitios en los que los que se superpongan las señales de varios de esos transmisores la señal resultante podrá ser utilizada con éxito por el receptor, incluso la recepción puede mejorarse. Pero para que esto ocurra, deben cumplirse dos cosas:

- Los transmisores emitiendo en la misma frecuencia tienen que estar sincronizados cuidadosamente.
- Hay que garantizar que las señales que están llegando al receptor procedan de transmisores no muy lejanos.

Esta breve explicación tiene dos consecuencias importantes: todos los repetidores que tenga una misma emisora pueden usar todas las mismas frecuencias, y por lo tanto la planificación del espectro radioeléctrico es muy sencilla y eficiente (no hay que reservar una frecuencia distinta para cada repetidor). La segunda consecuencia interesante se deriva del segundo punto anterior: los transmisores de estas Redes de Isofrecuencia forzosamente han de tener una potencia baja, para que su señal no llegue demasiado lejos; si necesitamos llegar un poco más lejos, pongamos un microtransmisor para cubrir esa nueva zona. Este ahorro de potencia de transmisión ayuda también a realizar una planificación de frecuencias mucho más eficiente.

Para el sistema DAB se han definido un total de cuatro modos de transmisión. Estos modos definen ciertos parámetros que regulan por ejemplo el número de portadoras, duración de la trama de transmisión, número de bloques FIB (*fast information bloq* o bloque de información rápida) por trama, número de símbolos por trama etc. Los modos son empleados según el tipo de red que se esté implementando, así, el Modo I está recomendado para redes de frecuencia única (SFN, Single Frequency Networks) por debajo de 300 MHz. El Modo II se emplea para redes SFN en banda L o para redes híbridas de satélite y terrestres. El Modo III es más apropiado para satélite al tener mayor separación entre las portadoras. Finalmente, el

Modo IV fue añadido posteriormente para establecer redes SFN en banda L que permitieran mayor separación entre transmisores, o lo que es lo mismo con mayor intervalo de guarda. La mayor separación entre portadoras hace que el sistema se comporte mejor ante el efecto Doppler, de este modo el tercer modo es el más robusto ante dicho efecto. El operador en el momento de establecer el servicio debe designar el modo de transmisión que empleará para difundir el múltiplex [2].

El DAB es un sistema diseñado para trabajar en un rango de frecuencias de entre 30MHz a 3GHz. En concreto se han reservado la banda VHF3 y parte de la banda L para este tipo de transmisiones. Aunque en México no se cuenta aun con grandes avances sobre la radio digital, se ha considerado conveniente asignarle la Banda L en su fase de prueba.

1.5 Clases de servicios el DAB.

El DAB, como sistema de transmisión digital, puede también transmitir otro tipo de datos además de audio. En principio, cualquier tipo de información se puede transmitir siempre que esté en formato digital y no exceda la capacidad máxima disponible del DAB (aproximadamente 1,7 Mbit/s). Actualmente se están transmitiendo datos asociados a los programas de radio (PAD -Programme Associated Data) que son recibidos por la primera generación de receptores DAB. Los datos no asociados a los programas (non-PAD), también llamados datos independientes, son actualmente centro de atención para el diseño de aplicaciones comerciales. Estos datos se transmiten a través del canal principal de servicios (MSC -Main Service Channel) y pueden ser organizados en paquetes (Packet Mode) o transmitidos en flujo continuo (Stream Mode) para proporcionar simultáneamente un gran número de servicios. Para la recepción de los servicios se necesita un terminal diseñado específicamente. Algunos ejemplos de servicios pueden ser la distribución de periódicos electrónicos, la transmisión de páginas Web o la transmisión de imágenes estáticas como mapas meteorológicos o mapas de tráfico. Por esta razón se ha comenzado a hablar de "radiodifusión multimedia". Mediante ella cualquier tipo de información puede ser transportada por el canal DAB, y con la ventaja sobre la televisión por cable de que el DAB puede ser recibido en terminales portátiles y vehículos en movimiento. También se ha dotado al DAB del sistema de acceso condicional (Conditional Access System). Mediante este sistema se pueden implementar servicios dirigidos a usuarios de pago, servicios restringidos a un área de cobertura particular, etc. [4].

1.6 Impacto socio-económico en el DAB.

Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación son actividades orientadas a la producción y difusión (radioescuchas) la cual se desenvuelve en el contexto de la sociedad en este caso la radio digital (DAB) tiene un papel de gran importancia ya que es una tecnología que se avecina en nuestro país.

En la actualidad se tiende a reconocer el valor de la información como un recurso, con esto se afirma que la información es un elemento fundamental para el desarrollo de una orbe, dado que al contar con un nuevo servicio de comunicación se traduce en productos y servicios de alta calidad, mayor competitividad y permitir su transmisión eficientemente, las cuales son características que son de beneficio para la sociedad.

Los nuevos productos que nos ofrece la tecnología producen un impacto económico para la sociedad desde el primer momento de su implementación, ya que con nuevos servicios se requieren nuevas implementaciones de tecnología desde el proveedor de servicio hasta los usuarios.

Se han hecho inversiones en todo el mundo en ámbito de la radio, pero ninguna inversión como la de una tecnología innovadora como es la radio digital, sin embargo no todos los países tienen la oportunidad de invertir sus recursos financieros en la adquisición de nuevas tecnologías a pesar de que se plantea que el éxito que obtengan, el DAB promete ser una nueva tecnología eficaz ya que cuenta con una gran gama de características nuevas y funcionales que tienen como objetivo la de cumplir y llegar mas lejos de las expectativas del usuario.

La tecnología de la radio (DAB) amplía y reproduce las desigualdades entre los pueblos y los sectores sociales ya que la modernización de un país esta vinculada con su base tecnológica, esto quiere decir que se necesitan nuevas y mejores servicios tecnológicos para estar en un nivel competitivo, estas son algunas razones por las cuales debemos estar a la vanguardia en tecnología, el reto para los países en desarrollo es grande pues deben encontrar y adoptar estrategias en función de sus economías, la radio digital ha demostrado que es una tecnología rentable, y con esto se tienen razones suficientes para que en el país se implemente

la radio digital, consecuentemente se tiene que estudiar como se avienen las tecnologías de punta para garantizar el desarrollo sustentable del país.

Capítulo 2

Introducción a los sistemas de comunicaciones electrónicas

Introducción

El objetivo fundamental de un sistema electrónico e comunicaciones, es transferir información de un lugar a otro. Por consiguiente, se puede decir que las comunicaciones electrónicas son la transmisión, recepción y procesamiento de la información entre dos o más lugares, mediante circuitos electrónicos. La fuente original de información puede estar en forma analógica (continua), como por ejemplo la voz humana o la música, o en forma digital (discreta), como por ejemplo los números codificados binariamente o los códigos alfanuméricos. Sin embargo, todas las formas de información se deben convertir a energía electromagnética antes de ser propagada a un sistema electrónico de comunicaciones.

La finalidad del capítulo es proporcionar un panorama general sobre los sistemas de comunicación electrónicas ya que de aquí parte la creación de los sistemas de radiodifusión de audio digital DAB y cualquier sistema de comunicación moderno en general. Además de que es

importante conocer las técnicas que se utilizan en los sistemas analógicos de comunicación contra los sistemas digitales, para tener un mejor enfoque sobre que se debe cambiar y que se puede mejorar en el proceso de transición de la radio analógica convencional hacia la radio digital.

2.1 El espectro electromagnético.

El objetivo de un sistema electrónico de comunicaciones es transferir información entre dos o más lugares, cuyo nombre común es *estaciones*. Esto se logra transfiriendo la información original a formas de energía electromagnética, para transmitirla a continuación a una o mas estaciones receptoras, donde se recupera su forma original. La energía electromagnética se puede propagar en forma de voltaje o corriente a través de un conductor o hilo metálico o bien en forma de ondas de radio emitidas hacia el espacio libre, o como ondas luminosas a través de una fibra óptica. La energía electromagnética se distribuye en un intervalo casi infinito de frecuencias.

La frecuencia no es más que la cantidad de veces que sucede un movimiento periódico, como puede ser una onda senoidal de voltaje o de corriente, durante un determinado periodo. Cada inversión completa de la onda se llama ciclo. La unidad básica de la frecuencia es el hertz (Hz), y un Hertz es igual a un ciclo por segundo ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ cps}$) (1). La *fig. 2.1* muestra el espectro electromagnético en forma grafica.

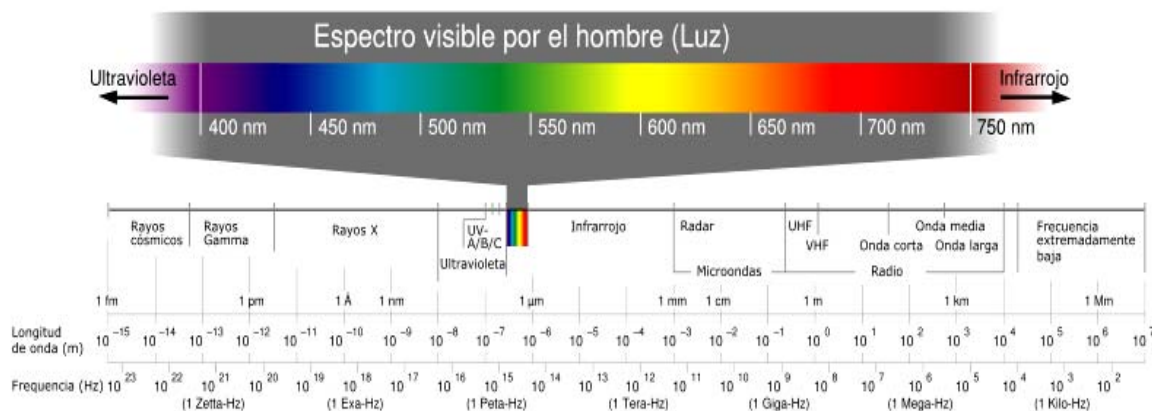


Fig. 2.1 Espectro espectro electromagnético.

2.1.1 Frecuencias de transmisión.

El espectro electromagnético de frecuencias total, donde se muestran los lugares aproximados de diversos servicios, *fig 2.1*. Este espectro de frecuencias va desde las subsónicas (unos pocos hertz) hasta los rayos cósmicos (10^{22} hertz). El espectro de frecuencias se subdivide en subsecciones o bandas. Cada banda tiene un nombre y sus límites.

En México, Las asignaciones de frecuencias para radio propagación en el espacio libre son realizadas por la *secretaría de comunicaciones y transportes* (SCT) y por la *comisión federal de telecomunicaciones* (COFETEL). Por ejemplo, La banda de emisión comercial en FM tiene asignadas las frecuencias de 88 MHz a 108 MHz. Las frecuencias exactas asignadas a transmisores específicos que funcionan en las diversas clases de servicios se actualizan y alteran en forma constante, para cumplir con las necesidades de comunicación de un país en particular [6].

El espectro total útil de radiofrecuencias (RF) se divide en bandas de frecuencias mas angostas, a las que se dan nombres y números descriptivos y algunas de ellas se subdividen a su vez en diversos tipos de servicios. Las designaciones de banda según el comité consultivo internacional de radio (CCIR) se muestran en la siguiente tabla.

Cuando se manejan ondas de radio, se acostumbra usar unidades de longitud de onda, y no de frecuencia. La longitud de onda es la distancia que ocupa en el espacio un ciclo de una onda electromagnética, es decir, la distancia entre los puntos correspondientes en una onda repetitiva. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la longitud de onda, y directamente proporcional a su velocidad de propagación. Se supone que su velocidad de propagación de la energía electromagnética en el espacio libre es de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (1). La relación entre frecuencia, velocidad y longitud de onda se expresa en forma matemática como sigue:

$$\text{longitud de onda} = \frac{\text{velocidad}}{\text{frecuencia}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde λ = longitud de onda (metros por ciclo)

c = velocidad de la luz (300,000,000 metros por segundo)

f = frecuencia (Hertz).

Tabla 2.1 Designaciones de banda CCIR.

| Numero de banda | Intervalo de frecuencias ¹ | Designación | Aplicación |
|-----------------|---------------------------------------|--|--|
| 2 | 30Hz-300 Hz | ELF (frecuencia extremadamente baja) | Distribución eléctrica (60 Hz) y telemetría de baja frecuencia |
| 3 | 0.3 kHz-3 kHz | VF (frecuencia de voz) | Canales telefónicos |
| 4 | 3 kHz-30 kHz | VLF (frecuencias muy bajas) | Sistemas especiales de gobierno y militares. |
| 5 | 30 kHz-300 kHz | LF (frecuencias bajas) | Navegación marina y aeronáutica |
| 6 | 0.3 MHz-3 MHz | MF (frecuencias intermedias) | Emisiones comerciales de radio AM |
| 7 | 3 MHz-30 MHz | HF (frecuencias altas) | Radiocomunicaciones en dos sentidos y banda civil. |
| 8 | 30 MHz-300 MHz | VHF (frecuencia muy altas) | Radios móviles, emisión comercial en FM y emisión de televisión en los canales 2 a 13 |
| 9 | 300 MHz-3 GHz | UHF (frecuencias ultra altas) | Emisión comercial de televisión en los canales 14 a 83. Servicios móviles de comunicación terrestre, telefonía celular, sistemas de radar y comunicación, sistemas de radio por microondas y satélite. |
| 10 | 3 GHz-30 GHz | SHF (frecuencias súper altas) | Sistemas de radio por microondas y satélite. |
| 11 | 30 GHz-300 GHz | EHF (frecuencias extremadamente altas) | Aplicaciones especializadas en radiocomunicaciones. |
| 12 | 0.3 THz-3 THz | Luz infrarroja | Sistemas de guía de proyectiles con blancos térmicos, fotografía y Astronomía. |
| 13 | 3 THz-30 THz | Luz infrarroja | |
| 14 | 30 THz-300 THz | Luz infrarroja | |
| 15 | 0.3 PHz-3 PHz | Luz Visible | Sistemas de fibra óptica |
| 16 | 3 PHz-30 PHz | Luz ultravioleta | ----- |
| 17 | 30 PHz-300 PHz | Rayos X | ----- |
| 18 | 0.3 EHz-3 EHz | Rayos Gamma | ----- |
| 19 | 3 EHz-30 EHz | Rayos cósmicos | ----- |

¹ 10⁰,hertz (Hz); 10³,kilohertz (kHz); 10⁶,megahertz (MHz); 10⁹,gigahertz (GHz); 10¹²,terahertz (THz); 10¹⁵,pentahertz (PHz); 10¹⁸,exahertz (EHz).

2.2 Ancho de banda y capacidad de información.

Las dos limitaciones más importantes en un sistema de comunicaciones son el ruido y el ancho de banda. El ancho de banda de una señal de información no es más que la diferencia de las frecuencias máxima y mínima contenidas en la información, y el ancho de banda de un canal de comunicaciones es la diferencia máxima y mínima que pueden pasar por el canal (es decir, son su banda de paso). El ancho de banda de un canal de comunicaciones debe ser suficientemente grande (ancho) para pasar todas las frecuencias importantes de la información. En otras palabras, el ancho de banda de un canal de comunicaciones debe ser igual o mayor que el ancho de banda de la información. Por ejemplo, las frecuencias de voz contienen señales de 300 a 3000 Hz. Por consiguiente, un canal para frecuencias de voz debe tener una amplitud igual o mayor que 2700Hz (3000Hz – 300Hz). Como regla general, un canal de comunicaciones no puede propagar una señal que contenga una frecuencia que cambie con mayor rapidez que la amplitud de banda del canal [4].

La teoría de la información es el estudio muy profundo del uso eficiente del ancho de banda para propagar información a través de sistemas electrónicos de comunicaciones. Esta teoría se puede usar para determinar la capacidad de información de un sistema de comunicaciones. La capacidad de información es una medida de cuanta información se puede transferir a través de un sistema de comunicaciones en determinado tiempo. La cantidad de información que se puede propagar en un sistema de transmisión es una función del ancho de banda y del tiempo de transmisión. R. Hartley, de los Bell Telephone Laboratorios, desarrollo en 1920 la relación entre ancho de banda, el tiempo de transmisión y la capacidad de información. La ley Hartley sólo establece que mientras más amplia sea el ancho de banda, y mayor sea el tiempo de transmisión, se podrá enviar más información a través del sistema. En forma matemática la ley de Hartley es

$$I \propto B \times t$$

Siendo I = Capacidad de información

B = Ancho de banda del sistema (Hz)

t = tiempo de transmisión (segundos)

La ecuación anterior indica que la capacidad de información es una función lineal, y es directamente proporcional tanto al ancho de banda del sistema como al tiempo de transmisión.

Si sube al doble el ancho de banda en sistema de comunicaciones, también se duplica la cantidad de información que se puede transportar. Si el tiempo de transmisión aumenta o disminuye, hay un cambio proporcional en la cantidad de información que el sistema puede transferir.

En general, mientras más compleja sea la señal e información, se requiere más amplitud de banda para transportarla en determinado tiempo. Se requieren unos 3Khz de amplitud de banda para transmitir señales telefónicas con calidad de voz. En contraste, se asignan 200 Khz de ancho de banda a la transmisión comercial de FM para música, con alta fidelidad, y se requieren casi 6 MHz de ancho de banda para transmitir señales de televisión de alta calidad.

C.E Shannon (también de Bell Telephone Laboratorios) publicó en 1948 un trabajo en el Bell System Technical Journal, donde relacionó la capacidad de información de un canal de comunicaciones, en bits por segundo (bps), con el ancho de banda y la relación de señal a ruido. La expresión matemática del límite de Shannon de capacidad de información es

$$I = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Es decir,

$$I = 3.32B \log_{10} \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde I = capacidad de información (bits por segundo)

B = ancho de banda (Hertz)

$\frac{S}{N}$ = relación de potencia de señal a ruido (sin unidades)

Para un canal normal de comunicaciones en banda de voz, con una relación de potencias de señal a ruido de 1000 (30 dB) y un ancho de banda de 2.7 kHz, el límite de Shannon de capacidad de información es

$$\begin{aligned} I &= 2700 \log_2 (1 + 1000) \\ &= 26.9 \text{ kbps} \end{aligned}$$

La ecuación anterior se puede reordenar para usarla en la determinación de cuanto ancho de banda se requiere para propagar determinada cantidad de datos por un sistema [1].

$$B = \frac{I}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)}$$

Donde B = ancho de banda (Hertz)

I = capacidad de información (bps)

$\frac{S}{N}$ = relación de potencia de señal a ruido (sin unidades)

2.3 Modulación y Demodulación.

Como a menudo no es práctico propagar señales de información a través de cables metálicos o de fibra óptica, o a través de la atmósfera terrestre, con frecuencia es necesario modular la información de la fuente, con una señal analógica de mayor frecuencia, llamada portadora. En esencia, la señal portadora transporta la información a través del sistema. La señal de información modula a la portadora, cambiando su amplitud, frecuencia o fase. Modulación no es más que el proceso de cambiar una o más propiedades de la portadora, en proporción con la señal de información. La modulación se hace en un transmisor mediante un circuito llamado modulador. Una portadora sobre la que ha actuado una señal de información se llama onda modulada o señal modulada. La demodulación es el proceso inverso a la modulación, y reconvierte a la portadora modulada en información original (es decir, quita la información de la portadora). La demodulación se hace en un receptor con un circuito llamado demodulador [1].

Hay dos razones por las que la modulación es necesaria en las comunicaciones electrónicas:

- Es en extremo difícil irradiar señales de baja frecuencia en forma de energía electromagnética con una antena.
- Ocasionalmente, las señales de la información ocupan la misma banda de frecuencias y si se transmite al mismo tiempo las señales de 2 o mas fuentes se interferirán entre si.

2.4 Modos de transmisión.

Los sistemas electrónicos de comunicaciones se pueden diseñar para manejar la transmisión solo en una dirección, en ambas direcciones, solo una a la vez, o en ambas direcciones al mismo tiempo. A estos se les llama modos de transmisión. Hay cuatro modos de transmisión posibles: simplex, semiduplex, duplex y duplex/duplex [1].

2.4.1 Simplex (SX).

Con el funcionamiento simplex, la transmisión solo se hace en una dirección a veces a los sistemas simples se les llama sólo en un sentido, sólo recibir o sólo transmitir. Una estación puede ser un transmisor o un receptor, pero no ambos a la vez. Como ejemplo de transmisión simples esta la emisión comercial de la radio y la televisión: la estación de radio solo transmite a uno, y uno siempre recibe [1].

2.4.2 Semiduplex (HDX, de half duplex).

En el funcionamiento semiduplex, las transmisiones se pueden hacer en ambas direcciones pero no al mismo tiempo. A veces, a los sistemas semiduplex se les llama alternar en ambos sentidos, en uno de los dos sentidos, o de cambio y fuera. Una estación puede ser transmisora y receptora, pero no al mismo tiempo. Los sistemas de radio en dos sentidos que usan botones para hablar (PPT, de push to talk) para conectar sus transmisores, como son los radios de banda civil y de policía, son ejemplos de transmisión semiduplex [1].

2.4.3 Duplex total (FDX, de full duplex).

Con el funcionamiento duplex total, o simplemente duplex, puede haber transmisiones en ambas direcciones al mismo tiempo. A veces, a los sistemas duplex se les llama simultáneos de dos direcciones, duplex completos o líneas bilaterales o en ambos sentidos. Una estación puede transmitir y recibir en forma simultanea; sin embargo, la estación a la que se transmite también debe ser de la que se recibe. Un sistema telefónico normal es un ejemplo del sistema duplex [1].

2.4.4 Duplex total/general (F/FDX, de full/full duplex).

Con la operación del duplex total/general es posible transmitir y recibir en forma simultánea, pero no necesariamente entre las 2 mismas estaciones (es decir, una estación puede transmitir a una segunda estación y recibir al mismo tiempo de una tercera estación). Las transmisiones duplex total/general se usan casi exclusivamente en circuitos de comunicaciones de datos. El servicio postal en Estados Unidos es un ejemplo del funcionamiento en duplex total/general [1].

2.5 Multiplexado.

La multiplexación es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión usando un dispositivo llamado multiplexor. El proceso inverso se conoce como demultiplexación. Existen muchas formas de multiplexación según el sistema de comunicación, los más utilizados son la multiplexación por división de tiempo o TDM (Time division multiplexing) y la multiplexación por división de frecuencia o FDM (Frequency-division multiplexing) [2].

2.5.1 Multiplexado por división de frecuencia, FDM.

En el multiplexado por división de frecuencia FDM, múltiples señales comparten el ancho de banda de un canal común de comunicaciones. Cabe mencionar que todos los canales tienen anchos de banda específicos y algunos son más o menos amplios. Un cable coaxial, por ejemplo, tiene un ancho de banda de 200 a 500 MHz. Sin considerar el tipo de canal, un ancho de banda amplio se puede compartir con el propósito de transmitir muchas señales al mismo tiempo. Las bandas de guarda están como zonas de buffer para reducir la interferencia entre canales vecinos y por la imposibilidad de realizar filtros ideales. La *fig. 2.2* muestra la representación gráfica del multiplexado FDM [3].

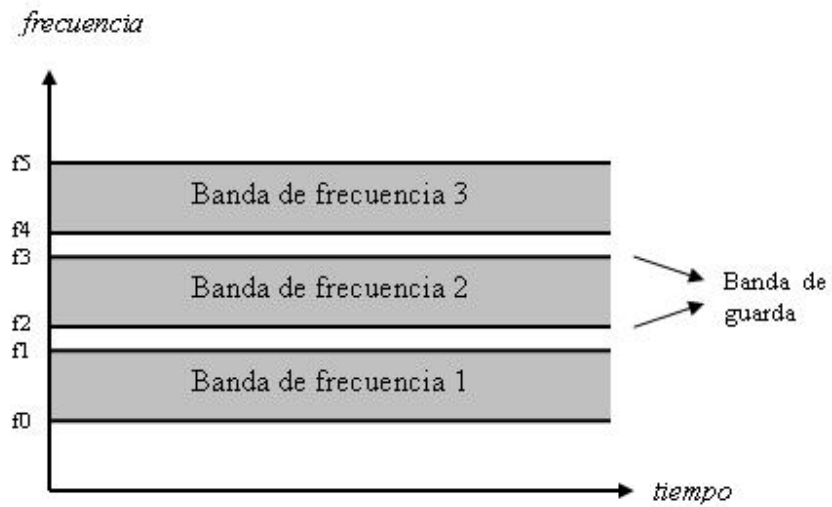


Fig. 2.2 Multiplexación FDM.

2.5.2 Multiplexado por división de tiempo, TDM.

En el multiplexado por división de tiempo TDM, se puede ocupar todo el ancho de banda de un canal. Sin embargo, cada señal se transmite por solo un espacio de tiempo muy corto llamados time slot. En otras palabras, las múltiples señales toman turnos de transmisión dentro de un solo canal, como se representa en la *fig. 2.3*. Las regiones de tiempo entre time slots no usadas se denominan tiempos de guarda y tienen la finalidad de disminuir la interferencia entre señales adyacentes [3].

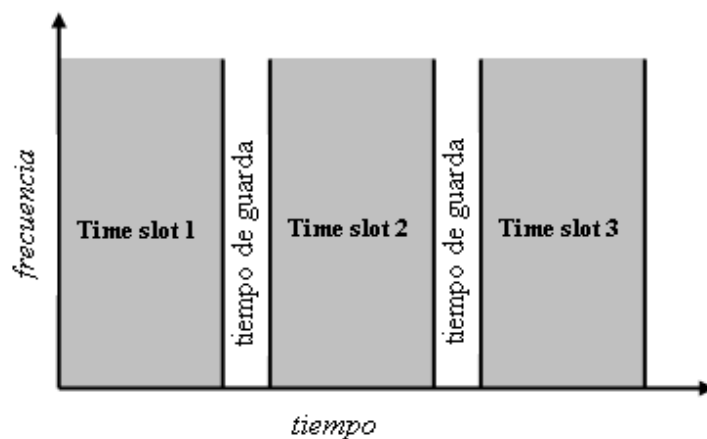


Fig. 2.3 Multiplexación TDM.

2.5.3 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales. (OFDM).

Una de las tecnologías que constituye la evolución de la radio es la multiplexación OFDM (por sus siglas en inglés). La ortogonalidad es una ventaja, un mecanismo para eliminar o reducir tanto como se quiera el problema de interferencia por propagación multitrayecto.

La multiplexación OFDM suprime la propagación multitrayecto (consiste en que entre el transmisor y el receptor exista más de un camino de propagación), ya que la señal de radio que se propaga no es un rayo estrecho que va directamente de la antena transmisora a la receptora. Si no un frente de onda amplio que se va difractando y reflejando a la medida que encuentra obstáculos en su camino (edificios altos o irregularidades del terreno).

Al receptor llegan varias replicas de la misma señal con diferente retardos entre ellas las primeras tres o cuatro tienen valores significativos de energía las demás suelen llegar atenuadas.

Las modulaciones que se encargan del proceso de multiplexar son mediante, QAM y PSK en conjunto de portadoras de diferentes frecuencias. Que se realiza tras, pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir errores producidos en la transmisión. La figura que a continuación se presenta es la representación gráfica de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales en comparación con una modulación convencional [8].

2.6 Como se transmite la información.

Tanto la información analógica como la digital pueden ser codificadas mediante señales analógicas o digitales. La elección de un tipo particular de codificación dependerá de los requisitos exigidos, del medio de transmisión, así como de los recursos disponibles para la comunicación. Los desafíos son los siguientes:

- Datos digitales, señales digitales: la forma más sencilla de codificar digitalmente datos digitales es asignar un nivel de tensión al uno binario y otro distinto para el cero. Para mejorar las prestaciones es posible utilizar otros códigos distintos al anterior, alternando el espectro de la señal y proporcionando capacidad de sincronización. En términos generales, el equipamiento para la codificación digital usando señales digitales es

menos complicado y menos costoso que el equipamiento necesario para transmitir datos digitales con señales analógicas mediante modulación.

- Datos digitales, señales analógicas: Los módems convierten los datos digitales en señales analógicas de tal manera que se puedan transmitir a través de líneas analógicas. Las técnicas básicas son el desplazamiento de amplitud (ASK, Amplitude-Shift Keying), desplazamiento de frecuencia (FSK, Frequency-Shift Keying), y desplazamiento de fase (PSK Phase-Shift Keying). En todas ellas, para representar los datos digitales se modifican uno o más parámetros característicos de la señal portadora. Algunos medios de transmisión como por ejemplo la fibra óptica y los medios no guiados, solo permiten la propagación de señales analógicas.
- Datos analógicos, señales digitales: los datos analógicos como por ejemplo voz y video, se digitalizan para ser transmitidos mediante sistemas digitales. La técnica más sencilla es la modulación por codificación de pulsos (PCM, Pulse Code Modulation), que implica un muestreo periódico de los datos analógicos y una cuantificación de las muestras. La conversión de los datos analógicos en digitales permite la utilización de las técnicas más recientes de equipos de conmutación para la transmisión digital.
- Datos analógicos, señales analógicas: los datos analógicos se modulan mediante una portadora para generar una señal analógica en una banda de frecuencia diferente, que se puede utilizar en un sistema de transmisión analógico. Las técnicas de modulación en amplitud (AM, Amplitude Modulation), modulación en frecuencia (FM, Frequency Modulation) y modulación en fase (PM, Phase Modulation). Los datos analógicos de naturaleza eléctrica se pueden transmitir fácilmente y de una forma poco costosa en banda base. Esto por ejemplo es lo que se hace para la transmisión de voz en líneas de calidad telefónica [4].

2.7 Tipos de modulación.

2.7.1 Amplitud modulada AM.

Para la transmisión y recepción de una señal se requiere transformarla a una forma mas adecuada. La modulación en amplitud es el proceso de alterar la amplitud de una señal portadora de frecuencia relativamente alta. La AM es una modulación relativamente barata y de baja calidad, usada para emisiones de señales de radio.

Los moduladores de AM son dispositivos no lineales con dos entradas y una salida. La primera entrada es una sola señal portadora de alta frecuencia y amplitud constante, la segunda son señales de información de frecuencia relativamente baja y puede tener una sola frecuencia, o ser de una forma compleja de onda formada a su vez por muchas frecuencias. La AM tiene el proceso en el modulador, donde la información modula la portadora de radio frecuencia, (frecuencias altas como para irradiarse en forma eficiente de una antena y propagarse por el espacio libre) y produce una forma modulada de onda.

