



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**Estudio de la Asignación Espectral
de
Radio Digital en la Banda de
Onda Media en México**

Tesis que para obtener el Título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presenta

Javier Rodríguez Huerta

Directora de Tesis

Dra. Fátima Moumtadi



Índice de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	
1. Sistemas de Radio Digital.....	6
1.1. Eureka 147, Digital Audio Broadcasting: DAB	6
1.1.1. Codificación de Audio	7
1.1.2. Codificación de Transmisión (de canal) y multiplexión	9
1.1.3. Modulación COFDM.....	10
1.2. IBOC, In Band-On Channel	11
1.2.1. FM-IBOC	11
1.3. DRM, Digital Radio Mondiale.....	17
1.4. SDARS, Satellite Digital Audio Radio Service	21
1.4.1. XM Satellite Radio.....	21
1.4.2. Sirius Satellite Radio	23
1.4.3. WorldSpace	24
Bibliografía y Referencias	27
CAPITULO 2	
2. Descripción de los Sistemas de Radio Digital de Onda Media	29
2.1. AM-IBOC	29
2.1.1. Capas AM-IBOC	29
2.1.2. Modo Híbrido.....	30
2.1.3. Modo Solo-Digital	31
2.1.4. Canales Definidos en el Sistema	33
2.1.5. Componentes Funcionales	34
2.1.6. Subsistema de Transmisión	38
2.2. Digital Radio Mondiale.....	41
2.2.1. Descripción del Sistema.....	41
2.2.2. Codificador y Características de la Señal	43
2.2.3. Flexibilidad del Sistema	45
2.2.4. Simulcast en un Solo Canal	46
2.2.5. Componentes del Sistema	48
Bibliografía y Referencias	54
CAPÍTULO 3	
3. Propagación de Señales de Onda Media.....	56
3.1. Influencia del Medio y Mecanismos de Propagación.....	57
3.2. Propagación por Onda de Superficie.....	62
3.2.1. Modelo de Tierra Plana.....	63
3.2.2. Modelo de Tierra Esférica	63
3.3. Propagación por Onda Ionosférica	64
3.3.1. Capas de la Ionosfera.....	66
Bibliografía y Referencias	72

CAPÍTULO 4	
4. Estudio de Interferencias entre Estaciones de Radio AM utilizando los Sistemas Digitales	74
4.1. Asignación Espectral en México en la banda de Frecuencias de Onda Media	75
4.2. Estudio para el Sistema AM-IBOC	77
4.2.1. Ocupación Espectral	77
4.2.2. Simulación de Propagación de Señales AM-IBOC	79
4.3. Estudio para el Sistema DRM.....	83
4.3.1. Ocupación Espectral	83
4.3.2. Simulación de Propagación de Señales DRM	85
4.4. Análisis de Resultados	87
4.4.1. Área de cobertura con el Sistema AM-IBOC	90
4.4.2. Área de cobertura con el Sistema DRM	93
Bibliografía y Referencias	94
 CONCLUSIONES	 95
 APÉNDICE A	
Acrónimos y Abreviaturas.....	97
 APÉNDICE B	
Tablas de Valores	99

Índice de Tablas

TABLA 1.1	ASIGNACIÓN ESPECTRAL PARA DAB.....	6
TABLA 1.2	CARACTERÍSTICAS DE LA FORMA DE ONDA HÍBRIDA PARA EL MODO DE SERVICIO MP1 FM-IBOC	15
TABLA 1.3	CARACTERÍSTICAS DE LA FORMA DE ONDA HÍBRIDA EXTENDIDA PARA LOS MODOS DE SERVICIO MP2 A MP4.....	16
TABLA 2.1	CARACTERÍSTICAS DE LA FORMA DE ONDA HÍBRIDA AM-IBOC	31
TABLA 2.2	CARACTERÍSTICAS DE LA FORMA DE ONDA TOTALMENTE DIGITAL	32
TABLA 2.3	CANALES LÓGICOS DISPONIBLES EN CADA MODO Y TASA DE INFORMACIÓN	33
TABLA 2.4	DIFERENTES VALORES PARA LA CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE LA SEÑAL DRM	44
TABLA 2.5	TASA DE BITS DEL MSC PARA DISTINTOS MODOS Y MODULACIÓN	45
TABLA 3.1	VALORES CARACTERÍSTICOS DE DISTINTOS SUELOS.....	62
TABLA 4.1	ASIGNACIÓN ESPECTRAL DEL RANGO DE FRECUENCIAS DE OM EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	75
TABLA 4.2	ESTACIONES CON SEPARACIÓN MÍNIMA ENTRE FRECUENCIAS CENTRALES DE TRANSMISIÓN.....	77
TABLA 4.3	POTENCIAS DE PORTADORAS DIGITALES AM-IBOC MODO HÍBRIDO	78
TABLA 4.4	POTENCIAS DE PORTADORAS DIGITALES EN DRM MODO HÍBRIDO.....	85
TABLA 4.5	DISTANCIA ENTRE PLANTAS DE TRANSMISIÓN.....	89
TABLA 4.6	COBERTURA MÁXIMA APROXIMADA DE LAS ESTACIONES UTILIZANDO IBOC-AM .	90

Índice de Figuras

FIGURA 1.1	GENERACIÓN DE SEÑAL DAB	7
FIGURA 1.2	ENMASCARAMIENTO DE AUDIO.....	8
FIGURA 1.3	ESTRUCTURA BÁSICA DE UN FRAME DAB: "MULTIPLEX"	9
FIGURA 1.4	ESQUEMA DE RECEPCIÓN DE SEÑAL DAB	10
FIGURA 1.5	PARTICIÓN DE FRECUENCIA: ARREGLO DE SUBPORTADORAS CON ORDEN A	13
FIGURA 1.6	NUMEROS DE SUBPORTADORAS DE REFERENCIA.....	14
FIGURA 1.7	ESPECTRO DE LA SEÑAL HÍBRIDA FM-IBOC	14
FIGURA 1.8	ESPECTRO DE LA SEÑAL HÍBRIDA EXTENDIDA FM-IBOC	15
FIGURA 1.9	ESPECTRO DE LA SEÑAL SOLO-DIGITAL FM-IBOC	17
FIGURA 1.10	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DRM	20
FIGURA 1.11	COBERTURA DE LOS SATÉLITES XM SATELLITE RADIO.....	22
FIGURA 1.12	ÓRBITA DE LOS SATÉLITES DE SIRIUS.....	23
FIGURA 1.13	ÁREA DE COBERTURA DE LOS SATÉLITES DE WORLDSPACE	25
FIGURA 1.14	HUELLAS DE UP-LINK DE LOS SATÉLITES DE WORLDSPACE	26
FIGURA 2.1	ESPECTRO DE LA FORMA DE ONDA HÍBRIDA AM-IBOC	30
FIGURA 2.2	ESPECTRO DE LA SEÑAL SOLO-DIGITAL AM-IBOC	32
FIGURA 2.3	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA PARA CAPA 1.....	34
FIGURA 2.4	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA GENERACIÓN DE LA SEÑAL OFDM	36
FIGURA 2.5	GRÁFICA DE LA FUNCIÓN PULSE-SHAPING	37
FIGURA 2.6	SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN HÍBRIDO.....	38
FIGURA 2.7	SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN SOLO DIGITAL.....	39
FIGURA 2.8	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DRM E INFORMACIÓN ASOCIADA.....	41
FIGURA 2.9	DIFERENTES CODIFICADORES DE AUDIO CON POSIBLE APLICACIÓN DE SBR.....	44
FIGURA 2.10	ESPECTRO DE LA SEÑAL DRM PARA UN ANCHO DE BANDA DE 9 [kHz]	47
FIGURA 2.11	DIAGRAMA DE SUBPORTADORAS OFDM EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA	50
FIGURA 2.12	EFFECTO POSITIVO DEL INTERVALO DE GUARDIA ENTRE PORTADORAS	51
FIGURA 2.13	ESQUEMA DE UBICACIÓN DE CELDAS DE REFERENCIA DE GANANCIA Y FRECUENCIA DENTRO DE UNA SECUENCIA DEL MODO D	52
FIGURA 3.1	FORMAS DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS DE RADIO.....	56
FIGURA 3.2	POSIBLES TRAYECTOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS	58
FIGURA 3.3	PROPAGACIÓN POR ONDA DE TIERRA	61
FIGURA 3.4	PROPAGACIÓN POR ONDA IONOSFÉRICA	61
FIGURA 3.5	DENSIDAD DE MOLÉCULAS IONIZABLES CON RESPECTO A LA ALTURA	65
FIGURA 3.6	DENSIDAD DE IONIZACIÓN CON RESPECTO A LA ALTURA	65
FIGURA 3.7	ZONA DE SKIP.....	66
FIGURA 3.8	VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ELECTRONES CON RESPECTO A LA ALTURA	67
FIGURA 3.9	ATENUACIÓN DE LA CAPA D A 1 [MHz] DE NOCHE Y DE DIA	69
FIGURA 3.10	CAPAS DE LA IONOSFERA	71
FIGURA 4.1	ESQUEMA DE OCUPACIÓN ESPECTRAL DE UNA SEÑAL AM.....	74
FIGURA 4.2	OCUPACIÓN ESPECTRAL DE LAS BANDAS LATERALES DIGITALES AM-IBOC	77
FIGURA 4.3	INTERFERENCIA DE SEÑALES DIGITALES AM-IBOC ENTRE ESTACIONES ADYACENTES	79
FIGURA 4.4	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CON RESPECTO A LA DISTANCIA: $f_{c1}=690$ [kHz] (BANDAS SUPERIORES).....	80
FIGURA 4.5	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CON RESPECTO A LA DISTANCIA: $f_{c2}=710$ [kHz] (BANDAS INFERIORES)	81
FIGURA 4.6	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CON RESPECTO A LA DISTANCIA: $f_{c2}=710$ [kHz] (BANDAS SUPERIORES).....	82
FIGURA 4.7	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CON RESPECTO A LA DISTANCIA: $f_{c3}=730$ [kHz] (BANDAS INFERIORES)	83
FIGURA 4.8	POSIBLE CONFIGURACIÓN ESPECTRAL DEL SISTEMA DRM CON CANALES DE 10 [kHz].....	84
FIGURA 4.9	POSIBLE CONFIGURACIÓN DRM PARA LAS ESTACIONES BAJO ESTUDIO	84
FIGURA 4.10	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DE LA SEÑAL DRM, $f_{c1}=690$ [kHz].....	86

FIGURA 4.11	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DE LA SEÑAL DRM, $f_{c2}=710$ [kHz].....	86
FIGURA 4.12	ATENUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DE LA SEÑAL DRM, $f_{c3}=730$ [kHz].....	87
FIGURA 4.13	UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE TRANSMISIÓN DE LAS EMISORAS BAJO ESTUDIO	89
FIGURA 4.14	DISTANCIA APROXIMADA ENTRE LAS PLANTAS DE TRANSMISIÓN DE LAS EMISORAS BAJO ESTUDIO	90
FIGURA 4.15	COBERTURA DE SEÑALES DIGITALES PARA EL PRIMER CASO DE INTERFERENCIA IBOC-AM	91
FIGURA 4.16	COBERTURA DE SEÑALES DIGITALES PARA EL SEGUNDO CASO DE INTERFERENCIA IBOC-AM	92
FIGURA 4.17	ÁREA DE LA COBERTURA DE ESTACIONES UTILIZANDO DRM	93

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los medios de comunicación se han ido perfeccionando a tal grado que nosotros, como usuarios, exigimos de los mismos una alta calidad de servicio y no solo eso sino también nuevos servicios. En el caso de la radio este hecho no ha sido la excepción; sin embargo, muchas limitantes han surgido debido a la poca evolución que ha tenido este campo desde que inicio con la modulación por frecuencia (FM) y por amplitud (AM).

En un intento de cubrir estos requerimientos y ofrecer una amplia variedad de contenidos, se han tomado diversas iniciativas, como el inicio de nuevos servicios de radio que no solo ofrecen al usuario más variedad en contenido, sino una calidad de servicio que con las transmisiones de radio convencionales no se había logrado. Ahora se utilizan nuevos segmentos espectrales para efectuar transmisiones de audio y otros servicios, que no tienen la limitante del ancho espectral utilizado, pues se les ha asignado una amplia gama espectral para explotar. Esto pasa con el sistema DAB europeo. Sin embargo, con el nacimiento de una nueva forma de hacer las cosas, surgen otras aun más ambiciosas, como en el caso de los proveedores de servicio de radio satelital.

Estos nuevos sistemas, han logrado dar al usuario mucho más de lo que esperaba. Incluso, en el caso de los sistemas satelitales, la competencia entre uno u otro proveedor no se centra ya en los contenidos o servicios, sino en los acuerdos que efectúan con empresas automotrices para incluir en sus autos los receptores de uno u otro sistema. DAB ha crecido en su mercado pues su competencia viene prácticamente del Internet y el costo de sus dispositivos receptores móviles y fijos.

Lo único que podría ser tachado a estos nuevos sistemas es el uso de bandas espectrales que no estaban destinadas a la transmisión de radio. Este hecho es en realidad el más importante y originador de discusiones, pues el espectro de frecuencias es considerado un bien natural finito: si ya se ha asignado cierto rango de frecuencias para la transmisión de radio ¿Por qué hay que ocupar otro rango?

En este punto, volvemos la mirada a los sistemas de radio convencionales y, si bien se habían dejado de lado y sin mucha evolución, con la llegada de la digitalización de la información, se nota que estos sistemas convencionales tienen un gran potencial aun y de ninguna forma podrán ser sustituidos por los nuevos sistemas de radio. A pesar de estos nuevos modelos de transmisión de audio, la radio analógica sigue aquí y con un pie en una nueva etapa de digitalización. Hoy en día han surgido sistemas de transmisión adaptados a las bandas que actualmente están en uso para transmisión de radio abierta y que ofrecen prácticamente los mismos contenidos y, en algunos casos, una calidad comparable a los nuevos sistemas. Tal es el caso de DRM y IBOC, uno

desarrollado en Europa de manera abierta y otro en Estados Unidos de América por una compañía privada, correspondientemente.

Ambos sistemas tienen la premisa de la reutilización de las bandas espectrales y la mejora del servicio, dando la posibilidad de una transición lenta que evite utilizar un nuevo segmento espectral a la vez que considera la implementación de nuevos servicios agregados.

En el presente trabajo se estudiarán particularmente estos dos sistemas (DRM y IBOC) y, en especial, su operación bajo el rango de frecuencias de AM en transmisiones diurnas, esto debido a las propias características que se definieron para utilizar el rango de 535 a 1605 [kHz] en la transmisión de audio como se concibió desde el inicio. El hecho de que sea una banda modulada por amplitud, llevó a una asignación de frecuencias para diferentes emisoras con un ancho de banda bien definido y estrecho, y lo mismo sucedió con las bandas de guarda entre dichas estaciones. Al hacer la modulación por amplitud, el ancho de banda resulta ser adecuado, aproximadamente 10 [kHz] por estación. La separación mínima entre las frecuencias centrales de operaciones de las emisoras se definió como 20 [kHz]. De lo anterior, se define una banda de guarda mínima entre estaciones de aproximadamente 10 [kHz]. De nuevo, para la transmisión analógica, esta banda de guarda es más que suficiente.

Ahora bien, de acuerdo a las premisas de operaciones e implementación de los sistemas que se estudiarán en este trabajo, cada sistema ha definido un sistema de operación híbrido, que transmita a la vez las señales analógicas convencionales así como las señales digitales propias del sistema. Esto asegura una transición lenta, lo cual representa una ventaja para el usuario. Por otro lado, para los diseñadores esto ha representado una nueva dificultad.

Los modos de operación híbridos, como se verá en el desarrollo de esta tesis, requieren la utilización de las bandas de guarda para efectuar la transmisión de sus señales digitales y, tal como se definieron estas bandas de guarda, cuando la separación entre frecuencias centrales de operación sea la mínima, los segmentos espectrales designados a la transmisión de la parte digital de las señales se traslapará causando inevitablemente la interferencia de señales. Esto en teoría está claro, sin embargo, otro factor que hay que tomar en cuenta es la ubicación geográfica de las bases transmisoras así como la potencia utilizada en la transmisión. En algunos casos, aunque haya traslape espectral de señales, la ubicación geográfica de las bases transmisoras puede ser tal que evite la interferencia de las señales.

Esta tesis tiene como objetivo poner de manifiesto estos riesgos para que sirvan de base para análisis posteriores y ayuden en la toma de decisiones acerca de la conveniencia de adoptar uno u otro sistema de radio digital dentro de la banda de AM en nuestro país, así como apoyar en las medidas de seguridad que han de tomarse al implementar cualquier sistema y que desde el inicio puedan aprovecharse todas las ventajas que estos sistemas ofrecen. Al mismo tiempo, se

ampliará el conocimiento con que actualmente se cuenta acerca de estos nuevos sistemas de radio digital.

La cobertura de las estaciones que puedan tener riesgos de interferencia se determinará con la ayuda del software recomendado por la UIT, GRWAVE, que con base en la permitividad y conductividad del suelo, altura de las antenas receptoras y transmisora, frecuencia de operación y potencia de transmisión, hace una aproximación de la intensidad de campo eléctrico con base en la distancia transmisor-receptor. Los valores que arroje el programa servirán para esbozar el campo de cobertura de una estación determinada. En este punto, la ubicación geográfica de las bases emisoras es importante pues puede determinar que si efecto habrá problemas de interferencia y que tan grave será el su impacto para los usuarios dependiendo de la magnitud de la zona de interferencia efectiva.

El desarrollo de esta tesis se ha dividido en cuatro capítulos.

Primero se ampliará un poco en lo que respecta a los sistemas de radiodifusión sonora digital. Sus bases de funcionamiento y características generales. Es importante notar en esta parte el hecho de que la mayoría de estos sistemas han sido designados a un segmento espectral diferente al que se había utilizado para la radio analógica.

En el capítulo dos se tratarán a detalle los dos sistemas digitales en que se enfoca este escrito: DRM y IBOC. Se harán notar los requerimientos espectrales que son particularmente importantes en los modos de operación híbridos. También se expondrán sus principios de funcionamiento que son muy similares y que difieren solamente en detalles de control de potencia. En este caso, el ancho espectral necesario para las señales digitales de cada sistema es el principal punto de referencia para hacer una primera aproximación a los problemas que pueden tener para implementarse.

El tercer capítulo expone los principios de transmisión al trabajar en el rango de frecuencias de AM. La transmisión nocturna es un caso que debe estudiarse aun a detalle, debido a la fuerte componente de las señales que surge de las ondas reflejadas en la ionosfera. En este escrito solamente se trata la transmisión diurna y en este capítulo se exponen los conceptos en que se basa GRWAVE para determinar las intensidades de campo.

En el cuarto capítulo se presentan las simulaciones efectuadas y los resultados obtenidos a partir de las mismas. Este capítulo se enfoca en la presentación de los conceptos que antes se trataron y los pone en un marco real, de forma que se pueda observar la cantidad de variables que deben considerarse tan solo en una primera aproximación como esta.

Finalmente, se presentan las conclusiones en base a los resultados obtenidos en el capítulo cuarto. También se harán algunas observaciones y anotaciones para futuros trabajos de investigación y análisis en este mismo sentido.

CAPÍTULO 1

SISTEMAS DE RADIO DIGITAL

1. Sistemas de Radio Digital

La digitalización de la información, tal como sucedió con la telefonía para la transmisión de voz sobre redes de multiplexión por división de tiempo, es un avance tecnológico cuyos principales objetivos son aumentar la eficiencia en el transporte de la información y mejorar la calidad de servicio que experimenta el usuario. No es solo uno el que se ha seguido para lograr la digitalización y transmisión de sonido con el fin de llevar la radio analógica a una nueva etapa, y es por eso que han surgido distintos estándares para lograrlo. El objetivo de este capítulo es dar un panorama general de los principales sistemas de radiodifusión sonora digital, mismos que representan un paso más hacia la convergencia de las telecomunicaciones.

1.1. Eureka 147, Digital Audio Broadcasting: DAB

Es el estándar europeo para la radiodifusión sonora digital. Nacido como el proyecto Eureka 147, en 1994 se convirtió en estándar mundial como recomendación ITU-R BS.114 [1] e ITU-R BO.1130 [2]. Un año después fue adoptado por ETSI en la norma ETS 300 401 [3]. Ahora mejor conocido como DAB, este sistema transmite en la banda de frecuencias L (aunque la banda va de 0.5 a 1.5 [GHz], solo se utiliza el rango de 1452 a 1492 [MHz]), y tiene la posibilidad de operar en las bandas VHF (canales 11 y 12, 198 a 210 [MHz]) [4] y UHF (sin embargo no se ha implementado).

La definición de bandas espectrales para uso de DAB se definieron en una conferencia celebrada en 1992 [B], tanto para el caso de transmisión terrestre (T-DAB) como satelital (S-DAB), para la mayoría de los países [4] [5], la tabla 1.1 muestra esta bandas

Tabla 1.1- Asignación espectral para DAB

T-DAB		
Banda I	47-68 [MHz]	Canales 2-4
Banda II	174-230 [MHz]	Canales 5-12
Banda III	230-240 [MHz]	Canal 13
Banda L	1452-1467.5 [MHz]	
S-DAB		
Banda L	1467.5-1492 [MHz]	

Este sistema provee una alta calidad de audio al usuario y hace un uso eficiente del espectro de frecuencias en que trabaja, transmitiendo desde audio hasta información multimedia, que esta destinada a receptores móviles, portátiles y fijos. En el espectro donde antes solo se podía alojar un programa o un canal de FM, ahora es posible tener hasta 6 programas distintos, 6 canales que pueden llevar cualquier tipo de dato o que pueden utilizarse por 6 estaciones distintas. DAB permite una amplia gama de opciones de codificación de los programas, de los

datos asociados a los programas radiofónicos y de los servicios de datos adicionales.

En la figura 1.1 se muestra la codificación individual de cada señal de servicio a nivel de la fuente, espaciada en tiempo y protegida contra errores en el codificador de canal [6]:

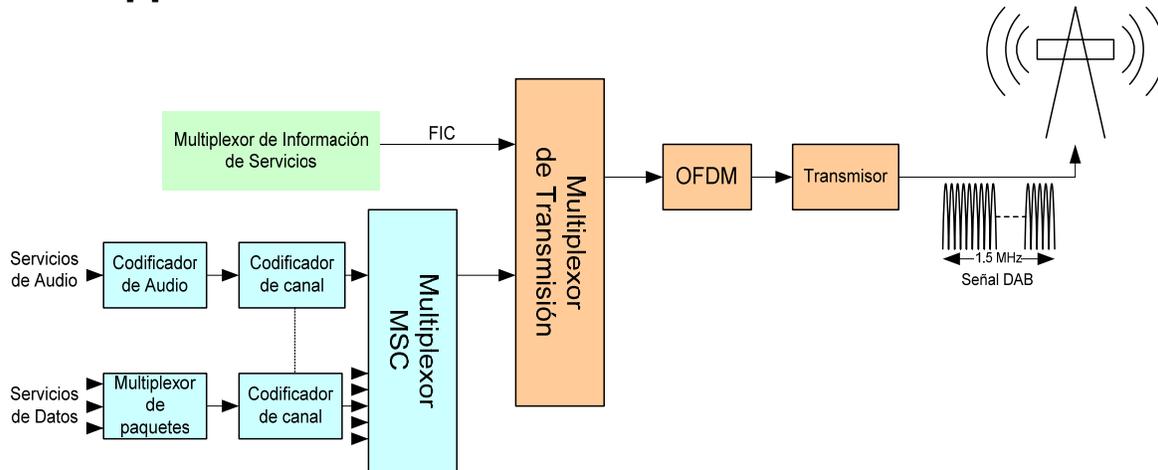


Fig.1.1 - Generación de señal DAB

Posteriormente los servicios son multiplexados en el canal de servicio principal (MSC) de acuerdo a una configuración predeterminada de multiplexión que puede ajustarse. El canal de servicio principal se combina posteriormente con la información de servicio incluida en el canal de información rápida (FIC) para formar los frames de transmisión. Finalmente se aplica OFDM para formar la señal DAB consistente en un gran número de portadoras. La señal es entonces trasladada a la banda de radiofrecuencias apropiada, amplificada y transmitida.

El sistema comprende tres elementos principales [7]:

- Codificación de Audio MUSICAM
- Codificación de transmisión (de canal) y multiplexión
- Modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

A continuación se detallan estos elementos.

1.1.1. Codificación de Audio

El codificador de audio utilizado principalmente (y que se utiliza a un hoy con mayor frecuencia) es MUSICAM, el acrónimo proviene de "Masking pattern Universal Sub-band Integrated Coding And Multiplexing", que es la base de codificación especificada para MPEG-2. Esta técnica hace uso del conocimiento de las propiedades del oído humano, en particular, los efectos de enmascaramiento temporal y ancho espectral de percepción del oído interno. De esta forma, el sistema codifica solo las componentes de señal de audio que el oído

percibirá mientras descarta la información de audio que el oído es incapaz de escuchar. Así, la capacidad la tasa de transferencia de bits se asigna solo a la codificación y transporte de la información que es importante para mantener una alta calidad subjetiva de audio. Es importante mencionar también que, desde el año 2006, el codificador AAC (Advanced Audio Coding) se ha venido utilizando también.

El principio del enmascaramiento de audio se muestra en la figura 1.2 [2]:

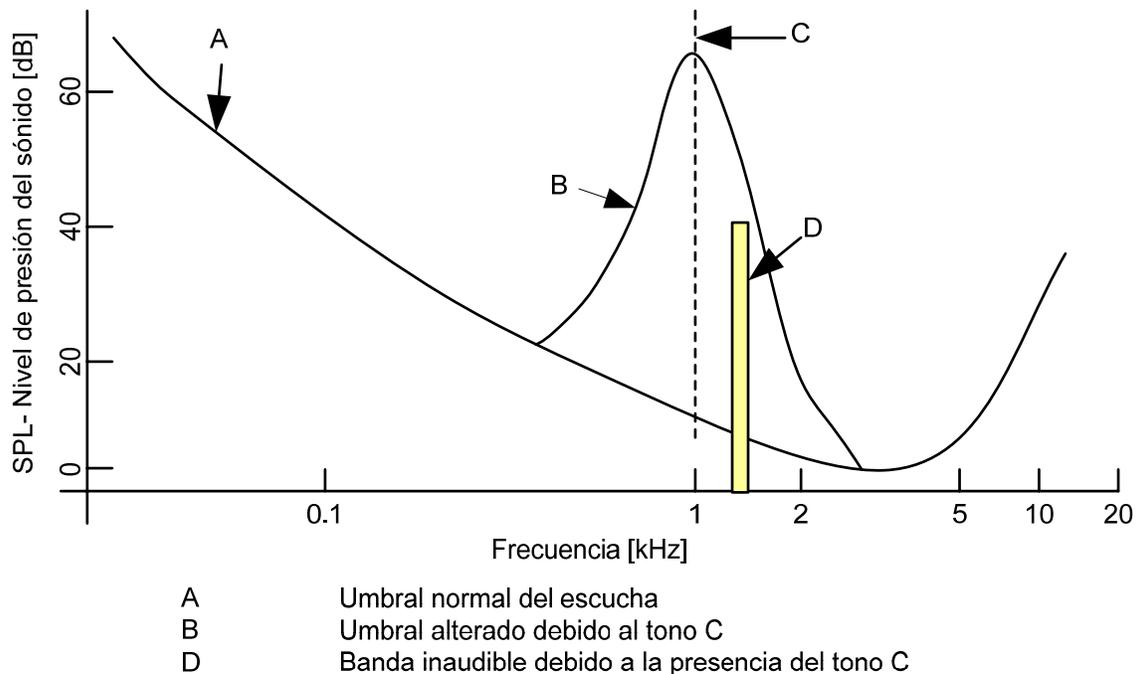


Fig. 1.2 - Enmascaramiento de audio.

En la figura anterior, la componente de la señal a 1 [kHz] deforma y aumenta el umbral de enmascaramiento que define el nivel que otras componentes de la señal deben exceder para poder ser audibles. Si una segunda componente de audio esta presente al mismo tiempo y esta cercana en frecuencia a la primera, esta segunda componente debe tener un nivel más alto para poder ser percibida por el oído, de forma que rebase el umbral modificado por la primera componente o, de otra forma, la segunda componente será enmascarada por la primera.

MUSICAM es un proceso de codificación de audio eficiente que puede reducir las señales de audio digitales a una de varias opciones posibles de codificación en el rango de 8 kbps a 384 kbps, a una frecuencia de muestreo de 48 [kHz] o, cuando un servicio puede tolerar una baja calidad de audio, 24 [kHz]. La calidad de audio proporcionada por el sistema, es subjetivamente percibida como calidad de CD utilizando tasas de transferencia de 192 kbps o mayores para dispositivos estéreo. La opción de codificación elegida para un servicio dado en un múltiplex depende

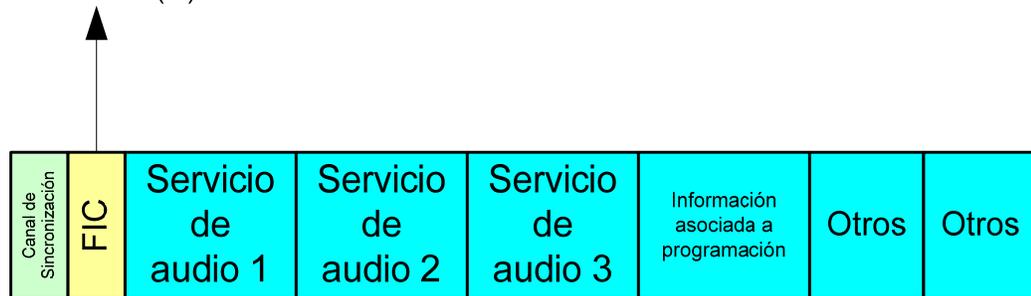
de la calidad de audio requerida para ese servicio, el tipo de servicio y el número de servicios que la emisora quiere alojar dentro de la capacidad del múltiplex DAB.

1.1.2. Codificación de transmisión (de canal) y multiplexión

Los datos para servicios individuales, ya sean basados en audio o multimedia, deben ser combinados en un sola secuencia de datos lista para la transmisión. Este proceso se conoce como multiplexión, y la secuencia de datos resultante es llamada múltiplex DAB. Dicho múltiplex DAB (en la figura 1.3 se muestra la estructura básica) comprende tres distintos elementos:

- El canal de sincronización, que transporta la frecuencia de referencia y la información de sincronización para permitir que los receptores se sincronicen y decodifiquen la señales DAB recibidas.
- El canal de información rápida (FIC), que lleva la información que describe la composición del múltiplex e informa a los receptores cómo extraer y decodificar la información para servicios individuales.
- El canal de servicio principal (MSC), que contiene los paquetes de datos o audio correspondientes a los diferentes servicios dentro del múltiplex. Esta parte del múltiplex es esencialmente la carga útil de la señal DAB.

Canal de Información Rápida: contiene principalmente la información de Configuración del Múltiplex (MCI) e información de Servicio (SI)



Canal de Servicio Principal: contiene la información de los programas de servicio y datos asociados a los mismos. Servicios de anuncio, textos, etc

Fig. 1.3 - Estructura básica de un frame DAB: "Múltiplex".

Posteriormente, al múltiplex se aplica la codificación de canal con FEC, espaciado en tiempo y frecuencia para aumentar la protección contra errores de bits.

El tamaño de la capacidad de datos de la señal DAB completa es aproximadamente 3 Mbps, de la cual el MSC ocupa aproximadamente 2.3 Mbps. Después de permitir la redundancia proporcionada por la codificación de canal, la carga útil neta es de 0.6-1.7 Mbps.

1.1.3. Modulación COFDM

DAB utiliza un esquema de modulación digital multi-portadora, COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). En lugar de tener una portadora única modulada digitalmente con una tasa de símbolos muy alta, COFDM utiliza muchas portadoras (hasta 1536 espaciadas con 1 [kHz]) moduladas independientemente con fase en cuadratura. El múltiplex se distribuye en todas las portadoras, ocupando aproximadamente 1.54 [MHz] de espectro.

En consecuencia, la tasa de símbolos en cada portadora individual es mucho más baja y el periodo de los símbolos es más largo, con lo que se tiene protección contra los ecos producidos por las multi-trayectorias. Mientras el retraso de las señales de eco sea menor que el intervalo de guardia entre símbolos, habrá en la recepción interferencia constructiva. De hecho, permite a la emisora introducir el concepto de una red de transmisores de frecuencia única (SFN), donde las multi-trayectorias son provocadas deliberadamente para que todos los transmisores en la red de transmisión propaguen la misma señal en la misma frecuencia, algo imposible en los sistemas de radio analógico.

En lo que respecta a la recepción de señales DAB, se utiliza un receptor analógico cuya salida se envía al demodulador OFDM y al decodificador de canal para eliminar los errores de transmisión. La información contenida en el FIC va hacia la interfase del usuario para la selección del servicio y es utilizada para configurar apropiadamente al receptor [6]. Posteriormente, los datos del MSC son procesados. La figura 1.4 ilustra este proceso

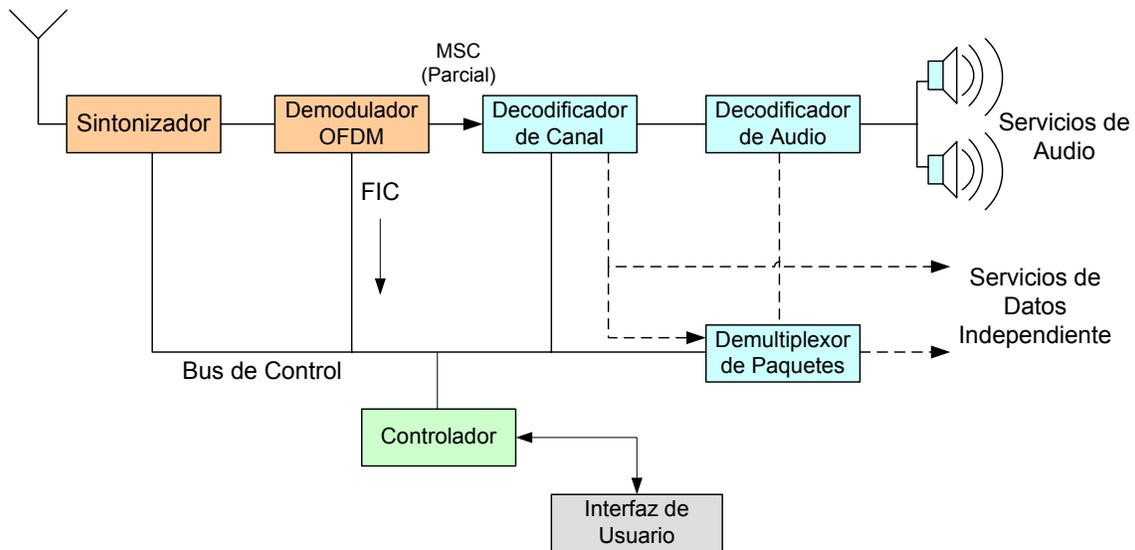


Fig. 1.4 - Esquema de recepción de señal DAB

1.2. IBOC, In Band-On Channel

Literalmente traducido como “Canal dentro de la Banda”, es un sistema de radiodifusión sonora digital desarrollado por Ibiqity Digital Corporation, impulsado principalmente por los Estados Unidos de América. En el 2002 la FCC (Federal Communications Commission) lo aprueba como único estándar digital para AM y FM y fue hasta el 2005 que la NRSC (National Radio Systems Committee) lo adoptó como estándar.

Su principal característica es que trabaja en la banda espectral asignada actualmente para las transmisiones de FM y AM, proporcionando transmisión digital al mismo tiempo que la analógica dentro de los segmentos de banda asignadas a las emisoras actuales. Esto evita la reasignación de espectro para transmisiones digitales y permite una fácil transición del sistema analógico al digital, pues las transmisiones analógicas continúan al aire mientras transcurre el proceso de migración a la tecnología digital. Sin embargo, aunque el sistema funciona ya para la banda de FM, en AM existen problemas sobre todo en la transmisión nocturna.

Este sistema provee de una mejor calidad de audio que las actuales emisiones analógicas además de la capacidad de prestar servicios de datos (tales como identificadores de la emisora, canción o intérprete de dicha canción, o bien noticias del tráfico o boletines de clima).

La señal digital, como se mencionó antes, es transmitida junto con la señal analógica por medio de portadoras digitales añadidas a dicha señal analógica. Este modo de transmisión se denomina híbrido, pues la información digital es colocada en frecuencias adyacentes a la señal analógica utilizando OFDM. El sistema trabaja también en los modos híbrido extendido y solo-digital que más adelante se describen. El sistema utiliza codificación de audio perceptiva, lo cual evita que la información que no puede ser percibida por el oído sea procesada, así, se reduce la cantidad de información digital y con ello el ancho de banda a utilizar. En el modo híbrido, se tiene la posibilidad de cambiar a la recepción de la parte analógica de la señal en caso de que la parte digital falle [10].

A continuación se explica un poco el sistema FM-IBOC [8], la parte de AM-IBOC se desarrolla con detalle en otro capítulo, aunque los principios de funcionamiento son los mismos que en el sistema de FM.

1.2.1. FM-IBOC

Tal como se define en la especificación para la transmisión, FM-IBOC se detalla en términos del modelo de capas ISO OSI, a saber, siete conocidas capas de funcionamiento de las cuales la capa 3 (red) y capa 5 (sesión) no se utilizan para este sistema. De esta forma el sistema consta de cinco capas en realidad. La capa uno es la capa de entrada del “habla”, donde el audio es recibido, procesado y

enviado a la capa dos donde es codificado para su transmisión digital. La codificación de canal contrarresta los inconvenientes normales de la transmisión en RF, como pueden ser desvanecimientos, interferencia y ruido atmosférico. La corrección de bits se hace mediante FEC y se agrega redundancia de bits para mejorar la resistencia del sistema a los errores.

Las capas tres y cuatro realizan la multiplexión y la capa cinco determina el formato que será usado para la transmisión de la señal [9].

El sistema FM-IBOC ofrece cuatro servicios básicos en una sola asignación de FM. El servicio principal provee el audio, el servicio de datos personal ofrece varios servicios de datos requeridos por el usuario, el servicio de identificación de estación lo provee un tercer canal y el cuarto servicio de aplicación auxiliar provee opciones de aplicaciones de transmisión especializadas.

Se utilizan canales lógicos para describir el camino óptimo del circuito que una señal debe seguir en su camino hacia la capa cinco. Debido a que el sistema acepta muchos tipos diferentes de señal, se tienen diez canales lógicos, sin embargo, no todos se utilizan todo el tiempo sino dependiendo de las necesidades de transmisión del audio de entrada. Cuatro de estos canales se llaman primarios, utilizados por las formas de ondas híbridas y solo-digitales. Se denotan como P1, P2, P3 y PIDS (Servicio de datos primario IBOC).

Por otro lado, hay seis canales lógicos secundarios utilizados solo por las formas de onda solo-digitales. Se denotan como S1, S2, S3, S4, S5 y SIDS (Servicio de datos secundario IBOC). Los canales lógicos P1 a P3 y S1 a S5 están diseñados para transportar datos y audio. Los canales SIDS y PIDS transportan información del servicio de datos de IBOC.

Los modos de operación (híbrido, híbrido extendido y solo-digital), utilizan OFDM para la porción digital de la señal, donde cierto número de sub-portadoras ortogonales, agrupadas en particiones, se modulan simultáneamente. El conjunto de estas sub-portadoras hace a la señal resistente contra multi-trayectorias, desvanecimientos e interferencia pues se transmiten a una baja velocidad de símbolos y el tiempo que ocupa la información en su transmisión es mayor.

Portadoras OFDM

Las portadoras OFDM se acomodan en particiones de frecuencia. Cada una de estas particiones comprende 18 sub-portadoras de datos y una sub-portadora de referencia como se muestra en la figura 1.5.

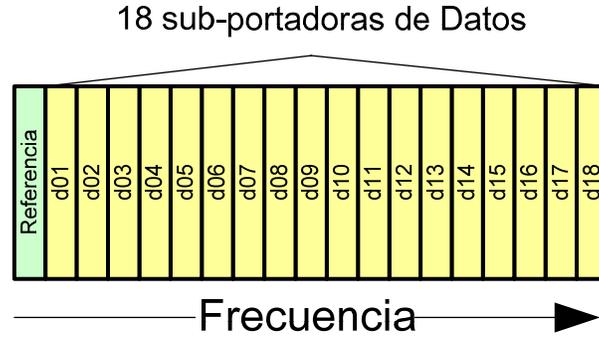
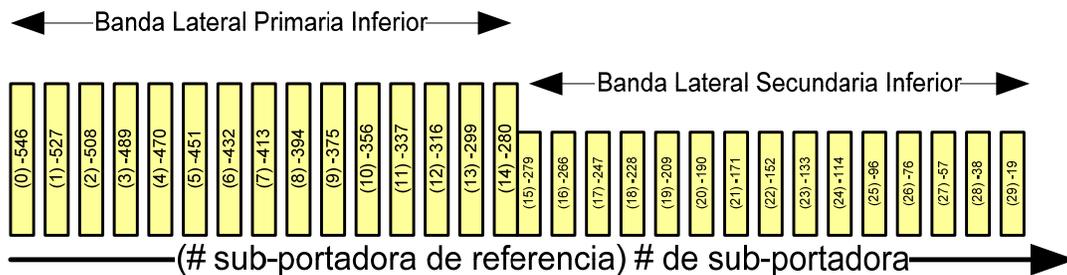


Fig. 1.5 – Partición de frecuencia: arreglo de sub-portadoras con orden A

La posición de la sub-portadora de referencia varía con la posición de la partición de frecuencia dentro del espectro: bien al inicio (orden A) o al final de la partición (orden B).

Para cada partición de frecuencia, las sub-portadoras de datos d1 a d18 transportan datos de capa dos mientras que las sub-portadoras de referencia transportan el control del sistema. Las sub-portadoras están numeradas desde 0 en la frecuencia central hasta ± 546 en cualquier extremo del canal de alojamiento de frecuencias.

Además de las sub-portadoras dentro de cada partición de frecuencias, dependiendo del modo de servicio, puede insertarse hasta cinco sub-portadoras de referencia adicionales en las posiciones -546, -279, 0, 279 y 546 con el objetivo de tener una distribución regular de sub-portadoras de referencia dentro de todo el espectro. Por conveniencia de notación, a cada sub-portadora de referencia se asigna un número único de identificación entre 0 y 60. Todas las sub-portadoras de referencia, así como la relación entre los números de sub-portadoras de referencia y los números de las sub-portadoras OFDM, se muestran en la figura 1.6.



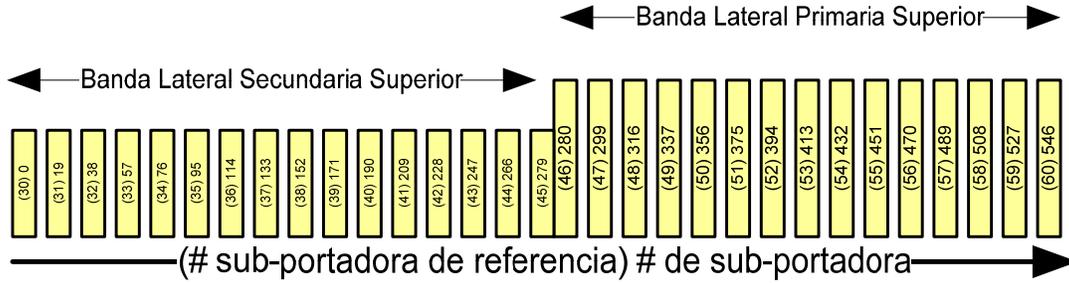


Fig. 1.6 – Números de sub-portadoras de referencia

Modo Híbrido

Las formas de onda híbridas mantienen la parte analógica de la señal mientras que el modo solo-digital, como indica su nombre, elimina dicha parte analógica. En la forma de onda híbrida, la señal digital es transmitida en bandas laterales principales primarias (PM) a cada lado de la señal analógica, como se muestra en la figura 1.7. El nivel de potencia para cada banda lateral es aproximadamente 16 [dB] debajo de la potencia total de la señal FM analógica.

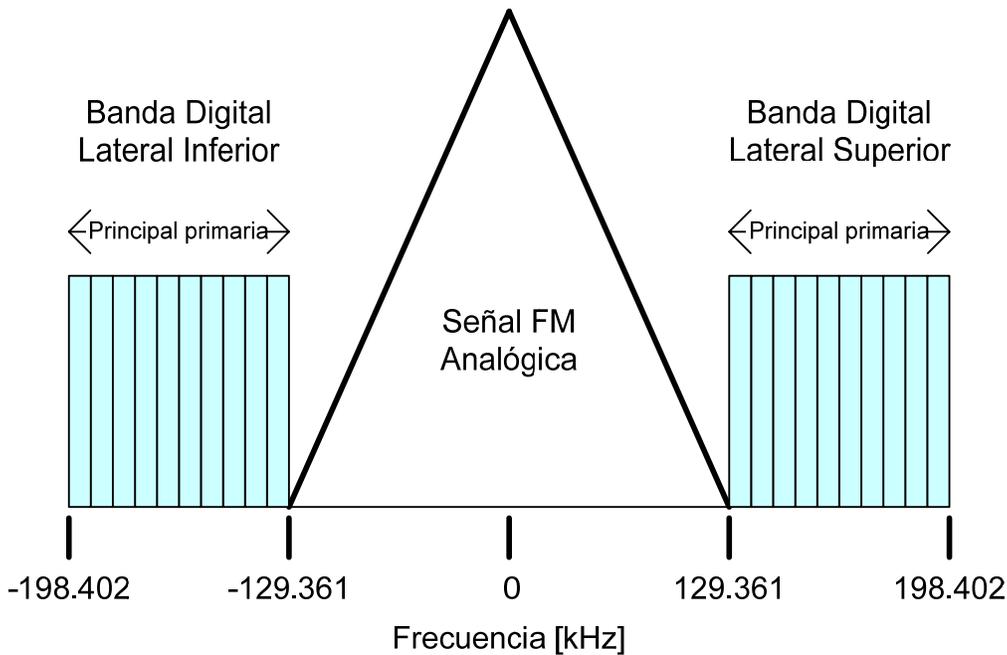


Fig. 1.7 – Espectro de la señal híbrida FM-IBOC

Cada banda lateral PM comprende diez particiones de frecuencia, que están ubicadas entre las sub-portadoras 356 a 545, o -356 a -545, las sub-portadoras 546 y -546 incluidas en las bandas laterales PM son sub-portadoras de referencia. La amplitud de las sub-portadoras dentro de una banda lateral PM está escalada uniformemente mediante un factor de escala de amplitud a_0 .

En la siguiente tabla se resume la información referente a las bandas laterales superior e inferior PM, del modo de operación MP1 (los datos incluyen la sub-portadora adicional de referencia).

Tabla 1.2 – Características de la forma de onda híbrida para el modo de servicio MP1 FM-IBOC

Banda Lateral	Número de Particiones de Frecuencias	Orden de la Partición	Rango de Sub-portadoras	Frecuencia de Sub-portadoras [Hz] desde la frecuencia central
Principal Primaria Superior	10	A	356 a 546	129,361 a 198,402
Principal Primaria Inferior	10	B	-356 a -546	-129,361 a -198,402

Modo Híbrido Extendido

Con respecto a la forma de onda híbrida extendida, el ancho de banda de las bandas laterales se extiende hacia la señal FM analógica para incrementar la capacidad digital. Este espectro adicional es llamado banda lateral primaria extendida, y es un añadido de las bandas laterales principales primarias, como se muestra en la figura 1.8:

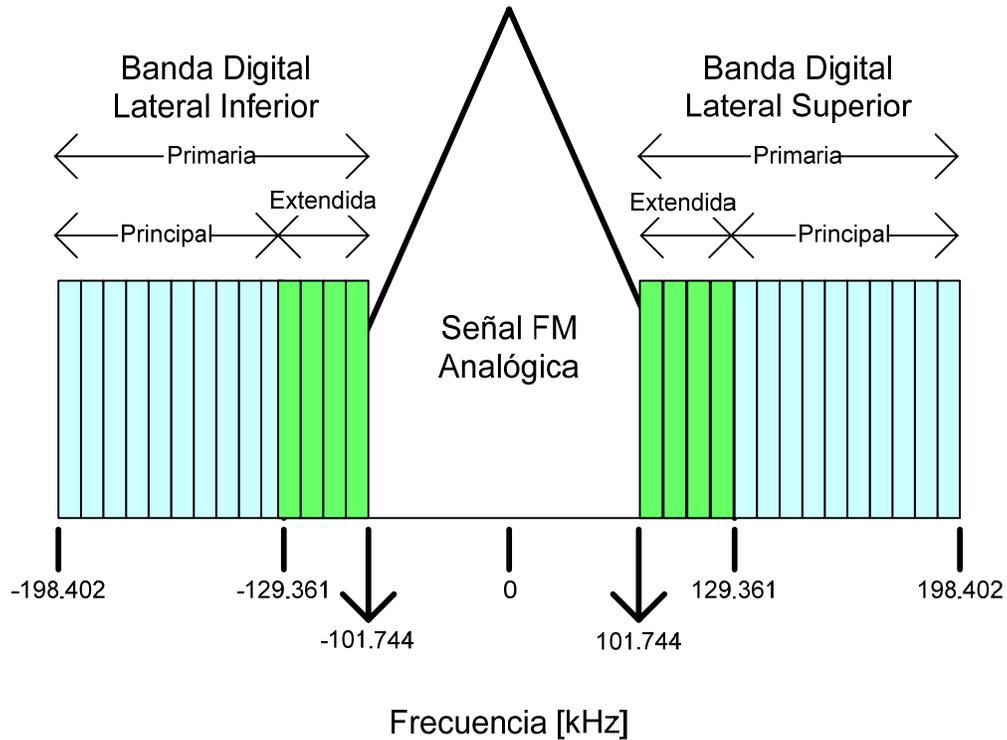


Fig. 1.8 – Espectro de la señal híbrida extendida FM-IBOC

Dependiendo del modo de servicio, una, dos o cuatro particiones de frecuencia pueden agregarse. Las bandas laterales primarias extendidas superiores incluyen las sub-portadoras 337 a 355 (una partición de frecuencia), 318 a 355 (dos particiones de frecuencia) o 280 a 355 (cuatro particiones de frecuencia), y en las bandas laterales primarias extendidas inferiores se incluyen, de manera similar, las sub-portadoras -337 a -355, -318 a -355 o -280 a -355. El factor de escala utilizado para estas bandas extendidas es el mismo que para las bandas laterales principales primarias.

En la tabla 1.3 se resume la información concerniente a las bandas primarias superior e inferior para la forma de onda híbrida extendida.

Tabla 1.3 – Características de la forma de onda híbrida extendida para los modos de servicio MP2 a MP4

Banda Lateral	Número de Particiones de Frecuencias	Orden de la Partición	Rango de Sub-portadoras	Frecuencia de Sub-portadoras [Hz] desde la frecuencia central
Principal Primaria Superior	10	A	356 a 546	129,361 a 198,402
Principal Primaria Inferior	10	B	-356 a -546	-129,361 a -198,402
Extendida Primaria Superior (1 partición)	1	A	337 a 355	122,457 a 128,997
Extendida Primaria Inferior (1 partición)	1	B	-337 a -355	-122,457 a -128,997
Extendida Primaria Superior (2 particiones)	2	A	318 a 355	115,553 a 128,997
Extendida Primaria Inferior (2 particiones)	2	B	-318 a -355	-115,553 a -128,997
Extendida Primaria Superior (4 particiones)	4	A	280 a 355	101,744 a 128,997
Extendida Primaria Inferior (4 particiones)	4	B	-280 a -355	-101,744 a -128,997

Modo Digital

Las mayores ventajas del sistema se observan con la forma de onda solo-digital, en la cual la señal analógica es removida y el ancho de banda de las bandas laterales digitales primarias se extiende completamente, como en la forma de onda híbrida extendida. Además, esta forma de onda permite que las bandas laterales secundarias digitales de baja potencia sean transmitidas en el espectro desocupado por la señal FM analógica. La figura 1.9 ilustra esto.

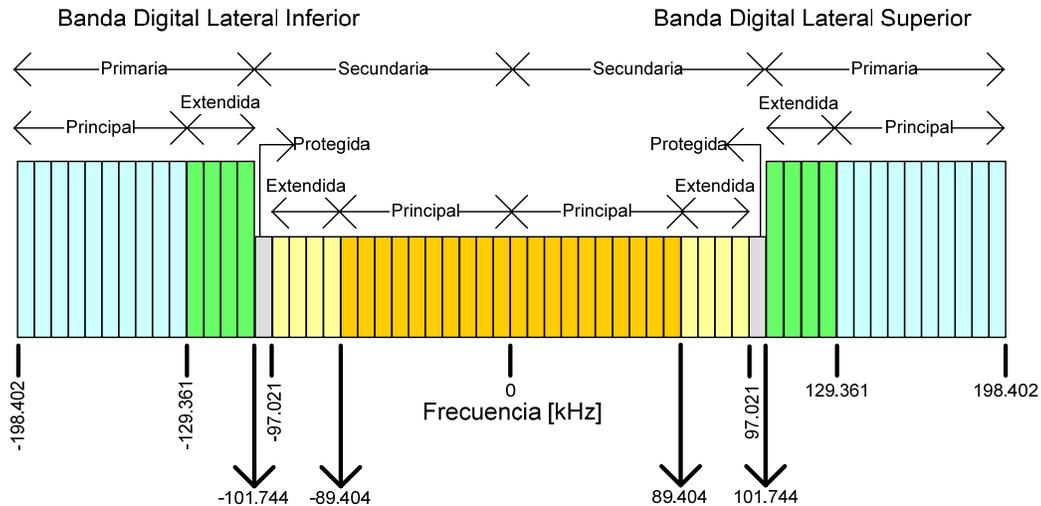


Fig. 1.9 – Espectro de la señal solo-digital FM-IBOC

Además de las diez particiones de frecuencia principales, las cuatro particiones de frecuencia extendidas están presentes en cada banda lateral primaria de la forma de onda solo-digital. Cada banda lateral secundaria también tiene diez particiones de frecuencia principales secundarias (SM) y cuatro particiones de frecuencia extendidas secundarias.

Cada banda lateral secundaria soporta una pequeña región protegida secundaria (SP) que consiste en 12 sub-portadoras OFDM y las sub-portadoras de referencia 279 y -279. Se les llama bandas laterales protegidas pues están localizadas en un área del espectro que es menos propensa a ser afectada por interferencia analógica o digital. Una sub-portadora adicional de referencia se coloca en el centro del canal.

Cada banda principal secundaria incluye las sub-portadoras 1 a 190 o -1 a -190. La banda lateral secundaria extendida superior incluye las sub-portadoras 191 a 266 y la banda lateral protegida secundaria superior incluye las sub-portadoras 267 a 278, además de la sub-portadora de referencia 279. Lo análogo ocurre en las bandas inferiores. El espectro total ocupado por la señal solo-digital es de 396.803 [Hz].

1.3. DRM, Digital Radio Mondiale

DRM es un estándar abierto de radiodifusión sonora digital, desarrollado por el consorcio con el mismo nombre surgido a finales de 1996 y que, sin embargo, se fundó oficialmente en 1998. El consorcio en sus inicios tenía como propósito desarrollar un estándar técnico abierto para reemplazar la radio AM analógica por un sistema digital. No fue sino hasta el 2001 cuando la UIT finalmente aprobó el sistema y lo ratificó como el estándar digital para las bandas de transmisión debajo

de 30 [MHz] e inició transmisiones regulares en Junio del 2003 en distintos países de Europa.

Los objetivos de este sistema son asegurar la migración de transmisión analógica a digital y mejorar la calidad de las transmisiones analógicas de radio, mediante la digitalización, en bandas con modulación por amplitud (AM): la onda larga (LW) de 150 [kHz] a 529 [kHz], la onda media (MW) de 530 [kHz] a 1710 [kHz] y la onda corta (SW) de 1711 [kHz] a 30 [MHz] [11].

La calidad de las señales que se transmiten con este sistema es muy cercana a la de señales FM y, además de la transmisión de contenido de audio, puede integrar servicios de datos y texto. Una ventaja de DRM es que utiliza las bandas asignadas actualmente para AM y no necesita de una nueva reasignación de frecuencias, además de estar diseñado para trabajar bajo el funcionamiento actual del sistema de transmisión analógica. Las señales pueden ser transmitidas en anchos de banda que van desde 4.5 [kHz] hasta 20 [kHz] dependiendo de las necesidades de transmisión y la disponibilidad del ancho de banda de las emisoras, que a su vez determinan el modo de transmisión. Las diferencias de cómo destina parte del tren de bits disponible para los canales hacia audio, datos y protección/corrección de errores, depende de la banda en que trabaja y modo de propagación. De esta forma el sistema puede adaptarse a las necesidades de los radiodifusores [16].

Este sistema de radiodifusión sonora digital, como IBOC, utiliza OFDM para la transmisión de sus señales, el número de sub-portadoras utilizadas varía de acuerdo al ancho de banda del que se dispone y, para un uso más eficiente de dicho ancho de banda, puede utilizar un de tres distintos codificadores de audio. Debe mencionarse además que no todas las sub-portadoras transmiten datos pues algunas se utilizan como sub-portadoras piloto o de referencia. Los datos que se van a transmitir se esparcen en estas sub-portadoras y dichas sub-portadoras se modulan con modulación en cuadratura. Vistos en el dominio de la frecuencia, los espectros de estas sub-portadoras aparecen encimados, sin embargo, gracias al principio de ortogonalidad, una vez que las sub-portadoras se sincronizan en el receptor, no se superponen entre sí y cada una puede ser demodulada por separado. DRM puede trabajar bajo uno de cuatro posibles modos de funcionamiento: A, B, C o D [12]. La robustez de la señal aumenta progresivamente con los modos de funcionamiento haciendo menos propensa a desvanecimientos y desvío de frecuencia por Doppler, de manera inversa, la tasa de transferencia disminuye al contar la señal con una mejor protección contra errores. Para cada modo de operación, esta protección contra errores tiene distintos niveles, y con el aumento de nivel se disminuyen las tasas de transferencia de los modos. Sin embargo, cuando existen procedimientos reglamentarios para utilizar canales de mayor anchura que 9 o 10 [kHz], la calidad de audio del sistema y su capacidad se mejoran de manera considerable [16].

Con la modulación en cuadratura, la lectura de la amplitud de una sub-portadora particular no significa nada, pues puede haber desvanecimiento selectivo en la

señal. Para determinar la lectura correcta, el software decodificador revisa la amplitud de la sub-portadora piloto más cercana a cada lado de la sub-portadora de datos. Por interpolación con las amplitudes conocidas de las sub-portadoras piloto transmitidas, se estima la respuesta del canal y se utiliza como un punto de referencia para corregir todas las amplitudes de las sub-portadoras de datos. De esta forma se simplifica la decodificación DRM, pues los efectos del desvanecimiento selectivo en la propagación puede medirse utilizando estas sub-portadoras piloto, además, al hacer la estimación del canal se habilita la demodulación coherente de OFDM [12].

En el modo de operación A de DRM se pueden transportar más datos que en el modo B: el modo A es utilizado principalmente para la onda media y propagación terrestre de la onda, en donde las características del desvanecimiento del canal son mejores que para la onda corta; de esta forma para el modo A es posible asignar más sub-portadoras de datos que de referencia, a diferencia del modo B.

La figura 1.10 ilustra de manera general el sistema, sin embargo una descripción más detallada se hará en capítulos siguientes.

El múltiplex MSC (Main Service Channel) de DRM se compone de uno a cuatro canales de audio o datos, también hay dos canales descriptivos llamados canales de acceso rápido (FAC) y existe aún otro canal llamado canal de descripción del servicio (SDC). Todos estos canales se codifican y posteriormente se les aplica la modulación OFDM con modulación en cuadratura. El sistema emplea principalmente el codificación de audio avanzado (AAC, Advanced Audio Coding) complementado con la replicación de banda espectral (SBR, Spectral Band Replication), que mejora la calidad de audio, con base en el contenido espectral de menor orden [16].

En el receptor, cualquier deterioro de la señal DRM, como desvanecimiento o interferencia debidos a la propagación, no es tan evidente como en el caso del AM, esto a causa del software decodificador DRM que recibe suficiente información correcta para ser capaz de reconstruir el audio o los datos como fueron originalmente codificados en el transmisor [12].

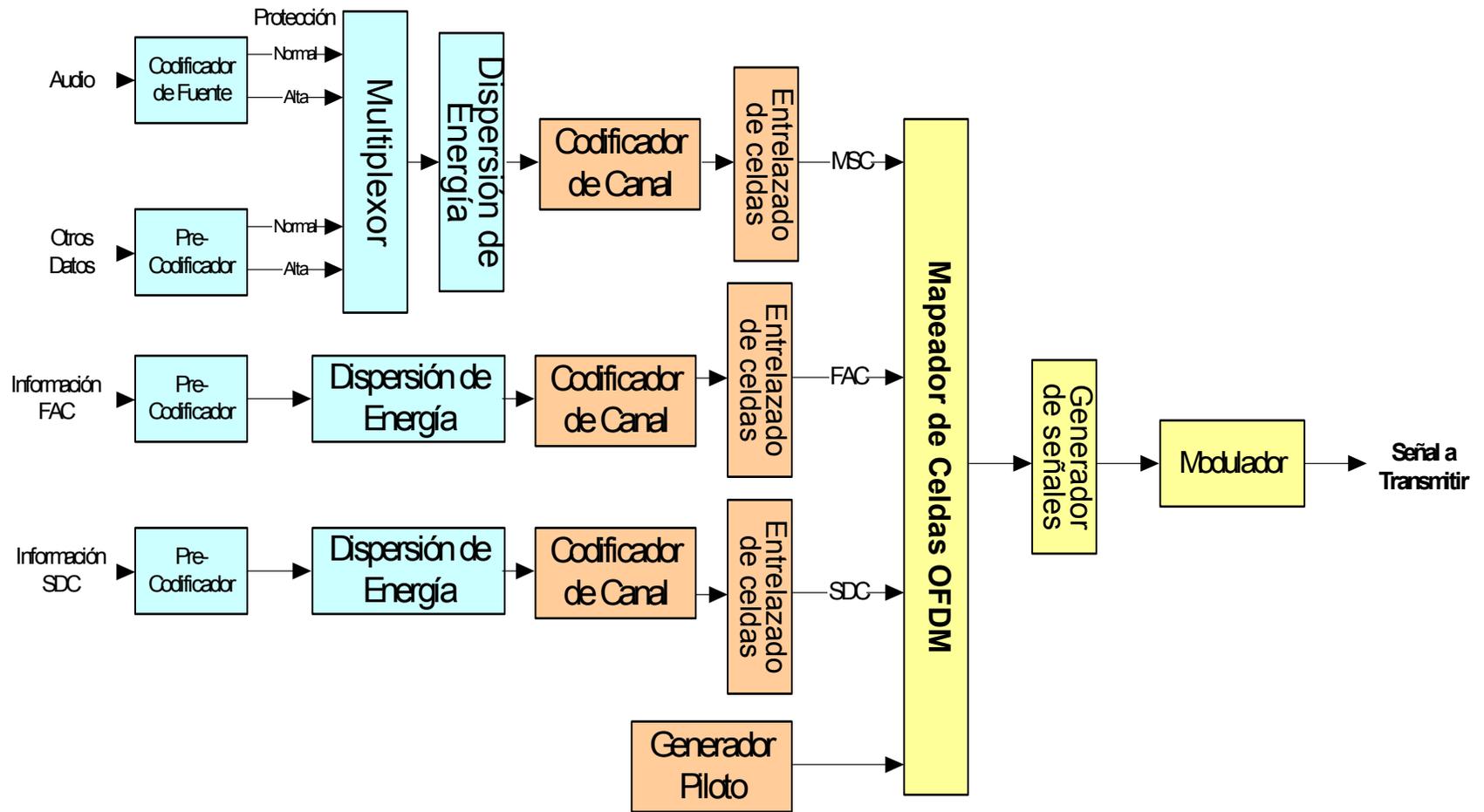


Fig. 1.10 – Diagrama de Bloques del Sistema DRM

1.4. SDARS, Satellite Digital Audio Radio Service

Este sistema consiste de una red de transmisión en la cual audio digital de alta fidelidad es transmitido desde satélites, la señal puede ser captada por los receptores de manera directa desde el satélite o bien por medio de repetidores terrestres.

El progreso de este tipo de sistemas, basados en la transmisión satelital, comenzó en 1992 en Estados Unidos cuando la FCC, comisión encargada de la regulación en telecomunicaciones en dicho país, permitió el uso de espectro dentro de la banda S (2.3 [GHz]) para la red nacional de radiodifusión basada en satélites llamada DARS. Solo cuatro compañías hicieron petición de la licencia que les permitiría dar este tipo de servicios, pero fue hasta 1997 que la FCC proporcionó dos de estas licencias a las compañías CD Radio (Sirius Satellite Radio) y American Mobile Radio Corporation (XM Satellite Radio), en bandas espectrales que costaron 83 y 89 millones de dólares respectivamente a estas compañías. La suma pagada solo les daba el privilegio de utilizar el espectro que se les concedió y, posteriormente, muchos más millones de dólares se invirtieron en esta incipiente industria [13].

Para el desarrollo de este sistema se necesitó desarrollar una nueva tecnología y satélites para la banda S, así como antenas receptoras y receptores en sí. Para el 2001, se lanzó el primer satélite de este tipo por parte de la compañía XM, por otro lado, la compañía Sirius lanzó su satélite en el 2002. La programación que transmiten estos sistemas se da a través de una suscripción: los usuarios pagan una cuota mensual y reciben la programación que casi no contiene comerciales. Dicha programación consta principalmente de música pero también incluye noticias, clima, deporte e información del tráfico. El servicio es utilizado principalmente por móviles, sin embargo, los receptores pueden ser instalados en residencias y negocios.

Además de las dos compañías antes mencionadas, existe también otra llamada WorldSpace Satellite Radio, que no lucra con los servicios que ofrece. De esta forma, son en total tres compañías principalmente las que proporcionan este tipo de servicios, a continuación una pequeña descripción.

1.4.1. XM Satellite Radio

Dentro del servicio que proporciona esta empresa, incluye una mayoría de canales de música, además canales de noticias, deportes y entretenimiento, así como de información del tráfico y clima.

Originalmente, XM proveía programación digital directamente desde tres satélites en la órbita geoestacionaria. El XM-1 ("Roll"), el XM-2 ("Rock") y el XM-3 ("Rhythm") conformaron la primera red de satélites para transmisión junto con una red terrestre de repetidores. Su área de cobertura comprende E.U.A, una pequeña

parte de Alaska y el sur de Canadá (ver figura 1.11). Las señales pueden recibirse también en las islas del Caribe y en la mayor parte del territorio mexicano, sin embargo, la recepción de señales en estos lugares no esta permitida. En la siguiente imagen se muestra lo anterior:

La vida útil de los satélites XM-1 y XM-2 se vio reducida a 6 años, de los 15 que estaban planeados, debido a fallas en su diseño. En compensación a esta falla, en el 2005 se lanzó el satélite XM-3 y se ubicó en la posición original del XM-1, haciendo que este último se colocara junto con el XM-2, permitiendo que cada satélite operara solo con un transponder y así disminuir su consumo de energía. En octubre del 2006, se lanzó también el XM-4 ("Blues") para completar el programa de reemplazamiento de los satélites. En diciembre del 2006, el satélite XM-1 fue apagado y colocado en su posición original, sirviendo como posible respaldo del XM-3. El XM-2 también será apagado y colocado junto al XM-4 para que sirva como respaldo de este. En consecuencia, habrá solo dos satélites activos a corto plazo: XM-3 y XM-4. Por otro lado, en junio del 2005, la empresa Space Systems/Loral anunció que había conseguido un contrato para el desarrollo del satélite XM-5.



Fig. 1.11 – Cobertura de los satélites de XM Satellite Radio

1.4.2. Sirius Satellite Radio

Provee de canales de música y otros tantos de noticias, deporte y entretenimiento. Sus satélites fueron desarrollados por Space Systems/Loral, desde el Radiosat-1 al Radiosat-4. En órbita existen tres de estos cuatro satélites y sus trayectorias son tales que siempre hay un satélite sobre el territorio de cobertura (E.U.A), vea la figura 1.12.

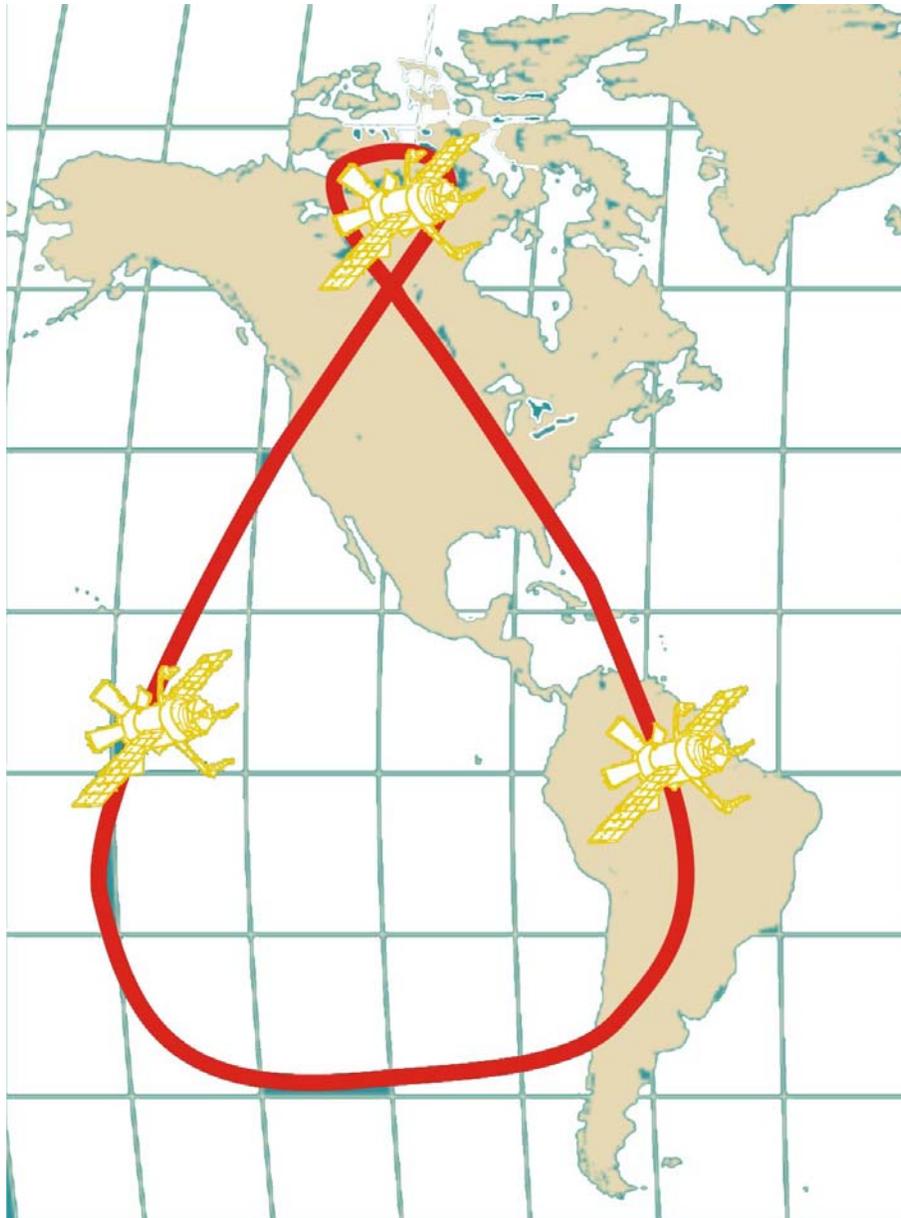


Fig. 1.12 – Órbita de los satélites de Sirius

Como se observa en la figura, hay tres satélites, cada uno efectúa un recorrido completo cada 24 horas y en cualquier momento del día, hay dos satélites ubicados por arriba del ecuador.

El cuarto satélite esta en reserva como respaldo a cualquier falla que se presente con los que están en órbita. La figura 1.12 muestra la trayectoria seguida por los satélites. Además de estos satélites, existe una red de repetidores terrestre, para ayudar en la recepción en lugares donde abundan edificios altos. La señal procesada en el receptor puede ser entonces la de un repetidor o la del satélite, esto depende de cual señal sea más potente y el proceso de elección es automático y transparente para el usuario. Tal como parece en la foto, se podría pensar que la recepción de las señales de Sirius es posible en Sudamérica, sin embargo, no es así, esto debido a que el uplink esta ubicado en E.U.A y la señal que se transmite a los satélites (para que estos la retransmitan después) no llega hasta el satélite que esta más al sur.

La compañía esta planeando lanzar un cuarto satélite para mejorar sus servicios, permitiendo además que, si falla un satélite en una constelación de cuatro, solo se tengan que reacomodar los tres restantes a sus órbitas actuales.

1.4.3. WorldSpace

Es una organización cuyo principal objetivo no es el lucro, por esta razón, el servicio no tiene costo, sin embargo, los receptores sí. Consta principalmente de dos satélites geoestacionarios llamados AfriStar, AsiaStar (existe también un tercero llamado AmeriStar aunque no ha sido lanzado) que trabajan en la banda L (1452 a 1530 [MHz]). También conocido como sistema D_H [17], es un sistema híbrido satélite/terrenal, fue diseñado para proporcionar radiodifusión digital de audio y datos por satélite para la recepción a bordo de vehículos, fija y portátil por medio de receptores comunes y económicos. Se ajusta al modelo OSI tal como indica la recomendación IUT-R BT.807, mediante su estructura de tres capas: física, de transporte y de servicio.

En 1998 y 2000 puso en órbita sus satélites AfriStar (21° Este) y AsiaStar (105° Este) respectivamente, en órbitas geoestacionarias [15]. Cada satélite tiene la función de cubrir determinadas áreas, en la figura 1.14 se muestra esto: AfriStar cubre África y el medio Oriente, por su parte AsiaStar cubre desde Indonesia e India a Corea y China.

Cada satélite transmite tres haces con más de 40 canales de programación disponible en distintos lenguajes. Los haces de los satélites están dirigidos principalmente a países en vía de desarrollo. La fundación WorldSpace, principal influyente en el contenido de este sistema, tiene el objetivo de proveer educación y programación informativa a la gente en países en desarrollo. Sus satélites fueron contruidos por Alcatel Space y Matra Marconi Space de Francia.