A la onda modulada de salida del modulador se le llama frecuencia envolvente de AM. La modulación en amplitud mas usada con frecuencia es la AM de portadora de máxima potencia y doble banda lateral también llamada simplemente AM.

En la AM convencional se produce una forma de onda de AM cuando una señal moduladora de una sola frecuencia actúa sobre una señal portadora de alta frecuencia, la onda de salida contiene todas las frecuencias que forman la señal de AM y se usa para transportar información por el sistema y es llamado envolvente AM cuando se aplica una señal moduladora, varia la amplitud de onda de salida de acuerdo con la señal moduladora y la frecuencia de repetición del la envolvente es igual a la frecuencia de la señal moduladora [1].

2.7.2 Frecuencia modulada FM.

La frecuencia modulada, (modulación angular) tiene características especiales como lo son, su propagación por ondas directas como consecuencia de su ubicación en la banda de frecuencia de VHF, reducción de ruido, mejor fidelidad del sistema y uso más eficiente de la

potencia. Desventajas sobre la AM es que tiene necesidad de mayor ancho de banda y circuitos más complicados tanto en los transmisores y receptores.

La modulación angular se produce siempre que se varía el ángulo de fase, Θ , de una onda senoidal, con respecto al tiempo. Para llevarla a cabo es necesario variar la frecuencia con respecto a la referencia de la señal moduladora y la cual hace variar indirectamente a la fase.

A diferencia de la AM, la modulación en frecuencia crea un conjunto de complejas bandas laterales cuya extensión dependerá de la amplitud de la onda moduladora. Como consecuencia del incremento de las bandas laterales, la anchura del canal de la FM debe ser más grande, siendo también mayor la anchura de banda de sintonización de los aparatos receptores (especie de "puerta electrónica" de los aparatos receptores que permite que pase a la etapa de demodulación una determinada anchura de señal). La principal consecuencia de la modulación en frecuencia es una mayor calidad de reproducción como resultado de su casi inmunidad hacia las interferencias eléctricas. En consecuencia, es un sistema adecuado para la emisión de programas (música) de alta fidelidad.

Ya que la FM se ubica en la banda de frecuencia VHF la propagación de la banda de VHF (al igual que la UHF y frecuencias superiores) se realiza por medio de las llamadas ondas directas o espaciales, que se caracterizan por su direccionalidad y, en consecuencia, su limitada cobertura (las ondas directas se pierden en el espacio cuando fluyen con la línea del horizonte). Esta direccionalidad hace que las señales de FM puedan ser fácilmente absorbidas o reducidas por los obstáculos que encuentra en su trayectoria.

Entonces su pequeña cobertura convierte a la frecuencia modulada en un servicio de radio fundamentalmente local (mediante el empleo de repetidores puede incrementar su cobertura).

Las bandas de frecuencia comercial tienen asignado 20 MHz a las emisiones que va de los 88 a 108 MHz esta banda de los 20 MHz se divide en canales de 100 y 200 KHz y comienzan en 88.1 MHz, es decir, 88.3, 88.5 MHz y sucesivamente [1].

2.7.3 Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).

La modulación por desplazamiento de amplitud, por sus siglas en inglés Amplitude-shift keying (ASK), es una forma de modulación en la cual se representan los datos digitales como variaciones de amplitud de la onda portadora.

La amplitud de una señal portadora análoga varía conforme a la corriente de bit (modulando la señal), manteniendo la frecuencia y la fase constante como se muestra en la *fig. 2.4*. El nivel de amplitud puede ser usado para representar los valores binarios 0s y 1s. Podemos pensar en la señal portadora como un interruptor ON/OFF. En la señal modulada, el valor lógico 0 es representado por la ausencia de una portadora, así que da ON/OFF la operación de pulsación y de ahí el nombre dado [1].

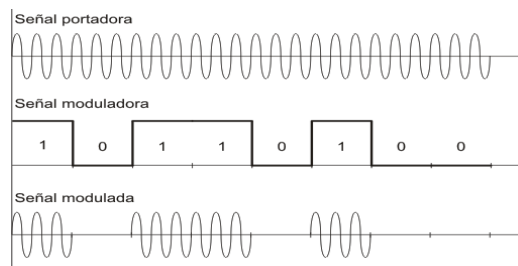


Fig. 2.4 Modulación ASK.

2.7.4 Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

La Modulación por desplazamiento de frecuencia, por sus siglas en inglés (Frequency Shift Keying) FSK es la más simple de las modulaciones digitales y por lo tanto es de bajo desempeño. Es similar a la modulación de frecuencia (FM), pero más sencillo, dado que la señal moduladora es un tren de pulsos binarios que solo varía entre dos valores de tensión discretos. En la modulación digital, a la relación de cambio a la entrada del modulador se le llama bit-rate y tiene como unidad el bit por segundo (bps).

FSK es una modulación de frecuencia donde la señal moduladora (datos) es digital. Los dos valores binarios se representan con dos frecuencias diferentes (f_1 y f_2) próximas a la frecuencia de la señal portadora f_p . Generalmente f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de igual magnitud pero en sentidos opuestos de la frecuencia de la señal portadora. (1) La señal modulada se representa gráficamente en la *fig. 2.5*.

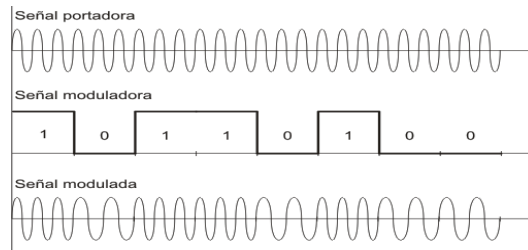


Fig. 2.5 Modulación FSK.

2.7.5 Modulación por desplazamiento de fase (PSK).

PSK (Phase-shift keying), es una modulación de fase donde la señal moduladora (datos) es digital. Es el caso de modulación donde tanto las señales de transmisión como las señales de datos son analógicas. Es un tipo de modulación exponencial al igual que la modulación de frecuencia como se muestra en la fig. 2.6. Se caracteriza porque la fase de la onda portadora varía directamente de acuerdo con la señal modulante, resultando una señal de modulación en fase.

La modulación de fase no suele ser muy utilizada porque se requiere equipos de recepción más complejos que las señales moduladas en frecuencia. Además puede presentar problemas de ambigüedad para determinar por ejemplo si una señal tiene una fase de 0° o 180° [1].

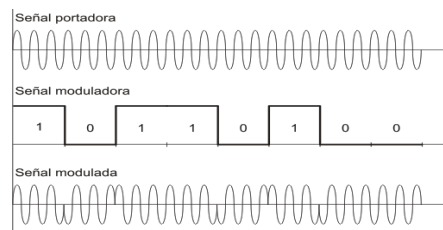


Fig. 2.6 Modulación PSK.

2.7.6 Modulación digital QAM.

QAM es una forma de modulación digital, la información digital esta contenida en amplitud como en fase de las portadoras. Inicialmente QAM fue una modulación para emitir señales estereofónicas ahora es utilizada para la modulación digital de portadoras analógicas. La modulación de amplitud en cuadratura es una forma de modulación en AM, en la cual existen

dos señales de fuentes distintas de información, esto quiere decir dos canales, y se modulan a la misma frecuencia de portadora en el mismo tiempo sin que interfieran dichas señales. Enseguida de que las fuentes de información modulan la misma portadora se separan en dos señales desfasadas 90° entre ellas su ventaja principal es la de la conservación del ancho de banda.

A continuación en la *fig. 2.7*, el diagrama a bloques de un modulador QAM. Observemos que existe un solo oscilador de la portadora, la cual produce una portadora enfasada al modulador I se desplaza 90° a la portadora y por resultado obtenemos otra portadora en cuadratura del modulador Enseguida los dos moduladores se suman linealmente pasando por etapas de elevación de frecuencias y amplificación de potencia [1].

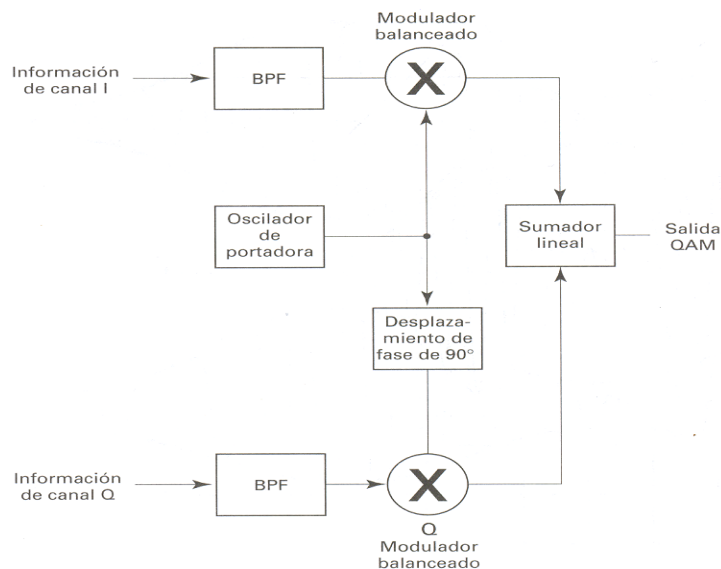


Fig. 2.7 Diagrama a bloques de un modulador QAM.

La *fig. 2.8* muestra el diagrama a bloques muestra el demodulador QAM , para llevar a acabo la demodulación se requiere un circuito recuperador de portadora que reproduzca la frecuencia y fase original de portadora y dos moduladores balanceados para demodular las señales este proceso es llamado detección sincrónica y sincronía [8].

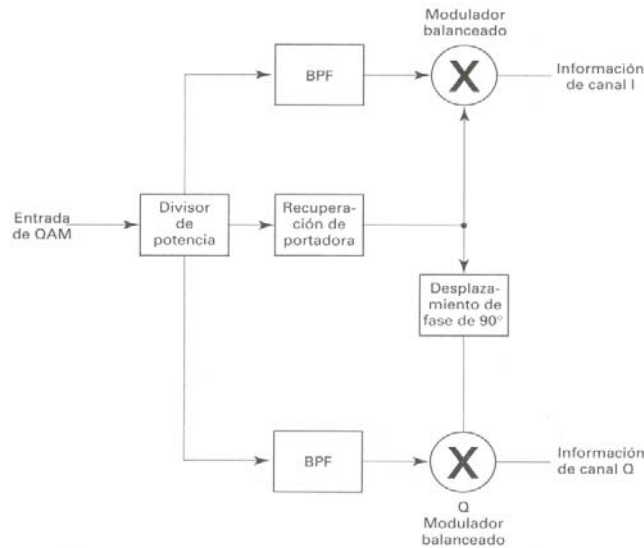


Fig. 2.8 Diagrama a bloques de un demodulador QAM.

2.7.7 Modulación QPSK.

La manipulación por desplazamiento cuaternario en fase es una forma de modulación digital angular y amplitud constante. La modulación QPSK es una técnica M-aria de codificación, en la cual $M=4$, con esto nos da como resultado 4 fases como resultado para una sola frecuencia de portadora y por consecuencia necesitamos cuatro condiciones de entrada, como solución se necesitan 2bits, en los cuales hay cuatro condiciones posibles (00, 01, 10 y 11) y se combinan en grupos de 2bits llamados dibits, cada dibit genera las cuatro fases de salida.

A continuación en la fig. 2.9 se muestra el diagrama de bloques del modulador QPSK. Primeramente tenemos dos bits (dibits) y se sincroniza en el divisor de bits, enseguida después de haber entrado salen simultáneamente en paralelo. Un bit al canal I y en otro al canal Q. El bit I modula una portadora enfasada con un oscilador de referencia y el bit Q modula una portadora que esta defasada 90° (en cuadratura), respecto a la portadora de frecuencia para un 1 lógico = +1V, un 0 LOGICO = -1V . Hay dos fases en la salida del modulador balanceado I: $+ \cos w_c t$ y

- $\text{sen } \omega_c t$ y dos fases en la salida del modulador Q: $+\text{cos } \omega_c t$ y $-\text{cos } \omega_c t$ el sumador lineal combina las dos señales en cuadratura (defasadas 90). Finalmente hay 4 fasores resultantes.

- 1) $+\text{sen } \omega_c t + \text{cos } \omega_c t$
- 2) $+\text{sen } \omega_c t - \text{cos } \omega_c t$
- 3) $-\text{sen } \omega_c t + \text{cos } \omega_c t$
- 4) $-\text{sen } \omega_c t - \text{cos } \omega_c t$

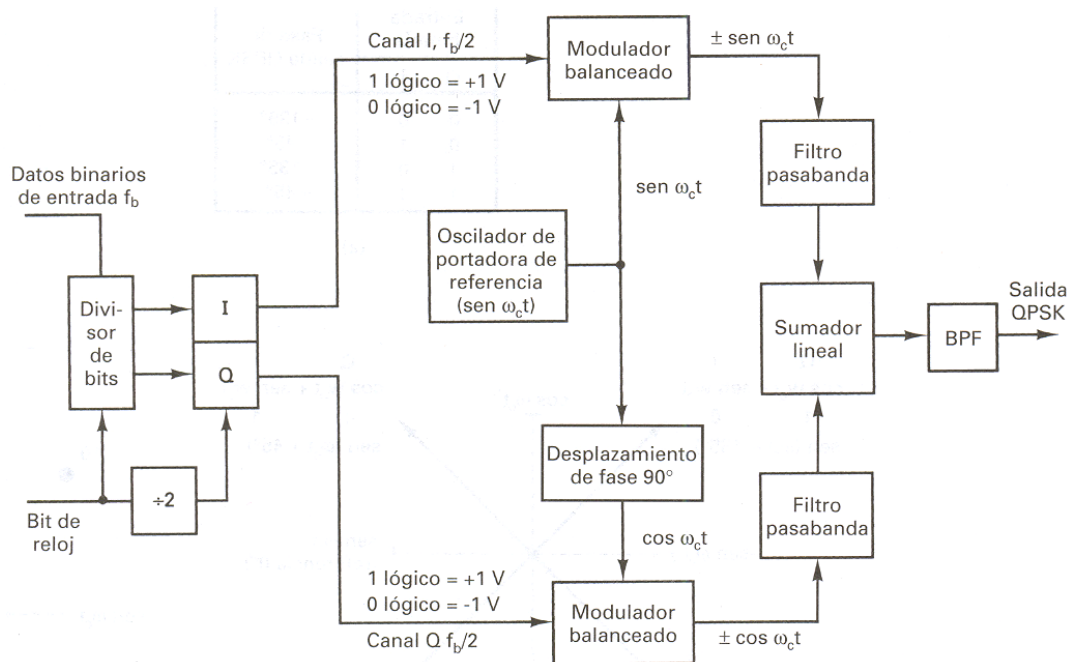


Fig. 2.9 Diagrama a bloques de un modulador QPSK.

La fig. 2.10 muestra el diagrama a bloques de un receptor QPSK, consiste en un divisor de potencia que dirige la señal de entrada QPSK a los detectores del producto I y Q, y al circuito de recuperación de portadora, el cual reproduce la señal del oscilador de portadora. La portadora debe de ser igual en frecuencia y en fase con la portadora de referencia de transmisión. La señal QPSK se demodula en los detectores de producto I y Q que generan los bits originales de los datos I y Q, las salidas de los detectores de productos de alimentan al circuito combinados de bits donde se convierten los canales I y Q paralelos a una corriente de salida de datos binarios [1].

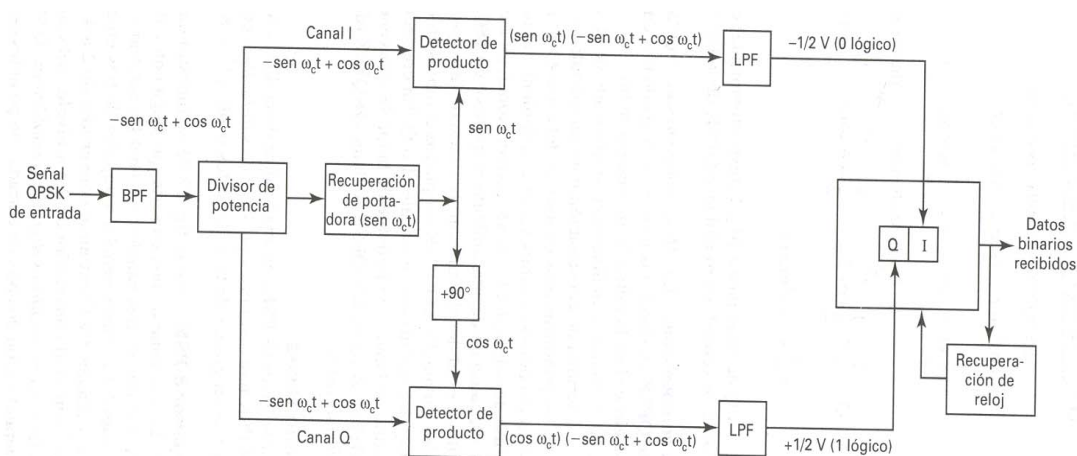


Fig. 2.10 Diagrama a bloques de un demodulador QPSK.

2.7.8 Modulación por código de pulso PCM.

La modulación por código de pulso (PCM, de pulse code modulation) es una técnica de modulación digital que se usa para transmisión digital. El termino “modificación por código de pulso” es algo equivoco, porque en realidad no se trata de una forma de modulación, sino mas bien de una forma de codificación de la fuente. En la PCM, los pulsos son de longitud y amplitudes fijas. Es un sistema binario en el que la presencia o ausencia de un pulso dentro de una muesca predeterminada de tiempo representa una condición de uno lógico o de cero lógico.

Un diagrama de bloques simplificado de un sistema PCM de un solo canal o simplex (solo en un sentido). El filtro pasabanda limita la frecuencia de la señal analógica de entrada al intervalo de frecuencias de banda de voz de 300 a 3000 Hz. El circuito de muestreo y retención muestra, en forma periódica, la señal analógica de entrada, y convierte esas muestras en una señal PAM² (de Pulse amplitude modulation por sus siglas en ingles) de varios niveles. El convertidor analógico a digital (ADC, de analog-to-digital converter) convierte las muestras PAM en códigos PCM paralelos, que se convierten a su vez en datos en serie, en el convertidor de paralelos a serie, y a continuación salen a la línea de transmisión. Las repetidoras en la línea de transmisión generan en forma periódica los códigos PCM [2].

² En donde se varía la amplitud de un pulso de ancho constante y posición constante de acuerdo con la amplitud de la señal analógica.

En el receptor, el convertidor serie a paralelo convierte los datos serie de la línea de transmisión en códigos PCM paralelos. El convertidor digital a analógico (DAC, de digital-to-analog converter) convierte el código paralelo PCM en señales PAM de varios niveles. El circuito de retención y el filtro pasabandas regresan la señal PAM a su forma analógica original. Un circuito integrado que ejecuta las funciones de codificación y decodificación PCM se llama codec (codificador/decodificador) [1].

2.8 Procesamiento digital de señales.

Nuestro mundo esta llena de señales tanto naturales como las que produce el hombre. Algunos ejemplos son la variación en la presión del aire cuando hablamos y las señales eléctricas periódicas que genera el corazón. Las señales representan información. A menudo, las señales no llevan directamente la información necesaria y es posible que no estén libres de perturbaciones. Es en este contexto que el procesamiento de señales forma la base para resaltar, extraer, almacenar o transmitir información útil. Las señales eléctricas quizá ofrecen un ámbito más amplio para tales manipulaciones. De hecho, es común convertir las señales en forma eléctrica para su procesamiento.

El procesamiento se hace en forma digital porque éste es usualmente más cómodo de realizar y más barato de implementar que en el procesamiento analógico. Además las señales digitales requieren usualmente menos ancho de banda y pueden ser comprimidas. Sin embargo, hay pérdida (ruido de cuantificación) inherente de información al convertir la información continua en discreta; y puede haberla si las muestras se toman demasiado espaciadas. Enseguida unas de las ventajas que posee el PDS.

1. La señal discreta (digital) es más fácil de transmitir, almacenar o manipular (en el caso del sonido: editar, comprimir, etc.).
2. La señal digital es inmune al ruido. La señal digital es menos sensible que la analógica a las interferencias, etc.
3. Se puede tomar una muestra de sonido y cambiar cualquiera de sus parámetros para generar un sonido diferente sin tener que recrearlo en la realidad. (Las aplicaciones de esta ventaja en la generación de efectos especiales son infinitas).
4. Ante la pérdida de cierta cantidad de información, la señal digital puede ser reconstruida gracias a los sistemas de regeneración de señales (usados también para amplificarla,

sin introducir distorsión). También cuenta, con sistemas de detección y corrección de errores que, por ejemplo, permiten introducir el valor de una muestra dañada, obteniendo el valor medio de las muestras adyacentes (interpolación).

El procesamiento digital de señales analógicas necesita que usemos un convertidor analógico a digital (ADC) para muestrear la señal analógica antes del procesamiento y un convertidor digital a analógico (DAC) para convertir la señal digital procesada de nuevo a la forma analógica. A continuación en la *fig. 2.11* muestra el diagrama básico del procesamiento digital de señales analógicas.

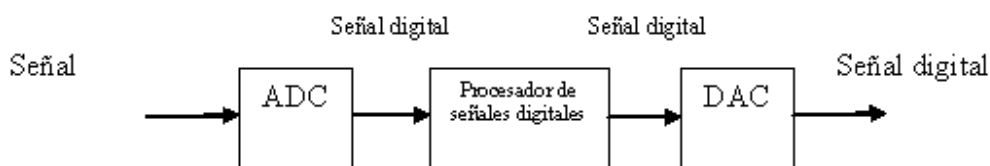


Fig. 2.11 Diagrama básico de un convertidor ADC a DAC.

Para llevar a cabo el procesamiento digital de señales se requiere transformar la señal de un formato continuo a uno digital. Para procesar una señal analógica por medios digitales, debemos convertirla en una señal digital en dos pasos, primeramente se muestrea (sampling), es decir tomar valores de voltaje de la señal continua en un tiempo determinado, en seguida la cuantificación, que es el proceso de tomar muestras de una señal a una determinada velocidad.

Con un DSP (Digital System Process), se lleva a cabo el procesamiento digital de señal, el cual. Es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesado y representación de señales analógicas en tiempo real. Principalmente emplea señales del DAC, la operación del DAC se inicia mediante el cerrado de un valor digital que recibe desde el procesador y es el momento cuando traslada dicho valor cerrado a un voltaje específico que selecciona desde un rango de posibles voltajes de salida. El número de etapas de voltajes diferentes que el DAC puede entregar depende sobre todo del número de bits y del valor digital cerrado (definido). Una de las aplicaciones más comunes la encontramos en telefonía celular; en la *fig. 2.12* la figura representativa de un DSP [7].

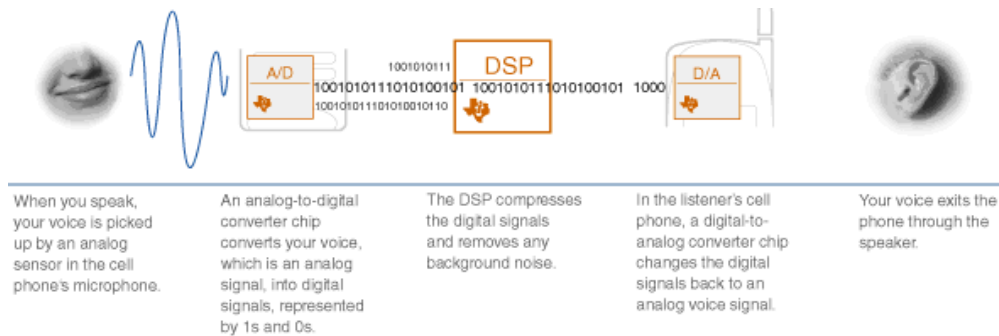


Fig. 2.12 Ejemplo de un DSP de telefonía celular.

En la mayoría de los sistemas DSP el principal proceso es el muestreo, el cual se ejecuta en un tiempo constante. Esto significa que la mayoría de los procesadores alimentan al DAC en forma sincronizada a cada una de las muestras convertidas cada una de ellas en valores diferentes, tomados en un tiempo discreto T *índice*, que corresponde al intervalo entre muestra y muestra. Se denomina valor digital a la salida de cada muestra. El T de muestreo es constante e implica una tasa (rate) de muestreo que se le denomina frecuencia de muestreo.

También el PDS esta constituido por propiedades que son la representación de señales en el dominio del tiempo, que nos permite identificar los parámetros fundamentales que son: fase, frecuencia y amplitud. Sin embargo cuando una señal esta constituida por múltiplos y submúltiplos tenemos que recurrir para su representación al campo del dominio de frecuencias. Para trasladar una señal de tiempo continuo a tiempo discreto da como resultado defectos fundamentales en la señal, entre otros la generación de las señales no previstas o también conocidas como señales fantasmas. El procesamiento digital nos aporta información en el sentido que ambas señales analógica o digital tienen particularmente cada una ventajas y desventajas; también se podría observar que con el manejo apropiado de la velocidad de muestreo podemos determinar cual es el rango de frecuencias útiles para un determinado proceso y en el cual la aplicación de filtros [5].

2.8.1 Teorema de muestreo.

El teorema de muestreo para el procesamiento de señales nos dice que si la componente más alta de frecuencia de una señal analógica no excede $f_s/2$, esta señal puede

ser digitalizada en una secuencia de muestras numéricas y convertirla de retorno al dominio análogo sin pérdida de información. (5)

$$f_s = 2 f_{\max}$$

2.8.2 Selección de la velocidad de muestreo.

En un DSP se tiene la necesidad de seleccionar la frecuencia de muestreo de manera apropiada, de no tener una elección basada en la frecuencia máxima de la señal se generan 2 situaciones, una conocida como Oversampling (sobre muestreo) y otra como Undersampling (bajo muestreo) [5].

2.8.2.1 Oversampling.

Para comprender como afecta el sobre muestreo tomemos como ejemplo una señal musical a la cual se le realiza un muestreo a una velocidad del doble de la utilizada normalmente, es decir 88.2 k-muestras/seg ($f_s = 44.1$ k-muestras/seg. normal). La nueva tasa de muestreo creara replicas que están muy distanciadas de la frecuencia original. La *fig. 2.13* muestra el efecto de este sobre muestreo sobre una señal musical [5].

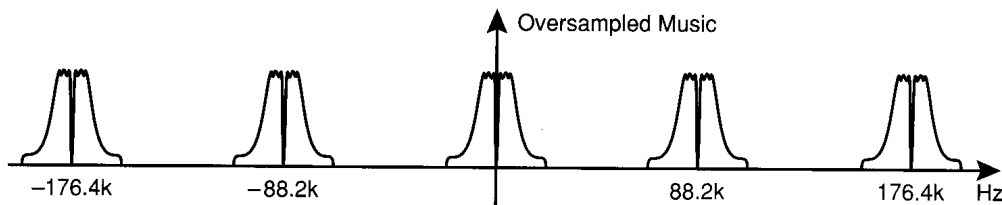


Fig. 2.13 Espectro de sobre muestreo de una seña musical.

2.8.2.2 Undersampling.

Para procesamiento digital con bajo muestreo consideraremos la misma señal musical pero utilizando una señal de muestreo de 30 k-muestras/seg. El resultado es un bajo muestreo que produce una colisión entre replicas que dañan irreversiblemente el espectro de la señal original. Por lo tanto en un PDS en el cual no podemos controlar la frecuencia de la señal entrante, debemos tener extremo cuidado de utilizar frecuencia de muestreo por debajo del

doble de la frecuencia máxima en razón de que un proceso de bajo muestreo provoca la destrucción de la información sin ninguna alternativa para recuperar la señal original, en la *fig. 2.14* la grafica representativa [5].

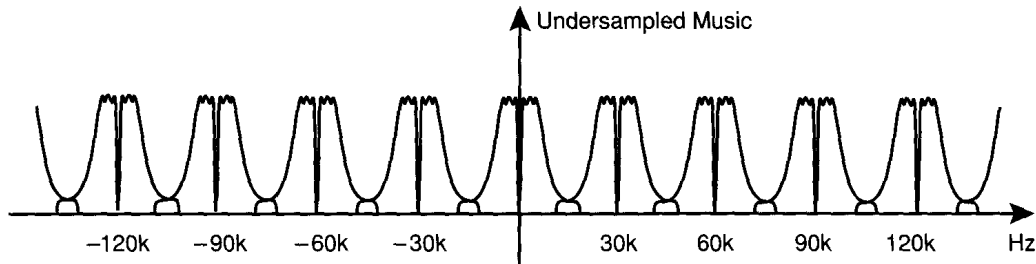


Fig. 2.14 Espectro de bajo muestreo de una seña musical.

2.8.3 Empleo de un filtro a la señal.

Podemos prever la generación de señales fantasmas (aliasing Frequency) mediante el empleo de un filtro que limite el ancho de banda e la señal de entrada, s decir si la señal de entrada contiene componentes que durante el proceso de muestreo supere la barrera de $f_s/2$ se debe intercalar un filtro denominado antialiasing filter con lo cual logramos trincar la señal especialmente en sus componentes que en base a la frecuencia de muestreo f_s supere la barrera de $f_s/2$. La mayoría de las señales en la practica se extienden en anchos de banda relativamente grandes, afortunadamente la información esta contenida en un rango de ancho de banda menor por lo que es totalmente viable la reducción sin riesgos de perder información y aseguramos evitar lo que se denomina Aliasing efect. En la *fig. 2.15* se ilustra como la frecuencia contenida en una señal de entrada puede ser limitada en su ancho de banda justamente antes del proceso de muestreo a efecto de prevenir la generación de frecuencias no previstas [5].

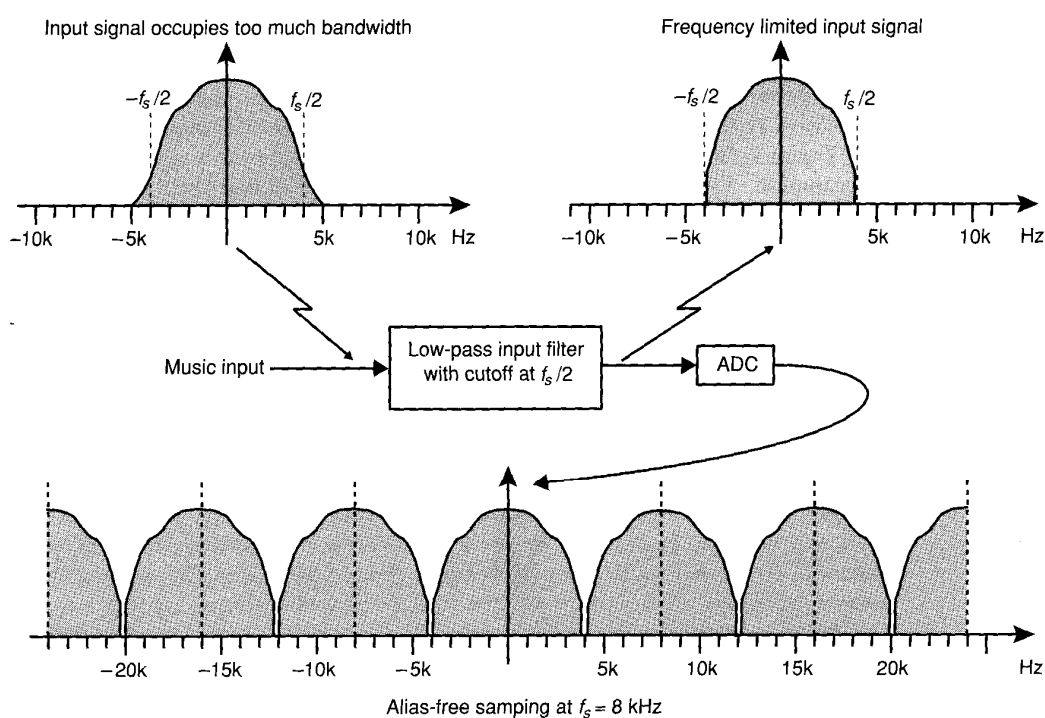


Fig. 2.15 Filtro Anti-aliasing en una entrada analógica.

2.9 Compresión digital de archivos.

Gracias a la compresión de archivos podemos oír música y ver películas en computadoras, estéreos y dispositivos portátiles. Los distintos formatos de audio y video se actualizan día tras día para ofrecer, opciones de entretenimiento de alta calidad en diminutos archivos.

La compresión digital se refiere a la reducción de Data Bit Rate (Tasa de bit en dato) y todos los términos que conlleva el proceso digital cuyo objetivo es el de mantener de extremo a extremo la calidad de la señal. En esencia la misma información utilizando un proceso de muestreo reducido, salvaguardando los límites de bajo muestreo para asegurar la no pérdida de información. Hay varias razones por las cuales hay que aplicar técnicas de compresión digital:

1. La compresión extiende el tiempo en la que se involucra un dispositivo de almacenamiento.
2. La compresión permite la miniaturización. Entonces decimos, con menos datos para almacenar el mismo tiempo de intervención es obtenido con un hardware mucho menor.

3. La tolerancia puede ser atenuada de tal manera que la compresión digital permite almacenamiento de información con un régimen de datos menor y que sin embargo compromete al sistema a utilizar un dispositivo descompresor para recuperar la señal.
4. En sistemas de transmisión la compresión permite una reducción en el ancho de banda en el cual generalmente resulta en una reducción en el costo del sistema. Esto puede facilitar algunos procesos que no serían prácticos sin esta ventaja.
5. Si un ancho de banda está disponible para una señal no comprimida permite una transmisión en tiempo real en el mismo ancho de banda.
6. Si un ancho de banda dado es disponible. La compresión digital permite una mejor calidad de señal en el mismo ancho de banda **[6]**.

La compresión se realiza mediante características que son, algoritmos de compresión de audio normalmente son llamados códec de audio. Existen dos tipos de compresión, basados en algoritmo de compresión sin pérdida (en:lossless) o algoritmo de compresión con pérdida (en:lossy).

Se denomina algoritmo de compresión sin pérdida a cualquier procedimiento de codificación que tenga como objetivo representar cierta cantidad de información utilizando una menor cantidad de la misma, siendo posible una reconstrucción exacta de los datos originales.

Se denomina algoritmo de compresión con pérdida a cualquier procedimiento de codificación que tenga como objetivo representar cierta cantidad de información utilizando una menor cantidad de la misma, siendo imposible una reconstrucción exacta de los datos originales.

Un códec de audio es un tipo de códec específicamente diseñado para la compresión y descompresión de señales de sonido audible para el ser humano. Por ejemplo, música o conversaciones. Los códec de audio cumplen fundamentalmente la función de reducir la cantidad de datos digitales necesarios para reproducir una señal auditiva. Lo que comúnmente se denomina "compresión de datos", pero aplicado a un fin muy concreto.

Existen fundamentalmente dos aplicaciones de los códec de audio:

- Almacenamiento: útil para reproductores multimedia que pueden reproducir sonido almacenado, por ejemplo, en un disco duro, CD-ROM o tarjeta de memoria.

- Transmisión: útil para implementar redes de videoconferencia y Telefonía IP.

Los códecs de audio se caracterizan por los siguientes parámetros:

1. Número de canales: un flujo de datos codificado puede contener una o más señales de audio simultáneamente. De manera que puede tratarse de audiciones "mono" (un canal), "estéreo" (dos canales, lo más habitual) o multicanal. Los códec de audio multicanal se suelen utilizar en sistemas de entretenimiento "teatro en casa".
2. Frecuencia de muestreo: de acuerdo con el teorema de Nyquist, determina la calidad percibida a través de la máxima frecuencia que es capaz de codificar, que es precisamente la mitad de la frecuencia de muestreo. Por tanto, cuanto mayor sea la frecuencia de muestreo, mayor será la fidelidad del sonido obtenido respecto a la señal de audio original. Por ejemplo, para codificar sonido con calidad CD nunca se usan frecuencias de muestreo superiores a 44,1 KHz, ya que el oído humano no es capaz de escuchar frecuencias superiores a 22 kHz.
3. Número de bits por muestra. Determina la precisión con la que se reproduce la señal original y el rango dinámico de la misma.
4. Pérdida. Algunos códecs pueden eliminar frecuencias de la señal original que, teóricamente, son inaudibles para el ser humano. De esta manera se puede reducir la frecuencia de muestreo. En este caso se dice que es un códec con pérdida o lossy codec (en inglés). En caso contrario se dice que es un códec sin pérdida o lossless codec (en inglés) [17].

De esta manera en la actualidad con la tecnología digital, la compresión es indispensable para cualquier tipo transmisión, reproducción que deseemos realizar.

2.10 MPEG-2 (Moving Pictures Experts Group 2).

Moving Pictures Experts Group 2 (por sus siglas en inglés), es la designación para un grupo de estándares de codificación de audio y vídeo acordado por MPEG (grupo de expertos en imágenes en movimiento). MPEG-2 introduce y define Flujos de Transporte, los cuales son diseñados para transportar vídeo y audio digital a través de medios impredecibles e inestables

Entre las varias mejoras o extensiones introducidas en los codificadores MPEG-2 tenemos:

- Nuevos modos de predicción de campos y tramas para scanning entrelazado.
- Cuantización mejorada.
- Soporte resistente para incremento de errores.

La compresión MPEG-2 permite corrientes de audio con un sonido de más alta calidad mientras, que usa como poca anchura de banda como sea posible. MPEG-2 es capaz de reducir la cantidad de anchura de banda utilizada en comparación con los sistemas convencionales.

La introducción de las características de MPEG-2 dentro del estándar DAB provee características adicionales las cuales se distinguen cada vez mas en el sistema DAB, que de un sistema convencional de radio, en específico esto se refiere a los multicanales y a los rangos de muestreo codificados de audio.

El sistema de multiplexaje MPEG-2, soporta cualquier número de canales de entrada de audio tan largos que la velocidad de transporte seleccionada pueda soportar la suma de datos, la velocidad también será asociada con la calidad.

La compresión de audio MPEG-2 es un algoritmo que a su vez también elimina la información irrelevante dentro de la señal de audio. La información irrelevante es cualquier señal imperceptible al oído humano. Por ejemplo, en presencia de una señal fuerte, todas las señales son enmascaradas y aunque son parte del espectro, no son percibidas por el oído. El algoritmo MPEG-2 es del tipo "lossy" o con pérdidas pero la distorsión insertada por la señal será inaudible.

La configuración básica del audio MPEG-2 ofrece seis canales de audio. Para aplicaciones multilinguaje o para crear un sistema estereofónico multicanal.

El proceso de compresión de MPEG-2 contiene una serie de procesos que a continuación se detallan. En primer plano se lleva a cabo la codificación donde el codificador procesa la señal de audio digital y produce el bitstream empaquetado para su almacenamiento y/o transmisión.

Las muestras se introducen en el codificador y a continuación el mapeador crea una representación filtrada y submuestreada de la señal de entrada. Las muestras mapeadas se

denominan muestras de subbanda transformadas. El modelo psicoacústico crea una serie de datos (dependiendo de la implementación del codificador) que sirven para controlar la cuantización y codificación. Este último bloque crea a su vez su propia serie de datos, de nuevo dependiendo de la implementación. Por último, el bloque de empaquetamiento de trama se encarga de agrupar como corresponden todos los datos, pudiendo añadir algunos más, llamados datos adicionales, como por ejemplo información del usuario [5]. En la *fig. 2.16* el diagrama a bloques del proceso de codificación.

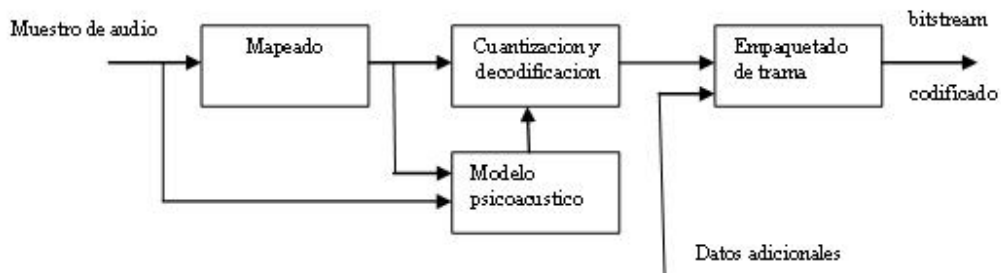


Fig. 2.16 Diagrama a bloques codificador MPEG-2.

El decodificador debe procesar el bitstream para reconstruir la señal de audio digital. La especificación de este elemento sí esta totalmente definida y debe seguirse en todos sus puntos. Los datos del bitstream son desempaquetados para recuperar las diversas partes de la información. El bloque de reconstrucción recompone la versión cuantizada de la serie de muestras mapeadas. El mapeador inverso transforma estas muestras de nuevo a PCM. [5]. En la *fig. 2.17* el diagrama a bloques del proceso de decodificación.



Fig. 2.17 Diagrama a bloques decodificador MPEG-2.

2.11 Control de errores.

Un circuito de comunicaciones de datos puede ser tan corto como de algunos metros, o tan largo como varios miles de millas, y el medio de transmisión puede ser tan sencillo como u

trozo de alambre, o tan complicado como una microonda, un satélite o un sistema de fibra óptica. En consecuencia, por las características no ideales de transmisión que hay en cualquier sistema de comunicaciones, es inevitable que halla errores, y que sea necesario desarrollar e implementar procedimientos de control de errores. El control de errores se divide en la detección y en la corrección de errores.

En la detección de errores únicamente se vigilan los datos recibidos para determinar cuando ha ocurrido un error de transmisión. Las técnicas de detección de errores no identifican cual o cuales bits están equivocados; solo indican que hubo un error.

En la corrección de errores, efectivamente se corrigen los errores que se reciben en una transmisión de datos y en esencia, hay tres métodos para corregir errores:

- Sustitución de símbolo, el cual se diseño para usarse en ambientes humanos, en donde un operador debe interpretar el carácter equivocado o erróneo de una cadena de caracteres representado por un símbolo poco común. En caso de que el operador no pueda interpretar el símbolo, debe pedir su retransmisión.
- Retransmisión, en el cual se vuelve a mandar un mensaje cuando se recibe con errores, y la recepción pide la retransmisión de forma automática de todo el mensaje.
- Corrección de errores en avance, en este esquema de corrección de errores, se detecta y corrigen los errores de transmisión en la recepción sin pedir la retransmisión [1].

2.12. Corrección de errores en sentido directo.

Más comúnmente conocido como FEC (de forward error correction por sus siglas en ingles) es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. Se utiliza en sistemas sin retorno o sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos. Este mecanismo de corrección de errores se utiliza por ejemplo, en las comunicaciones vía satélite, en las grabadoras de DVD y CD o en las emisiones de radio difusión digital.

La posibilidad de corregir errores se consigue añadiendo al mensaje original unos bits de redundancia. La fuente digital envía la secuencia de datos al codificador, encargado de añadir dichos bits de redundancia. A la salida del codificador obtenemos la denominada palabra código. Esta palabra código es enviada al receptor y éste, mediante el decodificador adecuado

y aplicando los algoritmos de corrección de errores, obtendrá la secuencia de datos original. Los dos principales tipos de codificación usados son:

- Códigos bloque. La paridad en el codificador se introduce mediante un algoritmo algebraico aplicado a un bloque de bits. El decodificador aplica el algoritmo inverso para poder identificar y, posteriormente corregir los errores introducidos en la transmisión.
- Códigos convolucionales. Los bits se van codificando tal y como van llegando al codificador. Cabe destacar que la codificación de uno de los bits está enormemente influenciada por la de sus predecesores. La decodificación para este tipo de código es compleja ya que en principio, es necesaria una gran cantidad de memoria para estimar la secuencia de datos más probable para los bits recibidos. En la actualidad se utiliza para decodificar este tipo de códigos el algoritmo de Viterbi, por su gran eficiencia en el consumo de recursos.

FEC reduce el número de transmisiones de errores, así como los requisitos de potencia de los sistemas de comunicación e incrementa la efectividad de los mismos evitando la necesidad del reenvío de los mensajes dañados durante la transmisión. En general incluir un número mayor de bits de redundancia supone una mayor capacidad para corregir errores. Sin embargo este hecho incrementa notablemente tanto el régimen binario de transmisión, como el retardo en la recepción del mensaje [8].

Capítulo 3

Estructura del DAB, su Servicios y aplicaciones

Introducción

En la actualidad en todas las áreas en las que está presente la electrónica se tienden a reemplazar los sistemas analógicos existentes por otros digitales. En todas las transiciones de la tecnología el tiempo y esfuerzo invertido es muy elevado, pese a esto los beneficios que ofrece, la radiodifusión sonora, merece la pena ya que la mejora que se consigue es muy sofisticada. Actualmente están presentes en todos los países sistemas de radiodifusión sonora analógicos, tales como AM o FM, estos sistemas traen consigo una serie de problemas, como lo son:

- *Emplea un ancho de banda muy elevado para la calidad que ofrecen si los comparados con los sistemas digitales.*
- *La saturación del espectro radioeléctrico ya que hay que usar una gran cantidad de canales para dar cobertura de un mismo programa.*

- *Los usuarios no están contentos con la calidad que les ofrece la radiodifusión sonora analógica (AM o FM), sobre todo en los casos de recepción móvil o portátil (problemas de propagación multitrayecto y efecto Doppler), por lo que demandan una mejor calidad.*
- *La cantidad de servicios que ofrece la radiodifusión analógica están muy limitados.*

Estos problemas provocan la desaparición del sistema de radiodifusión analógica y la implementación de un nuevo sistema que aproveche los recursos de una manera más eficiente. El sistema digital puede solucionar estos problemas.

Del sistema digital de radio podemos destacar las siguientes ventajas:

- *Permite difundir sonido de alta calidad, comparable a la del CD.*
- *Permite realizar distintos procesos de codificación y compresión sobre la señal que consiguen disminuir su ancho de banda sin perder calidad.*
- *Existen muchos otros procesos que aplicados a la señal permiten conseguir grandes mejoras (códigos correctores, encriptadores, etc).*
- *Aprovecha el espectro de una manera más eficiente que los analógicos, al poder operar en redes de frecuencia única (SFN).*
- *La potencia de los transmisores es menor que en el sistema analógico.*
- *Soluciona los problemas de propagación multitrayecto y efecto Doppler en la recepción móvil y portátil, consiguiéndose gran calidad en estos casos.*
- *Permite incluir diferentes tipos de aplicaciones, información sobre el programa (letra de canciones, autor, tipo, etc), aplicaciones multimedia (mapas de carreteras, tráfico, tiempo, bolsa, etc).*
- *La mejora de los sistemas digitales hace que estos sistemas resulten más baratos que los analógicos.*

3.1 Estructura de la trama DAB.

La trama es la arquitectura que constituye el DAB, de esta forma se inicia la descripción del funcionamiento de la radiodifusión digital DAB [14].

3.1.1 Tipos de información en el DAB.

En la trama DAB es posible difundir distintos tipos de datos. En general los datos pueden ser de audio, información relativa al audio, datos de otro tipo de servicios (bolsa, tráfico, noticias, etc.) Cada uno de estos tipos de información se transporta en una de las partes en que se divide la trama.

En la trama DAB se definen los siguientes servicios:

- Servicios: Cada uno de los programas o canales de la trama.
- Componentes de servicio: Son las partes en las que se divide cada servicio, principalmente son datos o sonido. Estos componentes se transportan en diferentes subcanales o incluso en el canal de información rápida FIC (Fast Information Channel).
- Subcanales. Son las partes de la trama donde se transportan los componentes de servicio.

Los principales bloques de datos de la trama, y los tipos de información que pueden incluirse en los sistemas DAB así como sus funciones, son las siguientes:

- Datos de control del múltiplex (MCI). En el MCI se detallan los datos de control necesarios para demultiplexar la trama de audio así como los servicios que incluye, que a continuación se presentan:
 - La organización de los subcanales, posición, tamaño y protección.
 - La lista de todos los servicios de la trama.
 - Los enlaces entre los servicios y sus componentes.
 - Los enlaces entre los componentes de servicio y los subcanales.
 - Los datos necesarios para la demultiplexación.
- Canal de datos de información rápida (FIDC). En el FIC se distribuyen datos de forma rápida, esto se consigue al no realizar el entrelazado en el tiempo en el FIC (Fast

Information Channel) que es la parte de la trama de transmisión donde se transportan estos datos.

- Información de servicio (SI). Aquí se difunde información de diferentes servicios. Se pueden incluir anuncios, como información de frecuencia, como por ejemplo la frecuencia asociada en FM, idioma, etiquetas de los programas, etc.
- Servicio de programas de audio. En esta parte se incluye la información de sonido de cada programa.
- Datos asociados al programa (PAD). Este tipo de datos están relacionados con un canal de audio, puede tratarse de la letra de las canciones, títulos, autores, etc.
- Servicio de datos en general. En este bloque se puede transportar cualquier tipo de datos. Dichos datos se denominan NPAD (Datos No Asociados al Programa).

Los datos PAD (tipos de datos para transmitir) es una nueva técnica en la radio ya que con esta forma de transmisión se ofrecen nuevos servicios que ofrecerá el proveedor de servicio [12].

3.2 Trama de transmisión.

La trama de transmisión es la unidad de información que transporta los datos desde la fuente de datos al receptor.

La transmisión en el sistema DAB se realiza mediante la emisión de la trama de transmisión. La estructura de esta trama está íntimamente relacionada con el modo de transmisión elegido para el sistema, que mas adelante se detallan, pero la estructura de esta trama se conserva en cualquiera de los modos.

La trama de transmisión (TT) es la base de la que parte el modulador COFDM para generar la señal DAB [17]. En la *fig. 3.1* la estructura general de la trama.

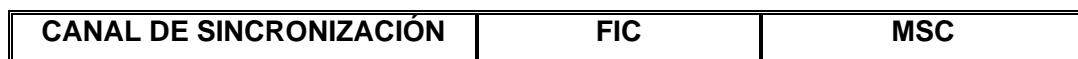


Fig. 3.1 Trama de transmisión.

- FIC: Fast Information Channel.

- MSC: Main Information Channel.

3.2.1 Canal de Sincronización.

Esta parte de la trama de transmisión tiene como objetivo incluir la información necesaria para que la trama se demodule correctamente, sincronice la trama, controle automáticamente la frecuencia, estime el estado del canal y como última función sirve para transportar la información de identificación del transmisor [22].

El canal de sincronización está formado por los dos primeros símbolos OFDM de cada trama de transmisión. La información que se incluye en cada símbolo son:

- Primer símbolo. Se incluye un símbolo nulo, que se usa para sincronizar los receptores. Además, opcionalmente puede ser incluida la información de identificación del transmisor (TII).
- Segundo símbolo. En este símbolo se emite la fase de referencia para efectuar el proceso de demodulación D-QPSK.

3.2.1.1 Canal de Información Rápida (FIC).

Este parte de la trama, ayuda al receptor a acceder a la información de la trama de forma rápida. También se incluye la información necesaria para que el receptor pueda conocer la configuración del canal principal de servicio (MSC) y pueda demultiplexarlo.

El FIC no se entrelaza en el tiempo para no introducir retardos en su demultiplexación y así poder conseguir el resto de los datos de la trama de forma rápida.

La topología de este bloque depende del modo de transmisión seleccionado. El FIC se divide en el Bloque de Información rápida (FIB) [27]. En el FIB se transportan los siguientes tipos de datos:

- Datos en el Canal de Datos de Información Rápido (FIDC).
- Información de Servicio (SI).
- Información de Configuración del Múltiple (MCI).

3.2.1.2 Canal de Información Principal (MSC).

Este es el canal por donde se envían los datos (PAD y NPAD) y el audio. Igualmente su configuración depende del modo de transmisión elegido.

La unidad que forma el MSC es la trama común entrelazada (CIF). El MSC se compone de distintos subcanales. Cada uno de estos subcanales puede llevar varios componentes de servicio (audio o datos). La organización de estos subcanales se controla mediante el MCI (Multiplex Configuration Information) [19].

Existen dos modos para el canal principal de servicio:

- Modo Ráfaga. Se transmite un único componente de servicio por subcanal. Se aplica a los datos PAD y opcionalmente a los NPAD.
- Modo Paquete. Es posible transmitir simultáneamente varios componentes de servicio en cada subcanal, se puede aplicar este modo a la información de servicio (SI) y a los datos NPAD.

3.3 Modos DAB.

Para el sistema DAB se han definido un total de cuatro modos de transmisión. Estos modos definen ciertos parámetros que regulan por ejemplo el número de portadoras, duración de la trama de transmisión, número de bloques FIB por trama, número de símbolos por trama, etc. [12].

En la *tabla 3.1* se muestran los parámetros que son definidos en cada uno de los modos (datos extraídos del ETS 300 401 estándar aprobado por UIT): [19].

Tabla 3.1. Modos DAB.

| PARÁMETRO | MODO I | MODO II | MODO III | MODO IV |
|-----------|--------|---------|----------|---------|
| <i>L</i> | 76 | 76 | 153 | 76 |
| <i>K</i> | 1536 | 384 | 192 | 768 |

| | | | | |
|------------|----------|--------|--------|--------|
| T_F | 96 ms | 24 ms | 24 ms | 48 ms |
| T_{NULL} | 1,297 ms | 324 us | 168 us | 648 us |
| T_S | 1,246 | 312 us | 156 us | 623 us |
| T_U | 1 ms | 250 us | 125 us | 500 us |
| D | 96 Km | 24 Km | 12 Km | 48 Km |

El significado de los parámetros son:

- L : Número de símbolos OFDM por trama de transmisión.
- K : Número de portadoras.
- T_F : Duración de la trama de transmisión.
- T_{NULL} : Duración del símbolo nulo.
- T_S : Duración del símbolo OFDM.
- T_U : Inversa de la separación entre portadoras. Intervalo de guarda.
- D : Distancia máxima nominal entre transmisores.

Además, se tienen los siguientes bloques FIB y FIC según el modo (datos extraídos del ETS 300 401): [18].

Tabla 3.2. Modos DAB.

| MODO | FIB EN TRAMA DE TRANSMISIÓN | FIC EN TRAMA DE TRANSMISIÓN |
|------|-----------------------------|-----------------------------|
| I | 12 | 4 |
| II | 3 | 1 |
| III | 4 | 1 |
| IV | 6 | 2 |

Los modos son empleados según el tipo de red que se esté implementando, así, el Modo I está recomendado para redes de frecuencia única (SFN) por debajo de 300 MHz. El Modo II se emplea para redes SFN en banda L o para redes híbridas de satélite y terrestres. El Modo III es más apropiado para satélite al tener mayor separación entre las portadoras. Finalmente, el Modo IV fue añadido posteriormente para establecer redes SFN en banda L que

permitieran mayor separación entre transmisores, o lo que es lo mismo con mayor intervalo de guarda. La mayor separación entre portadoras hace que el sistema se comporte mejor ante el efecto Doppler, de este modo el tercer modo es el más robusto ante dicho efecto.

En el esquema de la *fig. 3.2* se observa la trama de transmisión y su arquitectura para cada modo (figura extraída del ETS 300 401) [19].

3.4 Descripción del sistema de Radiodifusión sonora digital.

En la *fig. 3.3* se muestra el diagrama a bloques de la descripción del sistema de radiodifusión sonora digital DAB (Digital Radio Broadcasting) [19].

Este sistema digital presenta dos características esenciales:

- Tipo de modulación: Multiplexación por división en frecuencia de portadoras ortogonales codificadas (COFDM).
- Tipo de codificación: MUSICAM (Mpeg 2 Audio Layer II) [19].

El DAB es un sistema que está pensado para operar en cualquier parte del espectro situado entre 30 MHz y 3 GHz. Es posible la radiodifusión de la señal empleando medios terrestres (T-DAB), por satélite (S-DAB) o ambas topologías al mismo tiempo, redes híbridas. Además, el sistema DAB ha sido desarrollado pensando en distintos modos de recepción, de esta forma se ha considerado la recepción fija, portátil y móvil [23].

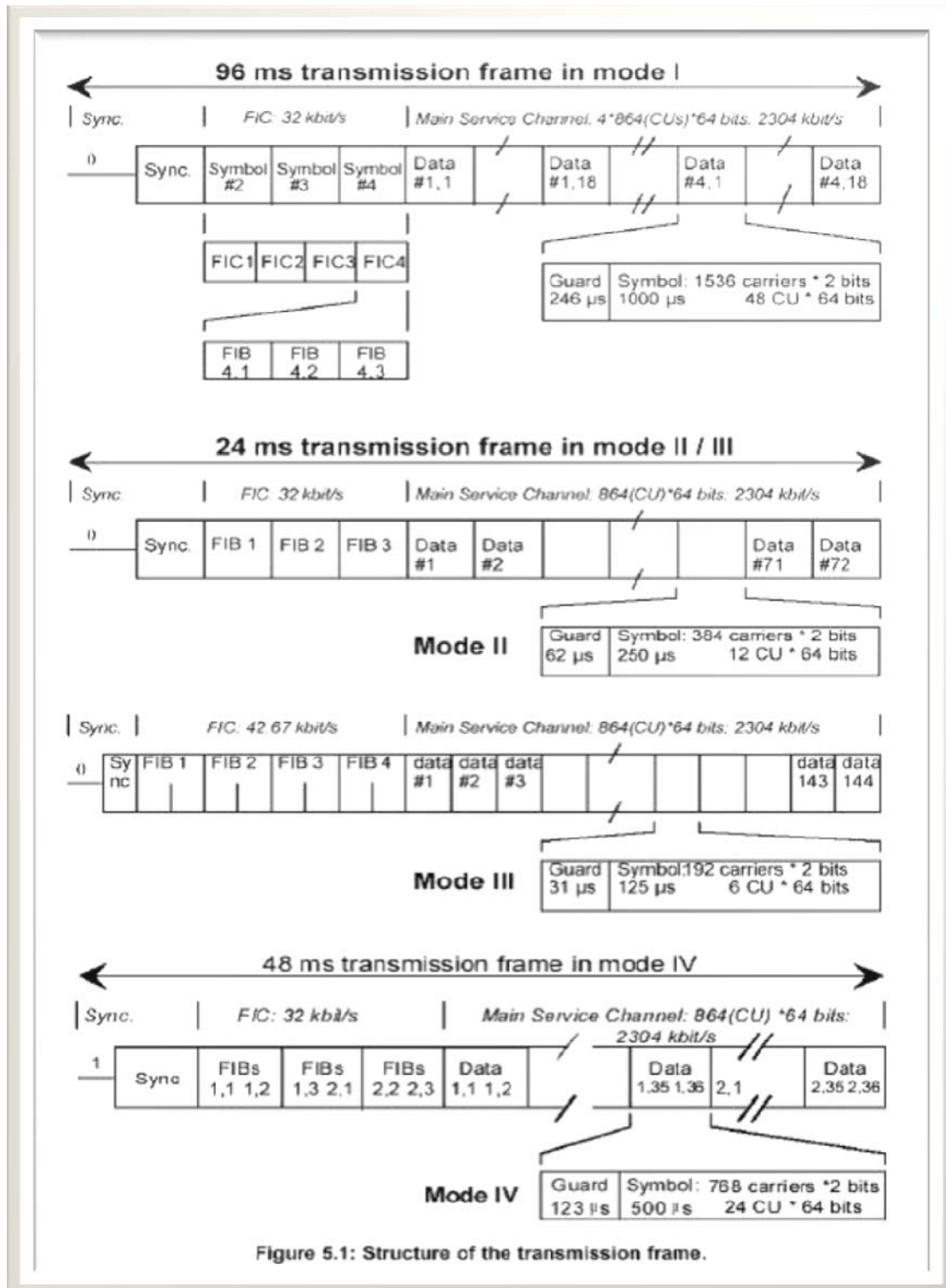


Fig. 3.2 Trama de transmisión y arquitectura para cada modo.