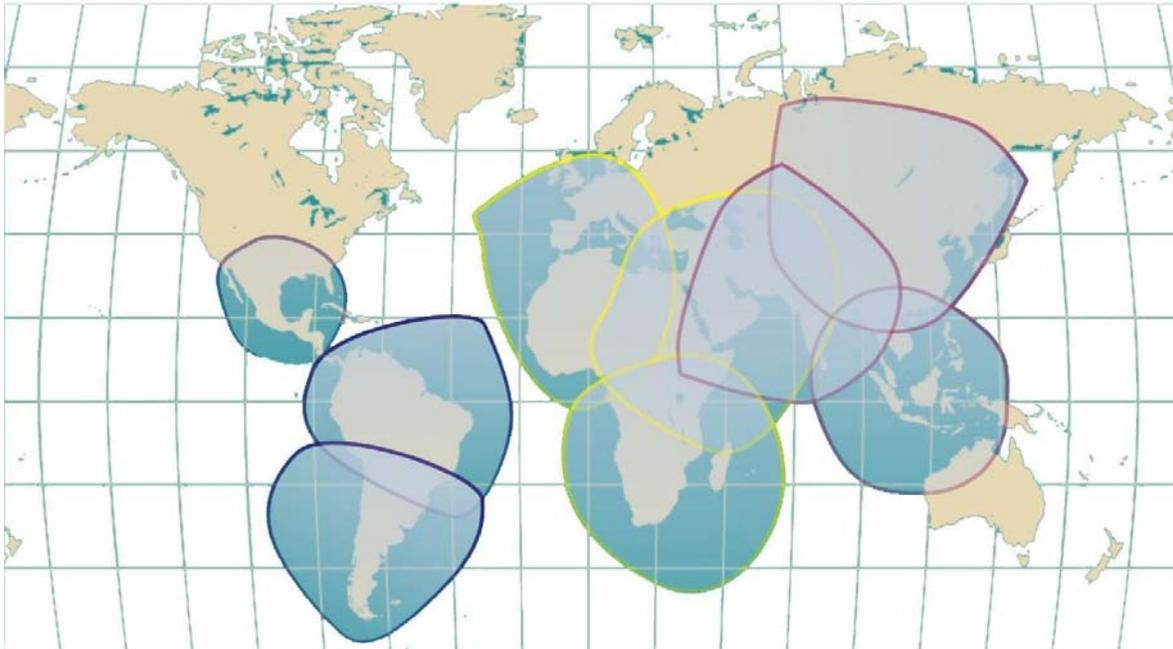


Fig. 1.13 – Área de cobertura de los satélites de WorldSpace.

El objetivo principal de esta organización era proveer un sencillo servicio de radio, pero mientras el proyecto se ha desarrollado, se ha dado más énfasis a características multimedia que involucren datos e imágenes. Otro de los objetivos era el de innovar, considerando el área de cobertura de sus satélites y su respectivo costo, las técnicas de codificación de audio avanzadas con una baja tasa de transferencia, sin embargo, el sistema al inicio no estaba diseñado para combatir los problemas que implicaba la recepción en móviles.

Dependiendo de la calidad de audio requerida para cada servicio, cada haz de uno de los satélites será capaz de transmitir hasta 96 servicios con 16 [kbps] cada uno. La codificación de audio que utiliza esta basada en el algoritmo MPEG de capa 3. La tasa de codificación para cada servicio esta disponible en múltiplos simples de un canal básico de 16 [kbps] hasta el máximo de 128 [kbps]. Subjetivamente, la calidad de audio que puede proveer va desde mejor que AM hasta calidad de CD.

Las emisoras que utilicen este servicio pueden subir sus programas desde hubs centralizados o bien a través de los enlaces de alimentación individuales localizados en cualquiera de las huellas de up-link de los satélites, dichas huellas se muestran en la figura 1.14.

Los emisores tendrán la opción de usar un enlace de subida local de baja potencia o enviar sus servicios a un enlace de subida remoto de alta potencia. Esto es posible debido al uso de FDMA para el enlace de subida.

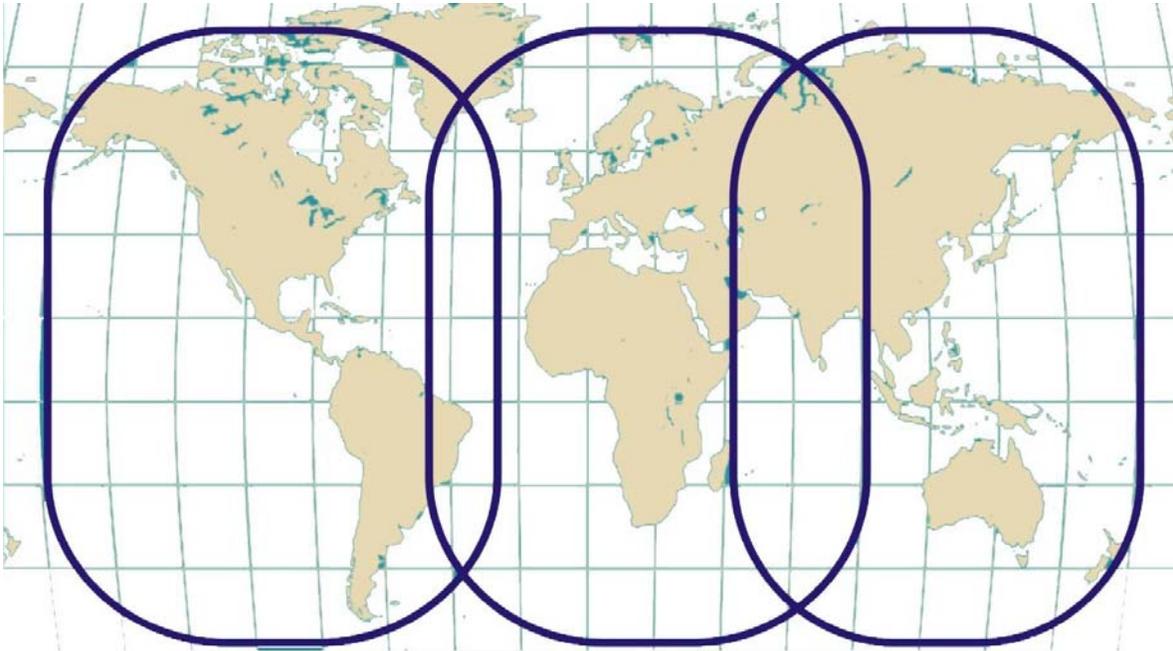


Fig. 1.14– Huellas de Up-Link de los satélites de WorldSpace.

Al ser recibidas en el satélite, las señales desde las estaciones de subida se ensamblan para formar el múltiplex. El arreglo permitirá que cada uno de los tres haces puede bajar su propio múltiplex. El enlace de bajada para cada haz utiliza TDMA y el procesamiento banda base en le satélite lleva acabo el proceso de conversión de FDM a TDM.

Bibliografía y Referencias

- [1] ITU-R Recomendación BS.1141-1: "Sistemas de radiodifusión sonora digital terrenal para receptores de vehículos, portátiles y fijos en la gama de frecuencias 30-3000 MHz"
- [2] ITU-R Recomendación BO.1130-2: "Selección de un sistema de radiodifusión sonora digital para los receptores instalados en vehículos, portátiles y fijos del servicio de radiodifusión (sonora) por satélite en la gama de frecuencias 1400-2700 MHz"
- [3] ETS 300 401 (Third edition): "Radio Broadcast Systems: Digital Audio Broadcasting (DAB) to Mobile, Portable and Fixed Receivers". ETSI, Sep. 2000
- [4] WARC-92 Resolution 528: "Introduction of the broadcasting-satellite service (sound) systems and complementary terrestrial broadcasting in the bands allocated to these services within the range 1-3 GHz". ITU Radio Regulations [RR-98] Volume 3
- [5] WARC-92 Resolution 527: "Terrestrial VHF digital sound broadcasting". ITU Radio Regulations [RR-98] Volume 3
- [6] www.worlddab.org/eureka147.php
- [7] www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_21/paper_21.shtml
- [8] Documento de especificaciones de transmisión de FM-IBOC, Ibiqity Digital
- [9] <http://beradio.com/eyeoniboc>
- [10] www.ibiquity.com
- [11] www.drm.org
- [12] www.drmradio.co.uk
- [13] www.streettech.com/archives_gadget/DARS.html
- [14] www.dogstarradios.com/sirasasecoma.html
- [15] www.worldspace.com/whatisit/overview.html
- [16] Recomendación de la UIT, BS.1514-1: "Sistema para radiodifusión sonora digital en las bandas de radiodifusión por debajo de 30 MHz"
- [17] Recomendación de la UIT, BS.1547: "Componente terrenal de los sistemas de radiodifusión sonora digital híbrida por satélite/terrenal para receptores instalados en vehículos, portátiles y fijos en la gama de frecuencias 1 400-2 700 MHz"

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE RADIO DIGITAL DE ONDA MEDIA

2. Descripción de los Sistemas de Radio Digital de Onda Media

El rango de frecuencias de la onda media va de 530 [kHz] a 1710 [kHz] y dentro de los sistemas de radiodifusión sonora digital, existen dos importantes estándares que trabajan en este rango de frecuencias: el sistema AM-IBOC y el sistema DRM. Es muy probable que alguno de estos sistemas sea adoptado en el futuro por las emisoras en México, sobre todo porque no necesitan de una nueva asignación de frecuencias y permite a las emisoras actuales seguir con sus transmisiones sin hacer gran modificación en sus instalaciones.

En este capítulo se describen estos dos sistemas, la mayoría de la información presentada fue adquirida de documentos y manuales de especificaciones proporcionados en los sitios correspondientes a cada sistema [1], [2].

2.1. AM-IBOC

El diseño del sistema IBOC se hizo pensando en que debía proporcionar un medio flexible de transición entre el sistema puramente digital y el analógico, por eso puede trabajar en dos modos distintos a cada uno de los cuales se asocia una forma de onda: Híbrida y totalmente digital. A diferencia de lo que ocurre en la forma de onda totalmente digital, en la forma de onda híbrida se conserva la señal analógica de AM llamada host que, por otra parte, debe ser de tipo monofónico, pues en el modo híbrido no se soporta una señal de tipo estéreo. La señal digital es modulada usando la multiplexión por división en frecuencia ortogonal (OFDM). OFDM es un esquema de modulación paralelo en el cual la secuencia de datos modula un gran número de sub-portadoras ortogonales que se transmiten simultáneamente. OFDM es muy flexible y permite el fácil mapeo de los canales lógicos en diferentes grupos de sub-portadoras.

El espectro de las señales se divide en bandas laterales, que representan agrupaciones de sub-portadoras. En secciones posteriores se presentan dichos espectros.

2.1.1. Capas AM-IBOC

El funcionamiento de este sistema esta organizado en función del modelo de capas del ISO OSI como sigue:

- Capa 5 (Aplicación). Presenta el contenido al usuario
- Capa 4 (Codificación). Codificación de fuente de contenido específico (PAC, HTML) así como identificación de la estación y capacidades de control.
- Capa 3 (Transporte). Uno o más protocolos de aplicación específica adaptados para proporcionar transferencia de los datos de capa 4 de forma robusta y eficiente.
- Capa 2 (Multiplexor de Servicios). Detección de errores limitada, direccionamiento, multiplexión de capa 3 a canales lógicos.

- Capa 1 (Física). Modulación, framing y procesamiento de señales (codificación e interleaving) al grado de servicio especificado.

La capa 1 del sistema convierte la información y control del sistema de capa 2 en una forma de onda AM-IBOC para su transmisión. La información y control es transportada en unidades de datos de servicio de capa 1 (L1-SDU) en canales lógicos a través de algún punto de acceso al servicio de capa 1 (L1-SAP).

Los L1-SDU varían en tamaño y formato dependiendo del modo de servicio, mismo que determina las características de transmisión de cada canal lógico; el modo de servicio es determinado, a su vez, por protocolos de capas superiores, en función de los requerimientos de la aplicación. Esto refleja la flexibilidad del sistema, que soporta envíos simultáneos de audio digital y datos, cumpliendo con los requerimientos de ambos servicios.

Para asegurar una buena sincronización y una rápida adquisición de estación, cada estación es sincronizada con GPS. Esto se logra mediante la sincronización con una señal sincronizada en tiempo y frecuencia con GPS.

2.1.2. Modo Híbrido

En la forma de onda híbrida, la señal digital es transmitida en bandas laterales primarias y secundarias a cada lado de la señal analógica host, así como debajo de las señales analógicas host en bandas laterales terciarias como se muestra en la siguiente figura 2.1.

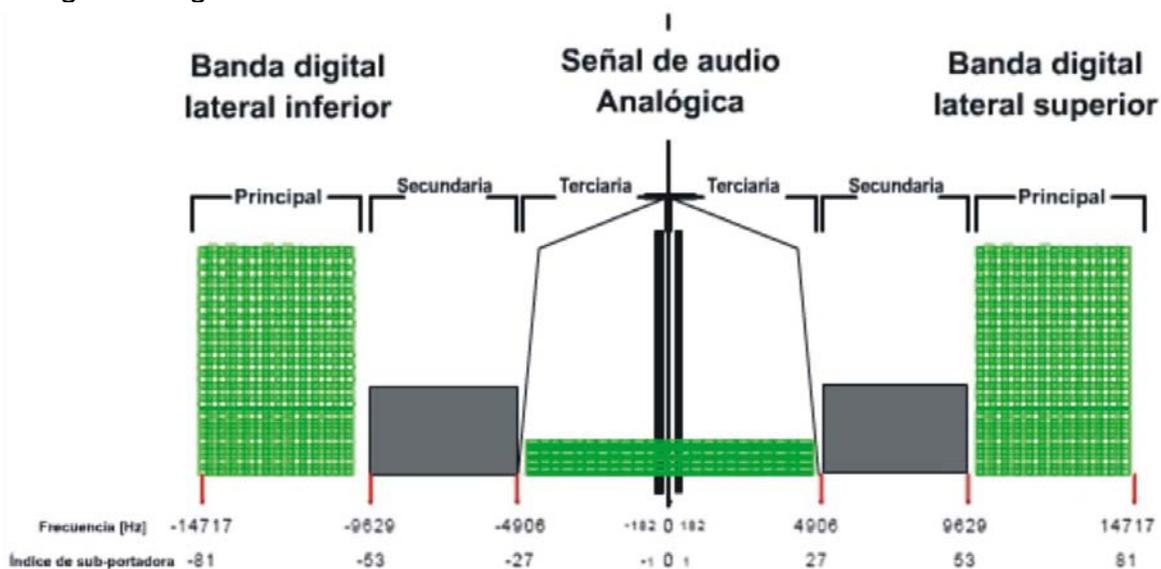


Fig. 2.1 – Espectro de la forma de onda híbrida AM-IBOC.

Adicionalmente, información de control y estado se transmite en sub-portadoras de referencia localizadas a cada lado de la portadora principal. Cada banda lateral tiene componentes superiores e inferiores. El canal lógico PIDS (ver sub-capítulo de canales del sistema) se transmite en portadoras individuales justo arriba y debajo de las frecuencias límite de las bandas laterales secundarias superiores e inferiores.

La potencia total de todas las bandas laterales digitales es menor al valor de potencia de la parte de la señal AM analógica. El nivel de cada sub-portadora OFDM, dentro de una banda lateral primaria o secundaria dada, es establecido en un valor constante y, por razones de interferencia, no todas las bandas poseen el mismo nivel de potencia, mismo que se establece con relación a la potencia de la señal analógica. Además, hay dos portadoras de referencia para el control del sistema cuyos niveles están establecidos en un valor que es diferente al de las otras bandas laterales. La información de estado y control es transmitida en sub-portadoras de referencia localizadas a cualquier lado de la portadora principal.

La tabla 2.1 muestra las características espectrales de la forma de onda híbrida.

Tabla 2.1- Características de la forma de onda híbrida AM-IBOC

Banda Lateral	Rango de Sub-portadoras	Frecuencias de Sub-portadoras [Hz] desde la frecuencia central
Primaria Superior	57 a 81	10356.1 a 14716.6
Primaria Inferior	-57 a -81	-10356.1 a -14716.6
Secundaria Superior	28 a 52	5087.2 a 9447.7
Secundaria Inferior	-28 a -52	-5087.2 a -9447.7
Terciaria Superior	2 a 26	363.4 a 4723.8
Terciaria Inferior	-2 a -26	-363.4 a -4723.8
Referencia Superior	1	181.7
Referencia Inferior	-1	-181.7
IDS1	27 y -27	4905.5 y -4905.5
IDS2	53 y -53	9629.4 y -9629.4

Las sub-portadoras individuales son numeradas de -81 a 81, la sub-portadora central tiene el número 0. Las sub-portadoras 54 a 56 y -54 a -56 no están representadas, debido a que no son transmitidas para evitar la interferencia por señales adyacentes primarias.

2.1.3. Modo Solo-Digital

Las verdaderas ventajas de este sistema se aprecian solo con la forma de onda totalmente digital. En ésta, la señal analógica es reemplazada con las bandas laterales primarias cuya potencia se incrementa con respecto a los niveles en la forma de onda híbrida. El resultado final es una señal digital de alta potencia con una reducción total del ancho de banda. Estos cambios proveen una señal digital más robusta que es menos susceptible a la interferencia de canales adyacentes.

La portadora AM sin modular es conservada. Además, la banda lateral superior secundaria se mueve a frecuencias más altas arriba de la banda lateral superior primaria y la banda lateral inferior terciaria se mueve a frecuencias más bajas debajo de la banda lateral inferior primaria, la potencia de estas dos bandas se incrementa también. La banda lateral inferior secundaria y la superior terciaria ya no se usan. Las sub-portadoras de referencia están localizadas a cualquier lado de la portadora AM no modulada como en la forma de onda híbrida, pero a niveles más altos. El espectro de la onda totalmente digital se muestra en la figura 2.2.

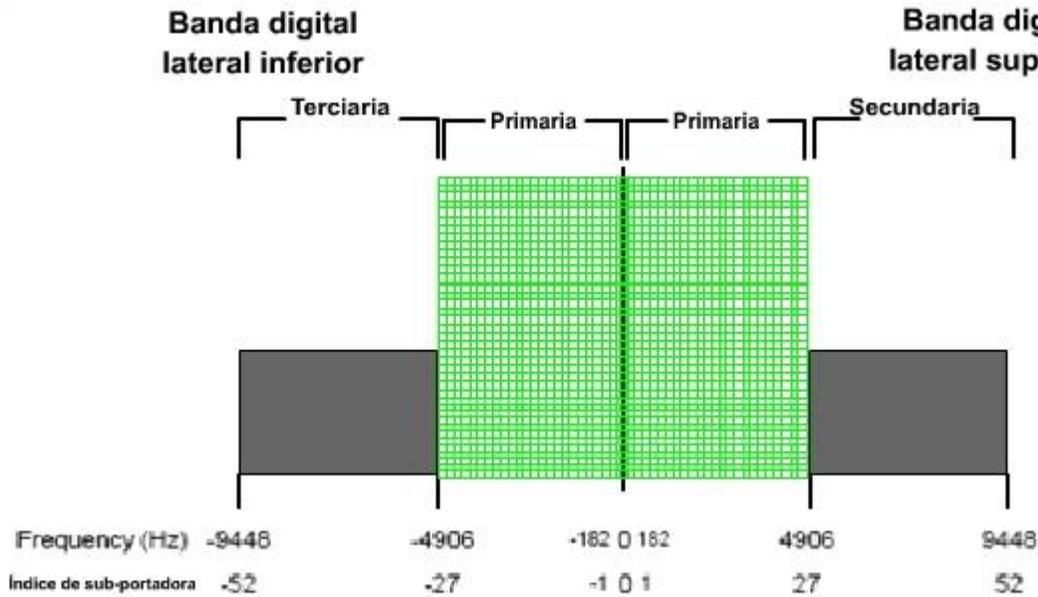


Fig. 2.2 - Espectro de la señal solo-digital AM-IBOC

El nivel de potencia de cada sub-portadora OFDM dentro de la banda lateral es fijado en relación a la portadora analógica principal no modulada. La tabla 2.2 muestra las características espectrales de la forma de onda totalmente digital.

Tabla 2.2 – Características de la forma de onda totalmente Digital

Banda Lateral	Rango de Sub-portadoras	Frecuencias de Sub-portadoras [Hz] desde la frecuencia central
Primaria Superior	2 a 26	363.4 a 4723.8
Primaria Inferior	-2 a -26	-363.4 a -4723.8
Secundaria	28 a 52	5087.2 a 9447.7
Terciaria	-28 a -52	-5087.2 a -9447.7
Referencia Superior	1	181.7
Referencia Inferior	-1	-181.7
IDS1	27	4905.5
IDS2	-27	-4905.5

2.1.4. Canales Definidos en el Sistema

El funcionamiento de IBOC, es decir, el transporte de la información para el usuario y la dedicada al desempeño del sistema, se hace por medio de canales que se configuran de acuerdo al modo de servicio y los requerimientos de la aplicación. A continuación se describen estos canales.

Canal de Control del Sistema

A través del canal de control del sistema (SCCH) se efectúa el control del modo de servicio (PSM), ancho de banda de audio analógico (AAB) y niveles de potencia (PL), estos datos se envían de la capa 2 a la 1, por otro lado, a través de este canal también es enviada la información para la sincronización de capa 1 a 2. Cuatro modos de servicio determinan todas las configuraciones permisibles de los canales lógicos. Estos son:

- a) Servicio híbrido modo MA1
- b) Servicio híbrido modo MA2
- c) Servicio digital modo MA3
- d) Servicio digital modo MA4

Canales Lógicos

Un canal lógico es un recorrido de la señal que conduce L1-SDU en frames de transferencia dentro y fuera de la capa 1 con un grado específico de servicio, determinado por el modo de servicio. Hay cuatro canales lógicos para protocolos de capas superiores: P1 (canal lógico principal 1), P2, P3, y PIDS (Canal lógico de servicio de datos IBOC primario). Los P1, P2 y P3 son utilizados para propósitos generales de transferencia de audio y datos, mientras que el canal PIDS está diseñado para llevar la información de los servicios de datos IBOC (IDS) y es transmitido en sub-portadoras individuales justo arriba y debajo de las frecuencias límite de la banda lateral secundaria superior e inferior.

Los canales lógicos P1 y P2 están diseñados para ser más robustos que el canal P3. Los canales lógicos P1 y P3 están disponibles para todos los modos de servicios, mientras que P2 está disponible solo para modos de servicio específicos. Esto permite una transferencia de información adaptable para manejar un gran número de aplicaciones.

En la tabla 2.3 se ilustra lo anterior, además podemos observar que los modos MA2 y MA4 proveen un tráfico más alto que los modos MA1 y MA3.

Tabla 2.3 – Canales lógicos disponibles en cada modo y tasa de información

Modo de Servicio	Tasa aproximada de información por canal [kbps]				Forma de Onda
	P1	P2	P3	PIDS	
MA1	20	0	16	0.4	Híbrida
MA2	20	20	16	0.4	Híbrida
MA3	20	0	20	0.4	Solo Digital
MA4	20	20	20	0.4	Solo Digital

El rendimiento de cada canal lógico se describe completamente a través de tres parámetros de caracterización: transferencia, latencia y robustez; el modo de servicio configura estos componentes para cada canal lógico activo.

2.1.5. Componentes Funcionales

A continuación se describe cada bloque funcional de la capa 1 y la señal que tiene asociada. En la figura 2.3 se muestra un diagrama de bloques de la capa 1. El audio y los datos pasan desde las capas superiores de OSI a la capa física a través de los puntos de acceso de capa 1.

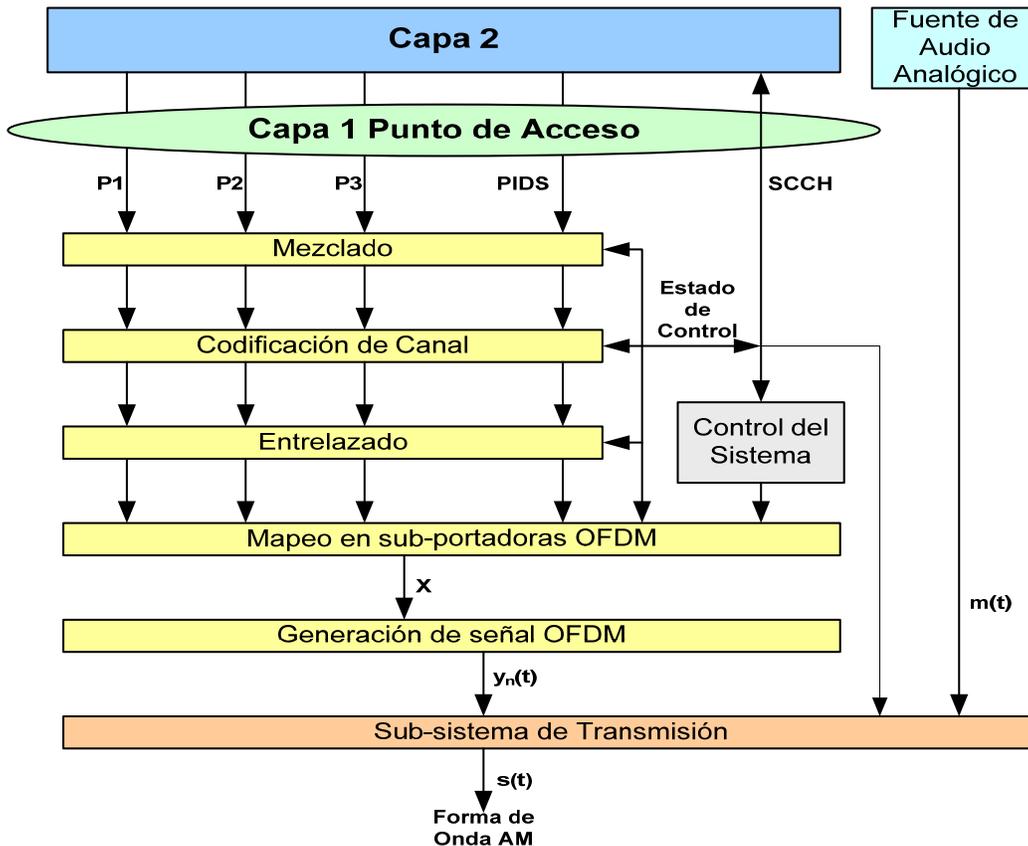


Fig. 2.3 – Diagrama de bloques del sistema para la capa 1

Punto de Acceso al Servicio L1

El L1-SAP sirve de interfaz entre la capa 2 y la 1. Cada canal entra en la capa 1 en frames de transferencia discretos, con un tamaño único y una tasa determinada por el modo de servicio (ver tabla de arriba). Los frames de transferencia que llevan información de la capa 2 son los L1-SDU.

Mezclado (Scrambling)

Esta función selecciona al azar los datos digitales llevados en cada canal lógico para evitar las periodicidades de la señal. A la salida del Scrambling o mezcla, los componentes o unidades de información del canal lógico conservan su identidad.

Codificación de Canal

Esta función utiliza la codificación convolucional para agregar redundancia a los datos digitales en cada canal lógico para mejorar su confiabilidad en presencia de problemas con el canal. El tamaño de las unidades de información del canal lógico se incrementa en proporción inversa a la tasa de código. Las técnicas de codificación son configuradas por el modo de servicio. A la salida del codificador de canal, las unidades de información del canal lógico conservan su identidad.

Entrelazado (Interleaving)

El entrelazado o interleaving en tiempo y en frecuencia es utilizado para atenuar los efectos de los errores Burst (cuando en una secuencia contigua de bits o símbolos, el último elemento y el primero de la siguiente secuencia son erróneos, haciendo que la secuencia entera sea errónea pues los bits de control llegan a ser incapaces de hacer la corrección). Las técnicas de interleaving se adaptan al ambiente de interferencia no uniforme de MF y son configurables por el modo de servicio. En este proceso, los componentes de los canales lógicos pierden su identidad.

Procesamiento de Control del Sistema

Esta función genera un vector de secuencias de datos de control del sistema que incluye información del control del sistema recibida de la capa 2 (por ejemplo, información del modo de servicio), y el estado para la transmisión en las sub-portadoras de referencia.

Mapeo de Sub-portadoras OFDM

Esta función asigna las matrices con interleaving y el vector de control del sistema a las subportadoras OFDM. Un renglón de cada matriz activa y un bit del vector de control del sistema es procesado en cada símbolo OFDM (cada T_S segundos) para producir un vector de salida X , que es una representación de la señal en el dominio de la frecuencia; dicho mapeo se hace en función del modo de servicio.

Generación de la Señal OFDM

Esta función genera la porción digital de la forma de onda AM-IBOC en el dominio del tiempo. Los vectores de entrada X son transformados en pulsos banda base en el dominio del tiempo, $y_n(t)$, definiendo un símbolo OFDM.

Para generar la señal OFDM se utilizan los símbolos complejos OFDM en el dominio de la frecuencia recibidos de la salida del mapeo de la sub-portadora OFDM y a la salida se tienen pulsos en el dominio del tiempo que representan la porción digital de la señal AM-IBOC. Un diagrama de bloques conceptual de la generación de la señal OFDM, se muestra en la figura 2.4.

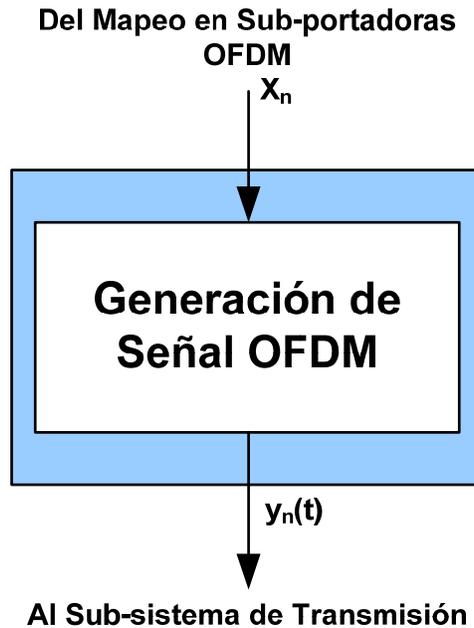


Fig. 2.4 – Diagrama de bloques de la generación de la señal OFDM

La entrada para la generación de la señal OFDM es un vector complejo, X_n de longitud L , que representa la constelación de valores complejos para cada subportadora OFDM en el símbolo n OFDM. La salida del generador de señal OFDM es un pulso $y_n(t)$ complejo en el dominio del tiempo, en banda base que representa la porción digital de la señal AM-IBOC para el símbolo n . El funcionamiento de este bloque se describe a continuación.

Sea $X_n[k]$ los puntos de la constelación compleja del mapeo de las sub-portadoras OFDM para el símbolo n , donde $k=0,1,\dots, L-1$ indica el número de sub-portadora OFDM. Sea $y_n(t)$ la salida compleja en el dominio del tiempo de la generación de señales OFDM para el símbolo n . Entonces $y_n(t)$ puede ser escrito en términos de $X_n[k]$ como sigue:

$$y_n(t) = W(t - nT_s) \sum_{k=0}^{L-1} X_n[k] \cdot e^{j2\pi\Delta f \left[k - \frac{L-1}{2} \right] (t - nT_s)}$$

donde $n=0,1,\dots, \infty$, $0 \leq t \leq \infty$, $L=163$ es el mínimo número de sub-portadoras OFDM, y T_s y Δf son el periodo del símbolo OFDM y el espaciamiento de las sub-portadoras OFDM, respectivamente.

La función de pulse-shaping, $W(\xi)$, se define como:

$$W(\xi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{3\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-4050\left(\frac{\tau}{T_s}\right)^2} H(\xi - \tau) d\tau} & \text{para } 0 \leq \xi \leq \frac{348}{270} T_s \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$$

donde

$$H(\xi) = \begin{cases} 0.5 \cdot \left[1 + \cos\left(\pi \frac{\alpha T - \xi}{\alpha T}\right) \right] & \text{para } 0 < \xi \leq \alpha T \\ 1 & \text{para } \alpha T < \xi < T \\ 0.5 \cdot \left[1 + \cos\left(\pi \frac{\xi - T}{\alpha T}\right) \right] & \text{para } T \leq \xi \leq (1 + \alpha)T \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$$

$\alpha=7/128$ es la anchura cíclica y $T=1/\Delta f$ es el recíproco del espaciamento de sub-portadoras OFDM. La figura 2.5 muestra un esbozo de la gráfica de la función pulse-shaping $W(\xi)$.

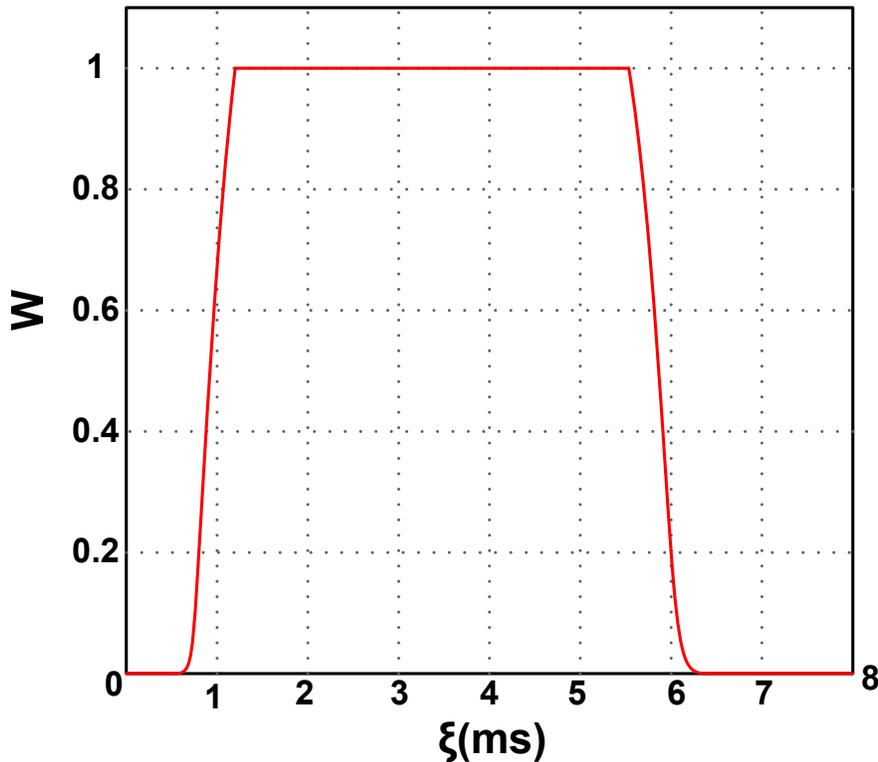


Fig. 2.5 – Gráfica de la función pulse-shaping

2.1.6. Subsistema de transmisión

En esta parte se da formato a la forma de onda en banda base para su transmisión a través del canal MF, aquí se incluyen pre-compensación, concatenación de símbolos y conversión superior de frecuencia (lleva la señal banda base a frecuencias más altas). Al transmitir la forma de onda híbrida, esta función retrasa, filtra y modula la fuente de audio AM analógico y la combina con la señal digital para formar la señal híbrida $s(t)$ lista para la transmisión.

La entrada a este módulo es un símbolo complejo en banda base en el dominio del tiempo, $y_n(t)$, del generador de señales OFDM. Una señal de audio analógico banda base, $m(t)$, es también entrada cuando se transmite la forma de onda híbrida. Además, la información del control de retraso de diversidad analógica (DD) también es entrada y viene directamente de la capa 2 través del SCCH. La salida de este módulo es la forma de onda AM-IBOC en MF.

En las figuras 2.6 y 2.7 se muestran diagramas de bloques de los subsistemas de transmisión híbrido y solo-digital, respectivamente.

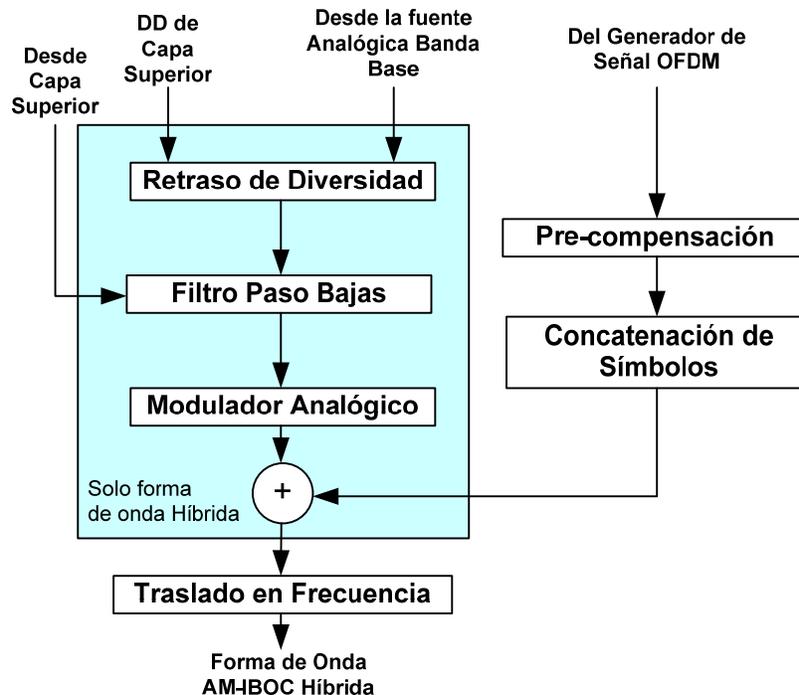


Fig. 2.6 – Subsistema de transmisión híbrido

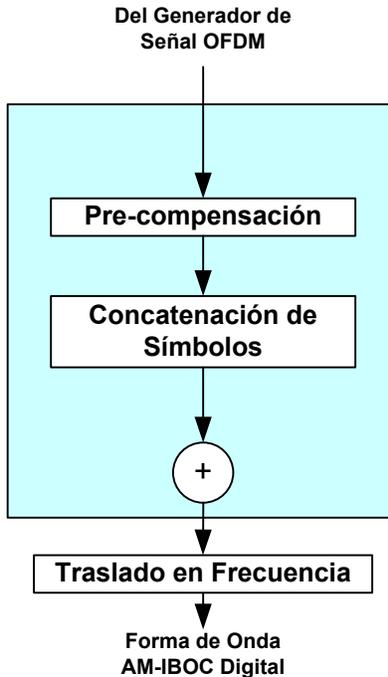


Fig. 2.7 – Subsistema de transmisión solo-digital

A continuación se detalla los componentes del subsistema de transmisión. Como puede verse en las figuras anteriores, el subsistema de transmisión para la forma de onda híbrida es más complejo que en caso de la forma de onda totalmente digital.

Concatenación de símbolos

Los símbolos OFDM individuales en el dominio del tiempo, salidos de la pre-compensación ISI (inter-symbol interference), se suman para producir un continuo de pulsos sobre $0 \leq t < \infty$ como sigue

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n'(t)$$

Retraso de Diversidad

Al transmitir la forma de onda híbrida, $y(t)$ se combina con la señal AM host analógica $a(t)$, como se muestra en la figura 0-3. El primer paso al generar $a(t)$ es la aplicación del retraso de diversidad a la señal de audio analógica banda base $m(t)$.

El bit de control de retraso de diversidad analógica (DD), recibido de la capa 2 a través del SCCH, es para habilitar o inhibir el retraso de diversidad. Si DD es 0, el retraso de diversidad se deshabilita, y se habilita si DD es 1. Cuando el retraso de diversidad es habilitado, un retraso ajustable τ_d se aplica a la señal de audio analógico banda base $m(t)$. El retraso es establecido de forma que, a la salida del

combinador analógico/digital, $a(t)$ se retrasa al contenido de la señal digital correspondiente, $y(t)$, en T_{dd} . Por ejemplo, si ambas señales, la digital y la analógica, llevan el mismo programa de audio, el audio analógico será retrasado de su correspondiente audio digital en T_{dd} a la salida del combinador analógico/digital.

Filtro Paso Bajas

En el modo híbrido, este proceso filtra, con paso bajas, los datos de audio analógico de acuerdo al estado del control ABB recibido de la capa 2. Si el bit de control es 0, el audio analógico es filtrado a un ancho de banda de 5 [kHz]. Si el bit de control es 1, el audio analógico es filtrado en un ancho de banda de 8 [kHz].

Modulador AM Analógico

Al transmitir la forma de onda híbrida, este proceso computa la envolvente de la señal AM analógica al aplicar un índice de modulación y agregando un offset como sigue:

$$a(t) = [1 + g \cdot m(t - T_{dd})]$$

donde $a(t)$ es la envolvente, $m(t - T_{dd})$ es la fuente analógica retrasada y g es el índice de modulación. Normalmente, $g=1.25$, representando un nivel de modulación del 125%.

Mezclador Analógico/Digital

Al transmitir la forma de onda híbrida, la forma de onda real analógica AM banda base, $a(t)$, es combinada con la forma de onda digital banda base, $y(t)$, para producir la forma de onda AM-IBOC híbrida compleja banda base, $z(t)$, como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Re}[z(t)] &= \text{Re}[y(t)] + a(t) \\ \text{Im}[z(t)] &= \text{Im}[y(t)] \end{aligned}$$

Los niveles de las bandas laterales digitales en el espectro de salida son establecidos ya desde el proceso de mapeo de las sub-portadoras OFDM.

Traslado en frecuencia (Up-Conversion)

La señal digital $z(t)$ se traslada de banda base a la frecuencia de portadora RF como sigue:

$$s(t) = \text{Re}(e^{j2\pi f_c t} \cdot z(t))$$

donde f_c es la frecuencia del canal RF. Para la forma de onda totalmente digital, $z(t)$ es reemplazada con $y(t)$.

2.2. Digital Radio Mondiale

2.2.1. Descripción del sistema

Los principios de funcionamiento de este sistema son muy similares a los del sistema IBOC, pero sus principales características son que utiliza diversos anchos de banda dependiendo del tipo de servicio o necesidades de transmisión de acuerdo al medio y, además, es un sistema abierto. El sistema utiliza COFDM (Multiplexión por División en Frecuencia Ortogonal Codificada) para la transmisión, de forma que los datos a transmitir, producidos por el audio codificado digitalmente y señales de datos asociadas, se reparten en un gran número de portadoras con cierto espaciado entre ellas. El número de portadoras puede variar según el ancho de banda asignado al canal y el grado de robustez requerido. Para el audio se utilizan tres tipos de codificadores, que más adelante se detallarán: MPEG4-ACC, MPEG4-CELP y HVXC.

Para el fácil manejo de la información, en el sistema DRM ésta se ha catalogado en dos grupos:

- Uno es el audio codificado y los datos que son combinados en el multiplexor de servicio principal, juntos forman el Canal de Servicio Principal (MSC).
- Otro grupo es la información que puentea el multiplexor (no pasa a través de él) de servicio principal y que forma el Canal de Acceso Rápido (FAC) y el Canal de Descripción del Servicio (SDC). Estos canales tienen como propósito la identificación y selección de parámetros para la transmisión, así como asegurar que se elijan los parámetros de decodificación apropiados en el receptor.

Un codificador de audio y pre-codificadores de datos aseguran la adaptación de la información de entrada a formato digital. La salida de estos codificadores se compone de dos partes a las cuales, un codificador de canal siguiente, agregará uno de dos niveles de protección distintos.

La figura 2.8 se ilustra el sistema y el flujo de información:

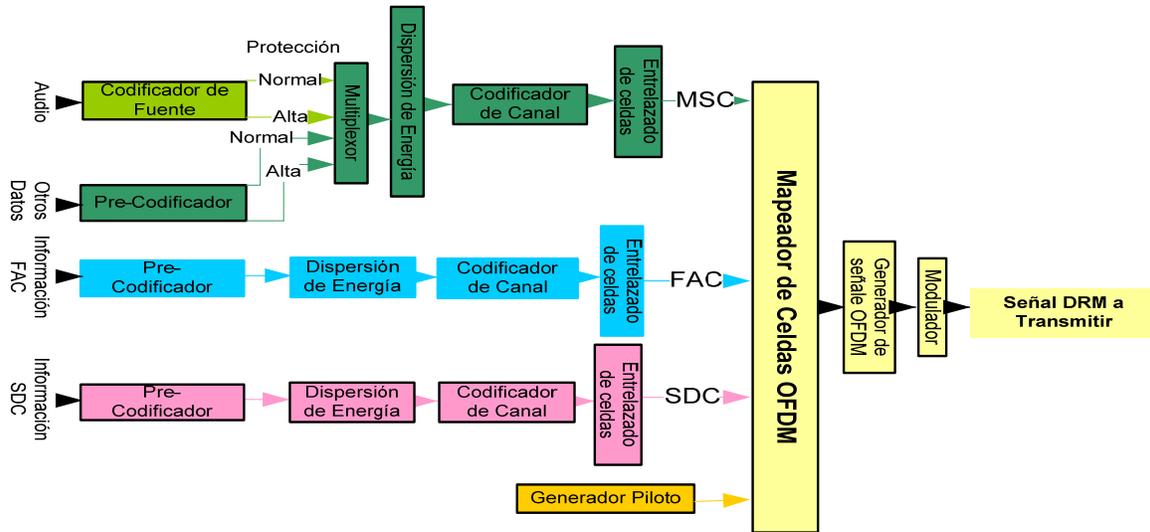


Fig. 2.8 – Diagrama de bloques del sistema DRM y la información asociada

El multiplexor combina los niveles de protección de todos los servicios de audio y datos en un formato definido, dentro de la estructura del frame de un flujo de bits.

La Dispersión energética provee una mezcla definida de los bits de cada canal (MSC, FAC y SDC) que reduce la posibilidad de regularidades indeseadas en la señal transmitida, es decir, secuencias constantes de bits.

El codificador de canal agrega bits de redundancia a los datos, para proveer medios de protección contra errores y corrección de los mismos, también define el mapeo de la información codificada digitalmente en celdas QAM. Estas son las portadoras básicas de la información que el transmisor utiliza para la modulación.

El interleaving de las celdas o entrelazado del canal MSC en tiempo y frecuencia, reordena la secuencia de los bits de la señal de forma simétrica como un medio para revolver la señal, de esta forma, la reconstrucción final de la señal en el receptor será menos afectada por los desvanecimientos rápidos que si los datos o música hubieran sido transmitidos en su orden original.

El generador de piloto agrega información que permite al receptor deducir la información de ecualización del canal (que incluye información de fase), y así permite la demodulación coherente de la señal.

El dispositivo que mapea hacia celdas OFDM junta las diferentes clases de celdas y las coloca en una rejilla tiempo-frecuencia. OFDM depende de varias sub-portadoras, cada una de las cuales lleva su propia señal sinusoidal por cierto tiempo. El arreglo de la información en estas sub-portadoras contiene todo lo necesario para la transmisión. En el caso de una señal OFDM DRM ocupando un canal de 10 [kHz] habrá de 88 a 226 sub-portadoras, dependiendo del modo de transmisión.

El modulador convierte la representación digital de la señal OFDM en una señal analógica que será transmitida a través de una antena o transmisor al aire (esencialmente representaciones de fase o amplitud, modulando las sub-portadoras RF).

Con un transmisor no lineal de alta potencia convencional, la señal primero se descompone en sus componentes de amplitud (A) y fase (RFP) para que ingresen después a la entrada del modulador de audio y circuitos de manejo de frecuencia respectivamente. Las señales A y RFP se ajustan para asegurar sincronía en el modulador, luego se recombinan (por acción del transmisor) a través de este esquema de modulación híbrido. Esta técnica de descomposición A/RFP no es requerida en el caso de un transmisor que utilice amplificación lineal. En este caso, la señal compuesta OFDM se aplica a la entrada del transmisor en lugar de la señal AM analógica usual.

2.2.2. Codificador y Características de la Señal

Para permitir un balance entre calidad de audio y el número de servicios proporcionados, el sistema DRM provee tres diferentes codificadores de audio, como ya se ha mencionado, que varían en calidad proporcionada, requerimientos de la aplicación y la tasa de bits. El funcionamiento de los tres codificadores puede mejorarse mediante el uso opcional de la codificación SBR (Spectral Band Replication):

- MPEG4 AAC, utilizado como codificador de audio de propósito general y provee la mejor calidad y funciona de forma óptima para tasas aproximadas de 20 kbps o superiores, utiliza una frecuencia de muestreo de 12 o 24 [kHz].
- MPEG4 CELP, para codificación de voz de alta calidad con tasa de 10 kbps sin contenido musical; utiliza una frecuencia de muestreo de 8 o 16 [kHz]. Con este codificador se pueden realizar transmisiones multilingües.
- HVXC, también para la codificación de voz pero a una baja tasa de bits: de 2 a 4 kbps, y frecuencia de muestreo de 8 [kHz]. Se utiliza para la transmisión de servicios de voz junto con los servicios de audio del codificador AAC.

La codificación adicional SBR es opcional y comúnmente se utiliza con AAC, esto mejora la calidad de audio pues “mejora” el ancho de banda de la señal con el uso de solo 2 kbps para datos adicionales en la codificación y, en el decodificador del receptor, se implementa cierto algoritmo para utilizar esta información.

En la figura 2.9 se muestra la variedad de los codificadores de este sistema. Cada codificador opera sobre cierto rango de tasa de bits y, por eso, soportan también cierto rango de calidad de audio.

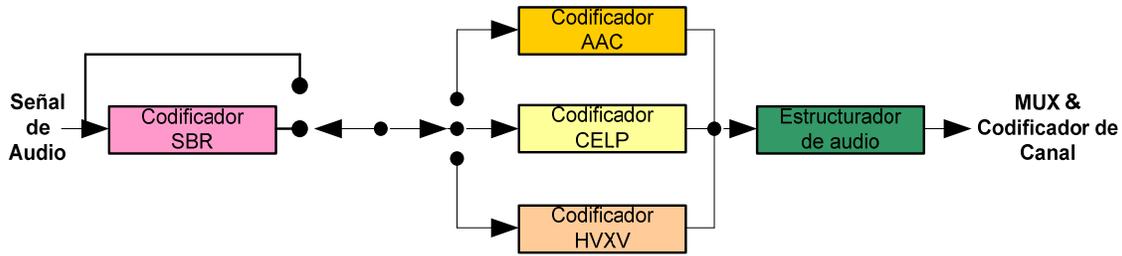


Fig.2.9 – Diferentes Codificadores de Audio con posible aplicación de SBR

En lo referente a la robustez de la señal, la tabla 2.4 muestra cómo algunos parámetros de la señal DRM pueden modificarse de acuerdo a las necesidades, como área de cobertura, de las emisoras.

Tabla 2.4 – Diferentes valores para configuración de parámetros de la señal DRM

Robustez	Modulación del MSC (nQAM)	Opciones de ancho de banda [kHz]	Aplicaciones comunes
A	16, 64	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	Cobertura local y regional con onda de superficie en bandas LW y MW.
B	16, 64	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	Cobertura nacional e internacional con onda aérea en bandas MW y SW
C	16, 64	10, 20	Cobertura Internacional en banda SW con señal más robusta
D	16, 64	10, 20	Cobertura nacional en banda SW para NVIS

La propagación en bandas AM puede ser terrestre, donde el principal factor adverso es el ruido eléctrico; o bien propagación aérea, donde además del ruido eléctrico existe el retardo diferencial y el efecto Doppler. En algunos casos, es necesario el uso de los dos tipos de propagación para llegar a determinados lugares. Para contrarrestar estos factores adversos, así como distorsiones o ruido adicionales debidas a la trayectoria de la señal, el sistema DRM puede funcionar bajo cuatro modos distintos de propagación, con cierta modulación y tasas de codificación.

Para condiciones de propagación particulares, la elección adecuada de los parámetros asegura que la señal de audio sea recibida con la mejor calidad posible de acuerdo a los requerimientos de cobertura y posibilidades de cada emisora. Así, el modo de transmisión A está diseñado para dar la más alta tasa de bits posible para la propagación terrestre. El modo B es la mejor opción para la transmisión aérea. Los modos C y D se utilizan para lugares donde las condiciones de transmisión son malas, como trayectorias largas con múltiples

obstáculos o incidencia casi vertical de la señal donde pueden ocurrir fuertes reflexiones. En cualquier caso, puede escogerse entre modulación 64QAM o 16QAM para el Canal de Servicio Principal (MSC), dicha elección esta determinada sobre todo por la relación señal a ruido (SNR), de forma que 16QAM es escogida para lugares donde la SNR puede ser muy baja como para soportar 64QAM. Naturalmente, la elección de modos más robustos o una modulación más robusta afectará la calidad del sonido: reduciéndola.

2.2.3. Flexibilidad del Sistema

En el caso de la flexibilidad del sistema, dentro de los inconvenientes implicados con la elección de los parámetros de modulación requeridos para proporcionar la calidad de sonido deseada, la emisora tiene opciones en el uso de la capacidad disponible del MSC. Si hay suficiente capacidad para alcanzar una buena calidad de audio, la emisora puede proveer un servicio de datos junto con el audio, o bien puede dividir la capacidad para proveer más de un servicio de audio. La tabla 2.5 muestra el rango de tasas de bits disponibles para diferentes niveles de robustez de la señal y ancho de banda.

Tabla 2.5 – Tasa de bits del MSC para distintos modos y modulación

Modo	Modulación del MSC (nQAM)	Ancho de banda de la señal [kHz]					
		4.5	5	9	10	18	20
		Tasa de bits aproximada [kbps]					
A	64	9.4	10.6	19.7	22.1	40.9	45.8
		14.7	16.7	30.9	34.8	64.3	72
	16	6.3	7.1	13.1	14.8	27.3	30.6
		7.8	8.9	16.4	18.5	34.1	38.2
B	64	7.2	8.3	15.3	17.5	31.8	35.8
		11.3	13	24.1	27.5	50	56.1
	16	4.8	5.5	10.2	11.7	21.2	23.8
		6	6.9	12.8	14.6	26.5	29.8
C	64				13.8		29
					21.6		45.5
16	9.2				19.3		
	11.5				24.1		
D	64				9.2		19.5
					14.4		30.6
16	6.1				13		
	7.6				16.3		

El sistema también es flexible en otros aspectos, en los que la emisora puede variar el ancho de banda de la señal para satisfacer los requerimientos espectrales de las diferentes bandas de frecuencia en diferentes regiones del mundo. Este

hecho, da la posibilidad de proveer los servicios conocidos como IBOC: utilizando el modo jerárquico de señales DRM de 4.9, 9 o 10 [kHz] de ancho de banda, éstas pueden ser transmitidas a cada lado de una señal analógica de 9 o 10 [kHz]. Además, donde la planeación de la estructura de AM lo permita, señales con doble ancho de banda (18 o 20 [kHz]) pueden ser transmitidas para incrementar el nivel de la calidad de audio.

Actualmente se trabaja en el desarrollo de propuestas para la opción de “simulcast” en un solo canal, donde una señal analógica y una DRM juntas ocupan un ancho de banda de 9 o 10 [kHz], lo que daría la posibilidad de una señal que sea compatible tanto con receptores analógicos como digitales.

2.2.4. Simulcast en un solo Canal

El “simulcast” es una opción para emisoras que aún deben satisfacer la demanda analógica de muchos radioescuchas durante los siguientes años, pero que también desean introducir los servicios DRM lo más pronto posible. Sin una nueva asignación de frecuencia o la inversión en nuevo equipo, las emisoras pueden tener la posibilidad de transmitir simultáneamente su servicio analógico y el nuevo servicio DRM, con el mismo contenido, utilizando sus transmisores y antenas existentes. Esta opción es más aplicable a las emisoras en las bandas LW y MW, donde es más difícil obtener una nueva asignación de frecuencia. Idealmente, las emisoras desean transmitir sus servicios utilizando simulcast en un solo canal (SCS), de forma que la señal analógica y la digital estén contenidas dentro del canal asignado de 9 o 10 [kHz].

El sistema DRM soporta varias opciones de simulcast. Los actuales modos simulcast soportados requieren del uso adicional de espectro fuera de los 9 o 10 [kHz] del canal asignado (conocido como simulcast multi-canal o multi-frecuencia, MCS). La señal DRM puede ubicarse en el canal adyacente superior o inferior y puede ocupar la mitad o todo el canal dependiendo de la opción de ancho de banda escogida. La figura 2.10 muestra un ejemplo para la configuración de 9 [kHz].

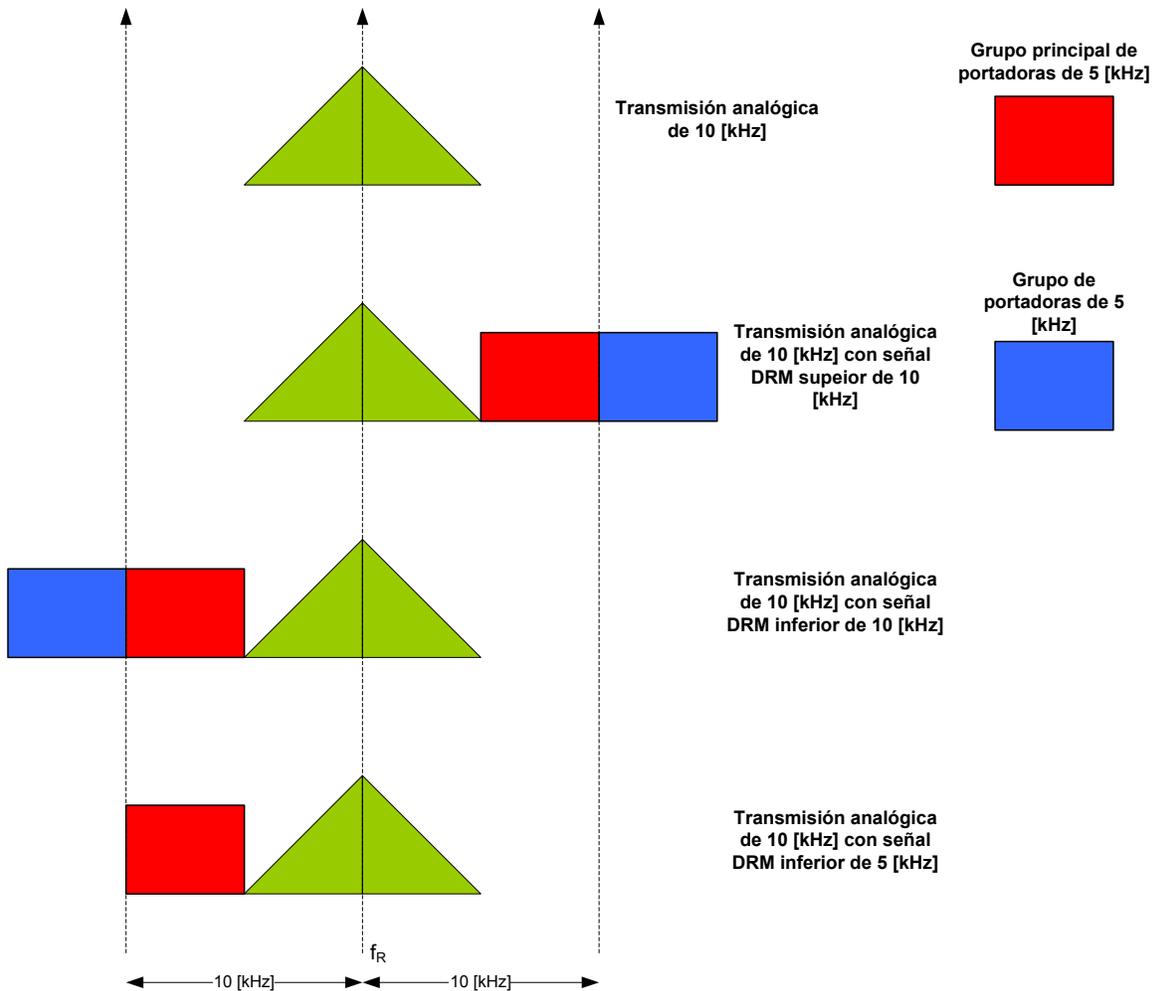


Fig. 2.10 – Espectro de la señal DRM para un ancho de banda de 10 [kHz] en modo simulcast del MCS

En las pruebas para determinar los niveles de la señal con los que se puede obtener una buena calidad de audio sin afectar el servicio analógico existente, se obtuvo que para lograr esos objetivos, el nivel de la señal DRM debe estar fijado entre 14 y 16 dB por debajo de la señal analógica adyacente. De cualquier forma, la modalidad SCS del sistema DRM está aún en desarrollo.

El sistema DRM provee un gran número de aplicaciones de datos, las cuales pueden ir desde un servicio de textos simple con una baja tasa de transferencia junto con el audio, hasta el uso entero de la capacidad MSC para servicios de datos multimedia. Sin embargo, como es seguro que gran parte de la capacidad del MCS siga siendo utilizada para servicios de audio durante mucho tiempo, por el momento es suficiente asignar una tasa de 2 a 4 kbps para cualquier servicio de datos, sin afectar dicho servicio de audio. Actualmente se desarrolla una especificación abierta, en conjunto con WorldDAB, para que estos servicios de

datos puedan mejorarse y puedan ser utilizados en dispositivos como palms, PC y dispositivos de audio portátiles.

2.2.5. Componentes del Sistema

Multiplexión

El sistema de transmisión DRM emplea un multiplexor para procesar muchas componentes de la señal que juntas proveen la información requerida por el receptor para sincronizar la señal, determinar qué parámetros de la señal se están utilizando y luego decodificar los servicios contenidos dentro de la información multiplexada (audio y datos). Para permitir que este proceso sea efectuado eficientemente por el receptor, los datos transmitidos se separan en tres componentes principales: el Canal de acceso Rápido (FAC), el Canal de Descripción del Servicio (SDC) y el Canal de Servicio Principal (MSC). El sistema DRM utiliza la técnica conocida como codificación multinivel. Esto significa que estos diferentes componentes multiplexados utilizan también una modulación distinta para asegurar que las componentes más importantes sean más resistentes a los problemas de propagación.

Canal de Acceso Rápido

Es el primer componente que el receptor debe decodificar, transmite los datos más importantes y por eso es transmitido con la modulación más robusta: 4QAM. Debido a la baja complejidad de modulación, no está espaciado en tiempo, como ocurre con el SDC y el MCS. Esto asegura que el receptor ocupe el menor tiempo posible en adquirir y decodificar la información y que sea capaz de hacerlo con una SNR más baja que la requerida para los otros dos componentes. Si la decodificación del SDC y el MCS falla, por un desvanecimiento por ejemplo, el FAC asegurará la sincronización del receptor, minimizando así el tiempo de recuperación del servicio de audio después del término del desvanecimiento. Este componente también lleva la información correspondiente al ancho de banda utilizado por la señal DRM, la modulación utilizada por el SDC y el MSC, el número de servicios contenidos dentro del MSC y sus nombres.

Canal de Descripción del Servicio

Una vez que la información del FAC ha sido correctamente decodificada, el receptor comienza con la decodificación de la información del SDC. Entre otras cosas, el SDC describe en detalle cómo decodificar los servicios contenidos en el MSC y también indica en qué otras frecuencias se porta el mismo servicio u otro relacionado, en qué regiones y cuándo están disponibles. Se utiliza interleaving en los datos del SDC para que sea más resistente al desvanecimiento. Utiliza una modulación menos compleja que el MSC y por eso puede decodificarse con una SNR más baja que el MSC.

Canal de Servicio Principal

Este componente contiene la mayoría de la capacidad de datos en una señal DRM; puede llevar hasta cuatro servicios separados y cada uno de ellos puede ser designado como servicio de audio o de datos. Utiliza modulación 16 o 64QAM. Se puede aplicar protección contra errores y además se aplica espaciamiento en tiempo para hacerlo más resistente contra algún desvanecimiento.

Codificación de Fuente

El rango de tasas de bits de códigos utilizables va desde 2 kbps (mínimo de HVXC) hasta 34 kbps (máximo de AAC con un canal de transmisión de 9 o 10 [kHz]); si se tienen dos canales de operación, la capacidad alcanza un máximo de hasta 74 kbps. Con la codificación mediante ACC, con o sin SBR, se obtiene una calidad de audio equivalente al FM monofónico; por otro lado, HVXC y CELP se utilizan para codificación de voz y proporcionan una buena calidad con 4 y 8 kbps respectivamente.

Como ya se mencionó, el SBR es utilizado para mejorar la percepción de una banda inferior de una señal de audio truncada espectralmente (cuya frecuencia de corte superior esta alrededor de 6 [kHz]) mediante el uso del contenido espectral de la información de la banda inferior para simular la información faltante de bandas superiores. Esto requiere de una señal SBR “ayudante” de aproximadamente 2 kbps y por eso no afecta mucho la señal codificada con AAC de 20 a 25 kbps. Todavía puede mejorarse la señal para alcanzar un nivel de FM estereofónico con ayuda de otra señal “ayudante” de 2 kbps derivada en la codificación de audio de la señal estéreo original.

Modulación de canal

Para transmitir los datos multiplexados, el sistema DRM utiliza COFDM, el cual usa una combinación de técnicas para combatir los efectos adversos en los canales de propagación en las bandas de AM. En este esquema de modulación se utilizan muchas sub-portadoras, separadas entre sí a la misma distancia, para transmitir los datos. La figura 2.11 ilustra la situación en el dominio del tiempo y la frecuencia para 5 sub-portadoras adyacentes.

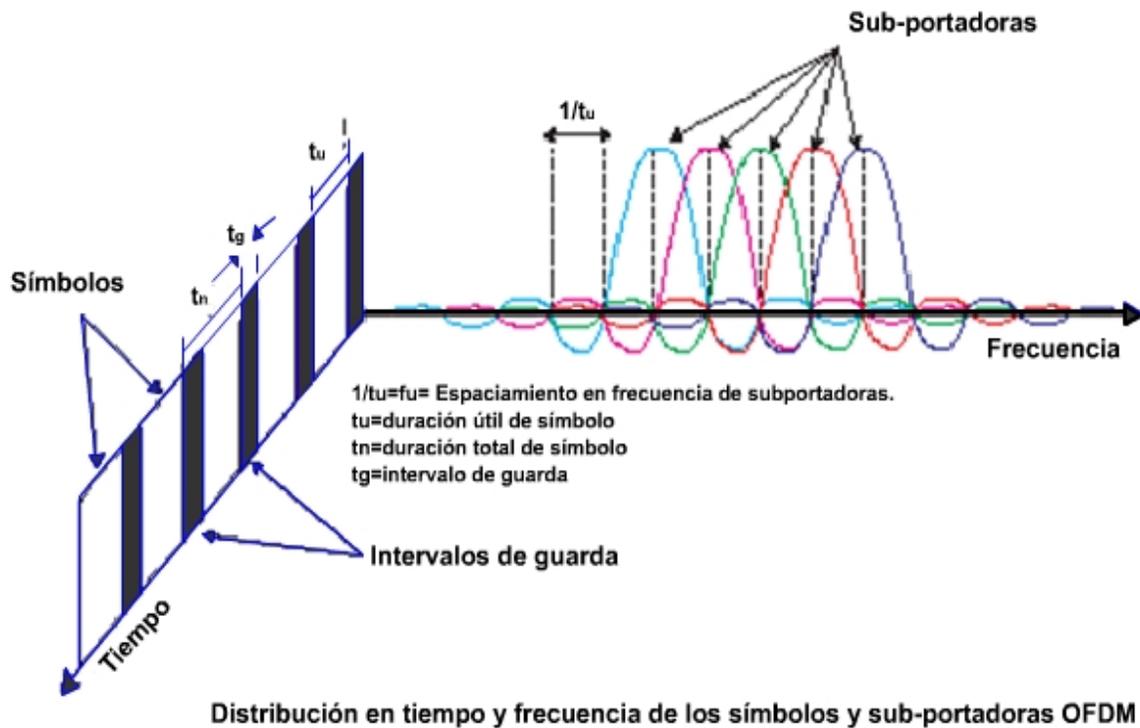


Fig. 2.11 – Diagrama de sub-portadoras OFDM en el dominio del tiempo y la frecuencia

El número de sub-portadoras varía de acuerdo al ancho de banda ocupado y al modo de operación. Dichas sub-portadoras están espaciadas en frecuencia (f_u) de forma que la duración útil de los símbolos (t_u) en las portadoras tiene un periodo tal que $1/t_u = f_u$. El resultado de esto es que, si el tiempo de la ventana de integración en el receptor es t_u , el espectro de cada portadora modulada tendrá energía nula en todas las frecuencias centrales de las otras portadoras: las portadoras son ortogonales. Sin embargo, en el mundo real, muchas portadoras se ven afectadas por desvanecimientos debidos a multi-trayectorias. Este efecto es ve minimizado gracias al intervalo de guarda de duración t_g entre cada símbolo. En la figura 2.12 se observa lo anterior.

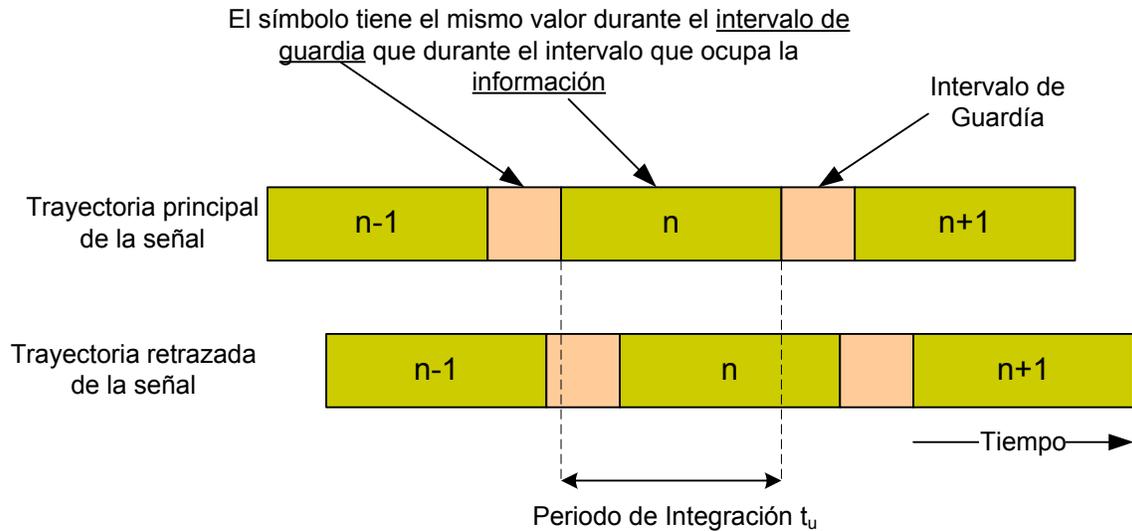


Fig. 2.12 – Efecto positivo del intervalo de guardia entre portadoras

En la figura 2.12 se muestra lo que ocurre cuando la primera señal llega (la línea superior) y luego se mezcla con la versión de sí misma retrazada (línea de abajo). El período de integración t_u incluirá contribuciones de la primera señal en llegar y de la segunda también. Debido a que el valor del símbolo es igual en el intervalo guardia y en la parte principal del símbolo, el resultado será constructivo en el período de integración y la interferencia Inter-símbolo no ocurrirá. Si el retraso de la segunda señal aumenta, llegará un punto en que la interferencia será inevitable. Es obvio que para evitar este caso, la máxima diferencia entre las señales que llegan deben ser menor que intervalo de guardia. En el sistema DRM este intervalo puede incrementarse en los modos más robustos para hacer a la señal más resistente a los efectos multi-trayectoria causados por la propagación aérea. La duración incrementa progresivamente del modo A al modo D (del 10% del período total del símbolo hasta 44%, o bien, de 2.66 [ms] a 7.33 [ms]).

Por otro lado, se observa que debido a los efectos adversos de propagación, durante algunos cortos períodos de tiempo algunas sub-portadoras no podrán demodularse correctamente; es por eso que, si los bits de datos multiplexados se aplicaran en las sub-portadoras consecutivamente, dichos efectos causarían que una cadena de bits consecutivos se vieran afectados y esto se reflejaría en fallas frecuentes del sonido. Para prevenir estos efectos, los bits de datos se aplican a las sub-portadoras en una secuencia definida, pero reordenada, de manera que los bits de datos consecutivos estén esparcidos en tiempo y frecuencia. En consecuencia, estos bits dispersados, recibidos con errores debido a la propagación adversa, pueden ser reordenados y luego corregidos en el receptor, como resultado de los bits de corrección de errores agregados antes de su transmisión (FEC).

El sistema DRM utiliza demodulación coherente. Para demodular satisfactoriamente las sub-portadoras, la respuesta del canal para cada una de

ellas debe determinarse y debe aplicárseles ecualización. Para permitir que este proceso de ecualización sea efectuado satisfactoriamente, cierto número de celdas de referencia piloto es esparcido a lo largo de la secuencia de modulación OFDM. Estas celdas de referencia utilizan sub-portadoras específicas (o frecuencias definidas) con características de amplitud y fase definidas y obedecen cierta secuencia. Para mejorar aún más la exactitud del proceso, estas celdas piloto tienen su nivel de señal definido de forma que su relación señal a ruido sea mayor comparada con la de las otras celdas de datos. Debido a que el esparcimiento de la secuencia de celdas piloto está predeterminado, el demodulador puede ser programado para reconocer la secuencia, lo cual a su vez provee de un método para lograr la sincronización del receptor. Estas celdas de referencia comprenden una mezcla de celdas de referencia de frecuencia y ganancia. Para modos robustos del sistema DRM, se aumenta la proporción de celdas piloto esparcidas, para asegurar la correcta demodulación en canales de propagación especialmente adversos. En la figura 2.13 se muestra cómo las celdas de referencia de frecuencia y ganancia se esparcen en tiempo y frecuencia en una porción de la secuencia de repetición del modo D de DRM para una transmisión OFDM.