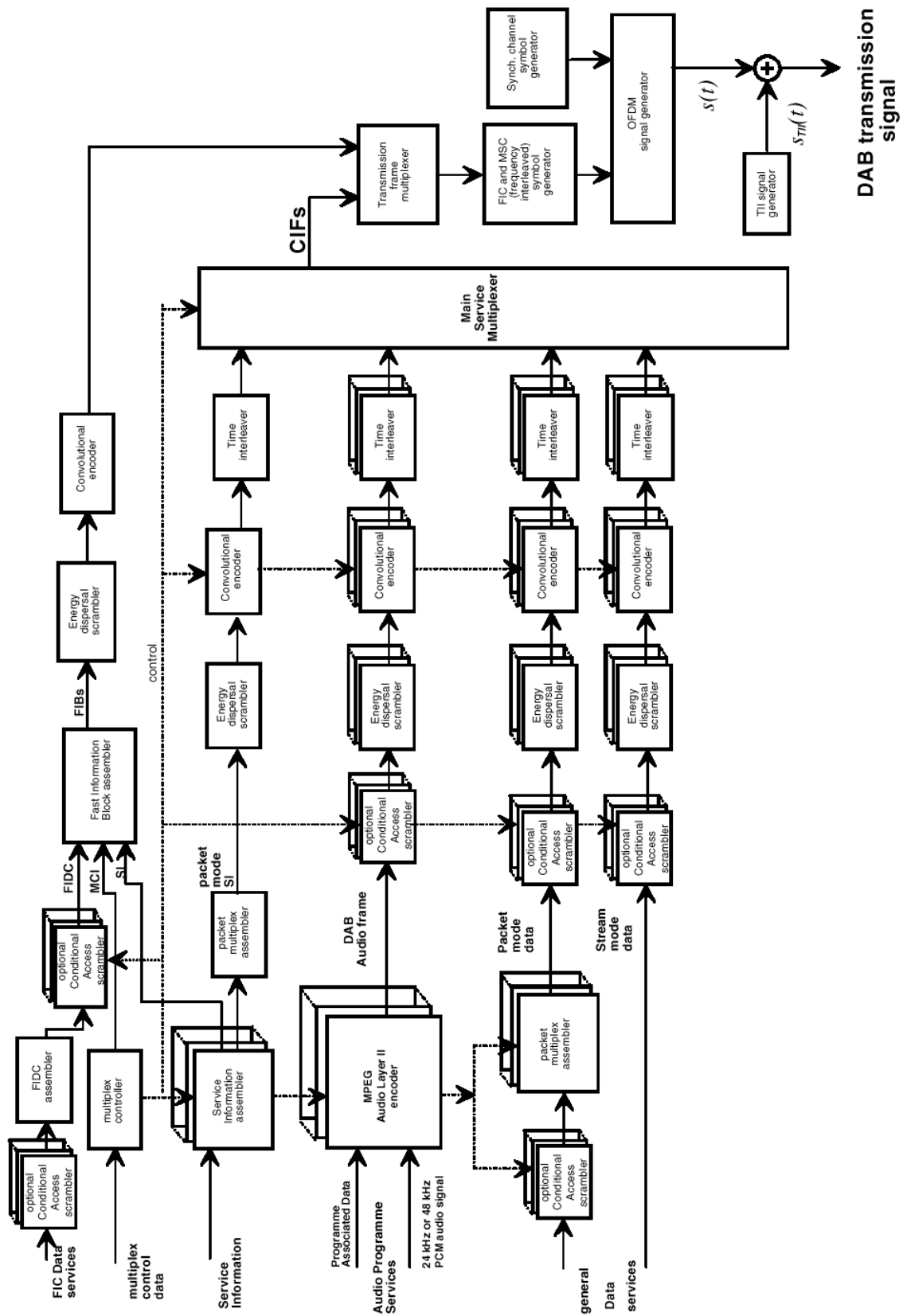


Fig. 3.3 Descripción del sistema de radiodifusión sonora digital DAB

Las principales ventajas del sistema DAB se deben a la modulación OFDM. Debido a la modulación OFDM tenemos como beneficios las siguientes características:

- Es posible que parte de los ecos, que en la mayoría de los casos deterioran la calidad de la señal en la parte de recepción, contribuyan de forma activa a la recepción.
- Por consecuencia al punto anterior es posible trabajar en redes de frecuencia única, esto es, emplear la misma frecuencia o canal para difundir un mismo programa por distintos transmisores en un área extensa. Es posible emplear de forma positiva la interferencia co-canal, de esta forma, el espectro es aprovechado de una manera muy eficiente.
- La división de la información en diversas portadoras hace que el sistema sea muy robusto ante los desvanecimientos selectivos, así, es muy recomendado su uso para recepción y móvil.

Actualmente el desarrollo de redes DAB está centrado principalmente en el uso de la banda VHF y la banda L. La primera de ellas está dedicada de forma mayoritaria al establecimiento de redes de área extensa, en banda L se están estableciendo redes terrestres locales y de difusión por satélite [20].

3.4.1 Codificación de la fuente de audio.

El primer paso para crear un sistema digital es obtener la información de un sistema en este formato digital. Para esto en el caso de la radiodifusión sonora es necesario digitalizar la información de audio de los programas.

El sistema DAB emplea un sistema de codificación denominado MUSICAM que corresponde a la capa II del sistema de codificación MPEG.

El MPEG define las técnicas de codificación de audio y vídeo. Es el tipo de codificación empleado en redes de radiodifusión digital de audio (DAB).

De entre las tres capas distintas propuestas en la norma MPEG la capa II es seleccionada para el sistema DAB y otros servicios de radiodifusión tras realizarse un gran número de pruebas.

En primer lugar fue desarrollada la norma MPEG-1 que en su segunda capa define el sistema de codificación de señales de audio MIC (Modulación por Impulsos Codificados), muestreadas con distintas frecuencias de muestreo (32, 44,1 y 48 KHz), empleándose tasas binarias que van desde los 32 a los 384 Kbps dependiendo de si el canal es monofónico o estereofónico. Posteriormente, fue elaborada la norma MPEG-2 que tenía como principal objetivo lograr la codificación de audio de más canales y conseguir aplicar la norma inicial a señales muestreadas a menor frecuencia.

DAB emplea la codificación MPEG Audio Layer II (MUSICAM). Cuando se muestrea a 48 KHz. se usa la norma MPEG-1 y cuando la frecuencia de muestreo es de 24 KHz. se sigue la norma MPEG-2. La frecuencia de muestreo de la señal MIC, tanto de entrada en la parte de transmisión como de salida en la parte de recepción, debe ser siempre 48 KHz., cuando se usa MPEG-2 es necesarios cambiar la frecuencia de muestreo de 48 KHz. a 24 KHz.

El codificador procesa la señal MIC y genera una salida de tasa binaria desde 8 Kbps a 384 Kbps.

El sistema MUSICAM se puede definir como un sistema de codificación que emplea diferentes técnicas estadísticas y modelos psicoacústicos del oído humano para comprimir la información de audio eliminando la información redundante e imperceptible.

Además, los codificadores incluyen en la trama de salida los datos PAD (Program Associated Data) del programa y CRC (Código de redundancia cíclica). La trama de audio se puede observar en la *fig. 3.4* (figura extarida del ETS 300 401) [31].

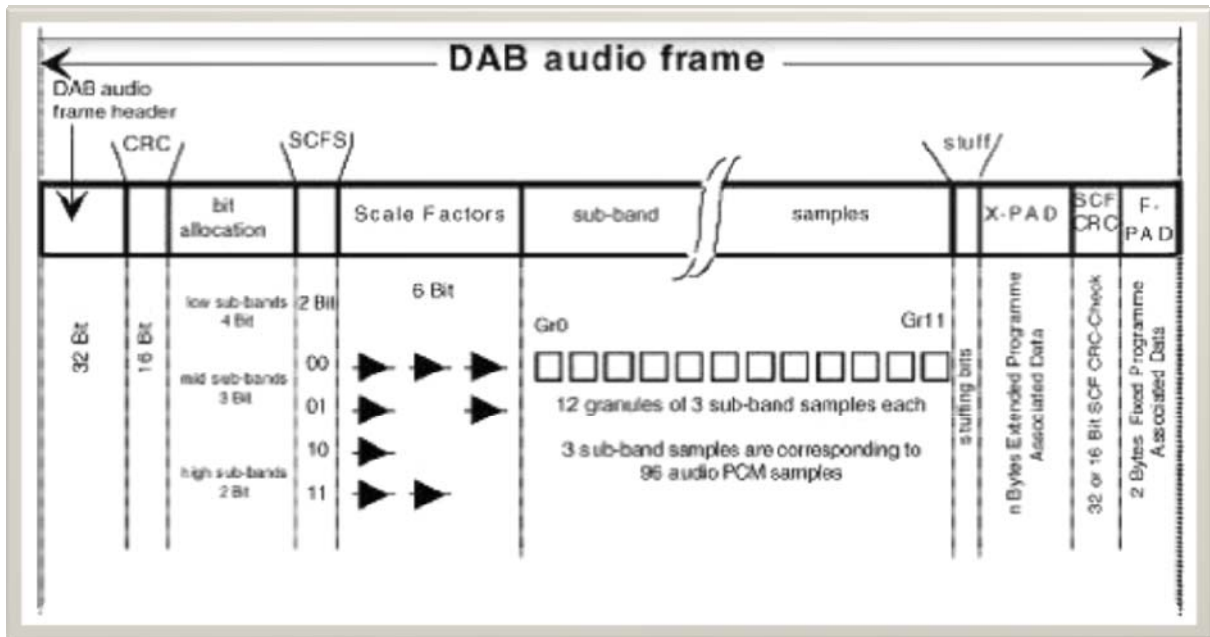


Fig. 3.4 Trama de audio.

En la fig. 3.5 se muestra el diagrama de bloques de un codificador de audio para DAB.

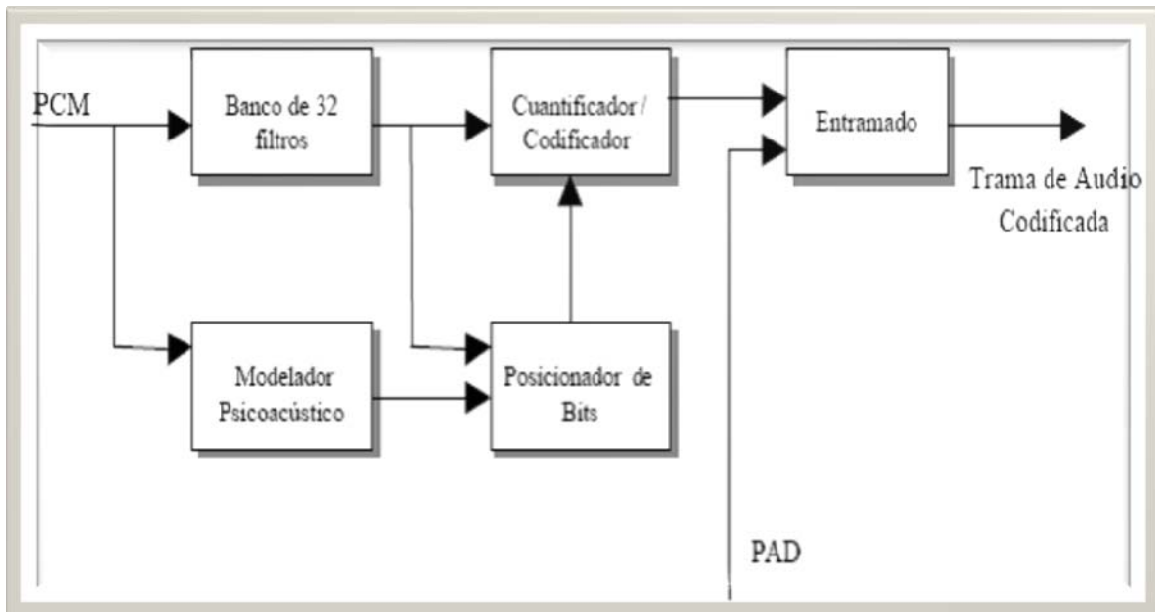


Fig. 3.5 Codificador de audio.

La señal de entrada PCM es conducida en primer lugar a un banco de 32 filtros que reparte la señal de entrada en 32 bandas distintas (grupos de 36 muestras), el Modelador Psicoacústico determina la forma en la que el Cuantificador/Codificador tratará cada banda. Para hacer esto último el Posicionador de Bits recoge los datos del Modelador Psicoacústico y determina el trato que recibirá cada banda respetando en cualquier caso la duración y tamaño de la trama de audio. Finalmente, en el bloque de entramado se forma la trama de audio DAB (audio + PAD) que se corresponde con 1152 muestras PCM y tiene una duración de 24 ms, se incluye la información de audio y los datos necesarios para su decodificación.

El Modelador Psicoacústico consigue eliminar la información que el oído humano no percibe:

- Sonidos por debajo del umbral audible.
- Sonidos que quedan enmascarados por otros más intensos.

En la *fig. 3.6* se muestra el decodificador en diagrama a bloques de forma simplificada.

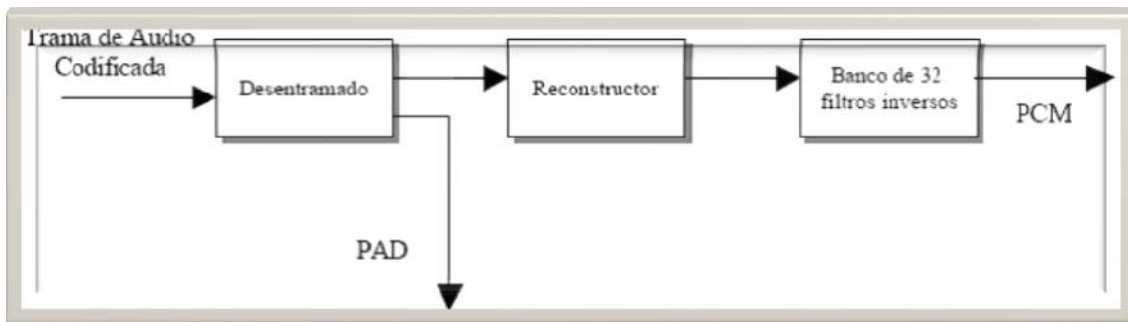


Fig. 3.6 Decodificador de audio.

En primer lugar se desentrama el audio codificado para de este modo conseguir por separado audio, PAD, datos de reconfiguración, etc. El bloque Reconstructor usando la información de control recupera las 32 bandas que finalmente se filtran de forma inversa a la empleada en el codificador para obtener de nuevo la señal PCM inicial.

Con este método de codificación se consigue comprimir la señal de audio disminuyendo el flujo binario de salida sin que se degrade la calidad de la señal [28].

3.4.2 Procesado de la señal.

Tras la obtención de la señal codificada se realizan una serie de procesos previos a la modulación propiamente dicha, en donde se generan los símbolos OFDM. Los procesos más importantes que se realizan son: [12].

- Dispersión de energía.
- Codificación convolucional.
- Entrelazado en el dominio del tiempo.
- Entrelazado en el dominio de la frecuencia.

A continuación se describen los bloques que intervienen en la generación de una señal DAB.

3.4.3 Acceso condicional.

Esta parte del proceso es opcional y sólo se emplea cuando existe información que debe ser accesible sólo para unos determinados usuarios.

Es posible enviar datos con acceso condicional tanto en modo ráfaga como en modo paquete, y en el FIDC (Fast Information Data Channel).

Las tres funciones principales que desarrolla el bloque de acceso condicional son:

- Aleatorización/Desaleatorización, Con este proceso se pretende encriptar la información de forma que sólo sea accesible para ciertos usuarios. El usuario debe poseer el desaleatorizador apropiado así como un código especial denominado CW (Control Word). Es posible aplicar distintos encriptados a un mismo servicio.
- Control del acceso condicional: Difunde los requisitos necesarios y los códigos necesarios para que los usuarios con acceso puedan ejercer esta función.
- Gestión del acceso condicional que el cual se encarga de gestionar el acceso condicional. Así, se autoriza a los receptores de distintas formas según la manera de suscripción a un servicio encriptado (por tema, por tiempo, por programa).

Esta posibilidad de encriptar la información proporciona una gran gama de posibilidades a los proveedores de servicios de radiodifusión [12].

3.4.4 Dispersión de energía.

El objetivo de este proceso es asegurarse de que la energía que de la señal se distribuya uniformemente y mantenga un nivel constante.

Para hacer esto se suma la señal de entrada con una secuencia pseudoaleatoria (cualquier grupo de secuencias binarias que presenten propiedades aleatorias parecidas a las del ruido). Con esto se consigue que la señal presente las propiedades espectrales de este tipo de señales. Así la energía se distribuye de manera uniforme en el espectro [25].

3.4.5 Codificación Convolutional.

La salida del dispersor de energía se introduce a un codificador convolutional (su función es la de desarrollar una codificación de bits que se presentan a la entrada mediante la introducción de bits de redundancia que habilitarán la corrección de errores en recepción). el cual tiene como objetivo la de generar un código de redundancia que sirva para poder corregir los errores que aparecen en la recepción por efecto de la propagación de la señal. Así, se añaden al flujo binario de entrada una serie de bits que sirvan para reducir la probabilidad de error del sistema.

La codificación convolutional puede ser aplicada de dos formas distintas las cuales son:

- Unequal Error Protection (UEP): diseñada especialmente para audio.
- Equal Error Protection (EEP): Diseñada tanto para datos como para audio.

De esta manera se puede aplicar una redundancia distinta a cada fuente de audio [21].

3.4.6 Entrelazado en el dominio del tiempo.

El entrelazado en el dominio del tiempo tiene como objetivo lograr la probabilidad de error de los bits del mismo código convolutional.

Al tener un código y por motivos de propagación se produce un fallo es muy probable que el fallo no se dé en un solo bit, sino que queden afectados varios de los bits que forman el código. Si esto ocurre se pierde toda la utilidad del código convolucional. La solución del entrelazado temporal consiste en separar en el tiempo los bits de un código de forma que no se transmitan consecutivamente, si la separación entre los bits es suficiente para poder considerar que las condiciones de la propagación tengan gran posibilidad de haber variado se consigue que los fallos que afectan a cada bit del código sean independientes [32].

3.4.7. Generación de los símbolos QPSK.

Al llevar a cabo el entrelazado en el tiempo se realiza la multiplexación del MSC y el FIC. Al realizar el multiplexado se lleva la trama a un mapeador de símbolos QPSK. Para generar los coeficientes de los símbolos QPSK en primer lugar es necesario dividir la trama, así se asignan los símbolos OFDM dividiéndose la trama.

Una vez separados los símbolos OFDM éstos se llevan a un mapeador de símbolos QPSK. Este parte se encarga de calcular los coeficientes de los símbolos QPSK en el dominio de la frecuencia. Posteriormente es posible aplicando la Transformada Discreta Inversa de Fourier generar la señal OFDM en el tiempo partiendo de las muestras espectrales de los símbolos QPSK.

La forma de generar los símbolos OFDM a partir de la trama de transmisión (MSC + FIC) depende del modo de transmisión que se elija.

Consecuentemente al realizar un entrelazado en frecuencia para proteger al sistema contra los desvanecimientos selectivos (interferencias), finalmente se generan símbolos D-QPSK y se introducen los símbolos de sincronismo [29].

3.4.8 Entrelazado en frecuencia.

Los símbolos QPSK que corresponden a los símbolos OFDM de la trama son llevados a diferentes portadoras, se separan los datos consecutivos en diferentes frecuencias. Con este procedimiento se consigue gran robustez ante los desvanecimientos selectivos que afectan a ciertas frecuencias. Al realizar este entrelazado en frecuencia de las muestras se consigue que

en caso de producirse un desvanecimiento selectivo no queden afectadas las muestras sucesivas de la señal [19].

Nuevamente la forma de realizar el entrelazado en frecuencia depende del modo DAB escogido para la transmisión.

3.4.8.1 Generación de símbolos D-QPSK. Símbolos de sincronismo.

Tras entrelazar la señal en frecuencia en las distintas portadoras se aplica una modulación diferencial a cada uno de las portadoras.

A continuación se generan símbolos D-QPSK a partir de los símbolos QPSK generados en el mapeador QPSK. Para realizar esto se suma una fase de referencia a los coeficientes de los símbolos QPSK. La utilización de una modulación diferencial se debe a que con este tipo de modulación se disminuye en gran manera la complejidad del receptor.

Al emplear una fase de referencia (modulación binaria de fase) es necesario que el demodulador conozca este valor para poder demodular el primero de los datos recibidos. A partir de aquí se puede usar la fase de los datos anteriores. Por este motivo es necesario introducir en la trama un símbolo de sincronismo de fase que ayude al receptor a realizar la demodulación correctamente.

Además de este símbolo de fase se inserta un símbolo nulo al principio del símbolo OFDM de un valor conocido para sincronizar al demodulador de forma que conozca el momento en que debe comenzar a demodular. Dichos símbolos de sincronismo se incluyen en el canal de sincronización [24].

3.4.8.2 Modulación OFDM. Generación de símbolos OFDM.

El siguiente paso en la formación de la señal DAB es la modulación, esta es una de los procesos más importantes en este sistema y aporta grandes ventajas como son, robustez ante el desvanecimiento selectivo (desvanecimiento de la señal), así como también mejora en el ancho de banda del sistema.

La modulación empleada en DAB es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), que se puede definir de forma sencilla como una técnica multiportadora que emplea portadoras ortogonales moduladas a bajo nivel y multiplexadas en frecuencia.

La modulación del DAB se ve influida por la configuración que se haya elegido en la trama. De esta forma, el número de portadoras, por ejemplo, depende del modo empleado para la trama. El modo define la duración del símbolo, entre otros parámetros, y con ello la separación de las portadoras OFDM

Además de emplearse la modulación OFDM se ha realizado un procesado de la señal previo, aplicándose por ejemplo, un código convolucional o señales entrelazados en tiempo y en frecuencia, con estos procesos se consigue hacer la señal más robusta frente a errores. Cuando se usan estos procesos la modulación completa pasa a denominarse con las siglas COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [14].

3.4.8.2.1 Multiportadoras Ortogonales.

El sistema DAB modula un número fijo de portadoras con un flujo de información de tasa binaria baja. El período de símbolo depende del Modo DAB que se esté empleando, este a su vez fija la separación entre portadoras que delimita el número de las mismas en un canal de ancho de banda 1,536 MHz, que es el que ocupa la señal DAB.

Al modular a baja velocidad se consigue reducir el ancho de banda de la señal modulada lo que es una gran ventaja, por otra parte es posible introducir un intervalo de guarda en cada símbolo que posibilita el funcionamiento en SFN aprovechándose los ecos constructivamente.

Para que no exista interferencia intersimbólica (interferencia entre bits) entre las distintas portadoras estas deben ser ortogonales. Dos señales son ortogonales cuando su producto escalar es nulo.

La señal OFDM para DAB está compuesta por un número de portadoras que depende del modo, existiendo 4 valores, 192, 384, 768, 1536. Estas portadoras son moduladas a bajo nivel en D-QPSK y se reparten en un ancho de banda de 1,536 MHz [23].

3.4.8.2.2 Sistema de modulación OFDM.

El sistema de modulación OFDM puede verse con un sistema de N moduladores D-QPSK, siendo N el número de portadoras del sistema DAB. El sistema demodulador sería el inverso.

Haciendo un análisis matemático es posible comprobar como la expresión de una señal OFDM en el tiempo puede ser expresada mediante la expresión de una Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT) y ciertos factores de escala. Así, aplicar esta transformada a los símbolos DAB de cada portadora en el dominio de la frecuencia equivale a usar los N moduladores QPSK diferenciales. En el extremo receptor se aplica el proceso inverso, la Transformada Discreta de Fourier (DFT) obteniéndose a partir de las muestras de la señal en el tiempo de nuevo los símbolos de cada una de las portadoras. En el extremo del transmisor se parte de las muestras de la señal OFDM en el dominio de la frecuencia (mapeado QPSK) y se aplica la IDFT para obtener la señal OFDM en el tiempo. En el extremo opuesto, el receptor se aplica el proceso inverso, transformación tiempo-frecuencia.

En la *fig. 3.7* se muestra el esquema de un modulador/demodulador OFDM.

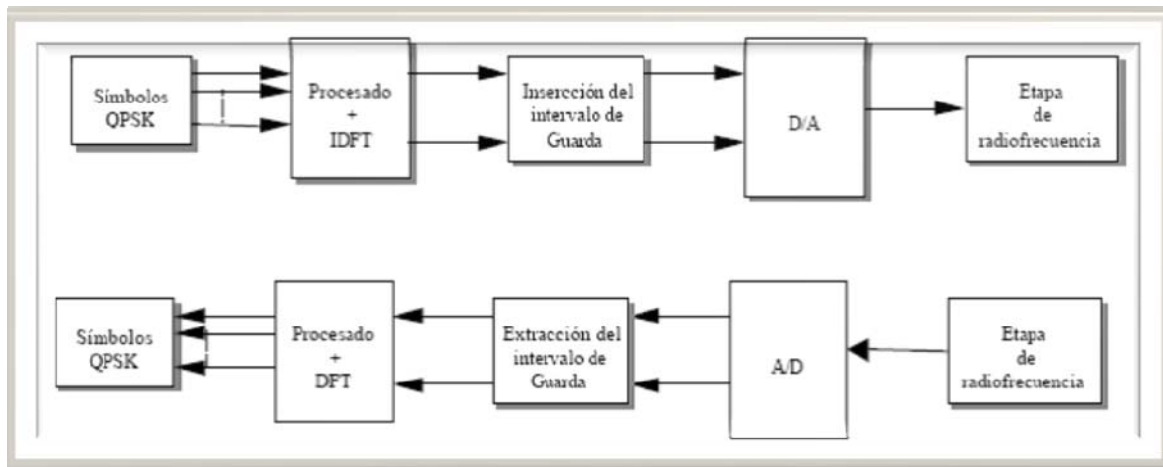


Fig. 3.7 Modulador-Demodulador OFDM.

Tras obtener la señal OFDM se introduce el intervalo de guarda. El intervalo de guarda es el responsable de absorber los efectos de la propagación multitrayecto de forma que los ecos que se reciben dentro del intervalo de guarda contribuyan positivamente a la recepción de la señal. Otra característica del intervalo de guarda es que posibilita el funcionamiento en redes de frecuencia única, como se ha mencionado los ecos contribuyen de forma positiva, así, es posible que varios transmisores cubran una misma zona geográfica en el mismo canal ya que la interferencia cocanal deja de ser interferencia [31].

3.5 Aspectos de propagación.

3.5.1 Modelo de propagación.

Para realizar un modelo de propagación se requiere una serie de cálculos y simulaciones de cobertura que den como resultado modelos de propagación los cuales dependiendo de su potencia será su irradiación [33].

3.5.2 Propagación Multitrayecto.

En la radiodifusión analógica siempre existen diferentes rayos de interferencia que llegan al receptor. El hecho de recibir ecos en la señal principal puede causar un gran nivel de interferencia que impida la correcta recepción de la señal.

En la radio analógica para evitar que los ecos afecten a la señal, normalmente se emplean antenas receptoras directivas ya que las señales interferentes llegan en direcciones diferentes a la de la principal. El empleo de antenas directivas es sencillo en el caso de recepción fija pero no es factible en recepción portátil o móvil al no poder orientar la antena al transmisor.

En radiodifusión digital DAB, no se pretende eliminar la recepción de ecos, sino se intenta que los ecos se sumen a la señal principal para aumentar el nivel de campo en recepción.

Para conseguir este comportamiento de los ecos en el sistema DAB se trabaja en redes de frecuencia única [22].

3.5.3 Espectro de la señal ODFM.

El espectro de la señal DAB que como ya se ha comentado se caracteriza por la modulación OFDM. El espectro depende del modo de transmisión que se elija para la red.

Como características especiales se pueden decir que todos los modos emplean transmisión multiportadora, que en todos los modos el ancho de banda del espectro es 1,536 MHz y que en este ancho de banda el espectro presenta planicidad.

A continuación se muestran las gráficas del espectro de cada uno de los modos. (Las gráficas han sido extraídas del ETS 300 401) [8].

- Espectro del Modo I DAB, 1536 portadoras.

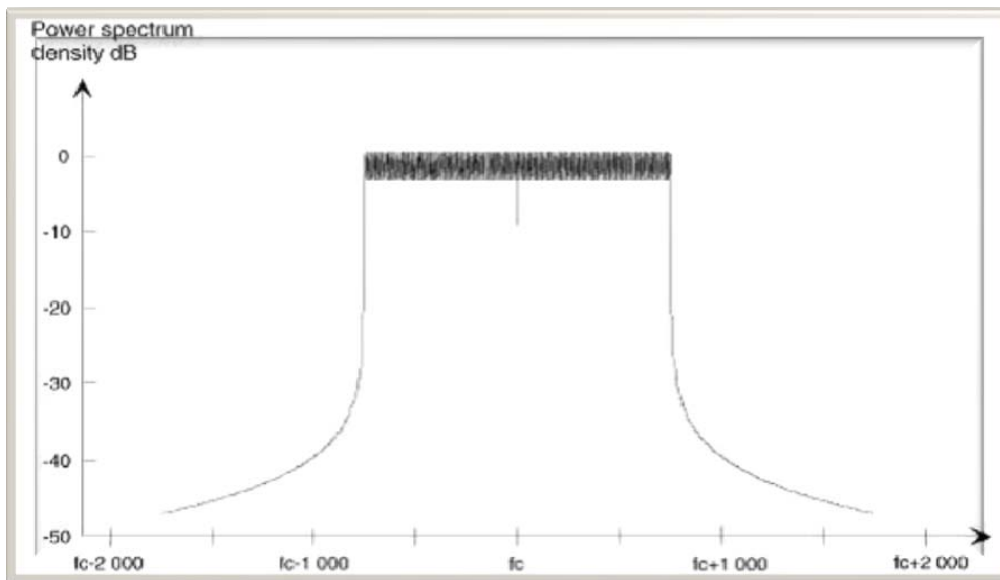


Fig. 3.8 Espectro del modo I.

- Espectro del Modo II DAB, 384 portadoras.