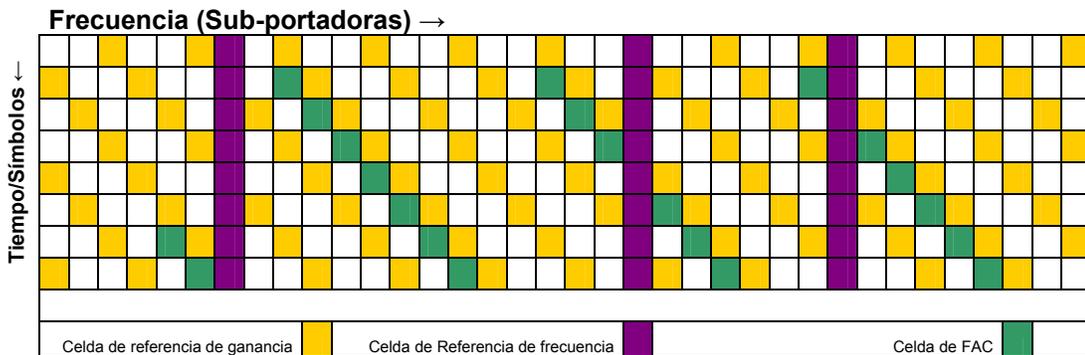


Fig. 2.13 – Esquema de ubicación de celdas de referencia de ganancia y frecuencia dentro de una secuencia del modo D

Como ya se mencionó, el modo de señal DRM puede escogerse cómo mejor convenga de manera que minimice los efectos adversos del canal de propagación, a la vez que proporciona la tasa de datos más alta posible. Además del ruido y los diversos retrasos, otro de los principales efectos a que se enfrenta la señal DRM es el esparcimiento Doppler.

Doppler causa un desvío de la frecuencia en el receptor, cuando la fuente y el receptor tienen una velocidad relativa entre ellos. Si la velocidad es constante, entonces el desvío también es constante, y si la velocidad es variable, también el desvío lo será. Si hay múltiples caminos entre el receptor y el emisor, y las velocidades relativas vistas desde el receptor son diferentes para cada trayectoria, entonces habrá un esparcimiento en los desvíos de frecuencia. En el caso de la propagación aérea, los desvíos Doppler son causados por la reflexión en las

capas ionosféricas, que están en constante movimiento, provocando que las trayectorias de propagación varíen dinámicamente.

Para la propagación terrenal, los desvíos de Doppler ocurren con un receptor móvil, debido a que las reflexiones en estas frecuencias es poca, el desvío de frecuencia por Doppler se debe solo a la velocidad del receptor con respecto al transmisor. A bajas velocidades, el desvío puede corregirse en el receptor, sin embargo, a velocidades de muchos miles de kilómetros por hora, el sistema puede incluso fallar. La velocidad máxima a la que esto pasa depende del modo de transmisión de DRM. Para el caso de propagación ionosférica, el esparcimiento de Doppler más fuerte se observa para cuando la incidencia de la onda es casi vertical (NVIS). Debido a que el tamaño de las trayectorias entre el transmisor y el receptor son más cortas, las distancias entre las capas ionosféricas representan una gran proporción de la longitud total del camino. Para contrarrestar estos efectos, de desvío de frecuencia y esparcimiento por Doppler, el espaciado de frecuencias entre las portadoras OFDM de la señal DRM es aumentada progresivamente. Esto asegura que el esparcimiento en frecuencia experimentado se mantendrá dentro de una pequeña fracción del espaciado de las portadoras para permitir una correcta demodulación.

Bibliografía y Referencias

- [1] Documento de especificaciones de transmisión de AM-IBOC, Ibiqity Digital
- [2] “Broadcasters’s user Manual”, del sitio www.drm.org

CAPÍTULO 3

PROPAGACIÓN DE SEÑALES DE ONDA MEDIA

3. Propagación de Señales de Onda Media

El conjunto de fenómenos por el cual las ondas de radio pueden viajar de un punto a otro se denomina propagación [2]. Las ondas pueden viajar por distintos medios, e incluso donde no hay medio alguno se pueden propagar (hablando de ondas electromagnéticas), y durante su trayecto pueden encontrar obstáculos que provocan cambios en la dirección de propagación y atenuación de la intensidad de los campos que las forman. Dichos obstáculos pueden ser ajenos al medio, pero también el propio medio posee características que, de cierta forma, representan un obstáculo al momento en que la propagación tiene lugar. La propagación de las ondas dependerá de dónde surgen y el medio en que viajarán, pero también depende de la propia frecuencia de las ondas: la banda de frecuencia de trabajo definirá los mecanismos de propagación de ondas que hay que considerar al analizar el canal de propagación [1]. En la figura 3.1 se muestra un esquema de las principales formas de propagación de señales de radio.

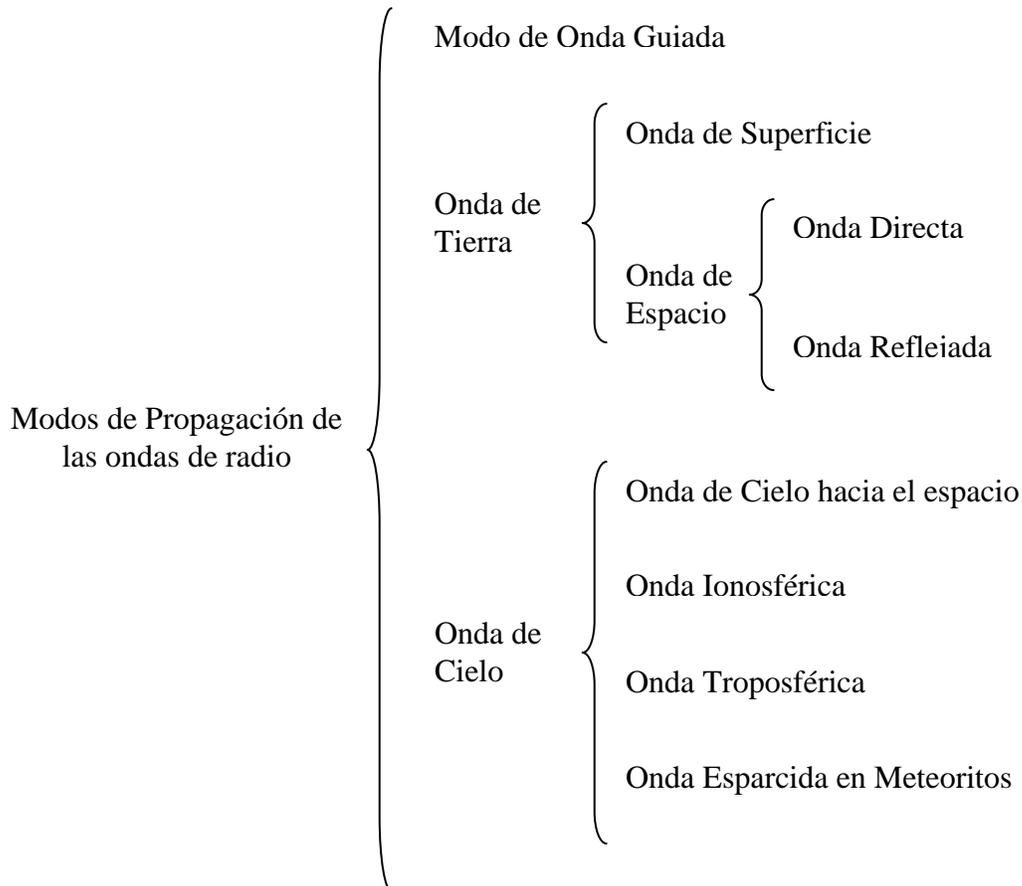


Fig. 3.1 – Formas de propagación de las ondas de radio

El modo de onda guiada se refiere a la propagación de una señal que viaja entre el espacio comprendido entre la ionosfera y la superficie de la tierra que, en tal caso,

parecieran formar un túnel o una gran guía de onda desde la antena transmisora hasta la receptora. Las frecuencia en que ocurre este fenómeno van de 30 [Hz] hasta aproximadamente 100 [kHz] [5].

Para los fines de este escrito, se considerará solamente el caso de propagación para señales que se encuentren dentro de la gama de frecuencias de la onda media (530 a 1710 [kHz]) y se explicará brevemente fenómenos de propagación en este rango de frecuencias.

Las características del medio generalmente están definidas por los siguientes parámetros:

- Constante dieléctrica ϵ , llamada también permitividad, es la capacidad de un medio para almacenar energía electrostática. El valor de permitividad para el vacío es de 8.854 [pF/m] y para distintos materiales se define el parámetro de permitividad relativa.
- Permeabilidad μ , determina el grado en que un medio atrae o hacer pasar a través de él un campo magnético. El vacío tiene un valor de permeabilidad de $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] y en otros materiales se define la permeabilidad relativa.
- Conductividad σ , define la capacidad de un medio para conducir corrientes eléctricas, es el recíproco de la resistividad y se mide en Siemens; en el vacío la conductividad es nula.

En especial para este capítulo, las características del suelo serán de gran importancia pues, como se verá más adelante, dentro del rango de frecuencias de MF, los principales fenómenos de propagación son el de onda de superficie y onda ionosférica.

3.1. Influencia del Medio y Mecanismos de propagación

Para el estudio del comportamiento de las ondas se han propuesto diversos modelos y relaciones que nos dan una idea de estos fenómenos físicos, se hacen consideraciones dependiendo sobre todo de la frecuencia a la que se esta trabajando ya que, para diferentes frecuencias, existen diferentes maneras y caminos en que una señal se puede propagar. De esta forma, un modelo que describa la propagación en un determinado medio a altas frecuencias, no servirá para caracterizar la propagación de señales de bajas frecuencias en el mismo medio, incluso puede ocurrir que ni siquiera exista propagación, o bien, que el camino que sigan las ondas no sea el mismo. Modelos como el de la ecuación de Friis se vuelven poco prácticos debido a efectos del suelo, troposfera e ionosfera sobre la propagación de ondas [1].

Así, por ejemplo, dada una antena transmisora y otra receptora distanciadas entre sí, la antena receptora puede captar señales de la antena transmisora provenientes de distintos caminos [2]:

- Por onda directa: cuando hay línea de vista entre ambas antenas, la señal viaja desde el transmisor hasta el receptor sin obstrucciones ni reflexiones de importancia.
- Por onda reflejada: efecto presente sobre todo en la banda de frecuencias VHF y superiores, en donde ciertas superficies se consideran lisas con respecto a una longitud de onda dada y actúan como reflectores o repetidores pasivos.
- Por onda refractada en la ionosfera: efecto presente sobre todo en la banda de ondas media, en que las capas de la ionosfera desvían las trayectorias de las ondas de forma que vuelven hacia la tierra.
- Por onda de superficie: se mantiene adyacente a la superficie de la tierra siguiendo su curvatura por un proceso de difracción. Tiene polarización vertical pues cualquier componente de campo eléctrico horizontal sería absorbida rápidamente por la tierra. Es la principal forma en que se transmiten y reciben señales de onda media e incluso en las altas frecuencias.

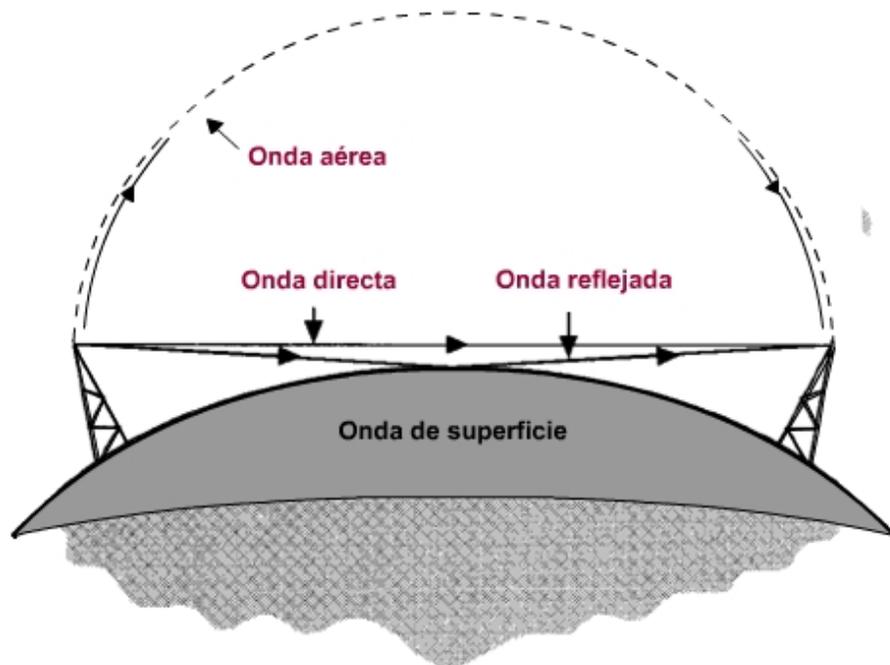


Fig. 3.2 – Posibles trayectos en la propagación de ondas.

Comúnmente se refiere a la onda directa junto con la onda reflejada en tierra como onda espacial, mientras la onda espacial junto con la onda de superficie es conocida como onda terrestre. En la imagen se ilustran solo algunos de los principales modos de propagación.

Para el caso de frecuencias altas, la trayectoria seguida por una onda refractada en la ionosfera no es ya posible, pues las capas de la atmósfera se vuelven transparentes para este tipo de ondas y el desvío que sufren no es suficiente para hacerlas volver hacia la tierra. Por otro lado, la onda de superficie es prácticamente nula pues, a altas frecuencias, las pérdidas en la tierra son altas y la señal se absorbe rápidamente.

En la banda de frecuencias de la onda media, la propagación por ondas de superficie y por ondas refractadas en la ionosfera, son las principales trayectorias para la transmisión de señales. A bajas frecuencias, la tierra se comporta como un buen conductor, de manera que se excita una onda de superficie que se adapta a la orografía del terreno y transporta los campos electromagnéticos más allá de la zona de visibilidad directa. Por otro lado, la ionosfera (ubicada entre 60 y 400 [km] de altura) refracta las ondas de frecuencia media, sin embargo, la señal es atenuada en gran medida por su interacción con las capas que componen la ionosfera.

Por lo dicho anteriormente, la potencia recibida ya no puede evaluarse utilizando modelos como el de la ecuación de Friis [1], la ecuación se debe corregir y se agregan factores de atenuación correspondientes a cada fenómeno de propagación. Estos factores presentan la dificultad de que pretenden representar factores del entorno que son parcialmente desconocidos y que, además, varían con el tiempo y el espacio, de forma que se obtienen valores medios con cierta desviación típica y esto provoca que la potencia pueda ser evaluada solo de maneja estadística.

El modelo de propagación en el espacio libre, donde las antenas se suponen aisladas y situadas en el vacío, la densidad de potencia incidente en la antena receptora esta dada por la expresión:

$$\langle S \rangle = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (3.1)$$

donde d es la distancia al transmisor y G_t es la ganancia PIRE del transmisor. Por otro lado también se conoce la relación entre la densidad de potencia y el campo eléctrico siguiente:

$$\langle S \rangle = \frac{|E|^2}{240\pi} \quad (3.2)$$

Igualando las expresiones (3.1) y (3.2), obtenemos el valor de campo eléctrico en función de la potencia transmitida:

$$|E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} \quad (3.3)$$

La expresión anterior define al campo incidente en la antena receptora de manera ideal, sin embargo, en el espacio real, hay que modificar la expresión con un factor que depende del entorno y se denomina factor de atenuación de campo, de manera que la expresión resultante es la siguiente:

$$|E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} F_e \quad (3.4)$$

Para el cálculo de la potencia, en el caso ideal se aplica la ecuación de Friis, pero para el caso de propagación en un entorno real hay que incluir un factor de potencia F_p , que multiplica la potencia recibida de la ecuación de Friis original y que resulta ser el cuadrado del módulo del factor de campo:

$$\langle S \rangle = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} F_p \quad (3.5)$$

con

$$F_p = |F_e|^2 \quad (3.6)$$

Como ya se ha mencionado, en la banda de frecuencias medias, se produce la propagación principalmente mediante la onda de tierra o superficie (figura 3.2). Este tipo de propagación se utiliza principalmente en horas diurnas dejando de lado la opción de la propagación por medio de onda ionosférica que, por otro lado, se utiliza sobre todo en horas nocturnas; más adelante se verá el porqué. Dicha onda de superficie se propaga en la discontinuidad tierra-aire debido a las corrientes inducidas en la Tierra. Este modo solo propaga la polarización vertical porque la polarización horizontal se atenúa muy rápidamente debido al carácter conductor de la superficie de la tierra en estas frecuencias [1]. El alcance obtenido varía con la frecuencia, la potencia transmitida y el tipo de suelo, para MF alcanza hasta 300 [km]. Las aplicaciones más importantes en estas frecuencias son la comunicación naval y los sistemas de radiodifusión. Las antenas que se utilizan normalmente son los monopolos verticales con alturas entre 50 y 200 [m] que radian con polarización vertical [1].

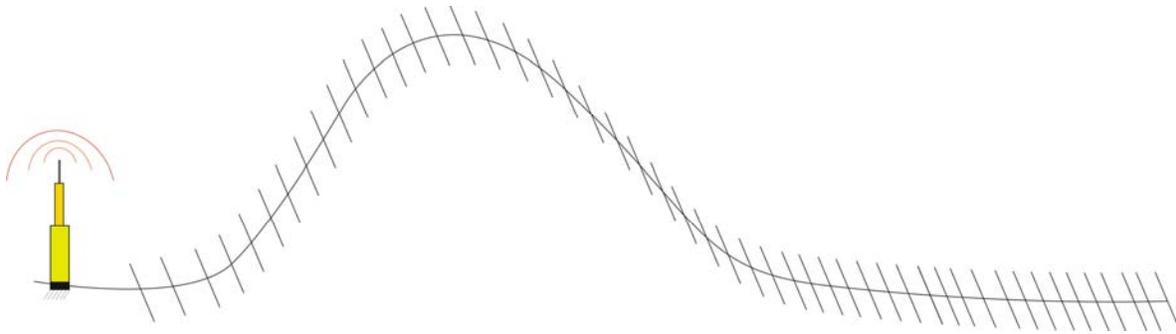


Fig. 3.3 - Propagación por onda de tierra

Además de los efectos de propagación por onda de tierra, también están presentes los efectos de la ionosfera que, en ondas de MF, refleja las señales hacia la tierra, vea la figura 3.3. Un ejemplo de esto son los enlaces transoceánicos de Marconi, en donde las ondas llegaban al mar y se reflejan de nuevo, de manera que después de varios saltos se cruzaba el océano. El alcance conseguido con un solo salto depende de la frecuencia, la hora del día y la dirección en que apunta la antena. En MF, durante la noche se alcanzan hasta 2000 [km] [1]. Este mecanismo de propagación lo utilizan los radioaficionados, comunicaciones navales y, en el pasado, eran la principal forma de comunicación de voz punto a punto a largas distancias. A continuación se describen las formas de propagación de señales en MF.

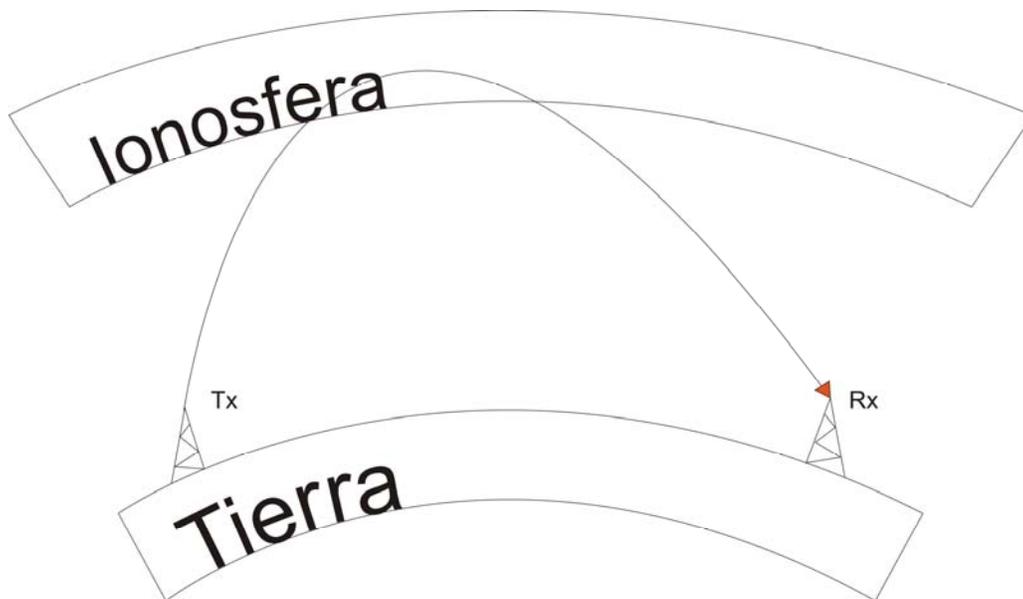


Fig. 3.4 - Propagación por onda ionosférica

3.2. Propagación por onda de superficie

Los primeros modelos de onda de superficie fueron propuestos por A. Sommerfeld en 1909, pero quienes aplicaron estos trabajos a la ingeniería de comunicaciones fueron Shuleiki y Van der Pol. Posteriormente Burrows, Norton y Wait contribuyeron decisivamente para configurar los modelos de Onda de Tierra. En general, estos modelos suponen una tierra lisa y de características eléctricas uniformes, pues se considera que la longitud de onda es mucho mayor que las posibles discontinuidades. Además, se supone que tanto la antena transmisora como la receptora se encuentran próximas a la superficie terrestre de manera que [1]:

- Una onda de superficie se propaga en la discontinuidad tierra-aire. La componente vertical se propaga sobre la superficie casi sin pérdidas, mientras que la componente horizontal se atenúa por el efecto de conductividad del suelo. La atenuación por absorción es mayor mientras menor sea la conductividad del suelo.
- La onda de espacio, compuesta por el rayo directo y el rayo reflejado en el suelo, se anula a nivel del suelo ya que el coeficiente de reflexión del suelo es prácticamente -1 y los caminos de ambos rayos son prácticamente iguales.

Para aprovechar este tipo de propagación hay que emplear antenas de polarización vertical, con alturas entre 50 y 200 [m]. Esta la forma habitual por la cual se reciben señales de las emisoras de radio de la onda media, es decir, de amplitud modulada. Los efectos de esta propagación se aprovechan mejor si las antenas emiten con ángulos bajos de radiación: antenas de un cuarto o media longitud de onda son buenas para transmitir en estas frecuencias. La caracterización correcta del suelo es fundamental para una correcta predicción de la propagación mediante onda de superficie. El suelo se caracteriza como un dieléctrico con pérdidas definido por los parámetros de permitividad relativa y conductividad.

Tabla 3.1 - Valores característicos de distintos suelos

Tipo de Suelo	ϵ_r	σ [mS/m]
Agua de mar	80	4000
Agua dulce	80	5
Tierra húmeda	15 - 30	5 - 20
Suelo rocoso	7	1 - 5
Tierra seca	4	1 - 10

En función de estos valores se definen dos modelos diferentes: uno válido para distancias cortas en que se supone tierra plana y otro válido para distancias largas en que se supone tierra esférica.

3.2.1. Modelo de Tierra Plana

Este modelo supone una propagación de espacio libre afectada por un factor de atenuación de campo eléctrico F_e , tal como en la expresión (3.4). Las antenas utilizadas son monopolos cuya directividad esta en función de su longitud y es, para efectos de este escrito, el único parámetro necesario. Dicha directividad esta definida como sigue [1]:

- Monopolo corto (longitudes mucho menores a λ) sobre tierra $D_0=3$ (4.77 dBi)
- Monopolo de longitud $\lambda/4$ sobre tierra $D_0=3.28$ (5.16 dBi).

El factor de atenuación de campo F_e se calcula a partir de una variable p denominada distancia numérica, que depende de la distancia, la longitud de onda y la conductividad del suelo.

$$F_e = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2} \quad (3.7)$$

$$p \approx \frac{\pi d}{60\lambda^2 \sigma} \quad (3.8)$$

Para distancias grandes ($p \gg 1$), el factor de atenuación de campo tiende a la expresión siguiente:

$$p \gg 1 \Rightarrow F_e = \frac{1}{2p} \quad (3.9)$$

La validez de este modelo se extiende hasta la distancia en que la difracción asociada a la curvatura de la tierra cobra importancia; es decir, hasta una distancia máxima dada por la expresión:

$$d_{\max} [km] = \frac{100}{\sqrt[3]{f [MHz]}} \quad (3.10)$$

3.2.2. Modelo de Tierra Esférica

Para distancias mayores a la definida en la expresión (3.10), es necesario considerar los fenómenos asociados a la difracción que produce la curvatura de la tierra. Para ello, la UIT-R, utiliza y recomienda el software GRWAVE [3] que proporciona valores de intensidad de campo eléctrico que varían con la distancia y que esta en función de parámetros del suelo (conductividad y permitividad), altura de las antenas y frecuencia de operación. También están a disposición gráficas [4]

hechas con este software que modelan la intensidad de campo producida por una antena transmisora de tipo monopolo corto con potencia radiada de 1 [kW].

Para otras antenas o potencia de transmisión hay que realizar una transformación de los valores en las gráficas a valores reales de campo. Esta transformación pasa por la relación entre la PIRE realmente utilizada y la PIRE del caso de referencia. Este valor de PIRE de referencia es de 3 [kW] (1 [kW] de potencia radiada por un monopolo corto [4], con directividad igual a 3) [1].

$$E = E_{graf} \sqrt{\frac{P_{rad} [kW] D_0}{3}} \quad (3.11)$$

De las gráficas proporcionadas por la UIT-R [4], se observa que la intensidad de campo eléctrico decrece de manera lineal en regiones cercanas a la antena y, conforme la onda se aleja de la antena y los efectos de la curvatura de la Tierra se hacen notar, el campo decrece de manera exponencial. Como ya se ha mencionado, el alcance depende de los parámetros del suelo, la potencia utilizada y la frecuencia de trabajo.

3.3. Propagación por onda ionosférica

Normalmente, las comunicaciones de los aficionados se realizan en el rango de frecuencias HF y VHF. En este tipo de enlaces, en el receptor se tienen comúnmente dos señales, la de línea recta (cuando hay línea de vista entre las antenas receptora y transmisora) y la señal que se refleja en tierra: ambas señales llegan al receptor casi al mismo tiempo. También puede ocurrir que las señales lleguen al receptor después de haberse reflejado en otros obstáculos como, por ejemplo, edificios. Particularmente, en el caso del rango de frecuencias perteneciente a HF hay diversos mecanismos de propagación: para distancias largas y, sobre todo para la parte alta del espectro de HF, se hace por el mismo método que el de las ondas de VHF; pero cuando se trata de distancias cortas se hace mediante ondas terrestres. Sin embargo el modo más importante de propagación es el de ondas ionosféricas, que también ocurre para frecuencias del espectro de MF cuando se hace transmisión durante la noche, logrando un alcance de hasta 2000 [km].

La ionosfera es la región de las capas altas de la atmósfera (de 60 a 400 [km] de altura) que, debido a su ionización, refleja las señales radioeléctricas hasta frecuencias de 30 [MHz]. En el año 1902 se postuló la existencia de esta capa, relacionándola con los experimentos de Marconi de 1901. Fue en los años 20 que se realizaron experimentos para comprobar su existencia [5]. La ionización, electrones libres, es producida principalmente por radiaciones solares en las bandas de ultravioletas y rayos X, por rayos cósmicos y por meteoritos; la creación de iones depende de la energía de radiación y de la densidad de las moléculas de los gases de la atmósfera: para alturas elevadas, la energía de la radiación incidente es elevada pero la densidad de las moléculas es baja, mientras que para

alturas más bajas la densidad de las moléculas es alta pero la energía de las radiaciones ya ha sido absorbida en gran parte [5]. Debido a lo anterior, la densidad de electrones varía con respecto a la altura según la hora del día, la estación del año los ciclos de manchas solares entre otros factores. La figura 3.4 representa la variación de la densidad de moléculas ionizables en función de la altura.

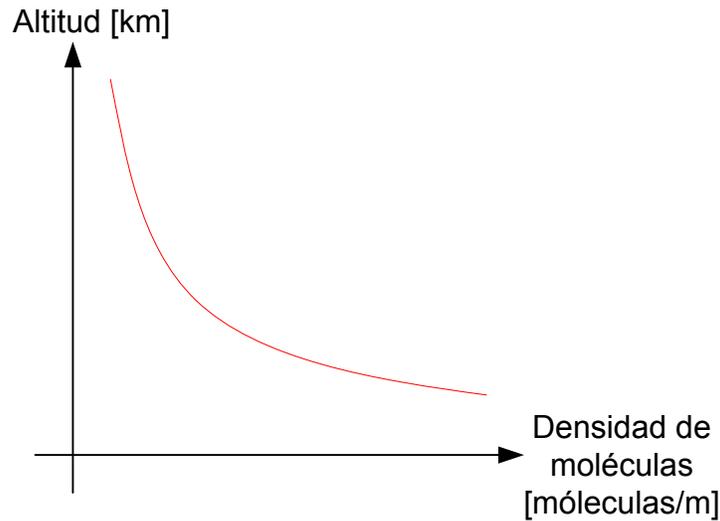


Fig. 3.5 – Densidad de moléculas ionizables con respecto a la altura.

Considerando que la energía proveniente de la radiación solar, y de más fuentes que pueden proporcionar energía que ionice las moléculas de la ionosfera, decrece conforme la altura también disminuye (es decir, conforme se va acercando a la superficie terrestre), la densidad de ionización de la ionosfera [5] puede representarse como en la figura 3.5.

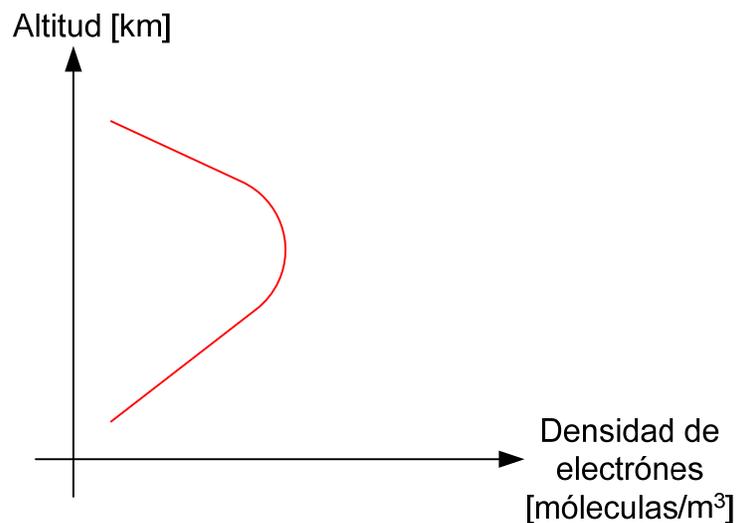


Fig. 3.6 – Densidad de ionización con respecto a la altura.

Por otra parte, el hecho de que haya una reflexión de señales hace notar la importancia que tendrán los ángulos de incidencia y los ángulos de reflexión que, como puede preverse, determinarán el alcance de las señales. La reflexión puede provocar la existencia de zonas donde la señal no podrá ser percibida. En la banda de frecuencias de onda media, la propagación de las ondas se produce principalmente por la onda de superficie y la onda ionosférica en conjunto, a pesar de que en la propagación diurna los efectos de la capa D pueden hasta impedir la propagación de ondas por la ionosfera. Como sea, si ambas formas de propagación están presentes, existe una zona en la cual ni la onda de superficie ni la ionosférica puede ser percibida, esta zona se conoce como zona de skip, vea figura 3.6.

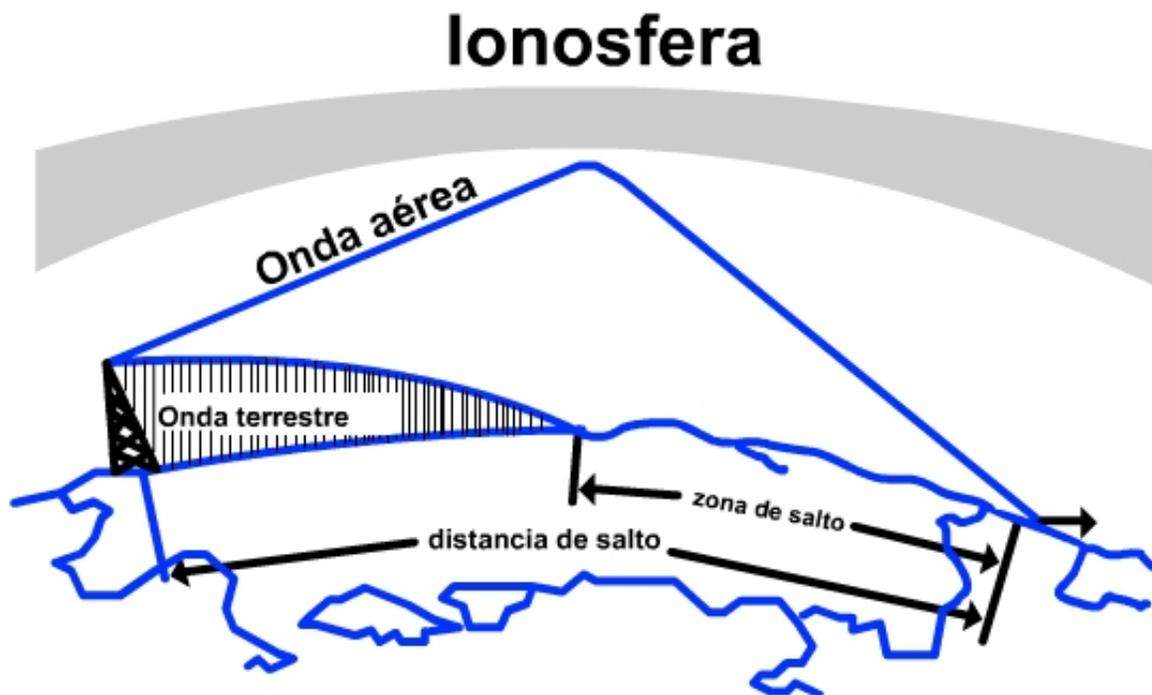


Fig. 3.7 – Zona de Skip

Esto es debido a que para existir un ángulo mínimo de incidencia, que depende de la frecuencia de las señales, para el cual la reflexión (en realidad refracción) de las ondas es posible; cuando las ondas inciden con ángulos cercanos a la vertical, entonces la ionosfera parece “transparente” y las ondas no pueden reflejarse, lo cual da lugar a la zona de skip.

También hay que mencionar que otro efecto adverso dentro de este modo de propagación es provocado por las distintas trayectorias que puede seguir una señal haciendo que al receptor llegue la misma señal desde distintos puntos,

dando lugar en el receptor a una superposición de copias de la señal original cuya intensidad se verá aumentada o disminuida rápidamente con el tiempo: esto se conoce como fading (desvanecimiento).

3.3.1. Capas de la Ionosfera

La densidad de electrones en las capas superiores de la atmósfera varía con la altura, presentando una serie de máximos relativos que permiten dividir la ionosfera en una serie de capas. En la figura 3.7 se presenta la densidad de electrones libres respecto a la altura, tanto para el día como para la noche.

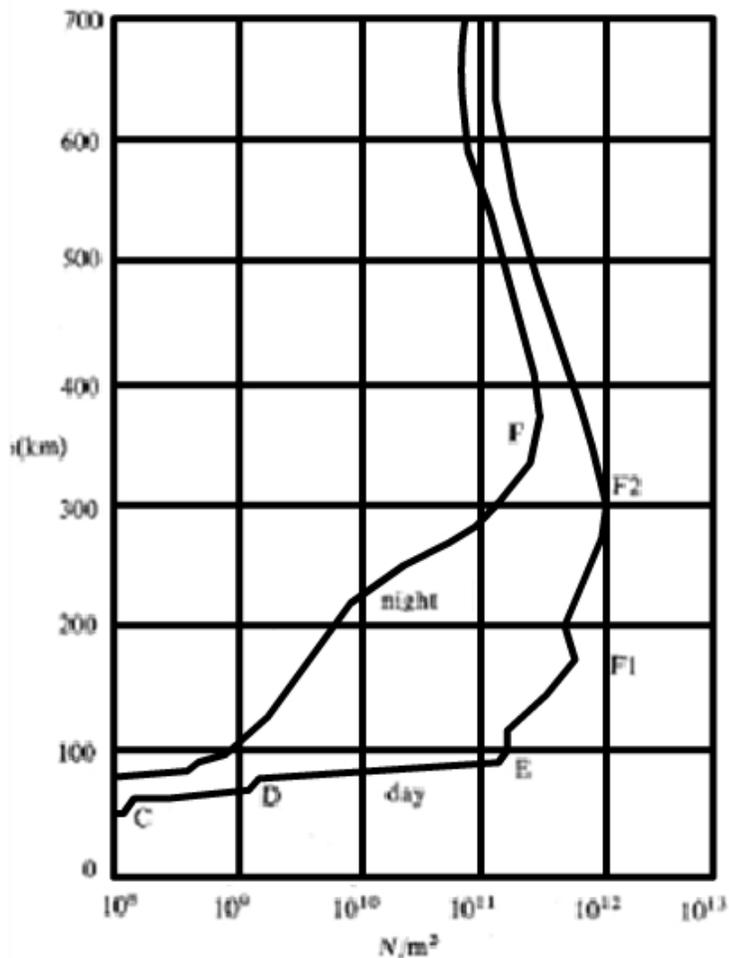


Fig. 3.8 – Variación de la concentración de electrones con respecto a la altura.

Capa D

La primera capa es la capa D, es una zona de baja densidad electrónica comparada con la molecular, que se produce entre los 50 y los 90 [km]. Esta capa se desvanece rápidamente (y prácticamente desaparece) tras la puesta de sol pues, junto con el sol, desaparece también la fuente de radiación constante (principalmente rayos X duros) que mantiene electrones libres en esta región de la ionosfera que, de otra forma, se recombinan rápidamente con otros iones para convertirse en átomos neutros [5] bajo los efectos del aumento en la presión atmosférica [2]. La ionización de esta capa se reduce hasta un 90 % tan pronto se pone el sol [5], dicha ionización es de por sí baja y varía muy poco con el ciclo solar; además en ella solo se reflejan ondas dentro de las bandas VLF y LF.