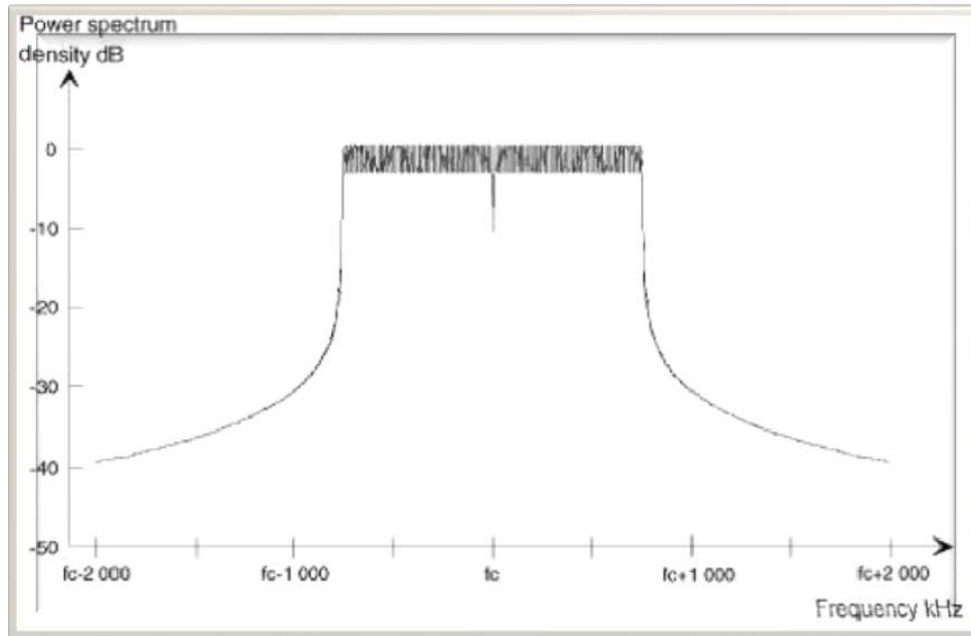


Fig. 3.8 Espectro del modo II.

- Espectro del Modo III DAB, 192 portadoras.

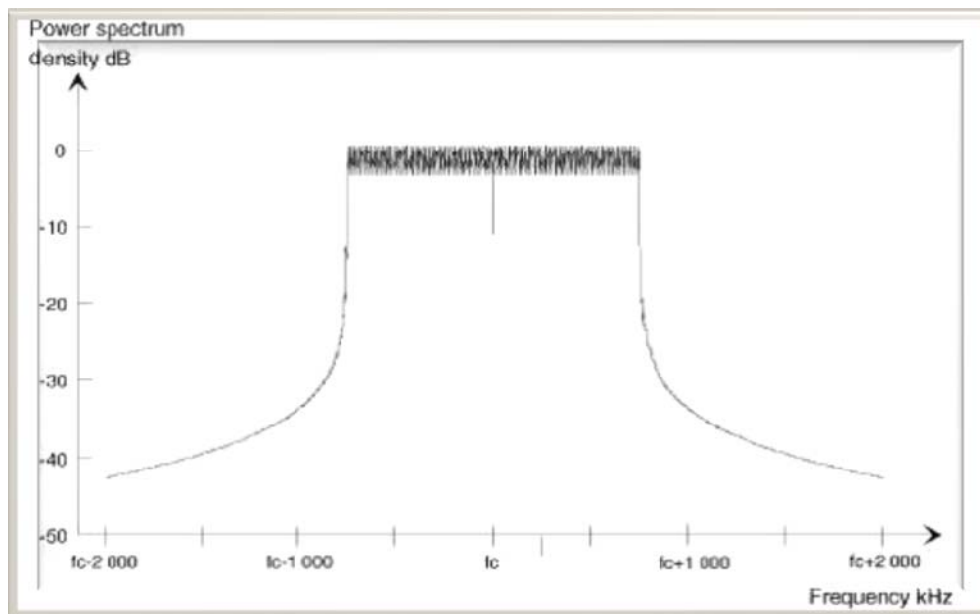


Fig. 3.9 Espectro del modo III.

- Espectro del Modo IV DAB, 768 portadoras.

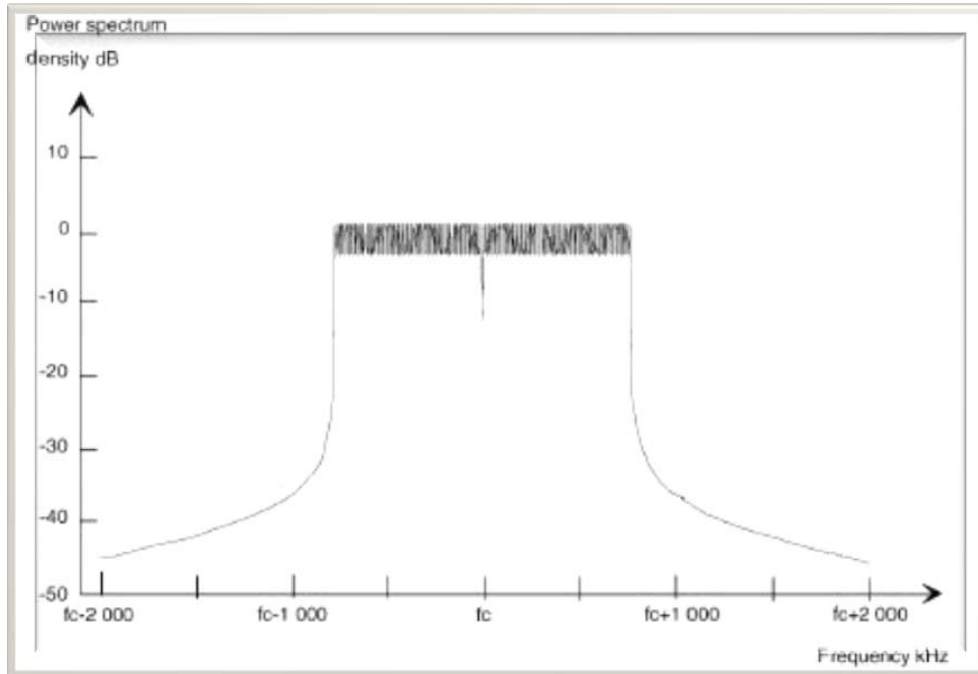


Fig. 3.10 Espectro del modo IV.

3.5.4 Máscara DAB.

Una vez que ha sido generada la señal que va ser radiodifundida es necesario filtrarla para evitar la creación de interferencias a los canales adyacentes.

La máscara del filtro es distinta según el caso particular de cada transmisor, así, los transmisores que se encuentren en zonas en las que pueda afectar en mayor grado la interferencia de canal adyacente deben tener una máscara más restrictiva [26].

Las máscaras del filtro para banda III y banda L son:

- Máscara para banda III.

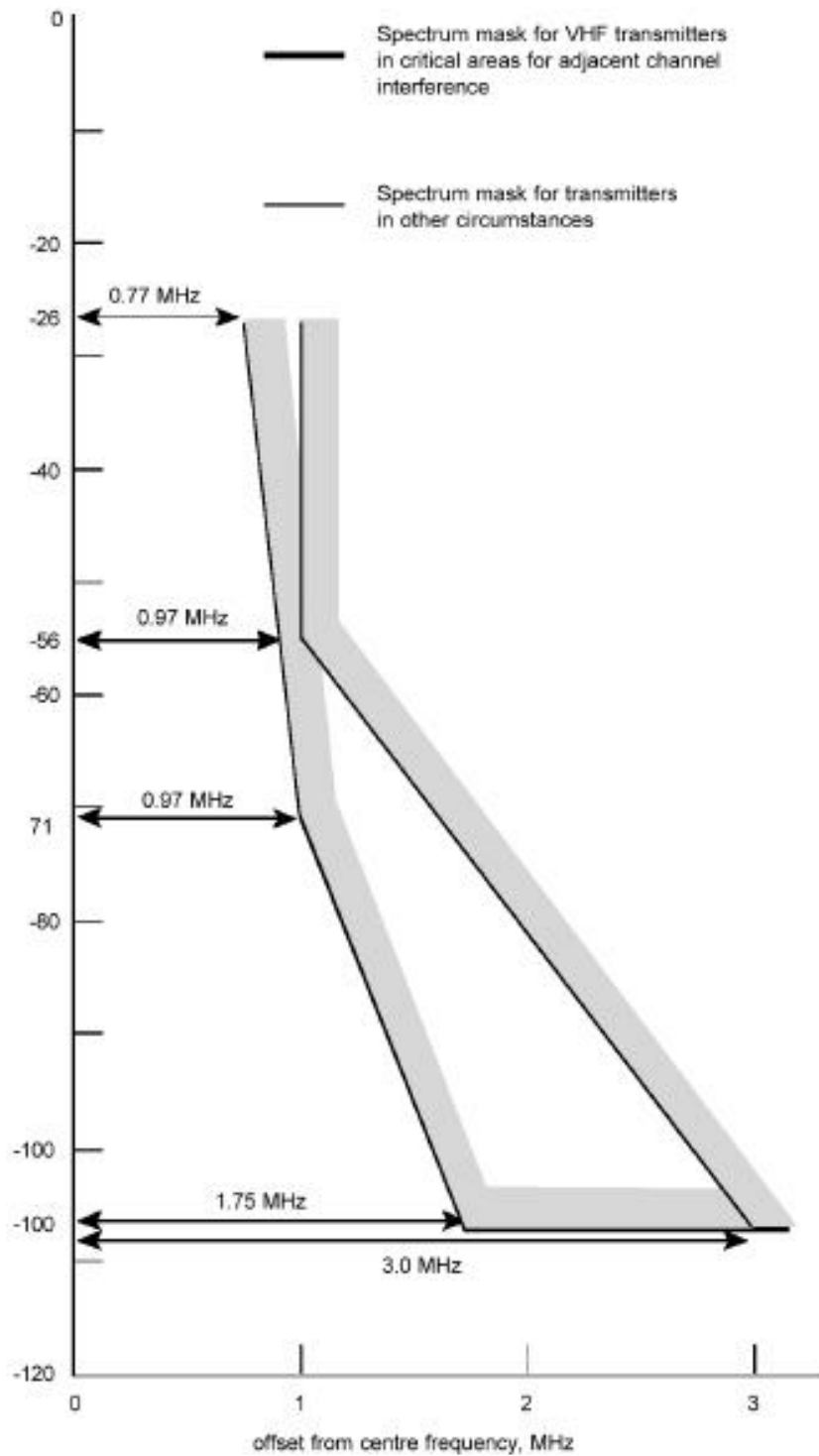


Fig. 3.11 Mascara para banda III.

- Máscara para banda L.

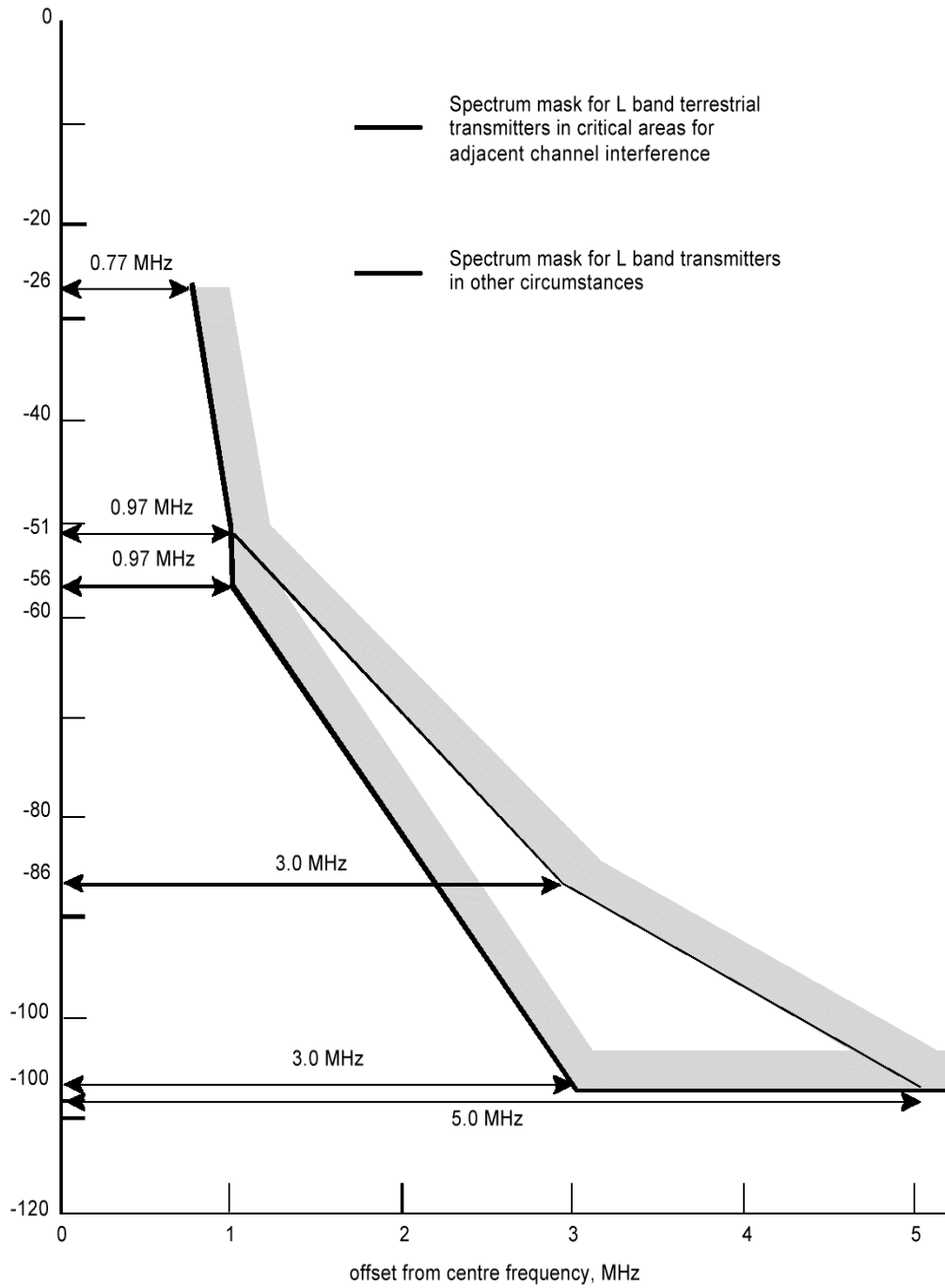


Fig. 3.12 Mascara para banda L.

Una vez filtrado el espectro de la señal radiada será el siguiente.

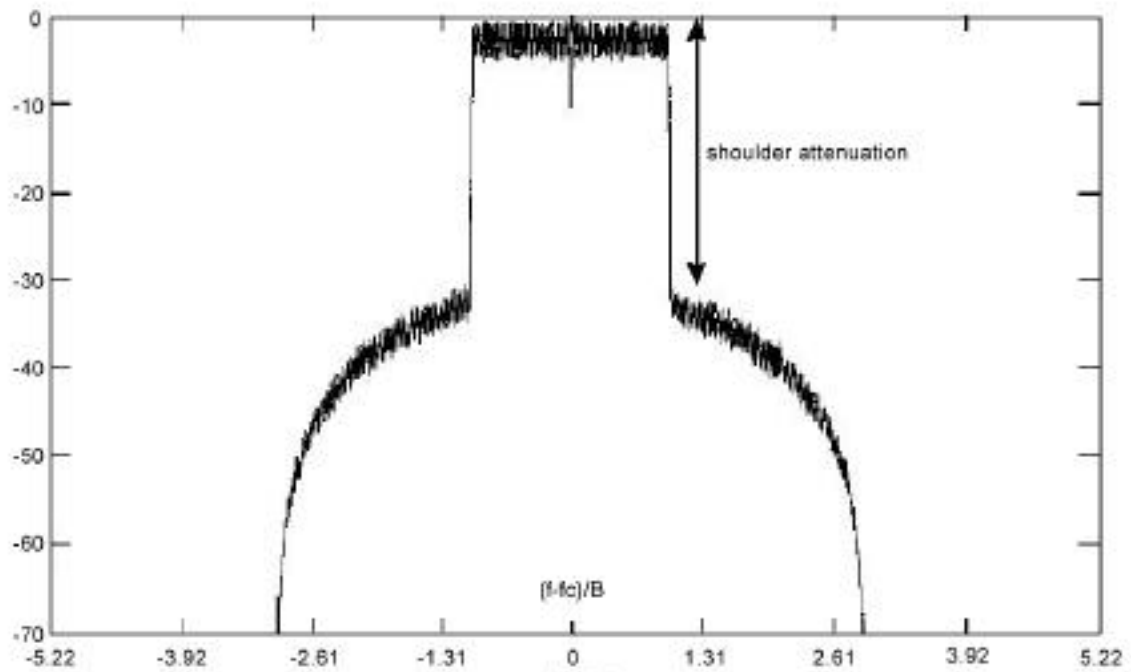


Fig. 3.13 Espectro de la señal radiada.

Capítulo 4

Modelo de la distribución de Una red para el sistema DAB

Introducción

La planificación de las redes de transmisión para la radiodifusión FM esta basada tradicionalmente en el concepto de redes de múltiple frecuencia (MFNs, Multiple Frequency Networks). En una MFN, transmisores adyacentes irradian el mismo programa pero operan en diferentes frecuencias para evitar interferencias de la señal en las áreas de cobertura de diferentes transmisores superpuestos. La red básica usa la misma o frecuencias cercanas. Planear la cobertura para una red FM requiere planear la frecuencia para los diferentes sitios transmisores, para optimizar el uso del escaso recurso de frecuencias RF.

El sistema DAB permite redes de una sola frecuencia (SFN, single frequency networks) en donde todos los transmisores da la red trasmiten exactamente la misma información en la misma frecuencia. La principal condición para trabajar con SFN es que todos los transmisores estén sincronizados a cada otro en frecuencia y cumplir con ciertos requerimientos de tiempo de

retardo. Planear la cobertura para una red DAB requiere planear el tiempo de retardo entre los diferentes transmisores en lugar de planear la frecuencia como en el caso de FM. La capacidad de la SFN del DAB permite una cobertura completa para regiones muy grandes sin necesidad de que el receptor tenga que sintonizar una frecuencia diferente mientras se mueve en el área. En contraste a la radiodifusión FM, el sistema DAB transmite típicamente de cinco a siete programas diferentes en un solo conjunto sobre una frecuencia y todos los programas contenidos dentro de ese múltiplex comparten la misma área de cobertura [18].

Durante la última década se han puesto en funcionamiento las primeras redes experimentales y comerciales DAB. Además de proporcionar audio con calidad CD y servicio de datos multimedia, este servicio ha de adaptarse a los nuevos hábitos de los consumidores, debiendo asegurar la cobertura para receptores fijos, móviles y portátiles. Se hace necesario redefinir la disponibilidad de servicio para garantizar una buena calidad de recepción al gran número de receptores móviles y portátiles.

La modulación empleada permite utilizar nuevas técnicas de cobertura, permitiendo modificar o ampliar el área de cobertura modificando no sólo la potencia de los transmisores, sino añadiendo transmisores co-canal, emisores de pequeña potencia que aumentan la disponibilidad de servicio o introduciendo retardos en los transmisores de una red sincronizada. De esta forma se aumenta enormemente la flexibilidad en el diseño de la red y la posibilidad de reforzar la cobertura en aquellas zonas que requieren un mayor grado de servicio (zonas urbanas de gran densidad, accesos a la ciudad, autopistas, etc.).

Aunque la radio convencional siempre ha utilizado transmisores terrestres, la difusión de la nueva generación de servicios de radio digital en Banda L permite combinar transmisores terrestres y satélites, ya que esta banda ha sido asignada por el WARC-92 en la mayoría de los países de las regiones ITU para la difusión terrestre y satélite. Mediante la utilización de transmisores co-canal, ambos tipos de transmisores pueden emitir simultáneamente, dependiendo del tamaño del área de servicio [27].

4.1 Redes de Frecuencia Única (SFN).

Una red de frecuencia única utiliza el mismo canal de radiofrecuencia para difundir un mismo programa en una misma zona *fig. 4.1*. Esto es debido a la inserción de un intervalo de guarda en la información transmitida. Durante el intervalo de guarda todos los ecos recibidos por el receptor contribuyen positivamente, esto es, las señales que se reciben tras la principal no causan interferencias. Se puede así disminuir la interferencia co-canal de gran forma, lo que permite la disminución de las relaciones de protección.

Para conseguir que en la zona de cobertura los ecos que se reciben en el receptor lleguen dentro del intervalo de guarda, como primera aproximación empleando dos transmisores hay que separarlos una distancia menor a la que avanza la onda en el intervalo de guarda. Por otro lado los transmisores que trabajen en redes de frecuencia única deben cumplir estrictamente con estas tres reglas:

- Radiar la misma información.
- Al mismo tiempo.
- A la misma frecuencia.

Para conseguir lo anterior es necesario realizar un proceso de sincronización en los distintos centros de la red. Para esto es necesario emplear una referencia de tiempo y frecuencia. Esto se puede conseguir si se emplean receptores con sistema de posicionamiento global GPS (Global Position System).

Se define la ganancia de red como la zona de cobertura que se gana al trabajar en redes de frecuencia única. Esto es posible al ser la intensidad de campo total utilizable mayor que la que procede de un solo transmisor, las intensidades de los distintos transmisores se suman en el punto de recepción siempre que se reciban en el intervalo de guarda.

Cuando se reciben señales fuera del intervalo de guarda se produce interferencia. Estas pueden ser de dos tipos:

- Entre símbolos: ISI (Intersymbol Interference).
- Entre Portadoras: ICI (Intercarrier Interference).

Es importante destacar que la red debe estar sincronizada para que la recepción sea posible y de buena calidad [24].

El sistema DAB es capaz de operar en redes de frecuencia única (SFN) gracias a la técnica de modulación que emplea (OFDM). La siguiente figura muestra un esquema básico de una red SFN. En donde observamos que las señales que provienen del conjunto multiplexor pasan a través de un adaptador de red para poder ser conducidas por la red de transporte hasta el codificador de canal y así ser transmitidas utilizando la técnica de redes SFN. (14)

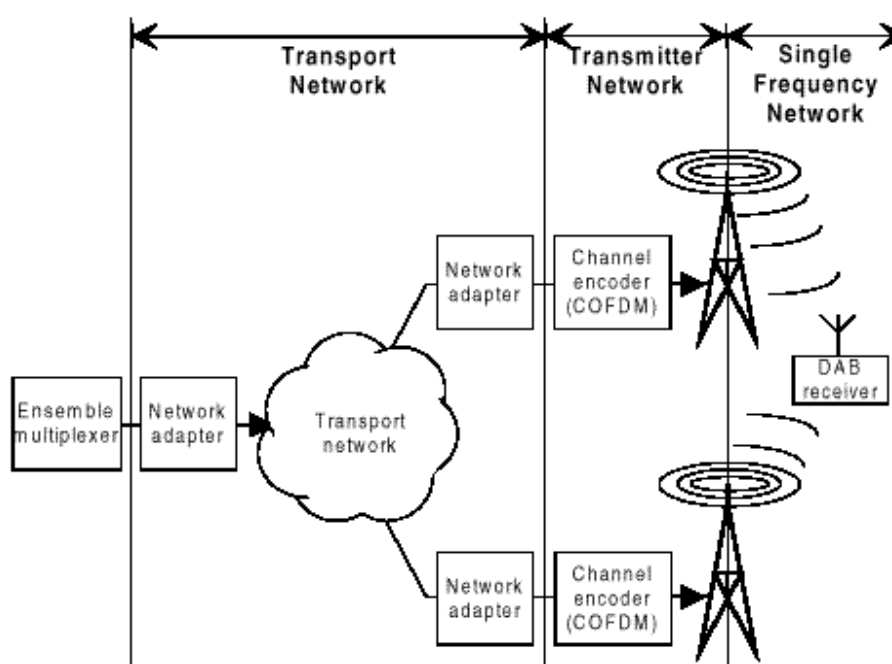


Fig. 4.1 Esquema de una red SFN

4.1.1 Sincronización en redes de frecuencia única.

Un factor clave para el correcto funcionamiento de las redes isofrecuencia es la existencia de un intervalo de guarda dentro del cual toda señal que llegue al receptor, bien de forma directa o mediante multitrayecto, aporta información útil. Surge así el concepto anteriormente mencionado de ganancia de red, que define la ganancia en recepción de las redes SFN frente a la transmisión de la señal mediante un sólo transmisor.

Por el contrario, cualquier señal de la misma frecuencia que llegue al receptor fuera de dicho intervalo, debe considerarse como señal interferente y puede degradar de forma importante la recepción de la señal DAB.

Por tanto, es evidente la importancia de que todos los transmisores de una red SFN transmitan en el mismo instante, de modo que solo la diferencia de trayectos, y no los retardos relativos entre transmisores, intervenga en la posibilidad de que un transmisor interfiera en la transmisión del resto de la red SFN. Dicho de otro modo, el intervalo de guarda debe servir para ‘absorber’ la diferencia de trayectos entre el receptor y los diferentes transmisores y no para compensar los fallos de sincronización de la red SFN [19].

El mecanismo para obtener la sincronización temporal requerida es el siguiente:

Consideremos el caso más común, en el cual el multiplexor no se encuentra en el mismo emplazamiento que el sistema radiante. Los distintos retardos que sufre la señal antes de ser radiada son:

1. Retardos en la red de transporte de la trama de servicio que comunica el multiplexor con el modulador.
2. Retardos en la red de transmisión (procesado en el modulador). Es el tiempo transcurrido entre la llegada de una trama al modulador y la emisión de la señal de RF

La *fig. 4.2* muestra los distintos retardos que son considerados en el sistema global.

En la red de distribución primaria se observan los siguientes retardos:

- Retardo acolchonado de la red.
- Retardo de tránsito de la red.
- Retardo de compensación de la red.

En la red de distribución del transmisor se observan los siguientes retardos:

- Retardo de compensación del transmisor.
- Retardo de compensación del transmisor.
- Retardo de offset del transmisor [28].

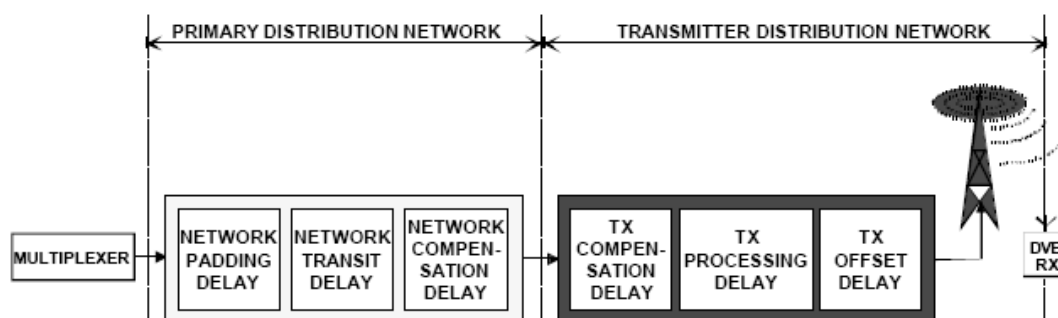


Fig. 4.2 Retardos del sistema.

Estos retardos son diferentes para cada transmisor. Así por ejemplo, pueden existir transmisores que estén localizados en el mismo emplazamiento que el multiplexor, junto a otros transmisores que reciben la señal multiplexada a través de una comunicación vía satélite (con el consiguiente retardo).

Además, las propiedades de la red de transporte no son estacionarias, de modo que un cambio de estado en dicha red (congestión de la red, cambio de ruta, etc.) varía el tiempo total dentro de un mismo transmisor.

Así, en cada trama es introducida una marca de tiempo, dada por la suma del tiempo actual respecto de la referencia pps (pulse per second) más el retardo de distribución máximo estimado, que indica el instante en el que la trama tiene que empezar a ser modulada en todos los transmisores. Dicha marca de tiempo es introducida en la parte inicial de la red de distribución. (14)

Para sincronizar la red se usa un sistema de sincronización dinámica el esquema se muestra en la fig. 4.3 mediante el uso de una señal GPS 1 pps.

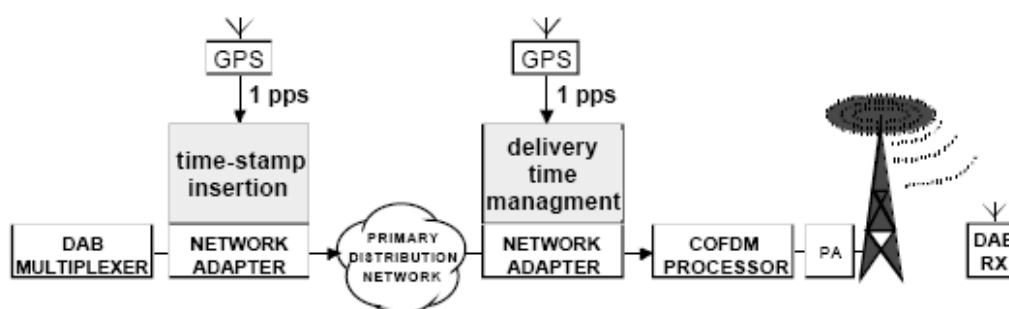


Fig. 4.3 Sincronización dinámica.

Cada modulador COFDM esperará a que su reloj local coincida con el valor de la marca de tiempo para comenzar el proceso de modulación.

Para que este mecanismo funcione, tanto los multiplexores como los moduladores deben tener la misma señal de reloj. Además, la señal de reloj debe ser una señal muy precisa y estable, por lo que suele ser proporcionada por un sistema GPS.

Además, cada modulador tiene la posibilidad de introducir manual o remotamente un retardo que compense los retardos entre las distintas cadenas de transmisión. Este retardo puede también servir para modificar la zona de cobertura de la red [30].

4.2 Descripción de la red DAB.

Como peculiaridad de las redes DAB podemos resaltar que cuando se ha implantado una red de frecuencia única (SFN), es necesario para la sincronización de la misma que diferentes elementos, centros de contribución, multiplexores de servicio, trama, moduladores, posean una referencia de tiempo y frecuencia común. Para obtener estas referencias se usa receptores GPS (Global Position System).

La posible topología de una red DAB podría ser como la que se muestra en la *fig. 4.4*. En los siguientes puntos se describen los elementos que se observa en dicha figura [22].