Su efecto más importante es la atenuación de la banda MF (pero no la refracta), como se muestra en la figura 3.8. Este efecto provoca que las señales de esta banda lleguen a tierra muy atenuadas durante el día, lo cual no es del todo malo pues sirve como medio para limitar el alcance de señales dentro de este rango de frecuencias durante el día. La absorción que produce es importante sobre todo en frecuencias inferiores a los 7 [MHz], por eso, cuando la absorción que produce es máxima, la capa D dificulta o impide las comunicaciones a largas distancias en las bandas de 3.75 [MHz] y 7.5 [MHz]. Las señales entre 7.5 y 10 [MHz] que se envían con ángulos altos pasan a través de esta capa y llegan a las capas superiores, pero si los ángulos a que se transmiten son bajos, viajan una mayor distancia a través de la capa D y sufren una gran atenuación. A medida que la frecuencia aumenta por encima de 10 [MHz] las ondas de radio pueden pasar por esta capa con mayor facilidad.

De cualquier forma, la capa desaparece durante la noche y las señales de la banda MF y de la parte baja de la banda HF quedan libres para pasar a través de ella hasta la capa F donde la MUF (máxima frecuencia utilizable) es siempre lo suficientemente alta como para propagar estas señales.

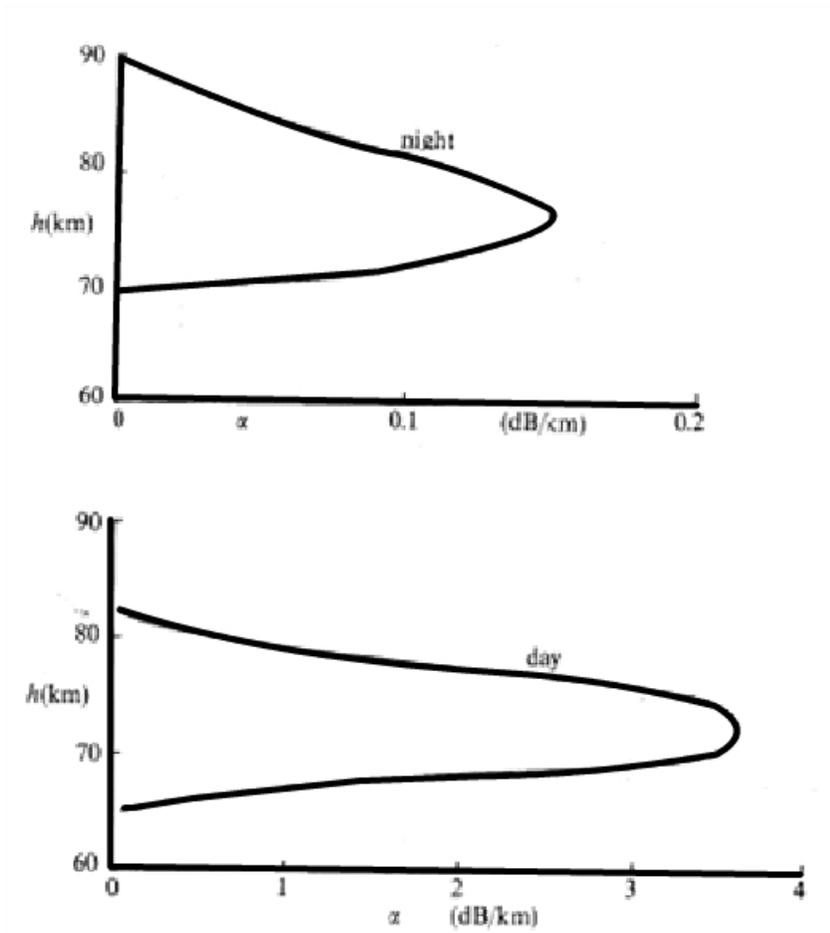


Fig. 3.9 – Atenuación de la D a 1 [MHz] de noche y de día.

Capa E

La capa E (de Eléctrica y llamada también capa Kennelly-Heaviside) fue la primera en ser identificada y se localiza entre 90 y 150 [km] de altura, sin embargo, la región de esta capa localizada entre 90 y 120 [km] es la que tiene efectos importantes para la radio-propagación [5]. Los átomos de nitrógeno y oxígeno de esta capa se ionizan a través de rayos X suaves [5]. Aparece principalmente de día y muy tenuemente por la noche debido a que la recombinación de iones no ocurre tan rápidamente como en el caso de la capa D, reflejando las frecuencias de MF. A veces refleja las señales antes de que lleguen a las capas F y provoca un menor alcance de las mismas: tiene un frecuencia crítica durante el horario diurno que varía entre 3 y 4 [MHz].

Capa F

La capa más importante, donde se produce principalmente la reflexión ionosférica, es la capa F. Se extiende desde los 150 hasta los 400 [km] de altura, los átomos de oxígeno de esta región se ionizan a partir de la radiación ultravioleta proveniente del sol. De día se alcanzan valores máximos de ionización en la capa y se conforma de dos sub-capas: F1 y F2.

La sub-capa F1 se forma entre los 150 y 250 [km] y desaparece en la noche. Esta capa no es muy importante para comunicaciones en frecuencia de HF, además, solo esta presente durante el día y en la mayor parte del tiempo en invierno esta ausente. Hablando de propagación diurna, no es probable que las señales de radio debajo de los 10 [MHz] alcancen la capa F1, debido a que son absorbidas por la capa D o refractadas por la E. las señales con frecuencias mayores a los 20 [MHz] que pasen a través de las capas inferiores de la ionosfera, probablemente también pasarán a través de la capa F1, debido a que la MUF de la de esta capa raramente es superior a los 20 [MHz]. La absorción disminuye la intensidad de cualquier señal que continua hacia la capa F2 durante el horario diurno. Cierta refracción útil puede tener lugar en para señales con frecuencias entre los 10 y 20 [MHz] [5].

La sub-capa F2 se extiende por arriba de los 250 [km] con un pico de ionización cerca de los 300 [km]. Durante la noche, la ionización de la capa F se colapsa en una capa ancha de 300 a 400 [km] de altura, donde los iones se recombinan muy lentamente, pues la densidad molecular es relativamente baja, por otro lado, la densidad de electrones (o iones) es la más alta de cupiera de las capas ionosféricas. Los niveles máximos de ionización cambian significativamente con la hora del día, la estación del año y el ciclo solar. La MUF de esta capa es una función directa de la radiación ultravioleta, la cual a su vez depende del ciclo solar y la estación del año. La MUF en verano varía entre 36 [MHz] (día) y 20 [MHz] (noche), mientras que en invierno varía desde 60 [MHz] (día) hasta 14 [MHz] (noche). En general, la ionización de la capa F2 y la MUF crecen raídamente al amanecer, alcanzan un máximo por la tarde y luego comienza a decaer [5].

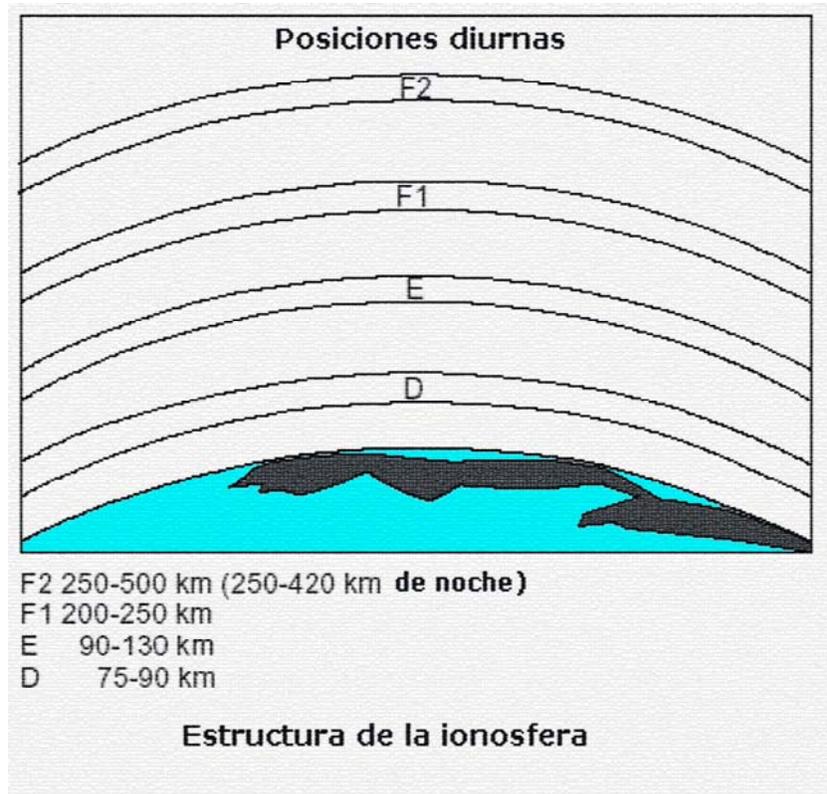


Fig. 3.10 – Capas de la ionosfera.

Para que las señales puedan aprovechar las capas F, deben atravesar dos veces la capa D, lo que supone una gran atenuación durante transmisiones diurnas. Para frecuencias por debajo de 4 [MHz], la fuerte ionización de la capa D no permite que las ondas puedan atravesarla y las atenúa de manera considerable. En la figura 3.9 se muestra un esquema de las capas de la ionosfera.

Según lo visto anteriormente, la propagación por onda ionosférica es posible solo durante periodos nocturnos para la banda de frecuencias MF.

Bibliografía y Referencias

- [1] Artículo del sitio de la Universidad Nacional de Rosario:
www.eie.fceia.unr.edu.ar
- [2] www.solred.com.ar/lu6etj/tecnicos/handbook/propagacion
- [3] www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=documents&link=rsg3&lang=en
- [4] UIT-R, Recomendación P.368-8, "Ground-wave Propagation Curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz". International Telecommunication Union. Radiocommunication Service. 2006.
- [5] Reyes García, Jesús. Notas de la materia "Sistemas de Radiocomunicaciones", Abril 2007.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DE INTERFERENCIAS ENTRE ESTACIONES DE RADIO AM UTILIZANDO LOS SISTEMAS DIGITALES

4. Estudio de Interferencias entre Estaciones de Radio AM Utilizando los Sistemas Digitales

En la banda de frecuencias MF se recurre a la modulación por amplitud para transmitir señales de radio analógico. La frecuencia central de transmisión asignada a cada estación esta separada de otras por medio de una banda de guarda que, debido al esquema de modulación utilizado, es un tanto angosta comparada con la banda de guarda presente entre estaciones que utilizan modulación por frecuencia. En México se define una separación de 10 [kHz] entre los canales de transmisión [1].

Las interferencias en transmisiones de señales AM son controladas a través de esta banda de guarda, además del control de potencia de transmisión sobre todo para el caso de operación nocturna. Los 10 [kHz] de protección son suficientes para evitar cualquier traslape del espectro de las señales, considerando que el espectro de transmisión de estas señales se extiende aproximadamente 5 [kHz] a cada lado de la frecuencia central de transmisión, f_c , como se muestra en la figura 4.1, haciendo que el canal de transmisión ocupe 10 [kHz] [2].

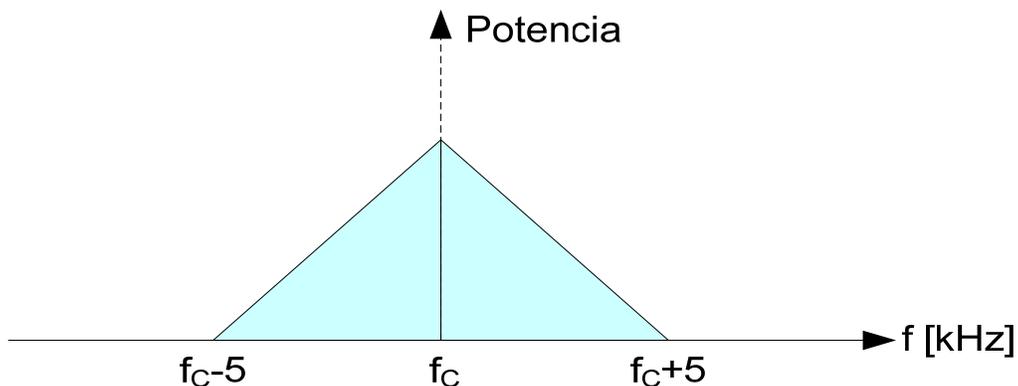


Fig. 4.1 – Esquema de ocupación espectral de una señal de AM

De esta forma, las frecuencias centrales de transmisión de las estaciones adyacentes estarán ubicadas en $f_c - 20$ [kHz] y en $f_c + 20$ [kHz], correspondientes a las estaciones de la izquierda y de la derecha, respectivamente. Note que entre los espectros de las señales queda siempre una banda de guarda de 10 [kHz].

Como ya se ha visto en capítulos anteriores, los sistemas de radiodifusión sonora digital utilizan esta banda de guarda para transmitir sus señales digitales de menor potencia y, considerando que los requerimientos espectrales de estos sistemas son diferentes entre sí, también serán ligeramente diferentes los problemas de interferencia que implique la implementación de uno u otro sistema de radiodifusión digital.

4.1. Asignación espectral en México en la banda de Frecuencias de Onda Media

Debido a que los resultados presentados aquí tienen un carácter general, no son propios de una zona en particular de México y aunque están determinados por propiedades de suelo y parámetros de transmisión bien definidos, dichos resultados pueden extrapolarse a cualquier región. Este escrito trata el caso particular de la ciudad de México. Casos similares se pueden encontrar en otras zonas del territorio nacional, y tan solo deben considerarse las variaciones de los parámetros de suelo.

El rango de frecuencias utilizado en México para la transmisión de señales con esquema de modulación por amplitud va de 535 a 1605 [kHz] [1] y las estaciones que actualmente operan en esta banda de frecuencias se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 – Asignación espectral del rango de frecuencias de OM en la ciudad de México

Distintivo	Frecuencia Portadora [kHz]	Potencia de Transmisión [kW]	
		Diurna	Nocturna
XEOC Radio Chapultepec	560	0.75	0.5
XEPH Tuya 590	590	25	10
XENK Radio 6.20	620	10	5
XEDTL Comunicación	660	50	1
XEN La 69	690	50	5
XEMP Radio 710	710	10	1
XEX Estadio "W"	730	100	100
XEABC ABC Radio	760	70	5
XERC Formato 21	790	50	1
XEITE Radio Capital	830	10	5
XEUN Radio UNAM	860	45	10
XEW "W" Radio 900	900	250	250
XEQ Bésame 940	940	50	50
XERFR Radio Fórmula 970	970	50	4
XEOY Radio Mil	1000	50	20
XEQR Radio Centro	1030	50	5
XEEP Radio Educación	1060	100	20
XERED Radio RED	1110	50	10
XECMQ El Fonógrafo	1150	20	10
XEFR Radio Felicidad	1180	10	5
XEB La B Grande de México	1220	100	100
XEL La 1260	1260	20	10
XEDA Radio 13	1290	10	1
XEJP Track 1320	1320	20	20
XEQK Ciudadanos	1350	5	1
XECO Romántica 1380	1380	50	5

XEBS Radio Sinfonola	1410	25	10
XEEST Radio Noticias 1440	1440	25	1
XEAI Radio Fórmula 1470	1470	50	5
XEDF Radio Fórmula 1500	1500	50	5
XEUR Frecuencia Positiva	1530	50	1
XEFAJ La Banda 1560 AM	1560	50	10
XEVOZ Bonita	1590	50	10

En la tabla pueden observarse las frecuencias centrales de transmisión de cada estación, así como las potencias de transmisión durante el día y la noche [3]. En general, la potencia de transmisión nocturna es menor a la diurna debido al comportamiento de las capas ionosféricas que, como se vio en el capítulo 3, permiten una mayor cobertura gracias a la desaparición de dos de las capas que causan mayor atenuación.

Ahora bien, los sistemas DRM y AM-IBOC, que fueron estudiados anteriormente, tienen diferentes requerimientos espectrales para poder transmitir sus señales digitales dentro de las bandas de guarda cuando trabajan bajo el modo de operación híbrido. Este modo de operación se desarrolló para facilitar la transición del sistema analógico al puramente digital. Aunque este hecho representa una gran ventaja para su introducción al mercado, presenta, sin embargo, algunos problemas.

A pesar de las pruebas que hasta ahora se han realizado utilizando ambos sistemas, DRM y IBOC, los problemas de interferencia se han dejado de lado porque las pruebas han sido realizadas solo en estaciones “aisladas” o solo con fines demostrativos y bajo condiciones controladas. Es decir, no ha habido pruebas de transmisión simultáneas en estaciones adyacentes, bajo las especificaciones de los sistemas digitales. Por esta razón lo que se ha observado hasta ahora acerca del funcionamiento de estos sistemas son solo aspectos parciales de lo que en realidad implican: propiedades de cobertura y calidad subjetiva del audio en condiciones que no son completamente reales y, ciertamente, condiciones bajo las que ninguno de los sistemas operará una vez adoptado cualquiera de ellos.

Las transmisiones de señales adyacentes tendrán efectos sobre las señales de una u otra estación que no se harán notar hasta que cualquiera de los dos sistemas sea implementado. Los problemas de interferencias aparecerán sobre todo en estaciones cuyas frecuencias centrales de transmisión estén muy cercanas entre sí; es decir, donde la banda de guarda es la mínima requerida: 10 [kHz].

En la tabla 4.1 se observa que, generalmente, las frecuencias centrales están separadas por 30 [kHz] e incluso 40 [kHz] (sin considerar el ancho del canal), sin embargo, hay casos en que las frecuencias están separadas tan solo por 20 [kHz] cumpliendo con lo establecido en [1]; empero, considerando el requerimiento

espectral de los sistemas DRM y AM-IBOC, puede notarse un riesgo claro de interferencias entre las señales digitales de estas estaciones al trabajar bajo el modo de operación híbrido.

En particular, se tiene el caso de las estaciones mostradas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 – Estaciones con separación mínima entre frecuencias centrales de transmisión

Distintivo	Frecuencia de portadora [kHz]	Potencia de transmisión diurna [kW]
XEN La 69	690	50
XEMP Radio 710	710	10
XEX Estadio "W"	730	100

A continuación se trata por separado ambos sistemas: DRM y AM-IBOC.

4.2. Estudio para el sistema AM-IBOC

4.2.1. Ocupación espectral

Tal como se vio en el capítulo 2, en el modo híbrido de operación de este sistema, las señales digitales ocupan aproximadamente 10 [kHz] a cada lado del canal de transmisión de la señal, tal como se muestra en la figura 4.2.

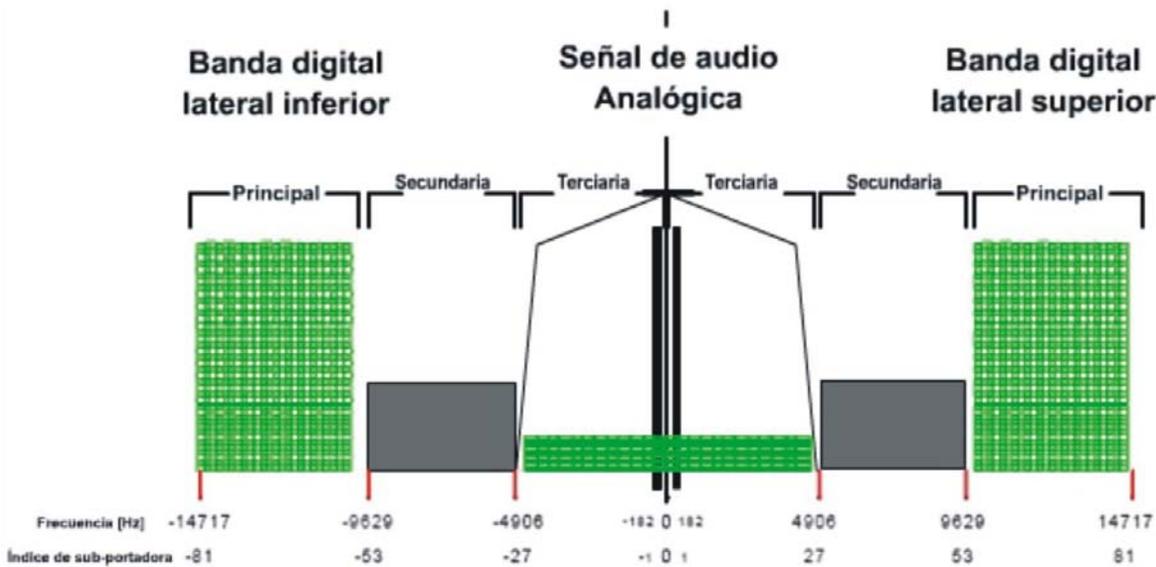


Fig. 4.2 – Ocupación espectral de bandas laterales digitales AM-IBOC

Puede notarse que para el caso de las estaciones mostradas en la tabla 4.2, inevitablemente habrá interferencias entre las señales digitales de las estaciones adyacentes. La figura 4.3, ilustra las interferencias entre estas estaciones.

La potencia de las señales analógicas no es la misma para todas y, por eso, tampoco es igual la potencia de la parte digital de la señal híbrida, pues cada una esta escalada con respecto a la potencia de la señal analógica “host” correspondiente. Así, por ejemplo, las bandas superiores primaria y secundaria de la señal en 690 [kHz] interfieren con las bandas secundaria y primaria inferiores de la señal en 710 [kHz], respectivamente.

En la tabla 4.3 se muestran los valores de potencia de cada banda lateral digital con respecto a la potencia de su señal analógica “host”. Debe notarse que el escalamiento de las portadoras digitales esta establecido en [4], de forma que las bandas laterales primarias están a 16 [dB] por debajo de la potencia de la portadora, las secundarias están aproximadamente hasta 30 [dB] por debajo de la potencia de dicha portadora y, en lo que respecta a las terciarias, su valor es ajustable y debe ser controlado pues se ubican dentro del espectro utilizado para la transmisión analógica de la señales.

Tabla 4.3 – Potencias de portadoras digitales en AM-IBOC modo híbrido

f_{central} [kHz]	P_{central} [kW]	P_{primaria} [kW]	$P_{\text{secundaria}}$ [kW]
690	50	1.26	0.05
710	10	0.25	0.01
730	100	2.51	0.1

A partir de los datos de la tabla anterior, y de la información dentro del capítulo 2, es fácil notar que existirán problemas de interferencia con estas tres estaciones si se trabaja con el sistema AM-IBOC en su modo híbrido. Las portadoras digitales que no se transmiten (± 54 a ± 56 , como se vio en el capítulo 2) para evitar interferencias por primer adyacente, solo sirven para proteger una pequeña parte de las banda laterales primarias, que son las que forman la parte más importante de la señal digital; las bandas secundarias y terciarias hacen una mejora en la calidad de la señal digital.

En la siguiente sección se hacen las simulaciones correspondientes a este caso.

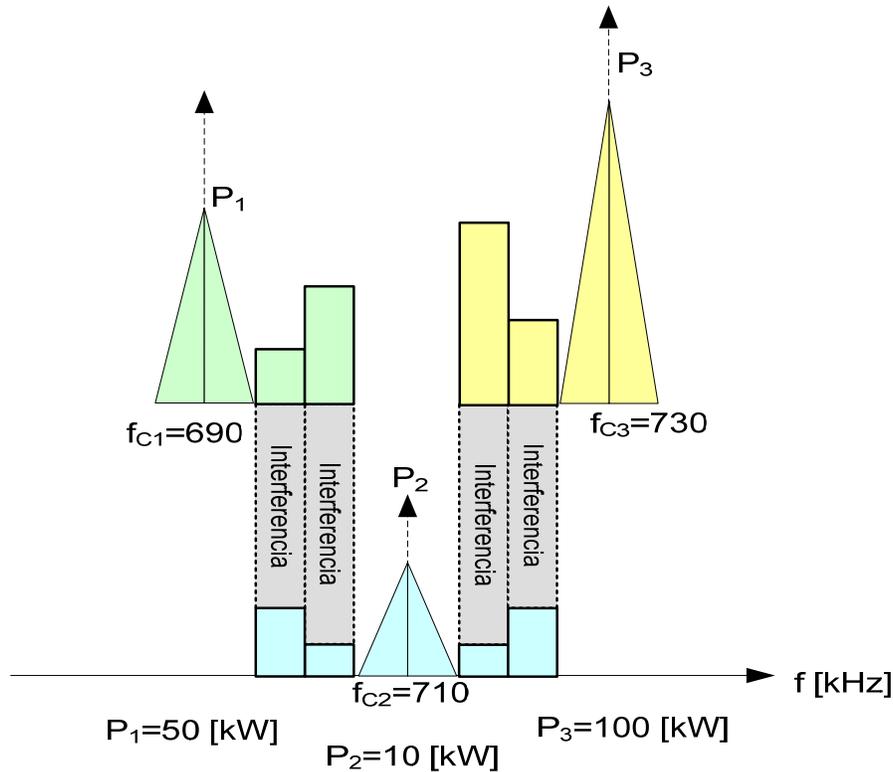


Fig. 4.3 – Interferencia de señales digitales AM-IBOC entre estaciones adyacentes.

4.2.2. Simulación de propagación de señales AM-IBOC

Para hacer una aproximación del comportamiento de propagación de las señales se utilizará el programa GRWAVE recomendado por la UIT para efectuar las simulaciones. Los principios de funcionamiento del software pueden consultarse en [5]. En adelante se presentan las gráficas de atenuación del campo eléctrico de las señales, utilizando la expresión (3.11) derivada dentro del capítulo 3 y que el programa utiliza. Junto con las gráficas se especifican los parámetros considerados y proporcionados como entrada al programa de simulación.

Para consulta del software, y un manual, puede obtenerse de [6]. Entre los parámetros de entrada más importantes que deben darse al programa se encuentran la conductividad (σ [S/m]) y permitividad relativa (ϵ_r) del suelo (parámetros que le caracterizan), la altura de las antenas receptora, h_r , y transmisora, h_t , así como la frecuencia de operación.

Los parámetros de entrada que se mantuvieron fijos para el programa de simulación son los siguientes: $\sigma = 50$ [mS/m], $\epsilon_r = 80$, $h_r = 2$ [m]

Los valores de conductividad y permeabilidad relativa del suelo son los correspondientes a los de agua fresca, esto debido a las propiedades que adoptó el suelo en la Ciudad de México por el hecho de haber sido construida sobre un lago. Considerar parámetros de suelo correspondientes a suelo seco y rocoso,

derivaría en grandes diferencias en el cálculo de intensidad del campo de las señales con respecto a los valores que se han obtenido en las pruebas de campo realizadas [7] y en las que se han considerado los parámetros de agua fresca.

La altura de la antena receptora se supone arbitrariamente de dos metros. Con respecto a la altura de la antena transmisora, se supondrá que las tres estaciones trabajan con una antena de altura aproximadamente igual a $\lambda/2$, donde λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia en que se efectúa la transmisión. Normalmente, se tiene solo la mitad de la antena de transmisión sobre el suelo, la otra mitad esta hecha con arreglos de cables extendidos sobre el suelo a los que comúnmente se llama radiales. Para la conversión de los valores arrojados por el programa GRWAVE a una potencia de transmisión específica, se considera una directividad de 3.28 [dB], de acuerdo a lo definido el capítulo 3.

La figura 4.4 muestra la atenuación del campo eléctrico para el caso de la señal con $f_{c1}=690$ [kHz] (altura de la antena de 217 [m]). Se consideró la frecuencia intermedia de cada banda como representativa, y en adelante así se considerará para las demás frecuencias, teniendo:

- banda lateral primaria superior a $f_{C1-LPS}=703$ [kHz] y
- banda lateral secundaria superior a $f_{C1-LSS}=698$ [kHz]

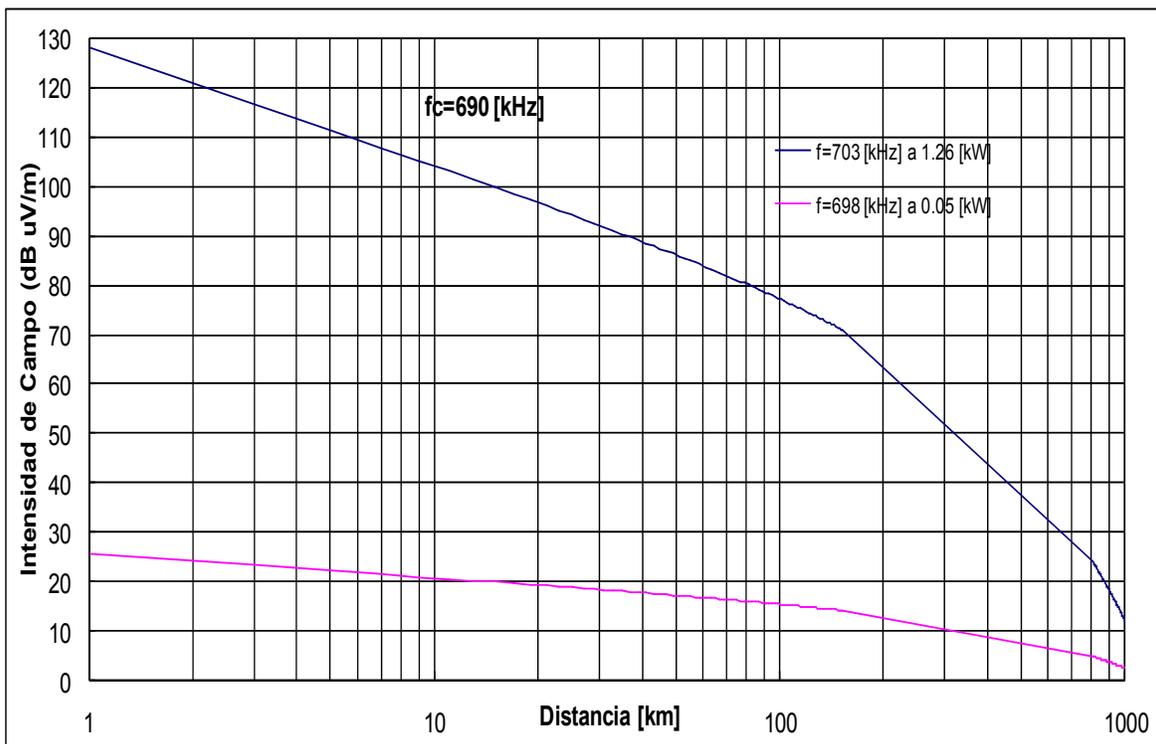


Fig. 4.4 – Atenuación del campo eléctrico con respecto a la distancia: $f_{c1}=690$ [kHz] (bandas superiores)

En el caso de la $f_{c1}=690$, solo nos interesa saber los valores campo eléctrico de las bandas laterales superiores, pues son las bandas que podrían interferir con las bandas inferiores de la siguiente emisora.

Con respecto al campo eléctrico de las bandas inferiores de la señal con frecuencia central en $f_{c2}=710$ [kHz] (altura de la antena de 211 [m]), el comportamiento de dicho campo puede verse en la figura 4.5. Debe notarse que, como se muestra en la figura 4.3, existe la siguiente situación:

- la banda lateral primaria inferior de esta señal interfiere con la banda lateral secundaria superior de la señal en $f_{c1-LPI}=690$ [kHz]
- la banda lateral secundaria inferior de esta señal interfiere con la banda lateral primaria superior de la señal en $f_{c1-LSI}=690$ [kHz]

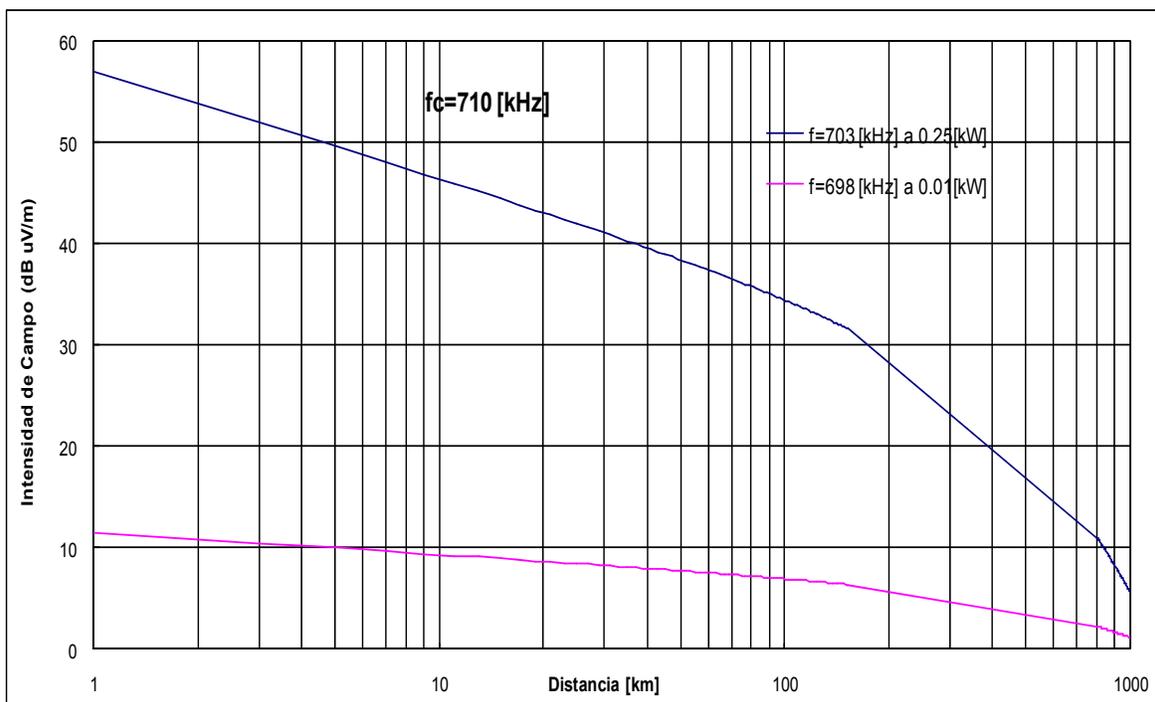


Fig. 4.5 Atenuación del campo eléctrico con respecto a la distancia: $f_{c2}=710$ [kHz] (bandas inferiores)

Por otro lado, para esta misma señal ($f_{c2}=710$ [kHz]), se tiene que las bandas laterales superiores interfieren con las bandas laterales inferiores de la señal con frecuencia central en $f_{c3}=730$ [kHz] tal como se observa en la figura 4.3.

En la figura siguiente, Fig. 4.6, se muestra la atenuación del campo eléctrico para las banda superiores de la señal con $f_{c2}=710$ [kHz], de la misma forma que antes, se toma la frecuencia intermedia de cada banda, primaria y secundaria, como la representativa de dichas bandas. Se puede observar que el comportamiento es muy parecido al de la figura 4.5 pues la frecuencia varía muy poco.

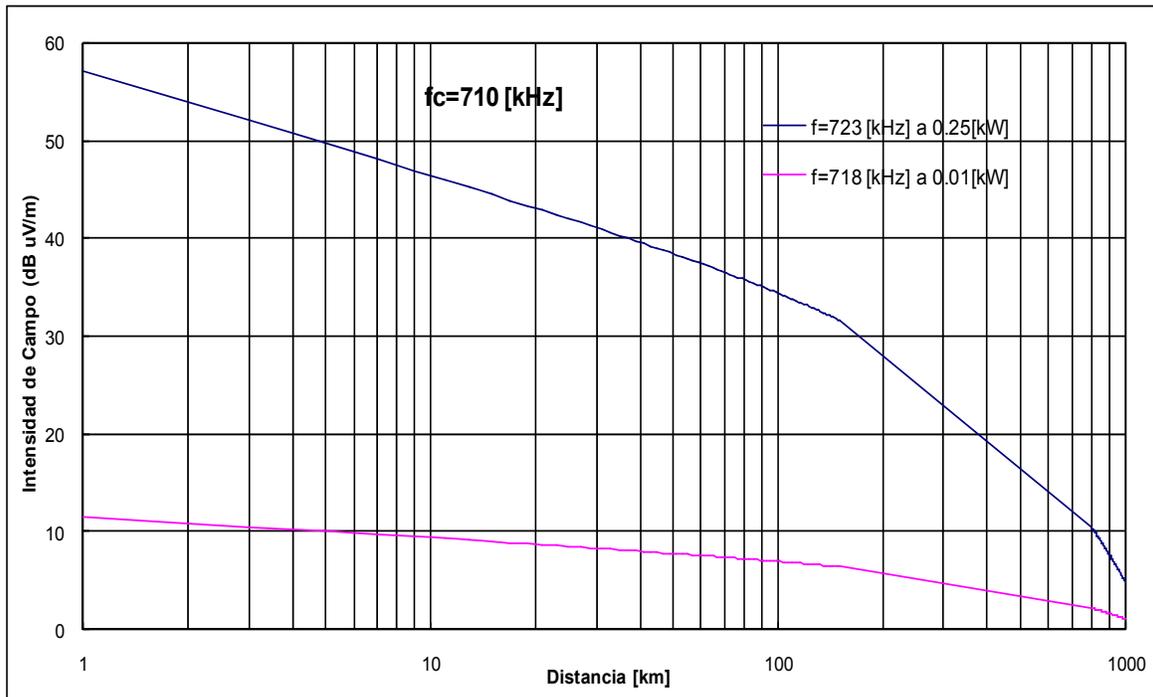


Fig. 4.6 Atenuación del campo eléctrico con respecto a la distancia: $f_{c2}=710$ (bandas superiores)

Por último, se toma la señal cuya frecuencia central es $f_{c3}=730$ [kHz] (la altura de la antena transmisora es de 205 [m]), y en la figura 4.7 se muestra la atenuación del campo eléctrico de las bandas inferiores, que son las que presentan interferencia, considerando la frecuencia intermedia de cada banda como la representativa de cada una de dichas bandas.