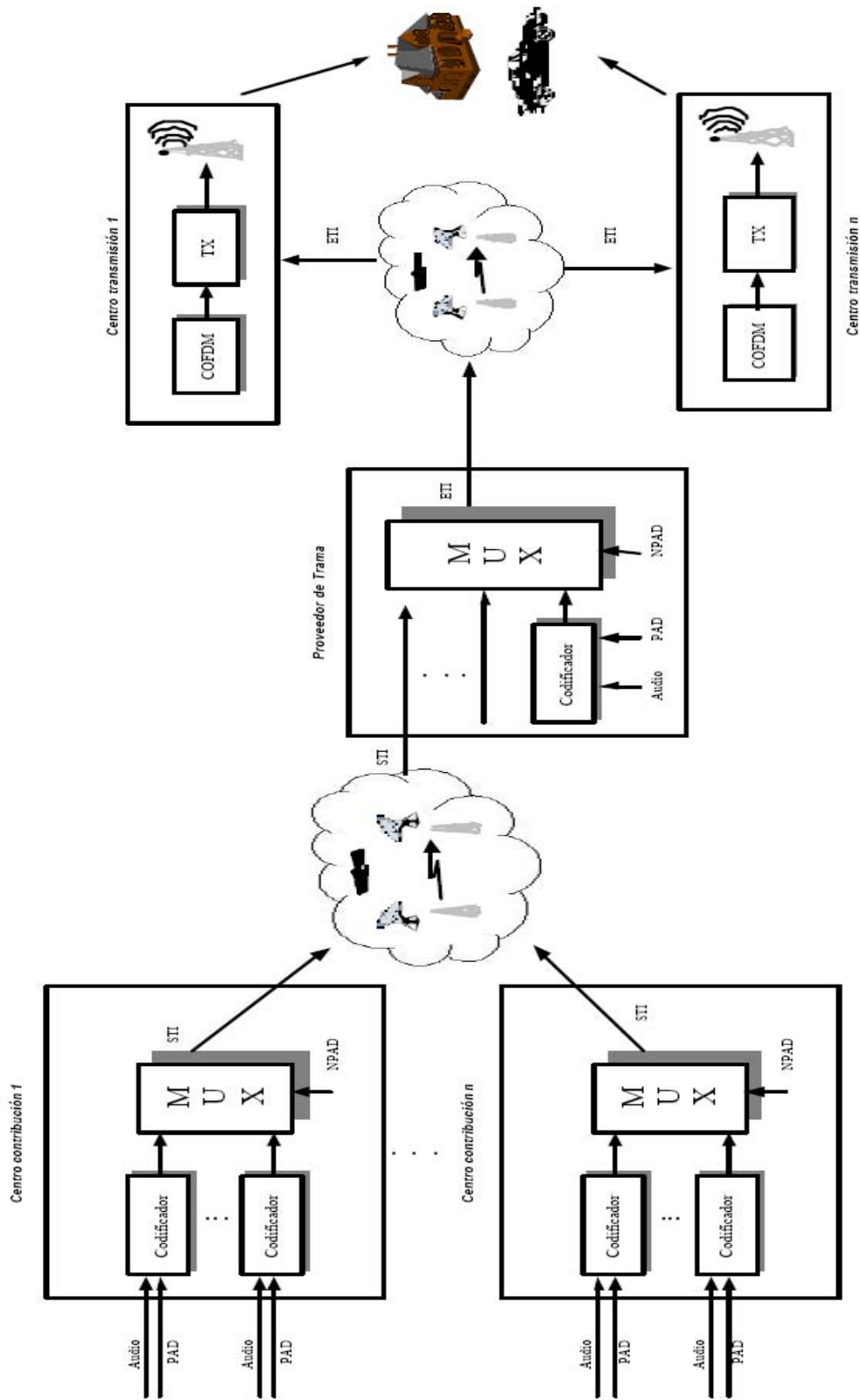


Fig. 4.4 Posible topología de una red DAB

4.2.1 Centro de Contribución. Proveedor de Servicio.

En este centro se da el primer paso para la consecución de la trama digital que será finalmente difundida. Esta trama está compuesta de 3 tipos de información, audio, datos (PAD – datos asociados al programa- y NPAD –no asociados al programa-) e información de control de la trama.

En el centro de contribución se tienen como fuente los datos, tanto asociados como no asociados, y la información de sonido del programa que puede estar en formato analógico o digital dependiendo de las características del codificador.

A partir de estos datos este centro entrega el audio y los datos codificados (trama de audio) al multiplexor de Servicio. Dicho multiplexor tiene como misión entregar una trama previa que incluya estos datos y la información de la trama creada para que pueda ser manipulada posteriormente de forma adecuada. Esta trama recibe el nombre de STI (Service Transport Interface).

Para conformar la trama STI en el centro de contribución se cuenta con un codificador y un multiplexor [22].

4.2.1.1 Codificador.

Este se encarga de codificar la información de audio según el método MUSICAM (Mpeg-1/2 Audio Layer II), que es el establecido para el sistema DAB. La información de audio puede estar en formato analógico o digital, teniendo en cuenta que finalmente la señal de entrada al bloque MPEG debe estar muestreado a 48 KHz.

La tasa binaria de salida del codificador puede ser configurada a los posibles valores establecidos para un canal en DAB. Lógicamente la calidad del programa en cuestión dependerá en gran medida de este valor.

Los codificadores deben ser capaces de insertar los datos asociados al programa (PAD), normalmente se emplea otro equipo que entrega estos datos al codificador. La salida del

codificador debe ser escogida según la red de telecomunicaciones que exista entre este y el multiplexor de Servicio.

El codificador debe ser capaz de configurar:

- Modo de audio.
- Tasa de codificación.
- Datos PAD (habilitación y tasa binaria).
- Configuración del reloj.
- Parámetros de cada canal (etiquetas de los servicios y componentes de servicio, capacidad, nivel de protección, etc.).

4.2.1.2 Multiplexor (MUX).

Este equipo al que se puede denominar *multiplexor de servicio* tiene como misión principal recoger todos los canales o programas de audio junto con los datos y multiplexarlos o ubicarlos de la manera conveniente para formar la trama STI.

El equipo tiene que ser capaz de recoger las contribuciones según el interfaz establecido. Normalmente la forma de manejar el audio y los datos es distinta para cada fabricante pero hay que tener en cuenta que la salida del proveedor de servicio debe cumplir con el formato especificado en el estándar DAB para este tipo de multiplexores. De esta forma se garantiza la posibilidad de agrupar la información de distintos proveedores de servicio, que emplean distintos fabricantes, en una misma trama DAB como se muestra en la figura.

4.2.2 Proveedor de Trama.

El proveedor de trama (Ensemble Provider) es el encargado de recibir cada uno de los programas del múltiplex DAB que provienen de los distintos centros de contribución o de los proveedores de servicio en formato STI y formar el múltiplex final que contiene toda la información del sistema.

La trama de salida de este centro recibe el nombre de ETI (Ensemble Transport Interface), esta trama comunica al proveedor de trama con los centros difusores a través de distintos tipos de redes de transporte. Se encuentra normalizada para los servicios de

radiodifusión digital sonora en distintas publicaciones del Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones. Una de las principales características que hay que seleccionar para la trama ETI es si debe ser independiente de la red de transporte (NI) posterior o se debe tomar en cuenta y ser adaptada a la misma (NA). El formato NI (Network Independent) se usa para conexiones locales o de prueba mientras que el NA (Network Adaptation) se emplea en redes comunes de telecomunicaciones.

El equipo principal en este caso es el multiplexor de trama (Ensemble Multiplexer) que es el encargado de generar la trama ETI a partir de las distintas contribuciones. Estas pueden llegar de diferentes formas, así, pueden provenir de algún tipo de red de transporte (enlaces de microondas, satélite, etc.) en formato STI, pueden ser insertadas directamente al multiplexor si los equipos de contribución se encuentran en el mismo lugar, etc.

El interfaz existente entre el proveedor de servicio y el de trama es el mencionado STI, en este interfaz se transportan datos desde el proveedor de servicio al de trama y datos de configuración entre ambos centros, por este motivo el enlace debe ser bidireccional. Los mensajes de información de configuración que se intercambian pueden ser de diversos tipos:

- De acción: para reconfiguraciones.
- De configuración: para intercambiar configuraciones.
- Mensajes FIG: para intercambiar ficheros FIG y su manejo.
- Mensajes FIB: para intercambiar matrices FIB y su manejo.
- De recursos: para manejar recursos.
- De información: para intercambiar distintos tipos de informaciones.
- De supervisión: para control y gestión de alarmas.

En el multiplexor de trama debe controlar parámetros como:

- Habilitación de las marcas de tiempo y valor.
- Valor de los retardos (estático, dinámico y offset).
- Configuración del reloj.
- Parámetros de la trama (NI, NA –5376 ó 5592-, Modo DAB).
- Parámetros del FIC (Fast Information Channel).

La trama ETI contiene todos los programas de la trama DAB así como todos los datos de la misma, tanto los datos destinados a los usuarios (PAD y NPAD) como los datos de control de la

trama que son utilizados por los siguientes elementos del sistema (moduladores, receptores, etc.) para realizar su función correctamente.

Mediante la trama ETI es posible configurar de forma remota muchos de los parámetros que empleará el modulador COFDM para generar la señal de RF. De este modo, se pueden definir:

- Modo de transmisión DAB.
- Valor de los retardos (estático y dinámico).
- Posibilidad de corte de la transmisión (Mute).

También en este caso en la figura se ha optado por una de las posibles arquitecturas en cuanto al proveedor de trama. Existen otras muchas posibilidades [26].

4.2.3 Centro de Transmisión.

Este es el lugar en el que se realizan los pasos necesarios para posibilitar la radiodifusión de la trama ETI. De este modo, se modula y amplifica la señal para posteriormente ser radiada en el canal radioeléctrico asignado. En primer lugar, se lleva la trama ETI a un modulador OFDM, con esto todas las contribuciones del sistema y los datos que incluye la trama ETI en un flujo de 2 Mbps se modulan y pasan a ocupar un canal de 1,536 MHz. Además de la modulación se aplica una codificación y un entrelazado en tiempo y en frecuencia con lo que el sistema pasa a denominarse COFDM. Una vez realizada la modulación se pasa a la transmisión de la señal para lo que es necesario llevar la señal al canal adecuado y proporcionarle la potencia suficiente para alcanzar la cobertura deseada[18].

4.2.3.1 Modulador COFDM.

Este bloque modula la trama ETI consiguiendo una señal multiportadora de ancho de banda 1,536 MHz según el formato establecido para señales DAB. El modulador debe ser configurado con diversos valores de forma local o remota, Modo y retardos básicamente para obtener la señal de salida adecuada. En estos equipos se lleva a cabo una de las principales tareas de una red DAB, la sincronización. El modulador debe extraer las marcas de tiempo de la trama o leerlas localmente para entregar la señal de salida en el momento justo, esta es la forma de conseguir redes de frecuencia única (SFN) [18].

4.2.3.2 Transmisor (Tx).

Este bloque realiza todos los procesos necesarios para poner la señal DAB en el aire. En un transmisor nos podemos encontrar con amplificadores, mezcladores, fuentes de alimentación, filtros, antenas, etc. Un esquema completo de un trasmisor se analizará más adelante [21].

4.2.3.3 Repetidores.

Es posible y muy típico encontrarse en una red de difusión con repetidores de señal, estos puntos se encargan de recibir la señal de RF, al igual que cualquier otro receptor, y volver a transmitirla. La misión de los repetidores es dar cobertura a una zona de sombra de la red. Habitualmente estas zonas presentan peculiaridades orográficas que imposibilitan la correcta recepción del transmisor o transmisores que cubren la zona colindante, además, no suelen ser muy extensas en una red ya totalmente implantada, por este motivo tampoco es habitual que la potencia de los repetidores sea elevada. La ubicación de repetidores en redes SFN no es algo trivial, ya que estos equipos no pueden estar a priori sincronizados [23].

4.3 Red de radiodifusión sonora digital terrestre T-DAB.

A continuación en la *fig. 4.5* se muestra el esquema general de una red de radiodifusión sonora digital terrestre. La figura está dividida en cinco bloques principales. El primero engloba a la generación de las señales que van a configurar el múltiplex de información T-DAB y que básicamente engloba audio y canales de datos. El siguiente bloque es una primera red de transporte de las diferentes señales de audio y datos v hasta el centro de multiplexación (tercer bloque), en el que se genera el múltiplex T-DAB que alimenta a los moduladores COFDM. A continuación, una segunda red de transporte lleva las señales a los centros emisores. El último bloque lo forman los transmisores de la red de difusión. La modulación COFDM puede realizarse de forma centralizada o descentralizada [18].

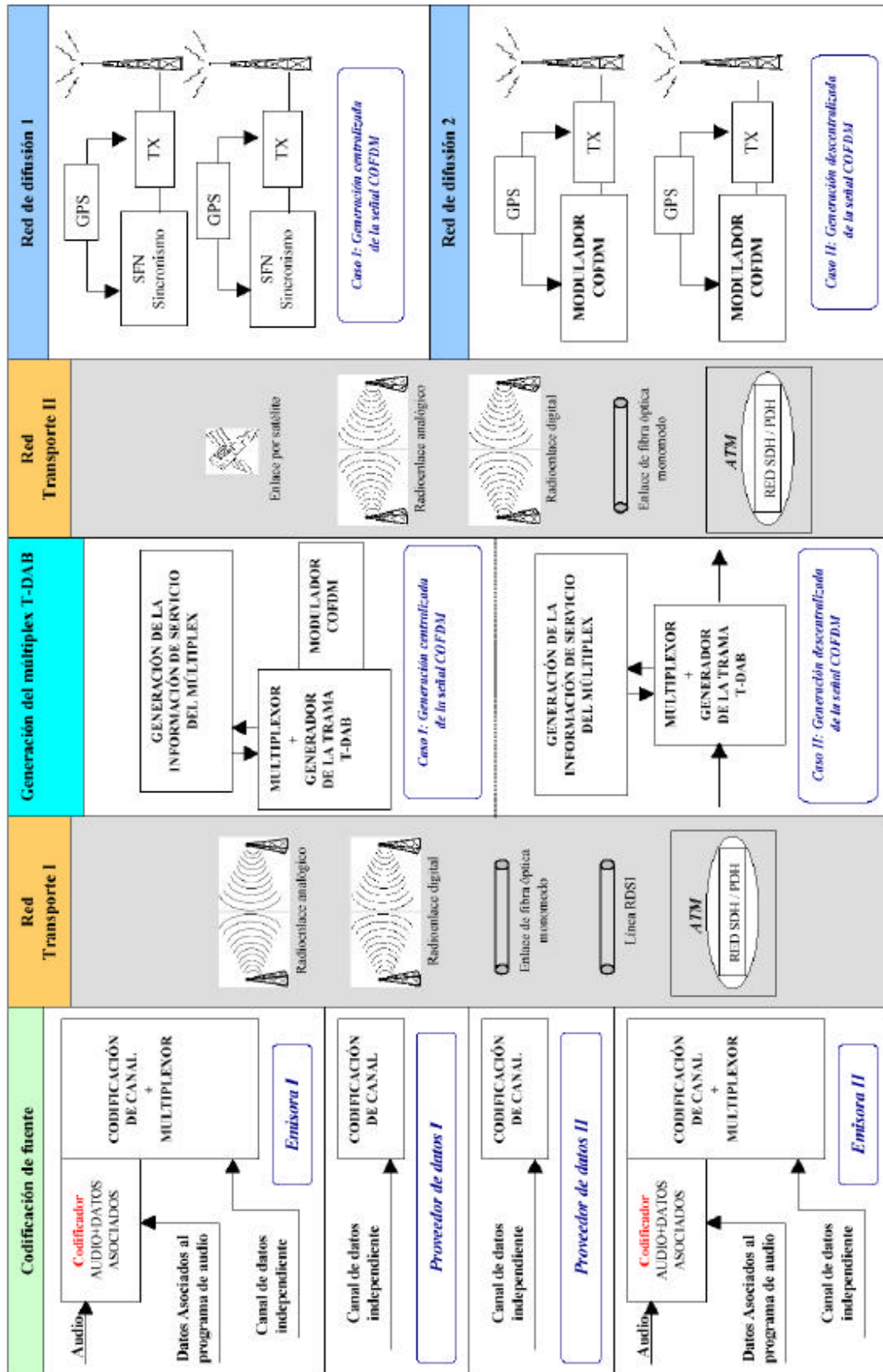


Fig. 4.5. Esquema general simplificado de una red de difusión T-DAB

4.4.4 Posibles configuraciones de redes terrestres.

4.4.4.1 Redes SFN centralizadas y redes descentralizadas.

Las características propias del sistema T-DAB permiten la creación de redes de difusión formadas por varios repetidores que emitan todos la misma señal en la misma frecuencia (redes SFN). La configuración de una red SFN admite dos posibilidades, en función de si la información que llega a las estaciones transmisoras es la trama de transmisión T-DAB, o bien la señal T-DAB modulada en OFDM.

En el primer caso, cada centro transmisor debe disponer de un modulador OFDM, dando lugar a lo que se denomina “modulación descentralizada”, mientras que en segundo caso sólo existe un modulador OFDM para toda la red de transmisores, a lo cual se denomina “modulación centralizada”. A continuación se comentan las diferencias entre ambas posibilidades [32].

4.4.4.1.1 Red SFN con modulación descentralizada.

Los servicios de audio y datos son enviados por la red de transporte de servicios hasta el punto donde se realiza su multiplexado, formando la trama de transmisión T-DAB.

Esta trama de transmisión es enviada a la red de transporte, la cual se encarga de distribuirla a todos los transmisores que constituyen la red. Tanto la red de transporte de servicios, como la red de transporte de las tramas de transmisión T-DAB, pueden utilizar sistemas de cable, terrestre y/o satélite como se muestra en la *fig. 4.6*.

En cada uno de los transmisores se recibe la misma trama T-DAB y se modula utilizando OFDM, para ser posteriormente radiada en el canal de radiofrecuencia asignado. Esta configuración de red SFN implica la necesidad de disponer de un equipo modulador OFDM en cada estación transmisora de la red. Para el correcto funcionamiento de la red SFN es preciso que todos los transmisores estén sincronizados, de modo que transmitan el mismo símbolo OFDM en el mismo instante de tiempo. Esto se realiza utilizando la información de sincronismo incluida dentro de la configuración de la trama T-DAB [30].

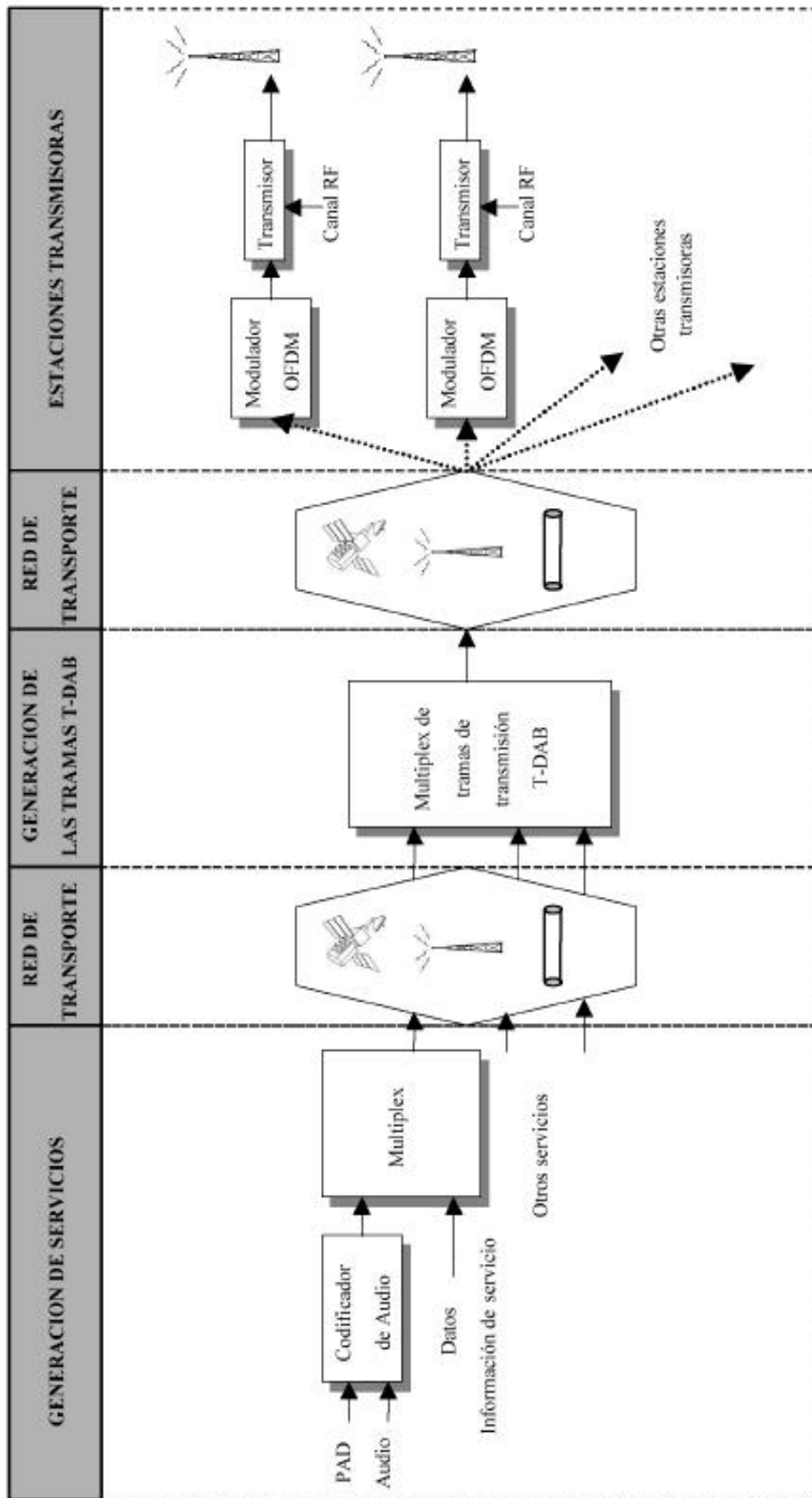


Fig 4.6 Esquema de una red SFN descentralizada.

4.4.4.1.2 Red SFN con modulación centralizada.

Los servicios de audio y datos son enviados por la red de transporte de servicios hasta el punto donde se realiza su multiplexado, formando la trama de transmisión T-DAB.

En este tipo de redes la trama T-DAB es inmediatamente modulada en OFDM, de forma que la señal enviada a los transmisores por la red de transporte es la señal TDAB modulada. Tanto la red de transporte de servicios, como la red de transporte de la señal T-DAB modulada, pueden utilizar sistemas de cable, terrestre y/o satélite. Cada estación transmisora recibe la señal T-DAB modulada y la sitúa en el canal de radiofrecuencia asignado.

Esta configuración de red aporta la ventaja de que sólo es necesario utilizar un modulador OFDM para toda la red, independientemente del número de transmisores que constituyan la misma como se muestra en la *fig. 4.7*.

En este caso también es necesario establecer la sincronización temporal de todos los transmisores de la red SFN. Sin embargo, la información de sincronismo va incorporada dentro de la trama de transmisión T-DAB, a la cual no se tiene acceso sobre la señal ya modulada en OFDM. Por ello, la sincronización de este tipo de redes se realiza retardando la señal T-DAB modulada que llega a cada transmisor, para compensar las diferencias de tiempo con la que llega la señal a los distintos transmisores [21].

4.4.4.2 Redes SFN con on-channel repeaters.

La combinación de utilizar una red de frecuencia única como “cuerpo central” de la distribución de la señal completada con repetidores co-canal que amplíen la cobertura tiene dos ventajas principales:

- La red puede contar con mayor separación entre transmisores.
- El coste global de la red resulta menor que el de las redes SFN.

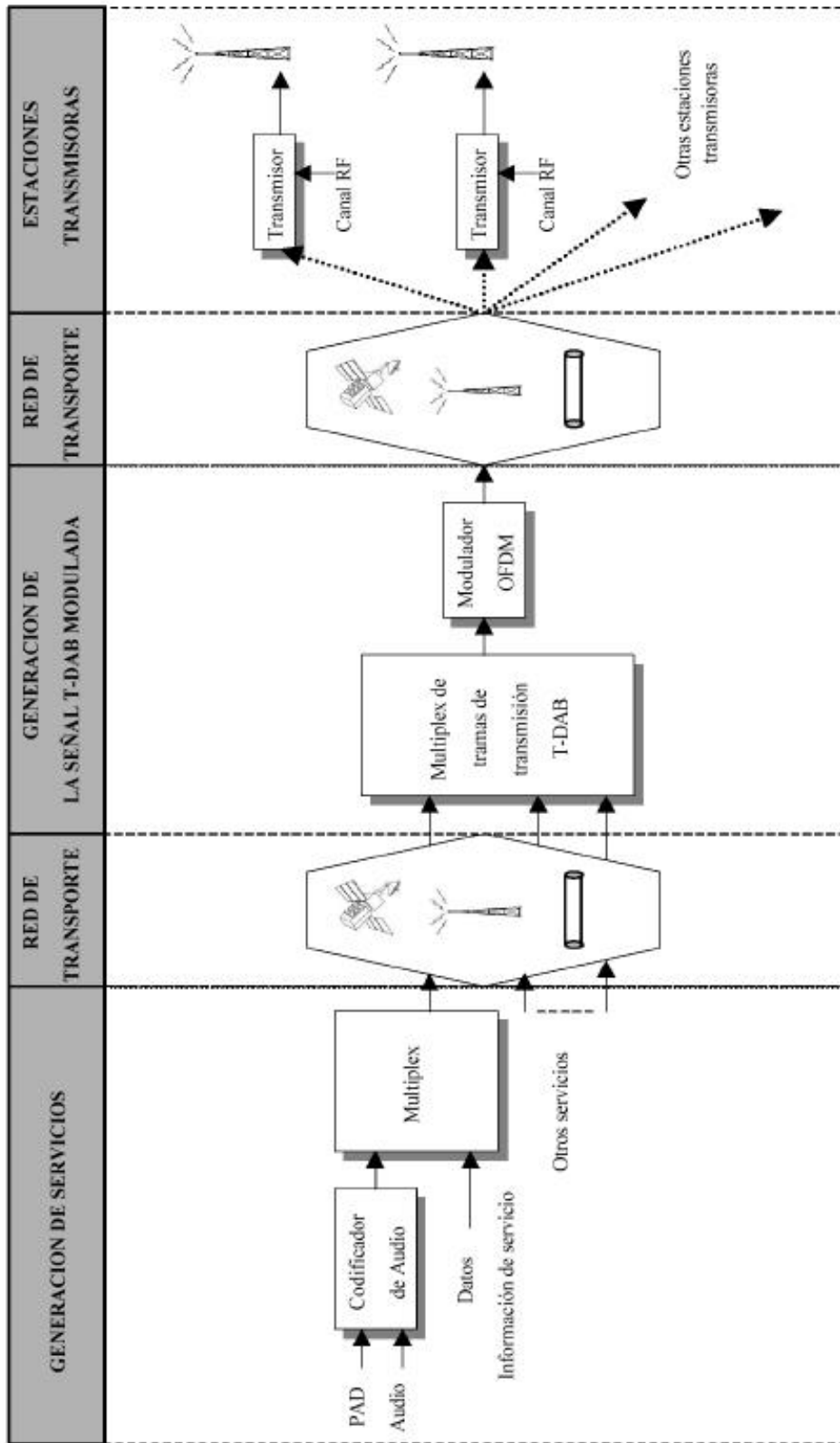


Fig. 4.7 Esquema de una red SFN centralizada.

4.4.4.3 In-band trunking.

Esta técnica consiste en instalar, entre un transmisor y un repetidor como muestra la *fig. 4.8*, un enlace en la misma frecuencia que la utilizada para la difusión del servicio DAB. Esta técnica ha sido sugerida por el Communications Research Centre de Canadá y se han realizado varias simulaciones y pruebas de campo que la confirman como una alternativa [18].

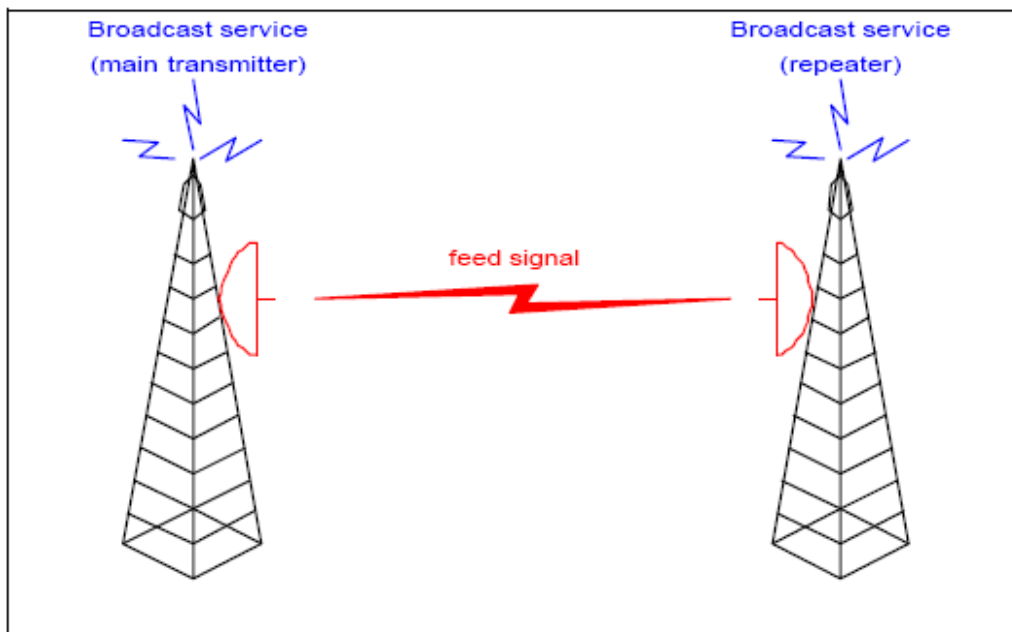


Fig. 4.8. In-band trunking.

Este método es similar a la utilización de repetidores co-canal en los siguientes aspectos:

- No se requiere ningún medio de distribución de la señal a los centros transmisores (fibra óptica, radioenlaces, etc.). En consecuencia, el coste de instalación y funcionamiento de la red se reduce.
- No es posible la regeneración de la señal en los repetidores, ya que el retardo requerido para la regeneración excedería los requisitos de cobertura de la red.

Las diferencias con respecto a la utilización de repetidores co-canal son las siguientes:

- El nivel de señal recibido en el repetidor es mayor, gracias a la utilización de antenas de mayor ganancia y mayor aislamiento.

- La señal transmitida por el radioenlace puede llevar cierto adelanto respecto a la señal difundida, lo que proporciona una gran flexibilidad a la sincronización de la red [33].

4.4.4.4 Comparativa.

En las figuras 4.9 y 4.10 se muestran una comparativa del equipamiento necesario para las diferentes técnicas.

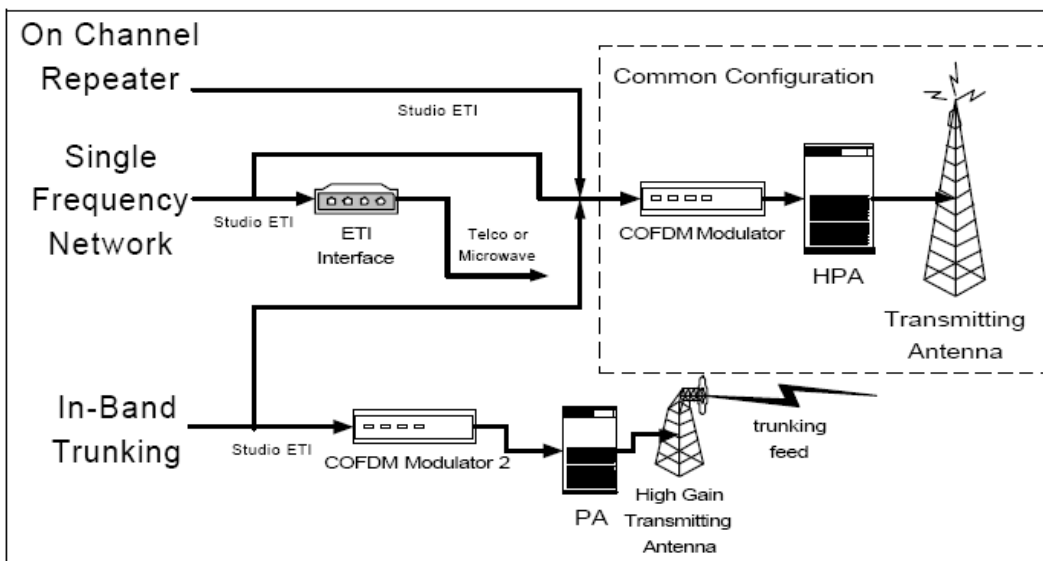


Fig. 4.9 Equipamiento necesario en el transmisor principal.

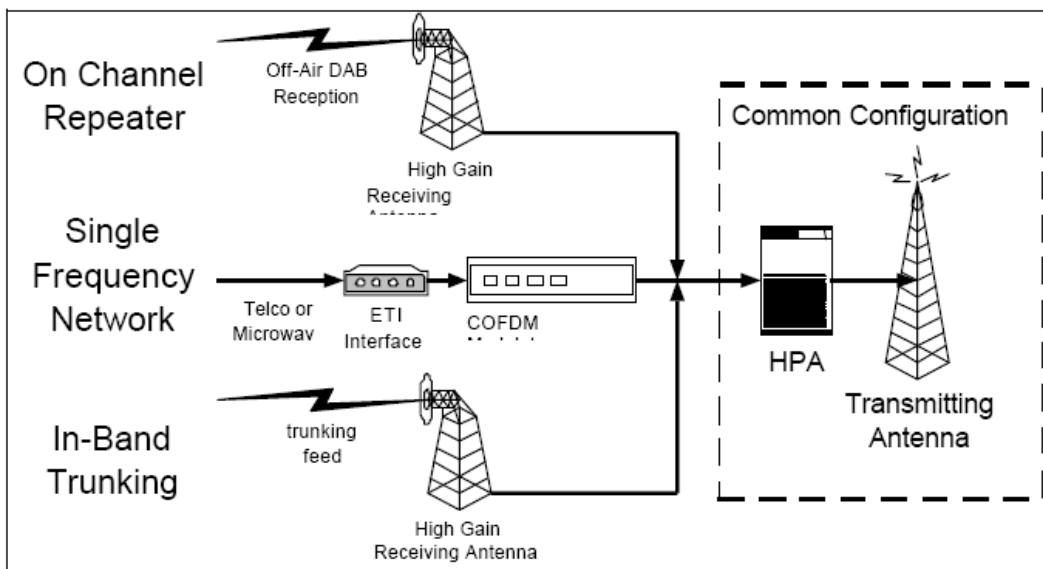


Fig. 4.10. Equipamiento necesario en un transmisor no principal (repetidor o transmisor adyacente de una SFN).

4.5 Bandas de frecuencia.

Un bloque de frecuencia de 1,5 MHz es suficiente para permitir la transmisión de hasta 6 programas de audio de alta calidad que pueden ir dentro del múltiplex de la señal DAB. La utilización de redes de frecuencia única posibilita un aprovechamiento espectral muy grande, gracias a la reutilización de la misma frecuencia por parte de todos los transmisores utilizados para ofrecer la cobertura deseada.

En general, todos los rangos de frecuencias de VHF y UHF son, en un principio y desde un punto de vista técnico, adecuados para las emisiones de radio digital terrestre (T-DAB). El problema que se plantea es que estas frecuencias son utilizadas por señales analógicas de radio (FM), de televisión y por otros servicios. Esto supone la necesidad de replantear las asignaciones de frecuencias de los distintos servicios existentes para permitir la introducción del DAB [33].

Para solucionar el problema de la saturación espectral de las bandas VHF/UHF, en la Conferencia Mundial Administrativa de Radiocomunicaciones, celebrada en 1992 en Málaga-Torremolinos, (WARC-92) se estableció la banda de frecuencias entre 1452MHz y 1492MHz (Banda-L) para los servicios de radiodifusión sonora digital por satélite (S-DAB) y para servicios complementarios de radiodifusión sonora digital terrestre (T-DAB) para la gran mayoría de los países entre ellos México (para Estados Unidos, India, Rusia y algunos países de Asia, se establecieron las bandas de 1,5 GHz, 2,3GHz y 2,6GHz). En esta misma conferencia se definieron las frecuencias para la radiodifusión sonora digital en la banda de VHF [28].

4.6 El sistema DAB en banda-L.

En la conferencia WARC-92, en Torremolinos, la Banda-L (1452 – 1492 MHz) fue designada para las emisiones de radio digital vía satélite, con emisiones complementarias terrestres. En esta banda se acomodaron 23 bloques DAB. Sin embargo, en muchos países esta banda no pudo ser utilizada para servicios DAB hasta el 2007, ya que estaba ocupada por otros servicios, tales como servicios fijos punto-punto.

En la conferencia europea WIESBADEN-95, se decidió utilizar la parte más baja de esta banda (15,5MHz) para la radiodifusión sonora digital terrestre (9 bloques LA-LI), reservando el resto de la banda (24,5MHz) para la radiodifusión sonora digital vía satélite (14 bloques LJ-LW).

Sin embargo, se ha planteando la posibilidad de asignar 7 bloques más de frecuencia (12MHz) para las emisiones T-DAB, dentro de la Banda-L (LJ-LP) [14]. Este planteamiento es debido a la consideración de que los 9 bloques designados actualmente resultan escasos para dar cabida a todos los servicios DAB comerciales futuros. Por otra parte, se considera que es poco provechoso reservar los 14 bloques para las emisiones S-DAB, teniendo en cuenta que parece existir muy poco o nulo interés comercial en futuros servicios S-DAB con áreas de cobertura multi-país.

Por el contrario, también es cierto que esta reasignación de los bloques S-DAB en bloques T-DAB, puede suponer que el futuro desarrollo de sistemas satélite con sólo siete bloques impida, llegado el caso, una competencia de mercado que haga inviable su explotación comercial, con el riesgo de crear una situación de monopolio en los servicios S-DAB ofrecidos [24].

4.6.1 Canales de frecuencia asignados al DAB en banda-L.

La canalización frecuencial de los nueve bloques en Banda-L destinados a los servicios terrestres de DAB, según se estableció en WIESBADEN-95, queda tal y como se presenta en la *tabla 4.1* y en la *fig. 4.11* [18].

Tabla 4.1 Canalización frecuencial de los bloques T-DAB en la banda-L.

| Nombre del bloque | Frecuencia central (MHz) | Rango de frecuencias (MHz) |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|
| LA | 1452,960 | 1452,192 – 1453,728 |
| LB | 1454,672 | 1453,904 – 1455,440 |
| LC | 1456,384 | 1455,616 – 1457,152 |
| LD | 1458,096 | 1457,328 – 1458,864 |
| LE | 1459,808 | 1459,040 – 1460,576 |
| LF | 1461,520 | 1460,752 – 1462,288 |
| LG | 1463,232 | 1462,464 – 1464,000 |
| LH | 1464,944 | 1464,176 – 1465,712 |
| LI | 1466,656 | 1465,888 – 1467,424 |

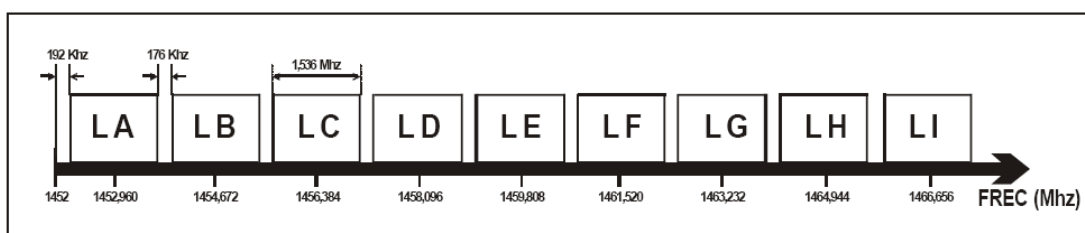


Fig 4.11. Disposición de los bloques T-DAB en la Banda-L.

4.6.2 Características generales.

Las emisiones de servicios T-DAB en Banda-L se caracterizan por ser emisiones terrestres de radio digital en frecuencias en torno a 1,5 GHz. El uso de esta banda en vez de utilizar las frecuencias asignadas de la Banda-III, presenta la ventaja de que no es necesaria la desaparición o migración de los servicios comerciales, gubernamentales y privados ya existentes en las frecuencias de VHF.

Por otra parte, al estar la Banda-L destinada también a los servicios de radiodifusión sonora digital por satélite, es posible utilizar un mismo equipo para la recepción de las emisiones T-DAB y las de S-DAB, facilitando la futura introducción de los nuevos servicios de satélite de cara a los usuarios. El disponer de un gran mercado de receptores ya existente, favorece el éxito comercial de las redes S-DAB que se diseñen en la parte alta de la Banda-L (1467,5 - 1492 MHz), y concebidas como transmisiones satélite, complementadas con

repetidores terrestres de baja potencia para dar cobertura a las zonas de deficiente recepción satélite [20].

La filosofía de las emisiones terrestres en esta banda es muy ventajosa para países de gran extensión, como Canadá, en los que la mayor parte de la población se concentra en ciudades muy pobladas y separadas entre sí grandes distancias por carreteras y autopistas. Esta red vial generalmente no suele estar bien cubierta por los servicios de radiodifusión terrestre. Esto hace que las transmisiones vía satélite sean la opción más viable para poder proporcionar la cobertura adecuada en las vías de comunicación entre ciudades, al tiempo que se cubren también las áreas dispersas de población.

Mientras las emisoras públicas centran su interés en proporcionar la cobertura nacional, o la mayor extensión posible, las emisoras privadas tienen centrado su objetivo en la cobertura de las zonas con mayor índice de población. La compatibilidad de estas dos filosofías empresariales, junto con la realidad de una implantación gradual y progresiva, hacen que las emisiones terrestres en Banda-L sean las más viables en este tipo de países.

El gran inconveniente que ha acarreado históricamente la Banda-L, ha sido el no disponer de equipos receptores de DAB. El desarrollo de las distintas generaciones de prototipos receptores ha ido paralelo al de los proyectos pilotos de investigación DAB.

La mayor complejidad de la Banda-L, respecto a la recepción de la Banda-III, ha retrasado la aparición de receptores a 1,5 GHz a nivel comercial. Sin embargo, en la actualidad ya existe en el mercado una gran variedad de equipos, tanto para vehículos, como para equipos HI-FI e incluso para ordenadores personales [22].

Desde un punto de vista técnico, las transmisiones en Banda-L tienen el inconveniente de sufrir mayor atenuación en espacio libre que las emisiones en Banda-III. Sin embargo, presenta como ventaja que el ruido humano generado, tanto en entornos urbanos, como en entornos suburbanos, es 25 dB más bajo en la Banda-L con respecto al generado en la Banda-III.

Dentro de los 4 modos posibles de transmisión para DAB, se han elegido los modos II y IV para las emisiones en Banda-L [24].

Tabla 4.2 Modos de transmisión DAB para la Banda-L

| Modo de transmisión | Modo I | Modo-IV | Modo-II | Modo.III |
|----------------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Numero de portadoras | 1536 | 768 | 384 | 192 |
| Distancia entre portadoras (Khz) | 1 | 2 | 4 | 8 |
| Intervalo de guarda | 246 | 123 | 62 | 31 |

Como puede observarse en la tabla IV, el Modo-I, a pesar de tener el intervalo de guarda más grande (246 μ s), permitiendo así un mayor espaciado entre repetidores de una red SFN, tiene la menor separación entre portadoras (1 KHz). Esta pequeña separación limita seriamente la máxima velocidad posible que puede alcanzar un receptor móvil como consecuencia de la degradación de señal producida por la dispersión frecuencial debida al efecto Doppler, cuando se trabaja a 1,5GHz.

Medidas de campo y simulaciones por ordenador han demostrado que el sistema DAB, funcionando en Modo-I a 1,5 GHz proporciona una recepción adecuada para velocidades de vehículos hasta 40 Km/h en el caso de entornos urbanos, suburbanos y zonas boscosas, y velocidades hasta 60 Km/h en entornos rurales [29].

Evidentemente éstas velocidades máximas no son aceptables para un vehículo que quiera recibir la señal DAB en movimiento (aunque puede que en ciertas circunstancias pudieran alcanzarse velocidades mayores sin que la degradación de señal fuera percibida).

El Modo-III es el que mejor se comporta respecto al efecto Doppler debido a que es el que mayor separación frecuencial tiene entre portadoras. Por ello, la frecuencia máxima de trabajo se ha establecido hasta 3 GHz para recepción móvil. Sin embargo, su reducido intervalo de guarda lo hace prácticamente inviable para intentar dar cobertura terrestre a una zona grande, debido a que la separación máxima entre transmisores es muy reducida y esto obliga a colocar muchos y muy cercanos entre sí [29].

Además, debido a que en Banda-L los niveles de señal mínimos necesarios son mayores que en la Banda-III, se obliga a transmitir con mayor potencia y esto provoca elevados niveles de interferencia entre los repetidores de una red SFN densa.

Debido a estas características mencionadas, este modo está pensado principalmente para los servicios S-DAB, con posibles reemisores terrestres para determinadas zonas de deficiente cobertura por satélite.

De esta forma, los modos idóneos para el diseño de redes DAB terrestres en la Banda-L, son el Modo-II y el Modo-IV [31].

El Modo-II adolece de los mismos problemas que el Modo-III, en cuanto a la interferencia producida entre los repetidores de la red SFN. Sin embargo, su mayor intervalo de guarda permite colocar los transmisores más separados entre sí, con lo se llega a una solución válida de cara al diseño de redes SFN de tamaño medio. En cuanto a la capacidad de soportar la dispersión frecuencial por efecto Doppler, se ha comprobado que el modo II presenta una buena robustez para receptores con velocidades hasta 150 Km/h .

El Modo-IV fue añadido posteriormente a la norma de la ETSI tras varias campañas de medidas de campo y de laboratorio desarrolladas en Canadá en 1995 y 1996.

Surge como un modo intermedio entre el Modo-I y el Modo-II, buscando mejorar el deficiente comportamiento del Modo-I frente al efecto Doppler a 1,5 GHz, con una mayor separación entre portadoras. Al mismo tiempo, se aumenta el intervalo de guarda del Modo-II permitiendo, así, poder diseñar redes SFN en Banda-L con mayor separación entre transmisores. Puede observarse en la tabla IV que sus parámetros están situados entre los del Modo-I y el Modo-II, por lo que también se le denomina "Modo-1.5" .

El principal inconveniente del Modo-IV viene motivado por ser menos robusto que el Modo-II frente al efecto Doppler, debido a que la separación entre portadoras COFDM es menor. Las velocidades máximas válidas para recepción móvil se sitúan en los 80 Km/h para áreas urbanas y 120 Km/h para áreas rurales. En las situaciones favorables de recepción directa desde el repetidor y con ecos escasos o de bajo nivel, el efecto Doppler no es tan crítico

por lo que también es posible llegar a utilizar el Modo-IV, en autopistas de entorno urbano, con velocidades de hasta 120 Km/h [32].

Comparando el Modo-II y el Modo-IV frente al diseño de redes en frecuencia única de servicios T-DAB en Banda-L, los estudios realizados, demuestran que para coberturas urbanas de ciudades pequeñas o medianas, como Vancouver, ambos modos presentan una complejidad de red similar, con el mismo número de transmisores necesarios. En estos casos es mejor usar el Modo-II, frente al Modo-IV debido a que es más robusto al efecto Doppler, permitiendo mayor velocidad del vehículo receptor. Sin embargo, para ciudades grandes como Toronto, el Modo-IV se presenta más adecuado ya que requiere menos transmisores y además proporciona un nivel más bajo de interferencia entre repetidores de la red, debido a la mayor separación entre ellos.

Como el Modo-IV es el óptimo para cubrir con SFN áreas grandes, debido a la mayor separación permitida entre sus transmisores, todos los esfuerzos se centran en buscar métodos que intenten reducir la dispersión frecuencial provocada por el efecto Doppler, haciendo a los receptores más robustos frente a esta degradación, que limita su funcionamiento a velocidades altas.

México ha elegido la Banda-L para el inicio de sus emisiones experimentales, tanto en redes DAB terrestres, como para las pruebas de transmisión vía satélite. En 1993 se realizó en la capital la primera prueba experimental de DAB en Banda-L y en julio de 1995 se realizaron pruebas S- DAB usando el satélite 'Solidaridad 2' [28].

Capítulo 5

Modelo de un transmisor y un receptor DAB

Introducción

Este capítulo explica el lado de radiodifusión de DAB sin mencionar sobre la emisión del envío de la señal a los diferentes lugares de transmisión de la red ya que se cubrió en el capítulo anterior. Las redes de transmisión DAB pueden tener cobertura nacional, regional o local. Dependiendo de los requerimientos financieros, geográficos y nacionales específicos, las frecuencias de banda L o banda III que se pueden usar para éstas redes.

DAB es diferente de los tradicionales sistemas de radiodifusión analógica como AM y FM. Por ejemplo DAB es un sistema de transmisión de banda ancha, transmitiendo muchos programas de audio y canales de datos sobre la misma frecuencia. Las bandas de frecuencia asignadas para la radiodifusión DAB son diferentes de las tradicionales bandas de radiodifusión y están separados por casi una década. El transporte de la información, audio y datos también emplea nuevos conceptos como compresión de audio. Por lo tanto nuevos conceptos de receptor tuvieron que ser desarrollados.

Ya que el sistema DAB es bastante complejo en términos de requerimientos computacionales, fue evidente que hubiera una necesidad de diseñar circuitos específicos y altamente integrados que cubren las partes analógicas y digitales del sistema. Estos circuitos integrados son los bloques de construcción para todos los tipos de receptores DAB y son base vital para soluciones costo efectivas.

De cualquier manera debido al rápido desarrollo en tecnología de computadoras, las PC's modernas son capaces de manejar la parte digital de un receptor DAB.

Hasta ahora, los varios tipos de receptores DAB se clasifican de la siguiente manera:

- *Autoesterios, receptores de solo audio o audio y datos*
- *Receptores de tarjeta de computadora. Algunas de estas soluciones están completamente basadas en hardware, donde otras implementaciones decodifican la parte digital en software en la PC*
- *Receptores de casa que incluyen sintonizadores Hi-fi y radios de cocina.*
- *Receptores portátiles.*
- *Receptores para monitorear la red.*

5.1 Transmisores DAB.

5.1.1 Aspectos generales.

La *fig. 5.1* se muestra un diagrama de bloques de un transmisor DAB. Cada transmisor consiste de un número de bloques funcionales los cuales serán explicados mas adelante. La señal de salida del conjunto multiplexor es entregada al sitio transmisor vía red de distribución DAB. En la entrada del transmisor la señal es protegida y un retardo preciso es insertado para sincronizar en tiempo la SFN. Después la codificación COFDM de la señal de salida de banda base del codificador COFDM puede ser sujeta para más tratamiento de la señal para pre-distorsión no lineal o la manipulación de factor de cresta antes de que sea convertido de digital a analógico. Después de la conversión al dominio analógico la señal es reconvertida a la radiofrecuencia deseada final. Finalmente la señal de RF es amplificada y filtrada para realizar las máscaras de espectro relevantes antes de que sea irradiada [18].

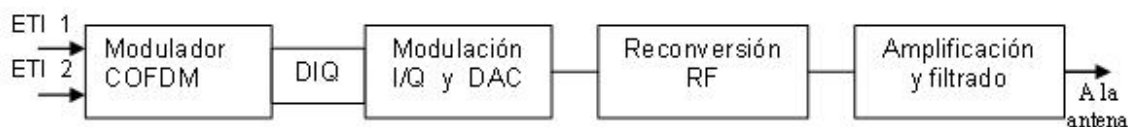


Fig 5.1 Diagrama de bloques de un trasmisor DAB

5.1.1.1 Bloques del procesamiento de señales de un Modulador COFDM.

El modulador COFDM por lo general contiene no solo la pura parte de la señal procesada del DAB, sino también una etapa de entrada para tratar las variantes diferentes de la señal ETI y para insertar el retraso de señal requerido. La señal de salida del modulador es o bien señal en banda base DIQ (digital en fase y cuadratura) de acuerdo a [EN 300 798] o una señal RF en una IF o RF conveniente si un modulador I/Q es incluido. Los bloques del procesamiento de la señal de un modulador COFDM son mostrados en la *fig. 5.2* y descritos en los siguientes párrafos.

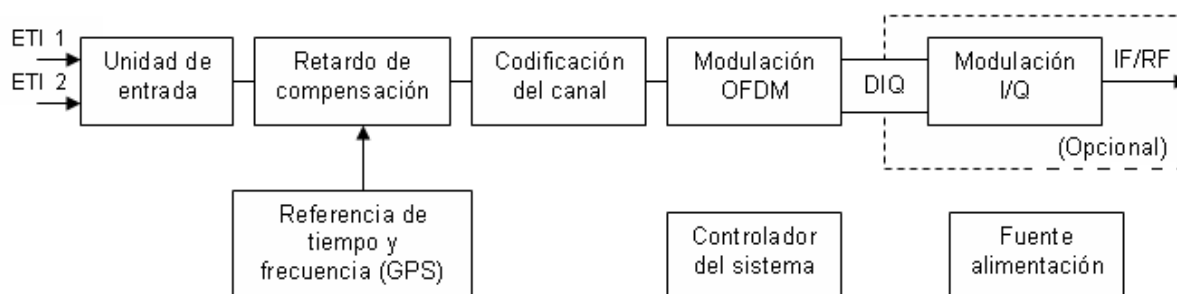


Fig 5.2 Diagrama de bloques de un modulador COFDM

La etapa de entrada tira de la señal ETI (ambos ETI(NI) y ETI (NA)) bajo el nivel ETI(LI) el nivel de la interfaz lógica, como es descrito en [EN 300 799]. Desde la señal ETI es transmitida en formato HDB3, esta es convertida también a nivel TTL en la etapa de entrada. Si el modulador tiene dos entradas para permitir redes con rutas de distribución redundante, ambas señales son monitoreadas para una señal de calidad en estas etapas del modulador y la selección de una o de dos señales de entrada para mayor procesamiento es realizado aquí [21].

En la sección de retardo de compensación la señal de entrada es retardada dentro de un rango de cero hasta a veces mas de un segundo, típicamente en pasos de 488 ns (488 ns están convenientemente disponibles en el sistema desde que estos están en el periodo de la señal ETI la cual es entregada en una taza de 2,048 Mbits/s). Para retardos de compensación dinámica, el time-stamp (tiempo de sello) de la ETI(NI) o la ETI(NA) es evaluado usando la señal 1 pps (Pulse per second o pulso por segundo) de un receptor GPS (Global Positioning System o sistema de posicionamiento global) como tiempo de referencia. La información para un retardo de compensación estático automático es transmitida en el MNSC (Multiplex network signalling channel) de la ETI. Este retardo es llamado "Retardo de offset del transmisor" y puede ser puesto para cada transmisor individualmente haciendo uso de una única clave del codificador. El usuario puede poner también un retardo ajustable separadamente para cada entrada la cual es referenciada como un retardo de compensación manual. Las combinaciones de los diferentes métodos de retardos de compensación son posibles.

El bloque de codificación del canal realiza toda la codificación necesaria para lograr un alto nivel de robustez de la señal y para permitir la corrección de errores en caso de una mala

transmisión. La dispersión de la energía, la codificación convolucional, EL tiempo de intercalado del MSC(main service channel), la multiplexación del MSC, la multiplexación de la trama de transmisión y el intercalado de la frecuencia, de acuerdo a la [EN 300 400] son realizados en este bloque.

En el bloque de la modulación OFDM, El flujo de bit de salida del bloque de codificación del canal, es mapeado sobre los símbolos DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), antes se realiza la pre-corrección $x/\sin x$ para la conversión digital a analógica. Finalmente, la IFFT (Inverse Fast Fourier Transformation o Transformada inversa de Fourier rápida) con la generación de un símbolo de referencia de fase, TTI (Transmitter Identification Information o Identificación de información del transmisor) y un intervalo de guarda son realizados en el generador de la señal en banda base DIQ.

La señal en banda base DIQ puede ser usada para permitir mayor procesamiento de la señal como pre-corrección no-lineal, o manipulación del factor de cresta. Para completar el modulador COFDM, un controlador del sistema y una fuente de alimentación son necesarios y un modulador I/Q puede ser incorporado [25].

5.1.1.2 Conversión digital analógica.

La salida del procesador digital, y por lo tanto la entrada del procesador analógico en el transmisor, es nominalmente la señal DIQ definida en [EN 300 798]. Estos estándares especifican una resolución para las señales I y Q de 8 bits, y una relación “clip to RMS” para estas señales de 12db. Esta especificación está destinada para permitir secciones digitales y analógicas de diferentes fabricantes para trabajar juntos. Sin embargo, muchos fabricantes suministran ambas secciones, e internamente pueden usar ligeramente diferentes configuraciones (ejemplo: alta resolución para reducir la cuantificación del ruido de piso, o una diferente razón clip to RMS).

El ejemplo del transmisor en la *fig. 5.3* muestra cadenas individuales en banda base I y Q, cada una consiste en un DAC y un filtro en banda base, seguido por una conversión para una frecuencia final, amplificación y un filtro pasa bandas.

En este arreglo esto es importante que los DACs (Digital to analogue converters o convertidores digitales a analógicos), los filtros y los caminos de conversión para las señales I y Q, estén muy estrechamente emparejados, en amplitud y fase, a través del ancho de banda de las señales en banda base I y Q. Ningún desequilibrio resultara en distorsión de la señal final RF, resultando en componentes en banda adicionales que aumente el ruido de piso en banda.

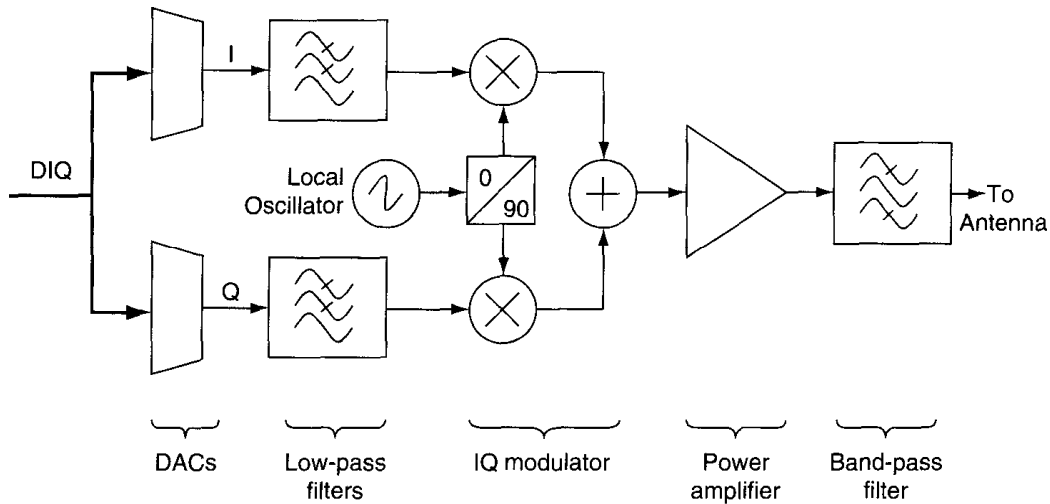


Fig 5.3 Ejemplo de un diagrama de bloques de un transmisor DAB con una entrada DIQ en banda base.

Más consideraciones incluyen la fase exacta del in-phase y la cuadratura local del oscilador de señales y la linealidad de los mezcladores de conversión. El bajo nivel de avance del oscilador local, en la frecuencia central de una señal DAB, puede ser tolerada porque esta posición de portadora no esta modulada.

Implementaciones más tempranas de transmisores DAB usaron este enfoque, y con alineación cuidadosa muy buenos resultados pueden ser logrados. Una de las ventajas de este enfoque es que los transmisores en banda III pueden ser implementados por una conversión simple para la frecuencia final, evitar la necesidad de IFs que requieren filtros y más conversiones.

Una técnica alternativa, en la cual la conversión a una IF baja (normalmente unos pocos MHz) es realizada en el dominio digital y se muestra en la fig. 5.4. Es también común evitar la necesidad de DACs y filtros estrechamente acompañados. Además se puede realizar una cuadratura del oscilador local (LO) altamente exacta, y eliminar la brecha del LO, (Aunque este

no es el mayor problema para el DAB). Sin embargo, es requerida más conversión en este caso [20].