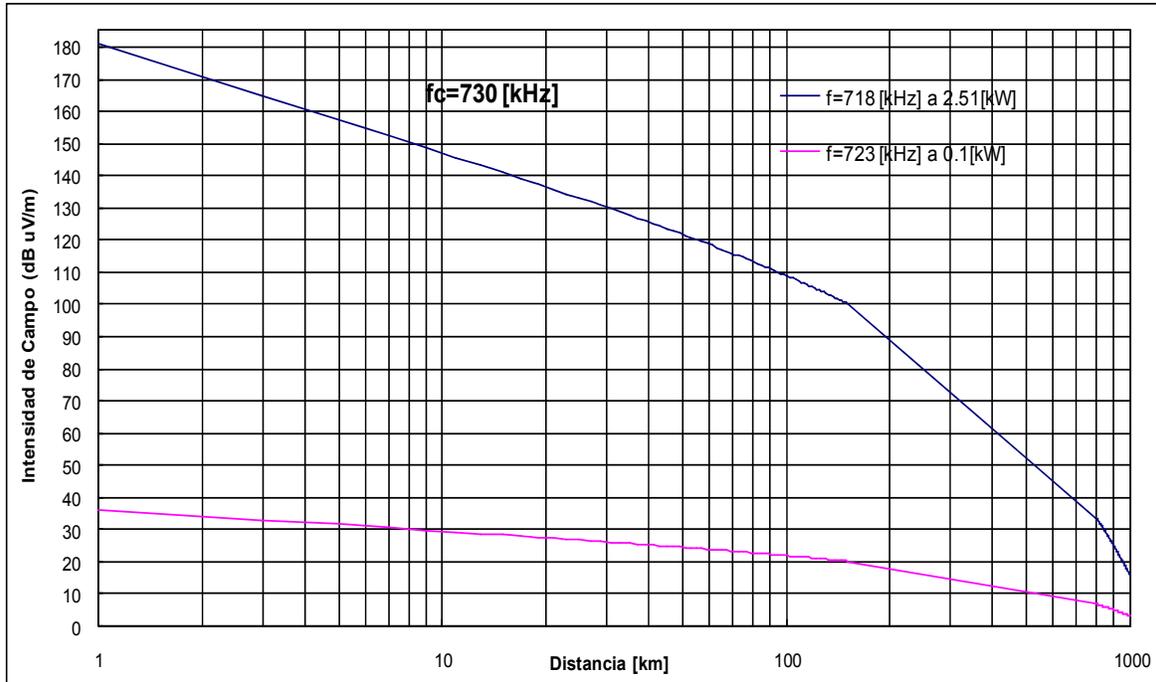


Fig. 4.7 – Atenuación del campo eléctrico con respecto a la distancia: $f_{c3}=730$ (inferiores)

4.3. Estudio para el sistema DRM

4.3.1. Ocupación espectral

Como se vio en el capítulo 2, el sistema DRM es por demás flexible y puede ocupar canales tan reducidos como 4.5 [kHz]. Para nuestro caso, el canal disponible es de 10 [kHz] y es suficiente para ofrecer una calidad de audio parecida al FM, utilizar un ancho espectral mayor resultaría en mejora de calidad de la señal y agregado de servicios. A diferencia del caso de IBOC-AM, el sistema DRM solo requiere de una canal espectral de 10 [kHz], es decir, no se requieren los 10 [kHz] disponibles a cada lado de una determinada frecuencia central para transmitir las sub-portadoras digitales, sino solo uno de los espacios espectrales disponibles, dependiendo de lo que convenga a las radiodifusoras.

El problema de interferencia presente en el sistema AM-IBOC, en el sistema DRM es solucionado por la flexibilidad que proporciona, la parte digital de las señales puede ser transmitida por arriba o debajo del canal que ocupa la señal analógica host (ver figura 2.10) y las estaciones pueden acomodarse de manera que no afecten a las estaciones adyacentes. La figura 4.8 muestra lo anterior.

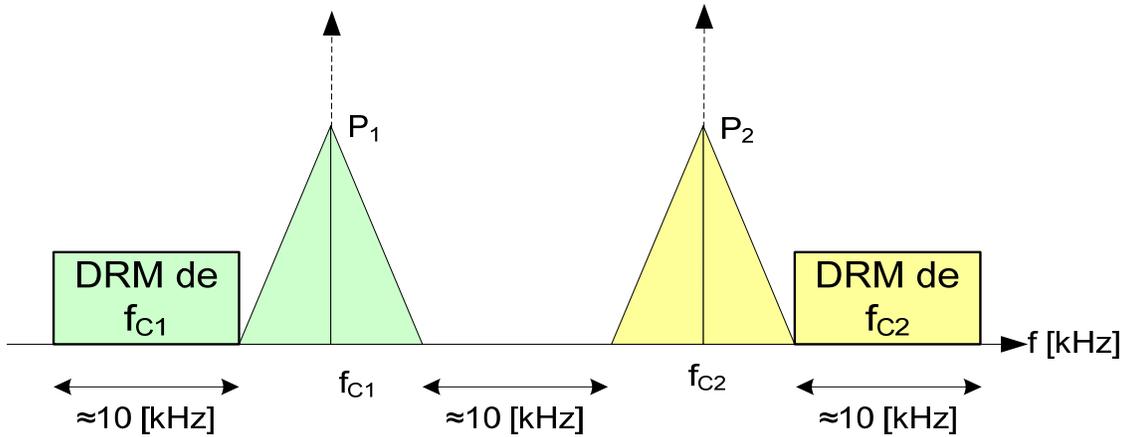


Fig. 4.8 – Posible configuración espectral del sistema DRM con canales de 10 [kHz]

En la figura 4.9 se ilustra una de las posibles configuraciones que podrían considerar las estaciones que se estudian en este capítulo, en caso de que el sistema DRM sea adoptado. Existen, además de la configuración mostrada, diversas posibilidades, pero la configuración a implementar depende de los radiodifusores, en cualquier caso el problema de interferencia puede ser resuelto.

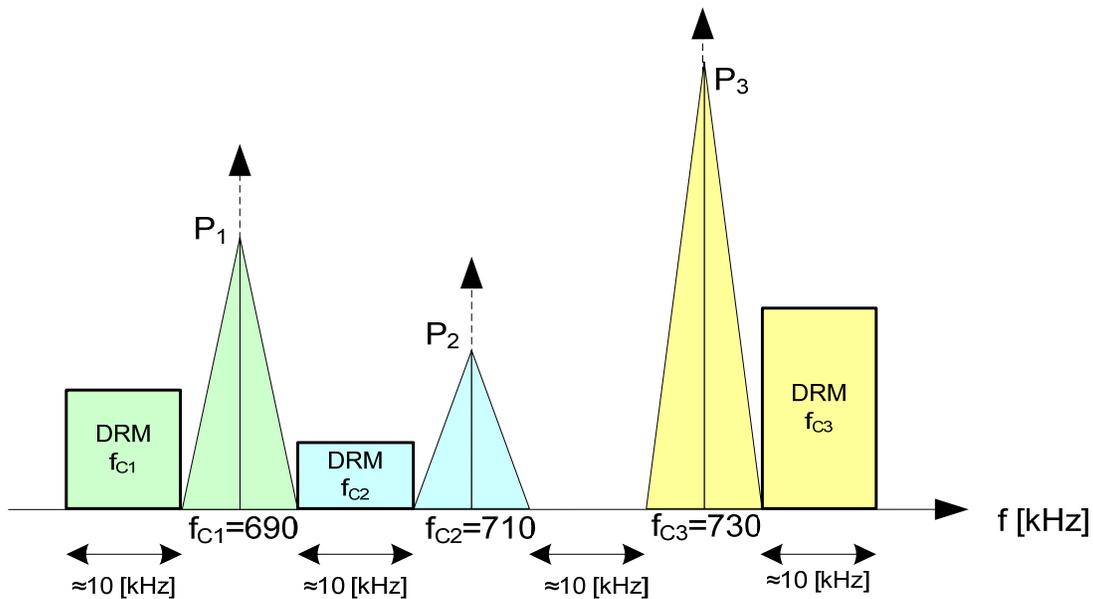


Fig. 4.9 – Posible configuración DRM para las estaciones bajo estudio

En este caso, la potencia de la parte digital de la señal también está escalada con respecto a la potencia de la parte analógica (la señal host), de manera que las sub-portadoras digitales están 16 [dB] por debajo de la potencia de la señal host. Este valor de potencia para la señal digital DRM es un tanto pesimista según [7], y

es considerado así solo como una recomendación para evitar interferencias entre la señal analógica y la digital, sin embargo, durante las pruebas hechas en la Ciudad de México [7] se escaló la señal digital hasta 13 [dB] y no se observó aparición de interferencia alguna. Los niveles de potencia de la parte digital de las señales se muestran en la tabla 4.4, considerando los 16 [dB]. Para los fines de esta tesis, la configuración que se utilizará para las simulaciones es la mostrada en la figura 4.9.

Tabla 4.4 – Potencias de portadoras digitales en DRM modo híbrido

f_{central} [kHz]	P_{fcentral} [kW]	$P_{\text{parte digital}}$ [kW]
690	50	1.26
710	10	0.25
730	100	2.5

En la sección siguiente se efectúa la simulación de propagación de la parte digital de las señales bajo estudio que, aunque no interfieren, será ilustrativo para la posterior comparación con el caso de AM-IBOC.

4.3.2. Simulación de propagación de señales DRM

Los parámetros de entrada que se darán al programa son los siguientes:

$$\sigma = 50 \text{ [mS/m]}, \quad \epsilon_r = 80$$

$$h_r = 2 \text{ [m]}$$

Son los mismos valores que para el caso de AM-IBOC, ya que las características del suelo son las mismas y la altura de las antenas receptoras es la misma, lo mismo sucede para la altura de las antenas transmisoras.

En la figura 4.10, se ilustra la atenuación sufrida por el campo eléctrico de la señal en $f_{c1}=690$ [kHz]. Se tomó la frecuencia intermedia (680 [kHz]) como representativa del bloque que comprende la parte de la señal digital de DRM.

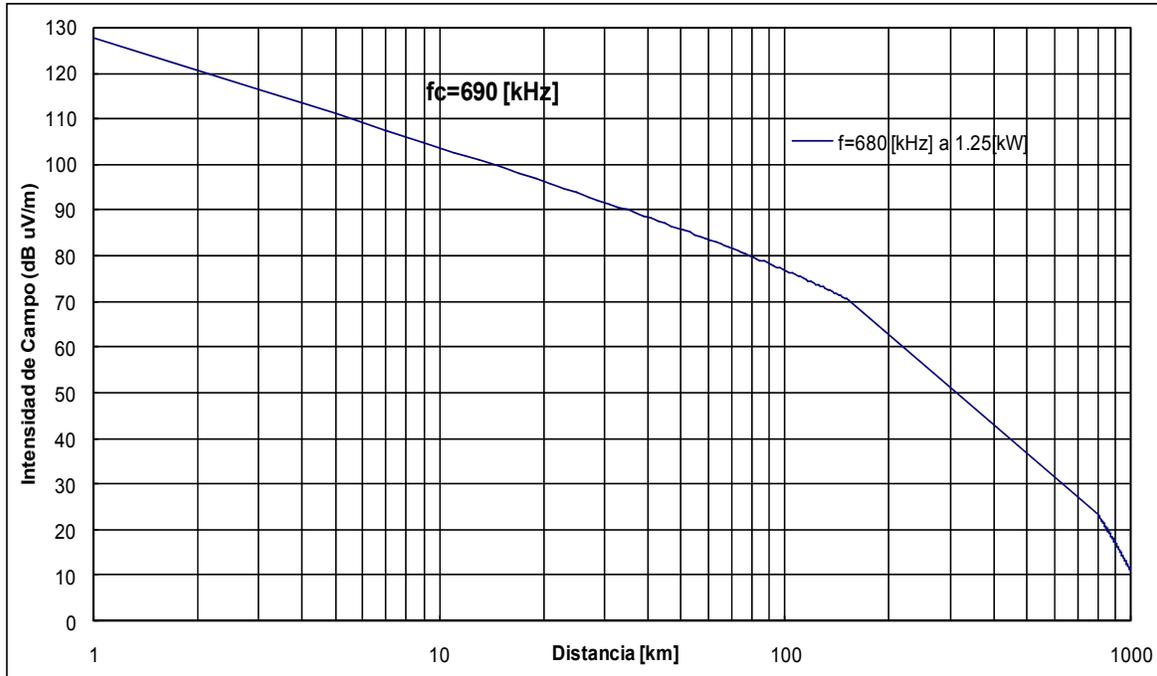


Fig. 4.10 – Atenuación del campo eléctrico de la señal DRM, $f_{c1}=690$ [kHz]

En la figura 4.11 se ilustra la atenuación que sufre el campo eléctrico con respecto a la distancia para la señal con frecuencia central en $f_{c2}=710$ [kHz]. La frecuencia representativa, como se muestra en la imagen, fue 700 [kHz].

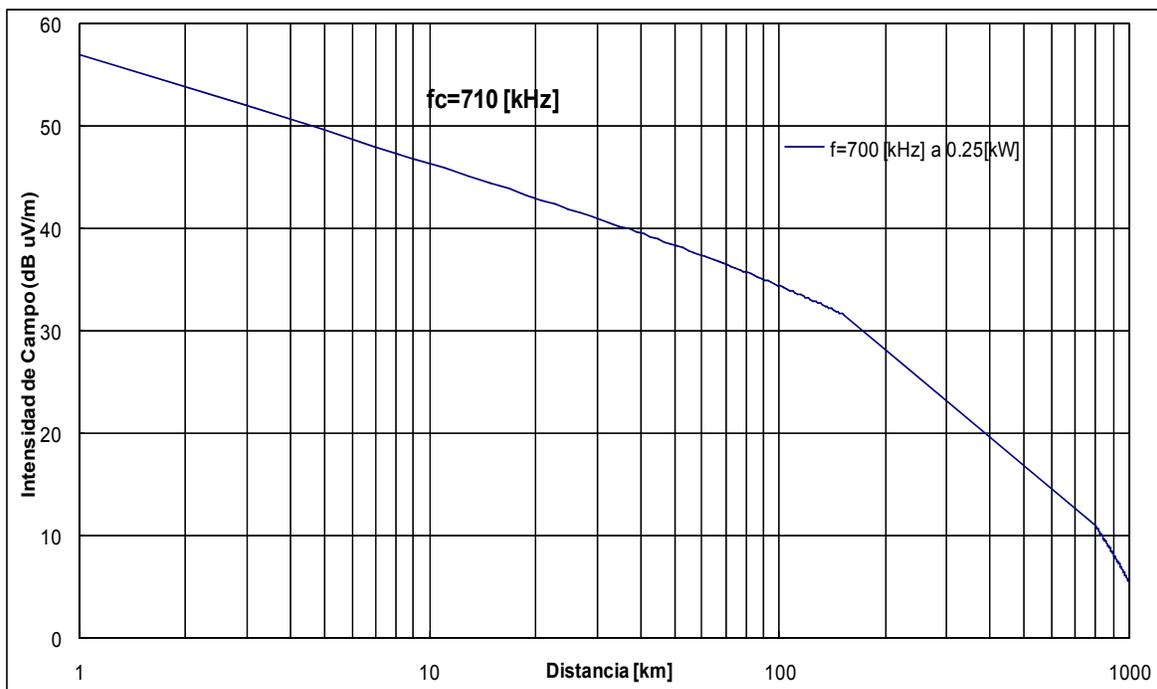


Fig. 4.11 - Atenuación del campo eléctrico de la señal DRM, $f_{c2}=710$ [kHz]

Por último, en la figura 4.12 se muestran los resultados obtenidos para la parte digital de la señal cuya frecuencia central es $f_{c3}=730$ [kHz]. La frecuencia representativa de la parte digital es, como se muestra en la figura, 740 [kHz].

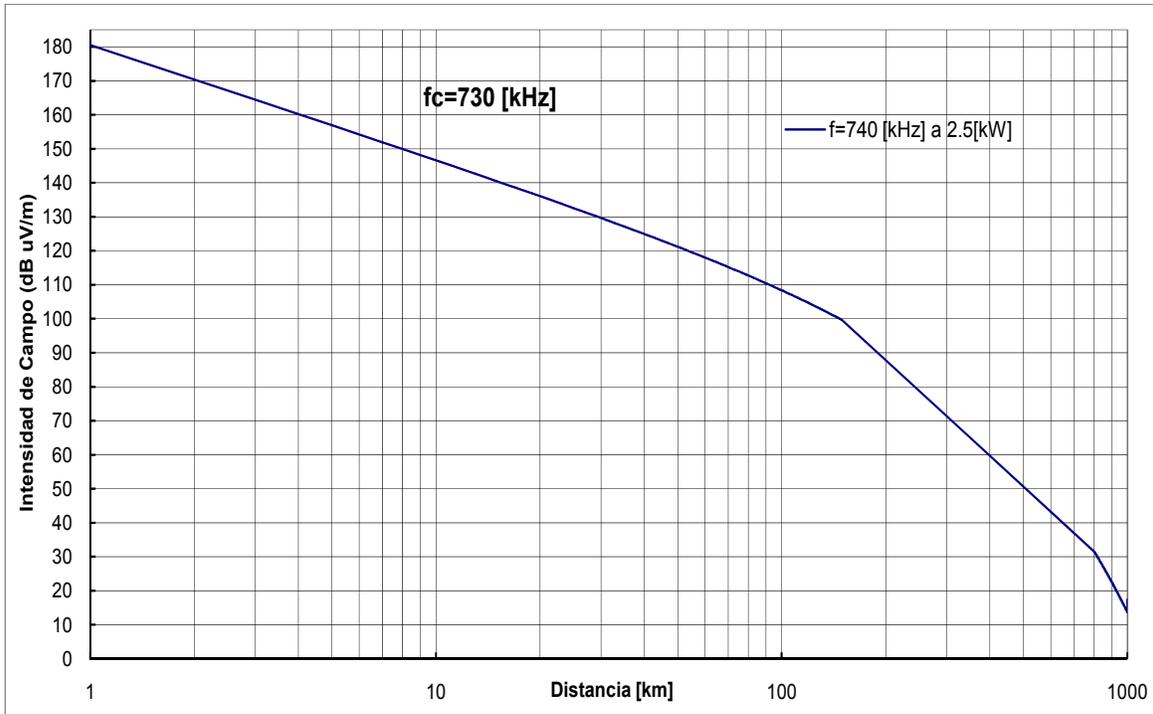


Fig. 4.12 - Atenuación del campo eléctrico de la señal DRM, $f_{c3}=730$ [kHz]

En el siguiente sub-capítulo se muestran mapas con la ubicación aproximada de las emisoras bajo estudio.

4.4. Análisis de resultados

A partir de las gráficas anteriores podemos hacer un diagrama de la cobertura de estas estaciones y observar como interferirán una con otra, dependiendo de su ubicación geográfica. Es posible que alcancen a tener buena área de cobertura sin que la interferencia con las otras señales les afecte demasiado considerando la capacidad de selectividad que poseen los equipos receptores y el umbral de recepción especificado en [8] para esta banda de frecuencias: 60 [dB μ V/m] (o hasta 54 y 40 [dB μ V/m], según la misma referencia) para obtener una relación señal a ruido (o relación entre señal deseada y señal no deseada) de 26 [dB] en los límites protegidos [8]. Sin embargo, según [7], la relación señal a ruido necesaria en señales digitales DRM demostró poder ser hasta de 15 a 20 [dB] menor que para señales AM analógicas teniendo una calidad de audio mucho mejor y área de cobertura comparable. En lo que respecta a IBOC, es más difícil, pues inevitablemente hay traslape de las señales en el dominio de la frecuencia,

además de otro factor que a continuación se explica: IBOC utiliza dos señales en el espectro, aunque sean parte de la misma emisión.

En este punto es importante señalar que, sin considerar los requerimientos espectrales, las señales de DRM y las de IBOC son muy parecidas: están compuestas por portadoras OFDM que llevan modulación digital de señales en cuadratura (digamos 64QAM), por eso, el ruido e interferencia que producen es un poco distinto del que se aprecia normalmente con señales analógicas convencionales (y que puede evitarse con una simple resintonización), ya que el ruido de estas señales digitales es ruido de banda ancha. Por lo anterior, la UIT ha determinado que si una señal analógica es reemplazada por una señal DRM (o IBOC), la potencia de transmisión promedio de la señal digital debe ser reducida entre 6 y 7 [dB] para proveer la misma protección co-canal entre estaciones [9]. Es decir, una transmisión digital con una potencia dada, causará entre 6 y 7 [dB] más interferencia a la salida de un receptor de AM que una señal AM con la misma potencia.

Los sistemas de protección de DRM contra este tipo de interferencia han sido adaptados de acuerdo a lo que especifica la UIT; sin embargo, el sistema IBOC, al componerse de dos partes dentro de la banda espectral, ha tenido dificultades al no reconocer que en realidad esta manejando dos señales y no una. Más adelante se retomará este punto.

De acuerdo a los valores de atenuación del campo eléctrico de las señales, que depende principalmente de las características del suelo, la distancia receptor-transmisor y la potencia de transmisión, podemos establecer el área de cobertura máxima de las estaciones. En la figura 4.13 se observa la ubicación de las estaciones bajo estudio.

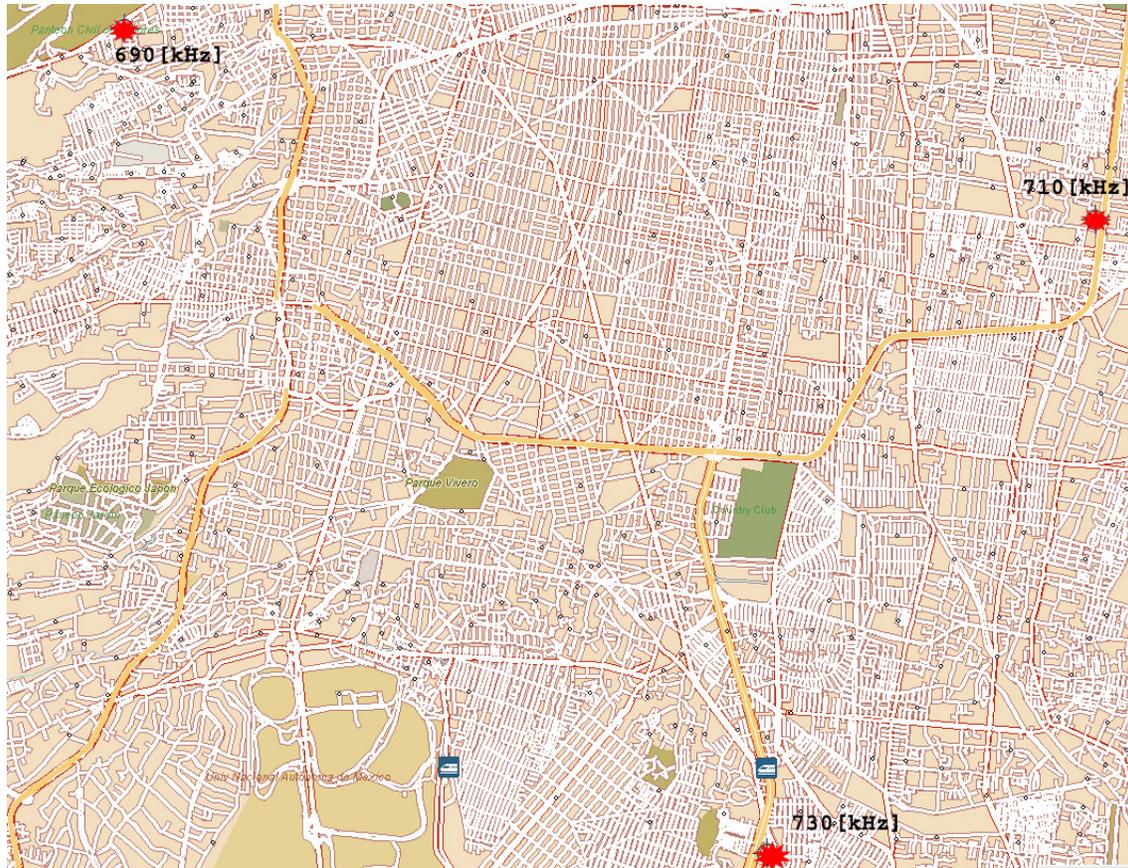


Fig. 4.13 – Ubicación de las estaciones de transmisión de las emisoras bajo estudio

La distancia aproximada entre cada estación se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 – Distancia entre plantas de transmisión

Distancia existente entre Estaciones	Distancia [km]
690 [kHz] a 710 [kHz]	11.49
710 [kHz] a 730 [kHz]	8.23
730 [kHz] a 690 [kHz]	12.08

En la figura 4.14 se muestra la distancia aproximada entre las estaciones. Las avenidas principales cercanas a la planta de transmisión también se muestran en la figura.

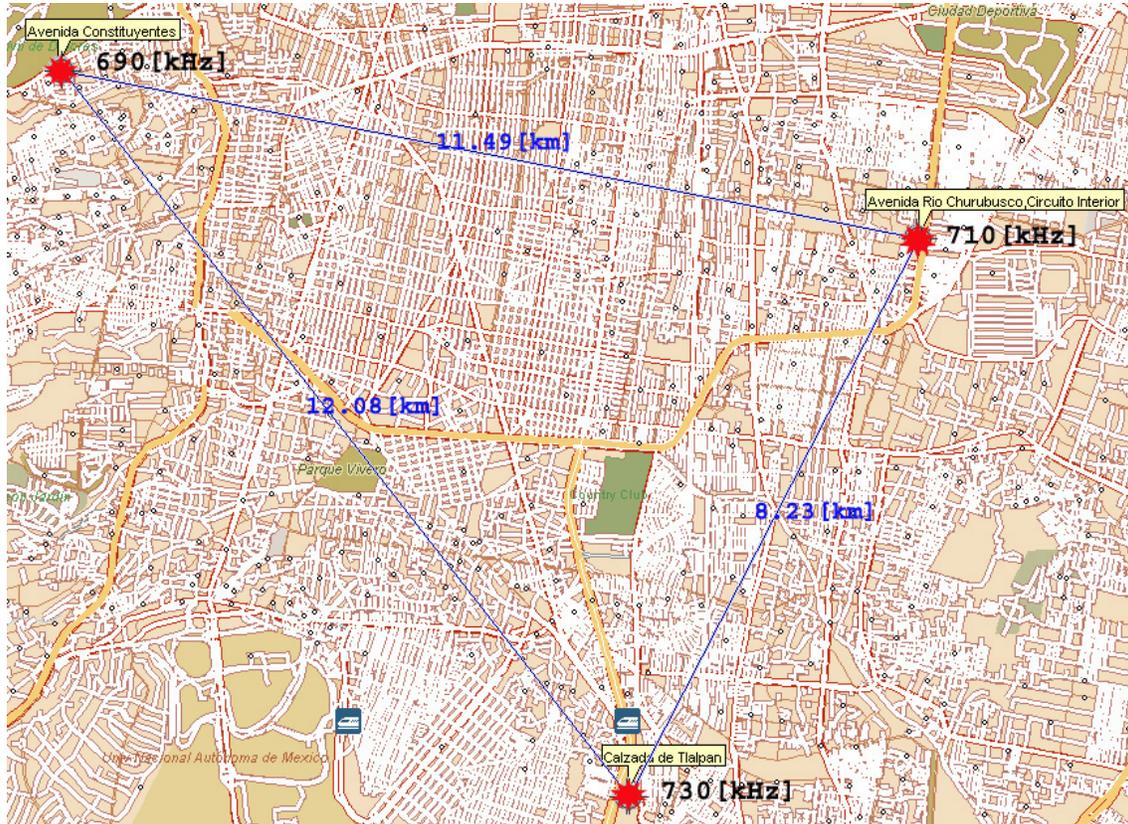


Fig. 4.14 – Distancia aproximada entre las plantas de transmisión de las emisoras bajo estudio

En las imágenes siguientes se muestra el área de cobertura de acuerdo a las simulaciones hechas en los sub-capítulos anteriores. Se considerarán los valores umbral de recepción como 60 [dB (μV/m)] y de 40 [dB (μV/m)], de acuerdo a la referencia [8].

4.4.1. Área de cobertura con el sistema AM-IBOC

De las gráficas mostradas en el sub-capítulo 4.2, podemos aproximar la distancia máxima de cobertura, considerando el umbral de 60 [dB μV/m] para las estaciones con mayor potencia de transmisión. En la siguiente tabla se aprecia lo anterior.

Tabla 4.6. Cobertura máxima aproximada de las estaciones utilizando IBOC AM

Estaciones de referencia	Cobertura [km] Portadora primaria
690 [kHz]	220
710 [kHz]	35
730 [kHz]	400

Se puede apreciar que el área de cobertura de las estaciones es mucho mayor a la distancia que existe entre ellas, lo cual implicará que habrá interferencia en las

señales que se propagarán, no solo geográficamente, sino también en el dominio de la frecuencia, tal como se ha visto en el subcapítulo 4.2.

Aquí se considerará como límite el área de cobertura correspondiente a la señal con menor potencia de transmisión, pues es la que determinará finalmente el punto que se trata en este escrito. En el primer caso de interferencia, la señal con frecuencia en 710 [kHz] corresponde a la señal con menor área de cobertura. De forma que

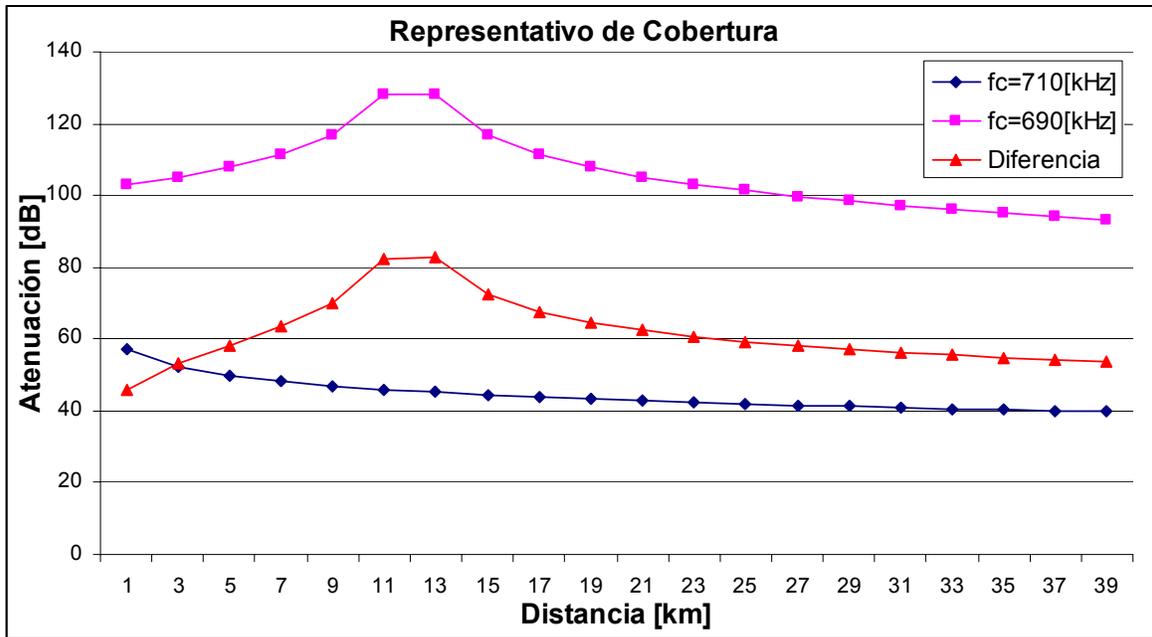


Fig. 4.15 – Cobertura de señales digitales para el primer caso de interferencia IBOC-AM

Debe notarse de la figura anterior, que el punto de referencia distancia 0 es el de la estación con menor potencia, en este caso la de frecuencia central en $f_c=710$ [kHz], por eso el pico de potencia máxima de la señal con $f_c=690$ [kHz] aparece a una distancia de 11.5 [km] aproximadamente.

La señal digital de $f_c=710$ [kHz] tiene una radio de cobertura de $r_1=39$ [km] en el mejor de los casos. Ahora bien, de la misma figura se observa que la señal digital de $f_c=690$ [kHz], tiene un radio de cobertura r_2 mucho más amplio, en este caso solo se esta representando en el rango en que afecta a la señal $f_c=710$ [kHz]. Debido a que ambas señales utilizan el mismo rango de frecuencias y a que, como muestra la figura, hay traslape geográfico de radios de cobertura, la interferencia es inevitable y nada conveniente para la señal $f_c=710$ [kHz]. La línea llamada diferencia muestra la relación de potencias entre ambas señales, se puede observar que el valor siempre es mayor a los 20 [dB] ($\mu\text{V}/\text{m}$) y siempre a favor de la señal $f_c=690$ [kHz]. Por esta razón, cualquier receptor ubicado dentro del radio de cobertura r_1 , esta sujeto a captar la señal de r_2 también, y dado que la potencia de esta última es siempre mayor, la señal propia de r_1 será desechada, y el

receptor seleccionará la señal de r2 como la adecuada para procesar. De forma que, en términos prácticos, la señal digital de las bandas inferiores de la emisora $f_c=710$ [kHz] “no existe” para los receptores mas que como ruido que puede desecharse.

El siguiente caso es muy parecido al anterior, en esta ocasión las bandas superiores digitales de la señal $f_c=710$ [kHz] interfieren con las bandas digitales inferiores de la señal $f_c=730$ [kHz]. La siguiente figura ilustra lo anterior

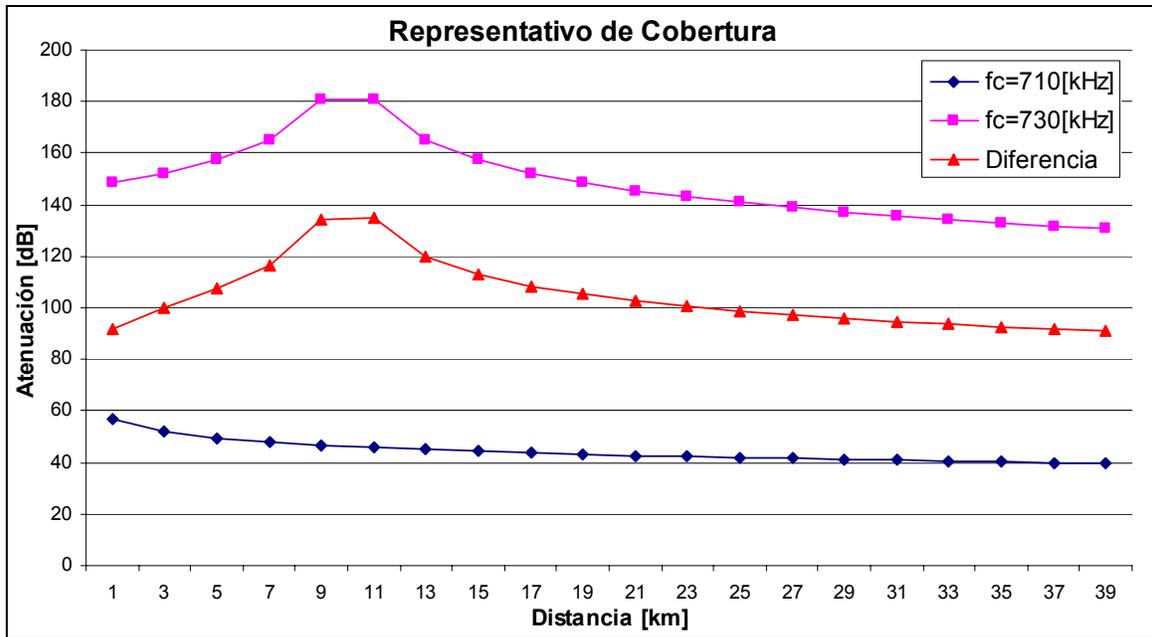


Fig. 4.16 – Cobertura de señales digitales para el segundo caso de interferencia IBOC-AM

Nuevamente, el punto de referencia distancia 0 se tomó como la ubicación de la estación transmisora de $f_c=710$ [kHz], por eso el pico de máxima potencia de transmisión aparece en aproximadamente en 9 [km] para $f_c=730$ [kHz]. El radio de cobertura r_3 de la señal $f_c=710$ [kHz] vuelve a ser de 39 [km] como máximo, pero en este caso son las portadoras digitales de la banda superior. Sin embargo, estas señales interfieren con las bandas laterales digitales inferiores de $f_c=730$ [kHz] que definen el radio de cobertura r_4 y, de acuerdo a la figura 4.16, estas componentes inferiores tienen una potencia de transmisión mucho mayor al de las bandas laterales digitales superiores de $f_c=710$ [kHz]. La diferencia entre las potencias de ambas bandas es más pronunciada que en el primer caso de interferencia y, por esta razón, el resultado es el mismo. Un receptor cualquiera ubicado en r_3 , estará sujeto a la señales propias de r_4 y debido a la diferencia de potencias, el receptor desechará la señal de $f_c=710$ [kHz] considerándolas ruido. Nuevamente, en términos prácticos, la señal digital de las bandas laterales superiores de $f_c=710$ [kHz] no podrá procesarse.