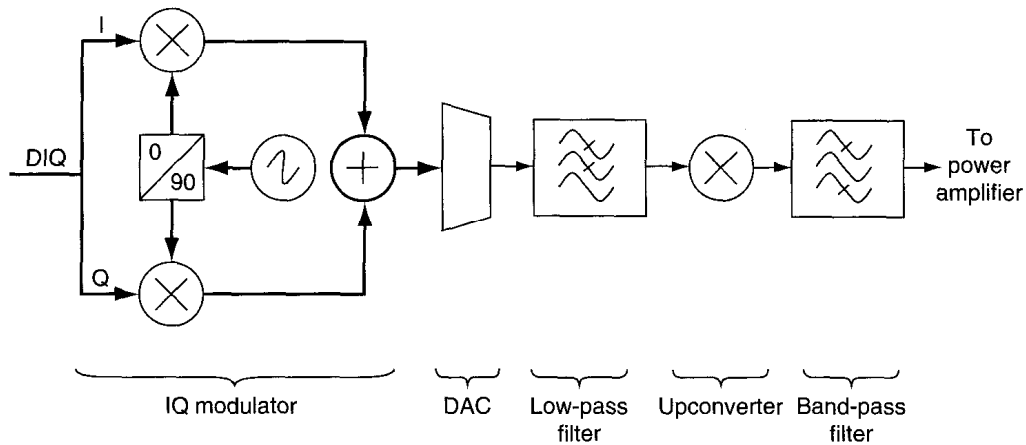


Fig. 5.4 Diagrama de bloques de un transmisor DAB usando una IF baja

Un factor más que debe ser tomado en cuenta es la pureza espectral en los osciladores usados en el transmisor, más comúnmente expresada como una sola banda lateral de ruido de fase (O “ruido de fase” para corta). Los sistemas OFDM son tolerantes de ruido de fase para la misma medida, pero más allá ciertos límites sufren de efectos adversos.

Este primer efecto es principalmente debido al ruido de fase del oscilador en compensación de frecuencia igual, o mayor que, los espacios entre portadoras de sistema OFDM. Esta contribución para el ruido de fase causa fugas de las portadoras en otras. Las portadoras ortogonales no son realmente las más largas, y causa una pequeña cantidad de interferencia en la otra. Este fenómeno es por lo tanto denominado frecuentemente “interferencia entre portadoras”.

El segundo efecto es principalmente debido al ruido de fase del oscilador en una frecuencia de compensación menor que el espacio entre portadoras. Porque los datos son llevados por cambios de fase entre símbolos sucesivos, El ruido de fase causa una reducción en la relación señal a ruido inherente. Este efecto es frecuentemente denominado “Error de fase común”, porque afecta a todas las portadoras igualmente.

Los efectos de ruido de fase del oscilador en los sistemas OFDM pueden ser analizados en detalle por las características individuales del oscilador usando funciones suplementarias (ejemplo [Stott, 1996]), pero para propósitos prácticos, el error de fase común es normalmente el efecto dominante en los sistemas DAB. La buena práctica de la ingeniería requiere que la degradación de la señal a ruido debido al transmisor de este efecto este minimizada, y una regla común de pulgar es que el ruido de fase no debe ser mayor que -60 dBc/Hz en una compensación de 25% del espacio entre portadoras [TR 101496] [23].

5.1.1.3 Conversión RF.

Como se ha señalado anteriormente, la conversión es requerida si el in-phase y la señal en cuadratura son moduladas a una IF mas bien que la RF final. Esto aplica para algunas implementaciones de de transmisores en banda III, Y la mayoría, si no todas las implementaciones en banda L. La mayoría de las consideraciones discutidas anteriormente aplica igualmente a los procesos de conversión, incluyendo mezcladores lineales, pureza espectral de los osciladores, y respuesta en frecuencia de los filtros pasa bandas usados para eliminar la brecha del LO y productos de imagen [27].

5.1.1.4 Amplificación y filtrado.

Debido a que COFDM es un sistema multipotadoras, una causa importante de la distorsión de la señal es un amplificador no lineal. Este causa intermodulacion entre las portadoras, dando lugar a productos RF ambos dentro del mismo ancho de banda de la señal COFDM, y también en canales adyacentes.

La diferencia entre la densidad espectral de la señal COFDM y los productos de intermodulacion fuera de banda es frecuentemente referida como "altura de hombro" (En la *fig. 5.5*, por ejemplo, la distorsión de la señal debido a la potencia amplificada no lineal ha resultado en una altura de hombro de 26 dB). El control de productos fuera de banda, es importante, porque su nivel afecta el rendimiento de otras señales en el canal adyacente.

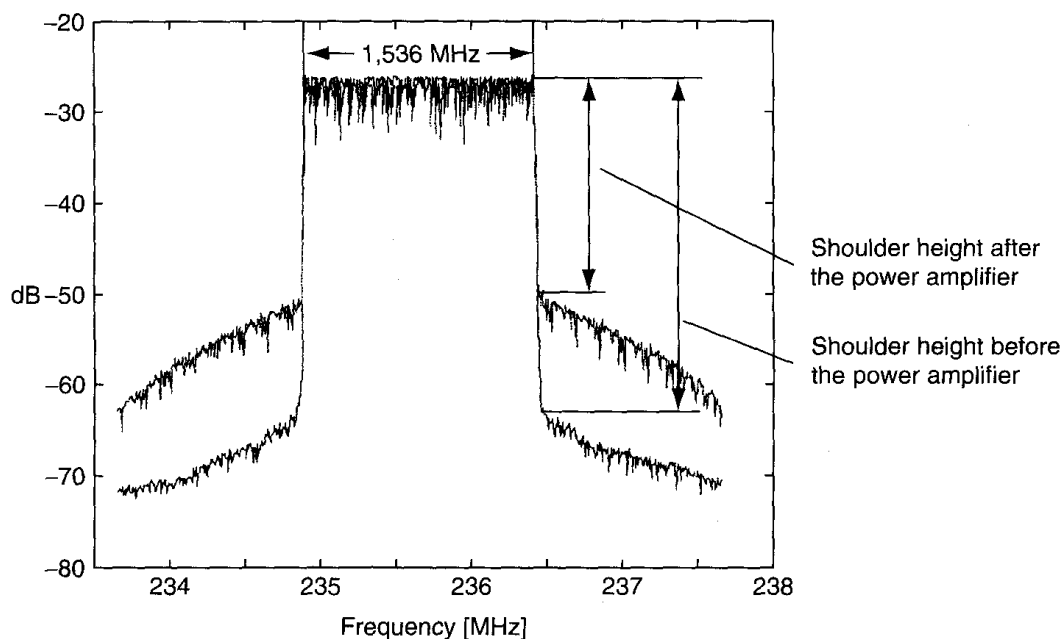


Fig. 5.5 Espectro de una señal DAB con un amplificador no lineal

Los productos de intermodulación en banda son ocultados por la misma señal COFDM, pero su nivel está típicamente alrededor de 3 dB más alto que la altura de hombro de los productos fuera de banda inmediatamente adyacente al conjunto. Estos productos limitan el rendimiento de la transmisión DAB, porque ellos representan un “ruido de piso” que no puede ser eliminado en el receptor. En consecuencia, los transmisores son diseñados para garantizar que el “piso” en banda esté suficientemente bajo que este impacto sobre el rendimiento del sistema sea mínimo.

Habiendo elegido el nivel aceptable de “piso” en banda, un nivel similar de productos fuera de banda será generado. Sin embargo, garantizar el eficiente uso del espectro [EN 300 401] y otros estándares requiere un nivel mucho más bajo de emisión fuera de banda por el transmisor, y esto puede ser logrado solo por filtros externos pasa bandas. Los requerimientos de atenuación del filtro dependen sobre el nivel de la emisión fuera de banda en la salida del amplificador, y por lo tanto sobre la linealidad del amplificador y etapas anteriores. Como un resultado una de las mayores decisiones de diseño en un transmisor DAB es el trade-off entre el rendimiento del filtro y la linealidad del amplificador [32].

Los amplificadores más eficientes, tienden a ser altamente no lineales, y no es adecuado para el DAB. Inversamente, los amplificadores altamente lineales, tienden a ser ineficientes. La mayoría de los transmisores DAB son diseñados de modo que la potencia final del amplificador sea la dominante no lineal en el sistema, la cual lo permite ser tan eficiente como sea posible. Aun así, este amplificador requiere un “back-off” de varios decibels (por ejemplo, la potencia de salida de la señal DAB tiene varios decibels debajo de la potencia de salida saturada del amplificador cuando pasa una demodulación de la señal RF). Para amplificadores de estado sólido, el back-off esta entre los 6 y 8 decibels.

Los amplificadores operando en esta forma resultan en una altura de hombro de 25 a 30 decibels. A fin de satisfacer los requerimientos del espectro fuera de banda de [EN 300 401], se requieren filtros pasa bandas de alto orden (ejemplo, en banda III los filtros de octavo orden son comúnmente usados). Estos filtros son normalmente la causa dominante de los efectos de la frecuencia selectiva en el transmisor DAB, en términos de ambos, amplitud y fase (Aunque los filtros en banda base pueden también tener una influencia). Los efectos de fase en particular necesitan ser mantenidos dentro de límites aceptables. Si esto no se hace, el rendimiento del sistema DAB puede ser degradado (ejemplo, una gran propagación del retardo de grupo a través del conjunto puede reducir la utilidad del intervalo de guarda en el receptor).

Debido a las expensas de los filtros y amplificadores de alto poder, en años recientes se ha visto mucho interés en mejorar la eficiencia de los amplificadores DAB sin afectar el espectro adversamente. Las técnicas de pre-corrección analógicas, que han estado en uso en los transmisores de radiodifusión por muchos años, ahora están siendo remplazadas por técnicas mas sofisticadas tales como sistemas closed-loop y varios métodos pre-acondicionados o de pre-corrección adaptativa implementadas en gran medida en el domino digital en banda base. Una de las técnicas es aplicar pre-corrección no lineal a la señal para linealizar los amplificadores de potencia no lineales. Como resultado el “ruido de piso” en banda y las emisiones fuera de banda son reducidas, esta ultima dando mucho mejores “alturas de hombros” de la salida del espectro. Otra técnica es la manipulación del factor de cresta la cual puede ser usada para lograr significativamente una potencia de salida del transmisor más alta. Sin embargo, la manipulación del factor de cresta degrada el rendimiento del sistema en general debido a mayor distorsión de la señal. Este solo debe ser aplicado en combinación con técnicas de pre-corrección no lineal ya que mejoran el rendimiento general del sistema [28].

5.2 Arquitectura del receptor.

El diagrama de la *fig. 5.6* se muestra un receptor del sistema DAB, la señal recibida de la antena es procesada en frecuencia de radio (RF), posteriormente filtrada y mezclada a una frecuencia intermedia, el resultado es una señal digital, finalmente la señal es decodificada, la fuente codifica datos, audio así como servicios de información.

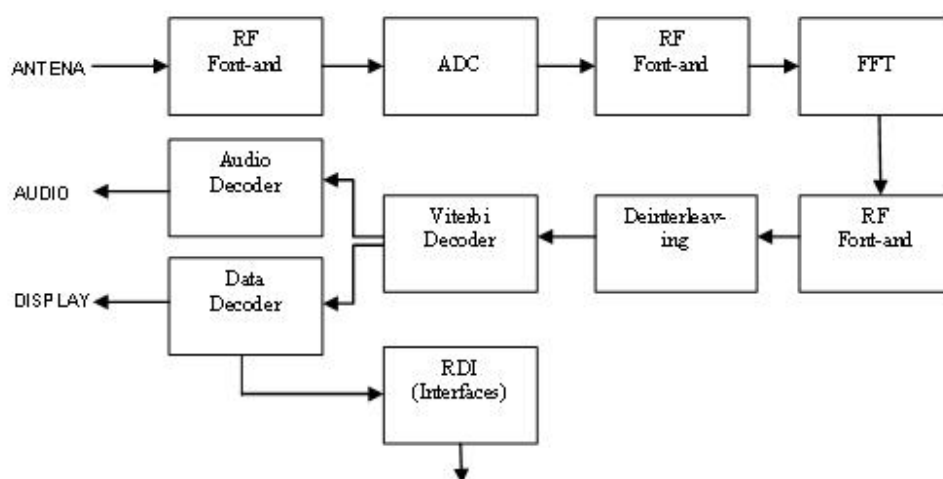


Fig 5.6 Diagrama a bloques de un receptor DAB.

5.2.1 Estructura de los bloques del receptor.

A continuación el funcionamiento de los bloques del diagrama:

5.2.1.1 RF FRONT-END.

El funcionamiento de este bloque es la de recibir la señal de radiofrecuencia para posteriormente procesarla en un convertidor analógico digital.

5.2.1.2 ADC (Conversor analógico digital).

Este bloque es el encargado de realizar la conversión de la señal (analógica-digital) el cual es un dispositivo electrónico capaz de convertir un voltaje determinado (de la señal recibida) en un valor binario, en otras palabras, este se encarga de transformar señales análogas a digitales [30].

5.2.1.3 DIGITAL FRONT-END.

Digital Front.end tiene dos tipos de interfaz para la banda base dependiendo del modo de red, así como del receptor seleccionado.

- Interfaz I/Q, esta arquitectura esta modulada en cuadratura, en la *fig. 5.7* el diagrama de su funcionamiento.

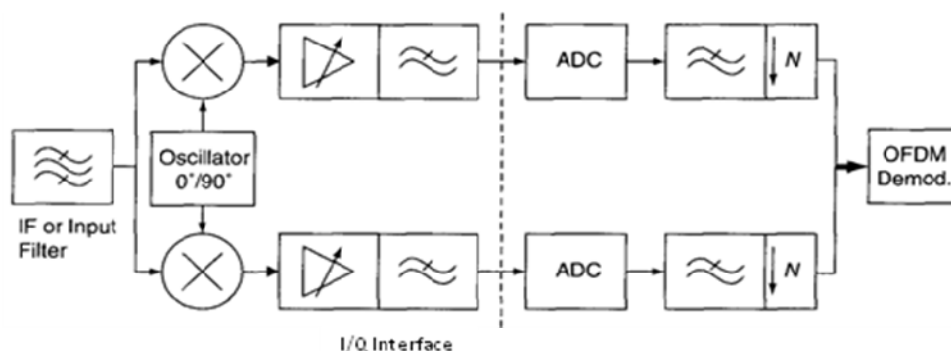


Fig. 5.7 Diagrama de la Interfaz I/Q

- Interfaz IF después de convertir la señal analógica digital la corrección de frecuencia es proporcionada por un multiplicador complejo dado por un oscilador numérico controlado, en la *fig. 5.8* el diagrama a bloques [30].

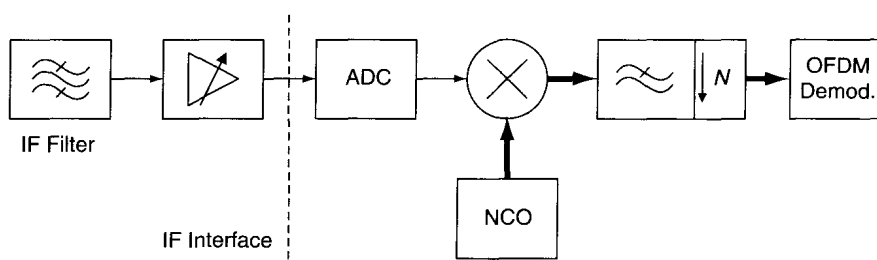


Fig. 5.8 Diagrama de la Interfaz IF.

5.2.1.4 FFT (Transformada Discreta de Fourier).

La demodulación de los símbolos OFDM esta dada por la FFT (Transformada Discreta de Fourier), calculando complejas amplitudes de portadoras del espectro DAB, estas amplitudes contienen información de los datos del modulador para la modulación de DQPSK. De acuerdo a

los diferentes modos de transmisión las transmisiones de FFT varían entre 256, 512, 1024 y 2048 portadoras.

5.2.1.5 Demodulación DQPSK.

La demodulación por desplazamiento diferencial de fase es la encargada de la modulación digital, donde la información binaria de la entrada esta compuesta por la diferencia entre las fases de dos elementos sucesivos de señalización. Con la demodulación DQPSK no es necesario recuperar la portadora de fase. En su reemplazo, un efecto de señalización recibe un retardo por un intervalo de frecuencia del elemento de señalización, y a continuación se compara con el siguiente elemento de señalización recibida. La diferencia entre la fase de los efectos de señalización determina la condición lógica de datos.

5.2.1.6 Proceso Deinterleaving.

Realiza el desentrelazado de los bits recibidos, de manera que se invierte el proceso realizado en transmisión como muestra la Fig. 5.9.

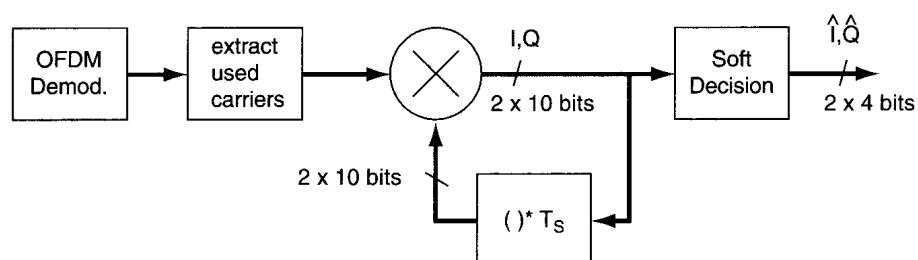


Fig. 5.9 Diagrama del proceso Deinterleaving.

5.2.1.7 Proceso Viterbi.

Este bloque sirve para eliminar errores debido a las distorsiones del canal, así como también codifica convolucionalmente. Este algoritmo construye una trama finita de todas las posibles secuencias de bits recibidas y mantiene una métrica acumulativa para cada camino en la trama. Cuando cada nuevo bits del canal es detectado, la métrica acumulada se actualiza en cada camino por medio de una tabla determinada por los coeficientes del generador de código. Después de un largo de truncamiento el decodificador selecciona el camino con la mejor métrica y entrega una decisión de bits.

5.2.1.8 Decodificador de Audio y Datos.

Describe unas especificaciones desarrolladas en software, hardware o una combinación de ambos, capaz de transformar un archivo con un flujo de datos (*stream*) o una señal. Los códecs pueden codificar el flujo o la señal (a menudo para la transmisión, el almacenaje o el cifrado) y recuperarlo o descifrarlo del mismo modo para la reproducción o la manipulación en un formato de display o audio, a continuación en forma de diagrama a bloques el decodificador en la *fig. 5.10* [22].

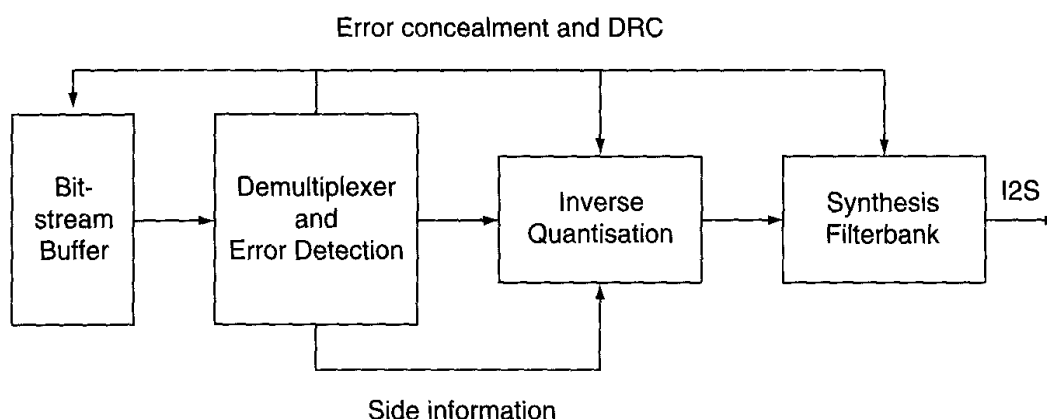


Fig. 5.10 Diagrama del decodificador de audio y datos.

5.3 Comparativa de la radio digital – analógica

El creciente desarrollo de tecnologías digitales le ha dado un nuevo enfoque a las comunicaciones electrónicas aportando grandes beneficios en comparación con los sistemas de transmisión analógica, la radio digital es un claro ejemplo de ello. La tabla 5.1 muestra una comparativa entre la radio digital y la radio analógica, la cual nos permite entender porque la radio digital se esta posicionando rápidamente como la radio de actualidad alrededor del mundo y porque la radio analógica se esta volviendo obsoleta y esta pronta a desaparecer.

Tabla 5.1 Tabla comparativa de la radio digital –analógica

| SERVICIOS OPERACIONALES | | |
|--|--|---|
| RADIO DIGITAL | RADIO ANALOGICA | OBSERVACIONES |
| Permite difundir sonido de alta calidad | Los usuarios no están satisfechos con la calidad que ofrece. | La calidad de audio que ofrece la radio digital es comparable a la de un CD |
| ----- | Los servicios que ofrece son limitados | Ya que la radio analógica es unimedia. |
| Envío de imágenes y textos a tableros electrónicos | ----- | La cual el receptor tiene una pantalla incorporada lo cual lo convierte en su sistema de transmisión multimedia |
| Permite incluir diferentes aplicaciones: | | |
| ❖ Letra de la canción | | |
| ❖ Autor del tema musical | ----- | ----- |
| ❖ Títulos musicales | | |
| ❖ Texto de las canciones en varios idiomas | | |
| Aplicaciones multimedia: | | |
| ❖ Posicionamiento global | | |
| ❖ Trafico de carreteras | ----- | La radio deja de ser unimedia (solo audio) |
| ❖ Estado del tiempo | | |
| ❖ Fecha y hora | | |
| Acceso condicional | ----- | Solo se emplea cuando existe información que debe de ser accesible por usuarios determinados |

CARACTERÍSTICAS TECNICAS

| RADIO DIGITAL | RADIO ANALOGICA | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Ancho de banda bajo | Ancho de banda elevado | Permitiendo la disminución de la utilización del ancho de banda |
| Aprovecha el espectro radioeléctrico de una manera mas eficiente | Saturación del espectro radioeléctrico | Ya que se pueden operar redes de frecuencia única |

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Permite realizar distintos procesos de codificación y compresión. | ----- | Lo que permite conseguir la disminución de su ancho de banda sin perder la calidad |
| La potencia de transmisión es menor | La potencia de transmisión mayor | Ya que los transmisores analógicos son mas robustos |
| Modulación OFDM | Modulación en amplitud y frecuencia | De esta forma se elimina el ruido en recepción. |
| Soluciona los problemas multirrayecto | ----- | Con esto se consigue una buena recepción móvil y portátil. |
| Elimina los problemas del efecto doppler | ----- | Con esto se consigue una buena recepción móvil y portátil. |
| Codificación MUSICAM | ----- | Tipo de codificación MPEG LAYER 2 |
| Funciona en cualquier parte del espectro radioeléctrico entre los 30MHz y 3GHz | Funciona entre los 0.3 MHz - 30 MHz | ----- |
| Su funcionamiento es en redes terrestres (T-DAB), por satélite (S-DAB) e híbridas (terrestre y satelital) | ----- | De esta forma se consigue seleccionar cualquier estación que este disponible. |
| Redes SFN (Frecuencia única) | Redes MFN | Las redes MFN irradian el mismo programa pero operan en diferentes frecuencias y las redes SFN operan en una sola frecuencia |

CONCLUSIONES.

La radio ha comenzado a abandonar sus tradicionales formas y modos de funcionamiento, está cambiando, se está reinventando, como en otras etapas de la historia de la radio, pero ahora con grandes innovaciones, la radio es un servicio de sistema abierto, desde sus inicios ha sido una actividad por la cual muchas personas obtienen información y entretenimiento. La radio es una de las primeras tecnologías de radiocomunicaciones que se puso en operación y que promete seguir siendo funcional y dando cambios constantes para beneficio de la sociedad.

El presente proyecto de tesis se hizo con la finalidad de dar a conocer un amplio panorama del funcionamiento de la radiodifusión de audio digital DAB, el cual será de beneficio para la comunidad estudiantil así como también para el público en general interesado hacia las nuevas tecnologías que se avecinan en nuestro país. La radio digital ha sido ya implementada en varios países, principalmente europeos, en los cuales se han observado grandes ventajas en comparación a la radio convencional así como una evolución tecnológica que ha provocado un gran impacto en la forma de oír radio, México se ha visto en la necesidad de acelerar la implementación de la nueva tecnología de “radio digital”, la cual esta en proceso de prueba.

Consientes de esta necesidad que tiene México de avanzar hacia nuevas tecnologías, se pensó en desarrollar esta tesis como una forma de aportar información esencial que sirva de cimientos para la construcción de nuestro propio sistema de radiodifusión de audio digital basado en los lineamientos y normas internacionales que se han ido estableciendo al paso de los años para esta tecnología. México no puede quedarse estancado en el desarrollo de esta tecnología y es parte fundamental principalmente de nosotros como ingenieros en electrónica y telecomunicaciones tomar la iniciativa para que la radio digital sea implementada en nuestro país lo más pronto posible de una forma rápida y eficiente.

Actualmente en nuestro país se han realizado pruebas experimentales las cuales han dado como resultado una pronta implementación en la radio digital en el país los grupos experimentales han sido por parte de radio – UNAM y la CIRT.

La presente tesis contiene información sobresaliente suficiente para que el lector tenga un panorama general sobre la radio digital y para que personas interesadas en la creación de

nuevas tecnologías puedan dar continuidad a esta. Este documento es a su vez una invitación a seguir participando y a seguir aportando bloques para que esta tecnología quede completada en nuestro país y para que México este a la vanguardia en desarrollos tecnológicos.

BIBLIOGRAFIA

[1] Wayne Tomasi. "Sistemas de Telecomunicaciones Electrónicas". Pearson, 2003.

[2] pendiente pini

[3] <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Comunicaciones>

[4] <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/electronicaaplicadall/aplicada>

[5] Cecilio Blanco Viejo "Fundamentos de Electrónica Digital". Thomson, 2005

[6] Apuntes de la materia de procesamiento digital de señales impartida por el Ing. Mariano Arumir Rivas Palacios.

[7] <http://www.wikipedia.org>

[8] <http://www.worlddab.org>

[9] <http://www.drm.org>

[10] [http:// www.ubiquity.com](http://www.ubiquity.com)

[11] <http://www.Lucent.com>

[12] Wolfgang Hoeg., Thomas Lauterbach, "Digital Broad Casting principles and applications of digital radio". John Wiley and Sons, 2003.

[13] <http://www.eureka.be>

[14] <http://www.worlddab.com>

[15] <http://www.ubiquity.com>

[16] <http://www.drm.org>

[17] <http://www.mpeg.org>

[18] Alard M. Lassalle R. "Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting for Mobile Receivers" Mac Millan, 1987

[19] Shelswell P. "The COFDM Modulation System". Ecafsa, 1996.

[20] Stott J.H. "The how and why of COFDM" John Wiley and Sons, 1998.

[21] Kozamernik F. "Digital Audio Broadcasting" Spring, 1999.

[22] Ratliff P.A., Pommier D., Meier-Engelen E. "The Convergence of Satellite and Terrestrial System Approaches to Digital Audio Broadcasting with mobile and portable receivers". Routledge, 1990.

[23] Voyer R., Conway F. "Digital Audio Broadcasting Experimentation". Efullet, 1991.

[24] Breton B., Voyer R., Sacques D. "Coverage Design Aspects of L-Band DAB". Mc Graw-Hill, 1997.

[25] Couinard G "Digital Sund Boadcasting".Ebsco, 1990.

[26] Erkkilä, V., Jokisalo, M., "DAB Fields Trials in Finland". Blackwell, 1994.

[27] Vahlin, A., Holte, N., "OFDM for broadcasting in Presence of Analogue Co-Channel Interference". Efullet, 1993.

[28] Hernando Rábanos, J.M., "Transmisión por Radio", Ebsco, 1995.

[29] J. G. Proakis. "Digital Communications". Mc Graw-Hill, 1995.

[30] R.H. Evans, "An Uplinking Technique for Eureka- 147 satellite DAB". Dillons 1998.

[31] ETS 300 401: "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting to mobile". UIT, 1997.

[32] G. Malmgren, "Network Planning of Single Frequency Broadcasting Networks". Efullet, 1996.

[33] G. Malmgren, "Single Frequency Broadcasting Networks". Efullet, 1997.

GLOSARIO

ANCHO DE BANDA.

Es la diferencia entre las frecuencias máximas y mínimas contenidas en la información.

CANAL.

Medio por el cual viaja la señal de radio, espectro radioeléctrico en una determinada banda.

COMUNICACIONES DIGITALES.

Es el proceso de transmitir pulsos digitales que se transfieren entre dos o más puntos en un sistema de comunicaciones físicos.

COMUNICACIONES SATELITALES.

En esencia, las comunicaciones satelitales son repetidoras de microondas en el cielo, formadas por una diversa combinación de receptores, transmisores, regenerador, filtro, multiplexor y demultiplexor.

CONTROL DE ERRORES.

Por las características no ideales de transmisión que hay en cualquier sistema de comunicaciones, es inevitable que haya errores, para eso existen dos categorías generales: detección de errores y corrección de errores.

MODOS DAB.

Estos modos regulan el funcionamiento de la radio como lo son: número de portadoras, duración de trama, etc.

MODULACION.

Es el proceso de cambiar una o más propiedades de la portadora, en proporción con la señal de información.

MODULACION OFDM.

La señal de radio que se propaga no es un rayo estrecho, sino es un frente de onda amplio que se va difractando y reflejando a la media que encuentra obstáculos en el camino.

MULTIPLEXADO.

Es la transmisión de información de más de una fuente a más de un destino a través del mismo medio de transmisión.

PROPAGACION MULTITRAYECTO.

Es recibir los ecos en la señal principal y en la radio digital se utilizan para usarlos de forma provechosa y eliminar la interferencia de la radio.

RADIO DIGITAL.

En la radio digital la señal moduladora es digital, consta de un transmisor, codificador, amplificador, transmisor y receptor, en el cual se amplifica y recupera la portadora.

RECEPTOR

Medio físico el cual procesa y codifica la señal que se desea transmitir.

REDES SFN.

Una red de frecuencia única utiliza el mismo canal de radiofrecuencia para difundir un mismo programa en una misma zona.

TRAMA DEL DAB.

Es la arquitectura que conforma el DAB. La cual, es la base del funcionamiento de la radio digital.

TRANSMISION DIGITAL.

Es el transporte de señales digitales entre dos o mas puntos en un sistema de comunicaciones, las señales pueden ser binarias o de cualquier otra forma de pulsos digitales de valores diversos.

TRANSMISOR

Medio físico por el cual recibe, procesa y codifica la señal para ser utilizada por el usuario.