4.4.2. Área de cobertura con el sistema DRM

Como se vio en el sub-capítulo 4.3, debido a la flexibilidad de DRM las interferencias entre las emisoras bajo estudio pueden ser anuladas gracias que los requerimientos espectrales de las señales digitales en este sistema son menores que para IBOC. En este caso es muy sencillo evitar las interferencia entre estaciones como las utilizadas para estudiar el caso de IBOC, de hecho, en la figura 4.9 se observa la configuración utilizada con este fin. Las interferencias en ese caso no ocurren debido a que el segmento espectral utilizado para cada componente digital de cada emisora es distinto. En la figura 4.17 se muestra un esbozo del área de cobertura de las estaciones.

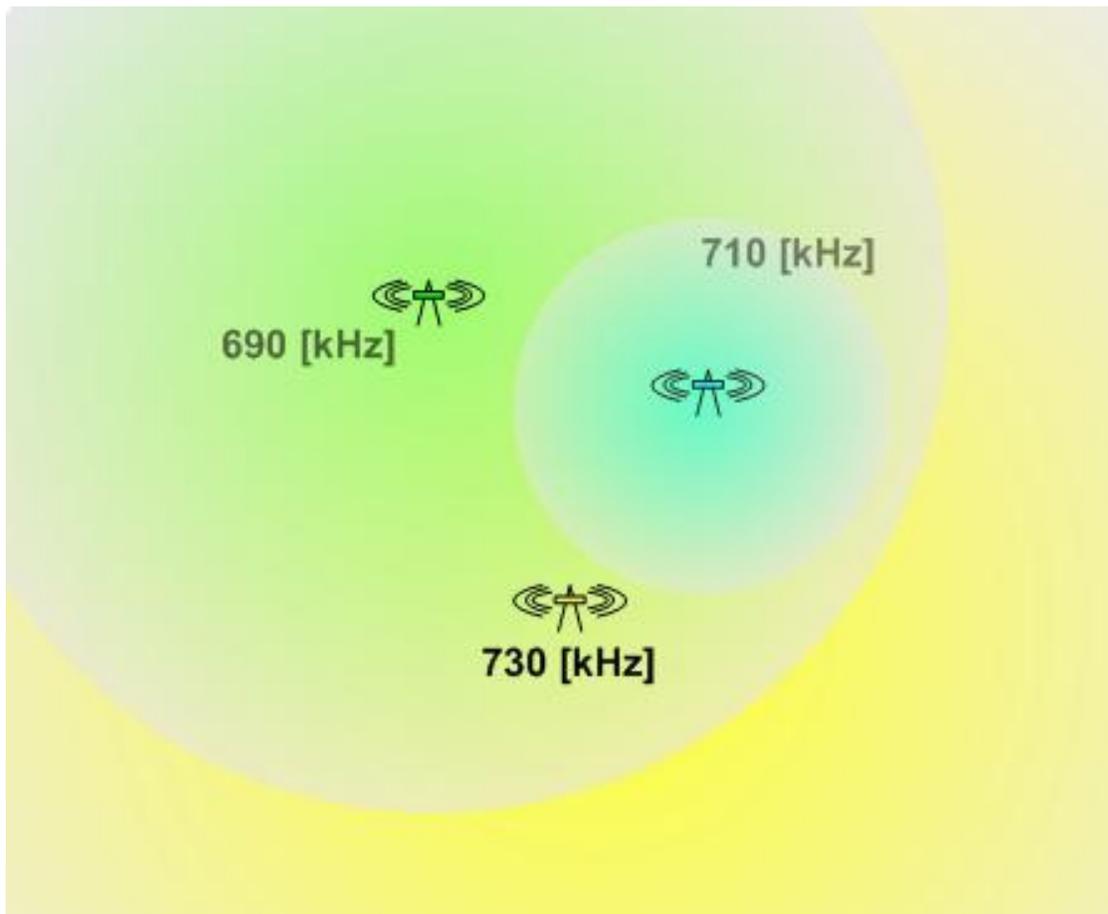


Fig. 4.17 – Área de cobertura de las estaciones utilizando DRM

En la figura hay tres diferentes colores representando la cobertura de cada una de las estaciones. Aunque los colores se superponen, en realidad no hay interferencias pues, como se muestra en la Fig. 4.9, el rango espectral utilizado para cada señal es distinto. Las distancias máximas de cobertura de cada estación pueden obtenerse de las figuras 4.10, 4.11 y 4.12.

Bibliografía y Referencias

- [1] Norma Oficial Mexicana NOM-01-SCT1-93
- [2] Recomendación UIT-R BS.1349
- [3] Documento “Infraestructura de Estaciones de Radio AM”, del sitio en Internet de COFETEL.
- [4] Documento de especificaciones de Transmisión de AM-IBOC, Ibiqity Digital.
- [5] UIT-R, Recomendación P.368-8, “Ground-wave Propagation Curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz”. International Telecommunication Union. Radiocommunication Service. 2006.
- [6] www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=documents&link=rsg3&lang=en
- [7] UIT-R, “Digital Radio Mondiale: MW (Médium Wave) Simulcast Test in México D.F.”. International Telecommunication Union. Radiocommunications Study Groups. August 2006.
- [8] UIT-R, BS.703 Recommendation, “Characteristics of AM sound. broadcasting reference receivers for planning. Purposes”. Internacional Telecommunication Union. Radiocommunication Service.
- [9] UIT-R, BS.1514-1 Recommendation, “Sistema para radiodifusión sonora digital en las bandas de radiodifusión por debajo de 30 MHz”. Anexo 4. Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT.

Conclusiones

En este escrito se han expuesto los posibles problemas de interferencia que surgirán una vez se decida adoptar alguno de los sistemas de radiodifusión sonora digital en la banda de ondas media en operación diurna. Los resultados obtenidos del análisis de ocupación espectral, así como los resultados obtenidos de las simulaciones, muestran claramente ventajas y desventajas de los dos principales sistemas tratados en esta tesis, lo que a su vez sirve de base para determinar el camino a seguir rumbo a la digitalización de la radio.

En particular, el sistema de AM-IBOC tiene importantes puntos débiles a causa de sus requerimientos espectrales pues, como se ha visto, los problemas de interferencia son inevitables en estaciones cuyas frecuencias centrales de operación están separadas por el mínimo ancho espectral de guarda. Las bandas laterales digitales de IBOC en modo híbrido requieren al menos de 10 [kHz] a cada lado del espectro correspondiente a la señal analógica y, de acuerdo a los resultados de las simulaciones hechas, la interferencia resulta inevitable, causando que al menos una estación quede sin posibilidades de transmitir eficientemente alguna señal digital bajo este sistema. Este hecho limita a la emisora afectada pues no podría proporcionar ningún servicio agregado y en realidad el modo híbrido no le beneficiaría en nada, ya que no podría utilizarlo para introducirse en esta nueva etapa. La emisora afectada (en este caso $f_c=710$ [kHz]), estaría evidentemente en desventaja comercial.

Por otro lado, el sistema DRM es muy flexible en el punto de ocupación espectral dando la posibilidad de trabajar en un ancho muy reducido, es cierto que se limita mucho en el aspecto de servicios agregados al inicio, sin embargo, la calidad de audio proporcionada es mejorada a la vez que evita los problemas de interferencia de IBOC. En el peor de los casos, DRM tendría que trabajar solo en un ancho espectral de 5 [kHz], lo cual es suficiente para generar una calidad de audio muy parecida a FM y algún servicio de datos sencillo agregado. Sin embargo, normalmente se cuenta con 10 [kHz] disponibles, por lo que puede mejorar notablemente tanto en servicios agregados como en calidad del audio.

Ambos sistemas ofrecen la ventaja de la reutilización de las bandas actualmente asignadas a la radio, evitando así utilizar un nuevo rango espectral, desventaja que tienen otros sistemas de radiodifusión sonora digital que no ofrecen ninguna otra ventaja o servicio que no pueda ofrecerse dentro de las bandas e que trabaja la radio convencional. Además, la potencia necesaria para la transmisión de las señales digitales es mucho menor que la que actualmente se necesita para señales analógicas, lo que repercute en el consumo de energía de las emisoras. Estos es ventajoso para los concesionarios, sin mencionar el hecho de la posible expansión del mercado, pues, al liberar la banda de guarda de su propósito, se abre la puerta a nuevos concesionarios para entrar al mercado de la radio ahora digital, ofreciendo al usuario mayores opciones y servicios.

CONCLUSIONES

Por el lado de los concesionarios, se tiene una consideración importante con respecto al sistema a utilizar y que en cualquier caso es transparente para el usuario. El sistema americano IBOC no es un sistema abierto y cualquier emisora que desee utilizarlo debe pagar cierta tarifa por el uso de la tecnología además de la adquisición del equipo necesario. En contraste, DRM solo requiere de los concesionarios que compren el equipo para la generación de la señal, sin cobro de tarifa alguna.

Las consideraciones hechas en este trabajo de tesis fueron para llevar a cabo un análisis sencillo que nos condujera a un punto muy concreto donde se prevén riesgos no menos que obvios y que, al ver los resultados, resultan evidentes. El problema de interferencia expuesto en esta tesis debe ser considerado a detalle en futuros estudios, y las consideraciones hechas aquí pueden modificarse con el fin de efectuar un análisis más detallado, que refuerce los puntos aquí expuestos. Este escrito resulta ser, sin embargo, un buen punto de referencia que exige se considere cuidadosamente la manera en que se procederá para que la radio avance al mundo digital y se explote aun el potencial que tienen estas bandas de operación. Este escrito constituye parte de las bases del proceso de investigación que, al menos en nuestro país, se ha descuidado. En trabajos posteriores, se permitirá caracterizar completamente una situación como la que se expuso en este escrito.

Los resultados pueden mejorarse considerando parámetros específicos de las antenas de transmisión de las emisoras, tales como la directividad: en esta tesis por simplicidad se consideró que las antenas son omnidireccionales. Efectuar el análisis hasta ese punto definirá con mayor exactitud las zonas en que el problema de interferencia tiene mayor impacto. Adicionalmente, como parte de trabajos futuros debe considerarse el análisis del caso de propagación nocturna, pues en el presente escrito dicho caso no se trató debido a la dificultad de modelado de este caso, pues deben considerarse los efectos de las componentes de la señal debidas a la reflexión en la ionosfera y que, como se vio, surgen debido al desvanecimiento temporal nocturno de las dos capas de la ionosfera que causan mayor atenuación.

El presente trabajo cumplió satisfactoriamente con los objetivos propuestos al inicio al plantear el panorama general de la situación que se enfrentará con la adopción de algún sistema de radiodifusión general en la banda de onda media y demostró que, en efecto, el problema de interferencia está latente y, para evitarlo, deben considerarse pruebas más allá de fines demostrativos, así como realizar estudios de las implicaciones de cualquier sistema. DRM resulta ser una mejor opción hasta este punto. Si un sistema de radiodifusión sonora digital puede entrar sin causar estragos en la infraestructura ya establecida, los concesionarios se verán motivados a ofrecer nuevos contenidos al usuario y, en estas condiciones, el proceso de digitalización será prácticamente transparente para el radioescucha, que por otro lado notará la mejora del servicio. Como consecuencia de lo anterior, el proceso de evolución de la radio se verá favorecido y el periodo de transición de analógico a digital disminuirá significativamente.

Acrónimos y Abreviaturas

AAB	Analog Audio Bandwidth Control
AAC	Advanced Audio Coding
AM	Amplitud Modulada
BLPI	Banda Lateral Primaria Inferior
BLPS	Banda Lateral Primaria Superior
BLSI	Banda Lateral Secundaria Inferior
BLSS	Banda Lateral Secundaria Superior
CELP	Code Excited Linear Prediction
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DAB	Digital Audio Broadcasting
DD	Analog Diversity Delay Control
DRM	Digital Radio Mondiale
FAC	Fast Access Channel
FCC	Federal Communications Commission
FDM	Frequency Division Multiplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FIC	Fast Information Channel
FM	Frecuencia Modulada
GPS	Global Positioning System
HVXC	Harmonic Vector eXcitation Coding
IBOC	In Band – On Channel
IDS	IBOC Data Service
ISI	Inter Symbol Interference
ISO	International Standards Organization
L1-SAP	Layer 1 - Service Access Point
L1-SDU	Layer 1 – Service Data Unit
LPI	(Banda) Lateral Primaria Inferior
LPS	(Banda) Lateral Primaria Superior
LSI	(Banda) Lateral Secundaria Inferior
LSS	(Banda) Lateral Secundaria Superior
MA1-MA4	AM Service Modes (1 a 4)
MP1-MP7	Primary Service Modes (1 a 7)
MPEG	Moving Picture Experts Group
MSC	Main Service Channel
MUF	Maximum Usable Frequency
MUSICAM	Masking Pattern Universal Sub-band Integrated Coding And Multiplexing
NRSC	National Radio Systems Committee
NVIS	Near Vertical Incidence Skywave
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
P1-P3	Primary Logical Channels (1 a 3)

PIDS	Primary IBOC Data Service Logical Channel
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva
PL	Power Level Control
PM	Primary Main (banda lateral de IBOC)
PSM	Service Mode Control
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
S1-S5	Secondary Logical Channels (1 a 5)
SAP	Service Access Point
SBR	Spectral Band Replication
SCCH	System Control Channel
SCS	Single Channel Simulcast
SDARS	Satellite Digital Audio Radio Service
SDC	Service Description Channel
SDU	Service Data Unit
SFN	Single Frequency Network
SIDS	Secondary IBOC Data Service Logical Channel
SM	Secondary Main (banda lateral de IBOC)
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SP	Secondary Protected (banda lateral de IBOC)
SPL	Sound Pressure Level
TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UHF	Ultra High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)
VHF	Very High Frequency

Tablas de Valores

La siguiente tabla muestra los valores para las bandas laterales primaria y secundaria superiores de IBOC de la señal analógica con frecuencia central en 690 [kHz]

$f_{c1}=690$ [kHz]	$f=703$ [kHz] BLPS a 1.26 [kW]	$f=698$ [kHz] BLSS a 0.05 [kW]	$f_{c1}=690$ [kHz]	$f=703$ [kHz] BLPS a 1.26 [kW]	$f=698$ [kHz] BLSS a 0.05 [kW]
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)
1	128.1458827	25.52727087	824	22.88738517	4.613052337
3	116.7491386	23.2569851	826	22.75827685	4.589671433
5	111.4204859	22.19783015	828	22.62916852	4.563952439
7	107.8876126	21.49406495	830	22.51179731	4.540571535
9	105.2350233	20.96565652	832	22.38268899	4.514852541
11	103.1106045	20.54246216	834	22.25358066	4.489133547
13	101.3265621	20.18707242	836	22.13620945	4.465752643
15	99.78899935	19.88078258	838	22.00710113	4.440033649
17	98.42749336	19.61190218	840	21.88972992	4.416652745
19	97.21856994	19.36874078	842	21.76062159	4.39093375
21	96.12701772	19.15129838	844	21.64325039	4.367552846
23	95.11762535	18.95256069	846	21.51414206	4.341833852
25	94.20212994	18.76785155	848	21.38503373	4.318452948
27	93.33358302	18.59717095	850	21.26766253	4.292733954
29	92.53545882	18.43818081	852	21.1385542	4.26935305
31	91.7842831	18.28620493	854	21.021183	4.243634056
33	91.06831874	18.14591951	856	20.89207467	4.220253152
35	90.39930287	18.01031027	858	20.76296634	4.194534158
37	89.75376124	17.88405338	860	20.64559514	4.171153254
39	89.14343096	17.76247268	862	20.51648681	4.14543426
41	88.55657493	17.64556817	864	20.3991156	4.122053356
43	87.99319314	17.53567792	866	20.27000728	4.096334361
45	87.46502272	17.42812576	868	20.15263607	4.070615367
47	86.94858941	17.32524978	870	20.02352775	4.047234463
49	86.44389323	17.2247119	872	19.90615654	4.021515469
51	85.96267128	17.12885019	874	19.77704821	3.998134565
53	85.49318646	17.03766466	876	19.64793989	3.972415571
55	85.04717587	16.94647914	878	19.53056868	3.949034667
57	84.60116529	16.85996979	880	19.40146035	3.923315673
59	84.17862895	16.77579854	882	19.28408915	3.899934769
61	83.76782973	16.69162729	884	19.15498082	3.876553865
63	83.35703051	16.61213221	886	19.03760961	3.850834871
65	82.96970553	16.53497523	888	18.90850129	3.827453967
67	82.58238055	16.45781825	890	18.79113008	3.801734972
69	82.20679269	16.38299936	892	18.66202176	3.778354068
71	81.84294195	16.31051855	894	18.54465055	3.752635074
73	81.47909121	16.23803775	896	18.41554222	3.72925417
75	81.12697759	16.16789504	898	18.29817102	3.703535176
77	80.7866011	16.10009042	900	18.16906269	3.680154272
79	80.4462246	16.0322858	902	18.03995436	3.654435278
81	80.11758522	15.96681927	904	17.92258316	3.631054374
83	79.78894584	15.90369083	906	17.79347483	3.60533538

85	79.47204359	15.84056238	908	17.67610362	3.581954476
87	79.15514133	15.77743394	910	17.5469953	3.556235482
89	78.8499762	15.71664359	912	17.42962409	3.532854578
91	78.54481106	15.65585324	914	17.30051577	3.507135583
93	78.25138305	15.59740098	916	17.18314456	3.483754679
95	77.95795503	15.53894872	918	17.05403623	3.460373776
97	77.66452702	15.48049646	920	16.93666503	3.434654781
99	77.38283612	15.4243823	922	16.8075567	3.411273877
101	77.10114523	15.36826813	924	16.69018549	3.385554883
103	76.81945433	15.31215396	926	16.56107717	3.362173979
105	76.54950056	15.25837788	928	16.44370596	3.336454985
107	76.27954679	15.2046018	930	16.31459764	3.313074081
109	76.00959301	15.15082572	932	16.19722643	3.287355087
111	75.75137636	15.09938773	934	16.0681181	3.263974183
113	75.48142258	15.04794974	936	15.9507469	3.240593279
115	75.23494305	14.99651175	938	15.82163857	3.214874285
117	74.9767264	14.94507377	940	15.70426736	3.191493381
119	74.71850975	14.89597387	942	15.57515904	3.165774387
121	74.47203021	14.84687397	944	15.45778783	3.142393483
123	74.22555068	14.79777407	946	15.34041663	3.116674488
125	73.99080827	14.74867417	948	15.2113083	3.093293585
127	73.74432874	14.70191237	950	15.09393709	3.069912681
129	73.50958632	14.65515056	952	14.96482877	3.044193686
131	73.26310679	14.60605066	954	14.84745756	3.020812782
133	73.02836438	14.55928885	956	14.71834923	2.995093788
135	72.80535909	14.51486513	958	14.60097803	2.971712884
137	72.57061668	14.46810333	960	14.4718697	2.94833198
139	72.34761138	14.42367961	962	14.35449849	2.922612986
141	72.11286897	14.37925589	964	14.22539017	2.899232082
143	71.88986368	14.33249408	966	14.10801896	2.873513088
145	71.66685839	14.29040846	968	13.97891064	2.850132184
147	71.4438531	14.24598474	970	13.86153943	2.82441319
149	71.23258493	14.20156102	972	13.74416822	2.801032286
151	71.00957964	14.1594754	974	13.6150599	2.777651382
152.36	70.85699707	14.11972786	976	13.49768869	2.751932388
802	24.24889116	4.886608913	978	13.36858036	2.728551484
804	24.13151996	4.860889919	980	13.25120916	2.70517058
806	24.00241163	4.835170924	982	13.12210083	2.679451586
808	23.88504042	4.81179002	984	13.00472963	2.656070682
810	23.7559321	4.786071026	986	12.8756213	2.630351688
812	23.62682377	4.762690122	988	12.75825009	2.606970784
814	23.50945256	4.736971128	990	12.64087889	2.58358988
816	23.38034424	4.713590224	992	12.51177056	2.557870885
818	23.25123591	4.68787123	994	12.39439935	2.534489982
820	23.1338647	4.662152235	996	12.26529103	2.508770987
822	23.00475638	4.638771332	998	12.14791982	2.485390083
			1000	12.0188115	2.46200918

La siguiente tabla muestra los valores para las bandas laterales primaria y secundaria inferiores de IBOC de la señal analógica con frecuencia central en 710 [kHz]

$f_{c2}=710$ [kHz]	$f=703$ [kHz] BLPI a 0.25 [kW]	$f=698$ [kHz] BLSI a 0.01 [kW]	$f_{c2}=710$ [kHz]	$f=703$ [kHz] BLPI a 0.25 [kW]	$f=698$ [kHz] BLSI a 0.01 [kW]
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)
1	57.08071294	11.41614259	824	10.37260803	2.049426586
3	52.00942776	10.40188555	826	10.31509861	2.038970328
5	49.63585717	9.927171435	828	10.26281732	2.027468444
7	48.06741846	9.612438066	830	10.2053079	2.015966561
9	46.88586129	9.376126633	832	10.15302661	2.005510302
11	45.93956994	9.186868362	834	10.09551719	1.994008419
13	45.14489432	9.027933239	836	10.0432359	1.98355216
15	44.46000942	8.890956258	838	9.98572648	1.972050277
17	43.85877458	8.770709289	840	9.93344519	1.961594018
19	43.32027728	8.663009831	842	9.87593577	1.950092135
21	42.83406128	8.564721005	844	9.82365448	1.938590251
23	42.38444218	8.475842811	846	9.76614506	1.928133993
25	41.97664812	8.393238372	848	9.71386377	1.916632109
27	41.5949947	8.316907688	850	9.65635435	1.906175851
29	41.23425379	8.245805133	852	9.60407306	1.894673967
31	40.89965354	8.177839456	854	9.54656364	1.884217709
33	40.58596579	8.115101907	856	9.49428235	1.872715825
35	40.28273431	8.05445561	858	9.43677293	1.862259567
37	40.00041534	7.997991816	860	9.38449164	1.850757683
39	39.72855263	7.943619274	862	9.32698222	1.839255799
41	39.46714618	7.891337984	864	9.27470093	1.828799541
43	39.22142411	7.841147945	866	9.21719151	1.817297657
45	38.98093018	7.794094783	868	9.16491022	1.806841399
47	38.7508925	7.748087248	870	9.1074008	1.795339515
49	38.52608295	7.703125338	872	9.05511951	1.784883257
51	38.31172966	7.66025468	874	8.99761009	1.773381373
53	38.10783262	7.618429647	876	8.9453288	1.762925115
55	37.90393559	7.578695867	878	8.88781938	1.751423231
57	37.71049482	7.538962086	880	8.83553809	1.740966973
59	37.52228217	7.501319557	882	8.77802867	1.729465089
61	37.33929765	7.464722653	884	8.72574738	1.719008831
63	37.15631314	7.42812575	886	8.66823796	1.707506947
65	36.98378488	7.393620098	888	8.61595667	1.697050689
67	36.81125662	7.359114447	890	8.55844725	1.685548805
69	36.64395649	7.325654421	892	8.50616596	1.675092547
71	36.48188449	7.293240021	894	8.453884669	1.663590663
73	36.32504062	7.261871246	896	8.39637525	1.653134405
75	36.16819675	7.230502472	898	8.344093959	1.641632521
77	36.01658101	7.199133698	900	8.28658454	1.631176263
79	35.86496526	7.169856175	902	8.234303249	1.619674379
81	35.71857765	7.139533027	904	8.17679383	1.609218121
83	35.57219004	7.11130113	906	8.124512539	1.597716237
85	35.43103055	7.083069233	908	8.06700312	1.587259979
87	35.2950992	7.054837336	910	8.014721829	1.575758095
89	35.15393971	7.027651065	912	7.962440539	1.565301837

91	35.02323649	7.000464794	914	7.904931119	1.553799953
93	34.88730513	6.973278523	916	7.852649829	1.543343695
95	34.75660191	6.947137878	918	7.795140409	1.531841811
97	34.63112681	6.922042858	920	7.742859119	1.521385553
99	34.50565171	6.896947839	922	7.685349699	1.509883669
101	34.38017661	6.87185282	924	7.633068409	1.499427411
103	34.25470152	6.8467578	926	7.580787118	1.487925527
105	34.13445455	6.822708406	928	7.523277699	1.477469269
107	34.01420758	6.798659013	930	7.470996408	1.465967385
109	33.89396061	6.774609619	932	7.413486989	1.455511127
111	33.77894177	6.751605851	934	7.361205698	1.444009243
113	33.66392293	6.727556458	936	7.303696279	1.433552985
115	33.5489041	6.705598316	938	7.251414988	1.422051101
117	33.43388526	6.682594548	940	7.199133698	1.411594843
119	33.32409455	6.65959078	942	7.141624278	1.400092959
121	33.21430384	6.637632638	944	7.089342988	1.389636701
123	33.10451313	6.615674496	946	7.031833568	1.379180443
125	32.99472242	6.59476198	948	6.979552278	1.367678559
127	32.89015984	6.572803838	950	6.927270987	1.357222301
129	32.78559725	6.551891322	952	6.869761568	1.345720417
131	32.68103467	6.530978806	954	6.817480277	1.335264159
133	32.57647209	6.510066289	956	6.759970858	1.323762275
135	32.47190951	6.489153773	958	6.707689567	1.313306017
137	32.36734693	6.468241257	960	6.655408277	1.301804133
139	32.26801248	6.448374367	962	6.597898857	1.291347875
141	32.16867803	6.427461851	964	6.545617567	1.280891617
143	32.06934358	6.40759496	966	6.488108147	1.269389733
145	31.97000912	6.38772807	968	6.435826857	1.258933475
147	31.87067467	6.368906805	970	6.383545567	1.247431591
149	31.77134022	6.349039915	972	6.326036147	1.236975333
151	31.6772339	6.329173024	974	6.273754857	1.225473449
152.93	31.58312757	6.315579889	976	6.221473566	1.215017191
802	10.979071	2.171764806	978	6.163964147	1.204560932
804	10.92156158	2.160262922	980	6.111682856	1.193059049
806	10.86928029	2.149806664	982	6.054173437	1.18260279
808	10.81177087	2.13830478	984	6.001892146	1.171100907
810	10.75948958	2.126802896	986	5.949610856	1.160644648
812	10.70198016	2.116346638	988	5.892101436	1.149142765
814	10.64969887	2.104844754	990	5.839820146	1.138686506
816	10.59218945	2.094388496	992	5.787538855	1.128230248
818	10.53990816	2.082886612	994	5.730029436	1.116728364
820	10.48239874	2.071384728	996	5.677748145	1.106272106
822	10.42488932	2.06092847	998	5.625466855	1.094770222
			1000	5.567957435	1.084313964

La siguiente tabla muestra los valores para las bandas laterales primaria y secundaria superiores de IBOC de la señal analógica con frecuencia central en 710 [kHz]

$f_{c2}=710$ [kHz]	f=723 [kHz] BLPS a 0.25 [kW]	f=718 [kHz] BLSS a 0.01 [kW]	$f_{c2}=710$ [kHz]	f=723 [kHz] BLPS a 0.25 [kW]	f=718 [kHz] BLSS a 0.01 [kW]
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)
1	57.07548481	11.41509696	826	9.692951253	1.96368527
3	51.9989715	10.3997943	828	9.635441834	1.952183386
5	49.62017279	9.925080183	830	9.577932414	1.941727128
7	48.04650594	9.610346814	832	9.525651124	1.930225244
9	46.86494878	9.374035381	834	9.468141704	1.91872336
11	45.91342929	9.183731484	836	9.410632285	1.907221476
13	45.11875368	9.024796361	838	9.353122865	1.896765218
15	44.43386877	8.88781938	840	9.300841575	1.885263334
17	43.8274058	8.766526786	842	9.243332155	1.87376145
19	43.28890851	8.658827328	844	9.185822736	1.862259567
21	42.79746438	8.560538502	846	9.128313316	1.851803308
23	42.34784528	8.471660308	848	9.070803897	1.840301425
25	41.93482309	8.389055869	850	9.018522606	1.828799541
27	41.55316967	8.311679559	852	8.961013187	1.818343283
29	41.19242876	8.240577004	854	8.903503767	1.806841399
31	40.8578285	8.172611326	856	8.845994348	1.795339515
33	40.53891263	8.108828152	858	8.793713057	1.783837631
35	40.23568115	8.049227481	860	8.736203638	1.773381373
37	39.94813405	7.991718061	862	8.678694218	1.761879489
39	39.67627134	7.937345519	864	8.621184799	1.750377605
41	39.41486489	7.885064229	866	8.568903508	1.739921347
43	39.16391469	7.83487419	868	8.511394089	1.728419463
45	38.92342076	7.786775403	870	8.453884669	1.716917579
47	38.68815495	7.740767867	872	8.39637525	1.706461321
49	38.46857353	7.695805957	874	8.344093959	1.694959437
51	38.24899211	7.652935299	876	8.28658454	1.683457553
53	38.03986695	7.611110267	878	8.22907512	1.671955669
55	37.84119804	7.57033086	880	8.171565701	1.661499411
57	37.64252914	7.531642705	882	8.11928441	1.649997527
59	37.44908836	7.49295455	884	8.061774991	1.638495643
61	37.26610385	7.456357647	886	8.004265571	1.628039385
63	37.08311933	7.419760744	888	7.946756152	1.616537501
65	36.90536294	7.384209466	890	7.894474861	1.605035617
67	36.73283469	7.349703814	892	7.836965442	1.594579359
69	36.56553456	7.316243789	894	7.779456022	1.583077475
71	36.40346256	7.283829388	896	7.727174732	1.571575592
73	36.24139055	7.251414988	898	7.669665312	1.561119333
75	36.08454668	7.220046214	900	7.612155893	1.54961745
77	35.92770281	7.18867744	902	7.554646473	1.538115566
79	35.77608707	7.159399917	904	7.502365183	1.527659308

81	35.62969946	7.129076769	906	7.444855763	1.516157424
83	35.48331184	7.099799246	908	7.387346344	1.50465554
85	35.33692423	7.071567349	910	7.335065053	1.494199282
87	35.19576475	7.043335452	912	7.277555634	1.482697398
89	35.05983339	7.016149181	914	7.220046214	1.47224114
91	34.92390203	6.98896291	916	7.167764924	1.460739256
93	34.78797068	6.961776639	918	7.110255504	1.449237372
95	34.65726745	6.935635994	920	7.052746085	1.438781114
97	34.52656423	6.909495349	922	6.995236665	1.42727923
99	34.395861	6.884400329	924	6.942955375	1.415777346
101	34.2703859	6.858259684	926	6.885445955	1.405321088
103	34.14491081	6.83421029	928	6.827936536	1.393819204
105	34.02466384	6.809115271	930	6.775655245	1.38231732
107	33.90441687	6.785065877	932	6.718145826	1.371861062
109	33.7841699	6.761016484	934	6.660636406	1.360359178
111	33.66392293	6.73696709	936	6.608355116	1.34990292
113	33.5489041	6.713963322	938	6.550845696	1.338401036
115	33.42865713	6.690959555	940	6.493336277	1.326899152
117	33.31363829	6.667955787	942	6.441054986	1.316442894
119	33.20384758	6.644952019	944	6.383545567	1.30494101
121	33.08882874	6.622993877	946	6.326036147	1.294484752
123	32.97903803	6.601035735	948	6.273754857	1.282982868
125	32.86924732	6.579077593	950	6.216245437	1.271480984
127	32.75945661	6.557119451	952	6.158736018	1.261024726
129	32.65489403	6.536206935	954	6.106454727	1.249522842
131	32.54510332	6.514248793	956	6.048945308	1.239066584
133	32.44054074	6.493336277	958	5.991435888	1.2275647
135	32.33597816	6.47242376	960	5.939154598	1.216062816
137	32.23141558	6.45255687	962	5.881645178	1.205606558
139	32.13208112	6.431644354	964	5.829363888	1.194104674
141	32.02751854	6.410731838	966	5.771854468	1.183648416
143	31.92818409	6.390864947	968	5.714345049	1.172146532
145	31.82362151	6.370998057	970	5.662063758	1.160644648
147	31.72428706	6.351131166	972	5.604554339	1.15018839
149	31.62495261	6.331264276	974	5.547044919	1.138686506
150.84	31.53607441	6.311397386	976	5.494763629	1.128230248
802	10.37260803	2.098571	978	5.437254209	1.116728364
804	10.31509861	2.087069116	980	5.379744789	1.105226481
806	10.25758919	2.076612858	982	5.327463499	1.094770222
808	10.20007977	2.065110974	984	5.269954079	1.083268339
810	10.14779848	2.05360909	986	5.217672789	1.07281208
812	10.09028906	2.042107206	988	5.16016337	1.061310197
814	10.03277964	2.031650948	990	5.10265395	1.050853938
816	9.975270222	2.020149064	992	5.05037266	1.039352055
818	9.917760802	2.00864718	994	4.99286324	1.027850171
820	9.860251383	1.997145296	996	4.93535382	1.017393913
822	9.807970092	1.986689038	998	4.88307253	1.005892029
824	9.750460673	1.975187154	1000	4.82556311	0.995435771

La siguiente tabla muestra los valores para las bandas laterales primaria y secundaria inferiores de IBOC de la señal analógica con frecuencia central en 730 [kHz]

$f_{c3}=730$ [kHz]	$f=718$ [kHz] BLPI a 2.51 [kW]	$f=723$ [kHz] BLSI a 0.1 [kW]	$f_{c3}=730$ [kHz]	$f=718$ [kHz] BLPI a 2.51 [kW]	$f=723$ [kHz] BLSI a 0.1 [kW]
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)
1	180.8657132	36.09770611	824	31.30941545	6.133667201
3	164.7802939	32.88703719	826	31.12719134	6.10060161
5	157.2594079	31.38585934	828	30.96153306	6.064229459
7	152.2730936	30.39058504	830	30.77930895	6.027857309
9	148.5292164	29.64330267	832	30.59708484	5.991485158
11	145.5142356	29.04150891	834	30.41486073	5.955113008
13	142.9962297	28.53891192	836	30.24920244	5.922047416
15	140.8261062	28.10575267	838	30.06697833	5.885675266
17	138.9044701	27.72219181	840	29.88475422	5.849303115
19	137.1981898	27.38161622	842	29.70253011	5.812930965
21	135.641002	27.07079966	844	29.53687183	5.776558814
23	134.2329066	26.78643558	846	29.35464772	5.743493223
25	132.9242061	26.52521741	848	29.1724236	5.707121072
27	131.6983348	26.28383859	850	29.00676532	5.670748922
29	130.5718585	26.05568601	852	28.82454121	5.634376771
31	129.4950797	25.84406622	854	28.6423171	5.60131118
33	128.50113	25.64236612	856	28.46009299	5.564939029
35	127.5403119	25.45058569	858	28.29443471	5.528566879
37	126.6291914	25.26872493	860	28.11221059	5.492194728
39	125.7677683	25.09678386	862	27.92998648	5.459129137
41	124.9394769	24.9314559	864	27.7643282	5.422756986
43	124.1443171	24.77274106	866	27.58210409	5.386384836
45	123.382289	24.62063934	868	27.39987998	5.350012685
47	122.6533926	24.47515074	870	27.2342217	5.316947094
49	121.941062	24.3329687	872	27.05199758	5.280574943
51	121.261863	24.19739977	874	26.86977347	5.244202793
53	120.5992299	24.06513741	876	26.68754936	5.207830642
55	119.9531626	23.9361816	878	26.52189108	5.174765051
57	119.3402269	23.81053235	880	26.33966697	5.138392901
59	118.7272913	23.69149622	882	26.15744286	5.10202075
61	118.1474873	23.5724601	884	25.99178457	5.068955159
63	117.5676833	23.45673053	886	25.80956046	5.032583008
65	117.0044452	23.34761407	888	25.62733635	4.996210858
67	116.4743387	23.23849762	890	25.46167807	4.959838707
69	115.9276663	23.12938117	892	25.27945396	4.926773116
71	115.4141256	23.02687784	894	25.09722985	4.890400965
73	114.900585	22.9243745	896	24.93157156	4.854028815
75	114.4036101	22.82517773	898	24.74934745	4.817656664
77	113.9232011	22.72598096	900	24.56712334	4.784591073
79	113.4427921	22.63009074	902	24.40146506	4.748218922
81	112.9623831	22.53750708	904	24.21924095	4.711846772
83	112.5151057	22.44492343	906	24.03701684	4.67878118
85	112.0512625	22.35564633	908	23.87135855	4.64240903
87	111.6039851	22.26636924	910	23.68913444	4.606036879
89	111.1732736	22.17709214	912	23.50691033	4.572971288

91	110.7425621	22.0911216	914	23.34125205	4.536599137
93	110.3118505	22.00515106	916	23.15902794	4.500226987
95	109.8977048	21.92248709	918	22.99336966	4.463854836
97	109.4835591	21.83982311	920	22.81114554	4.430789245
99	109.0859792	21.76046569	922	22.62892143	4.394417094
101	108.6883994	21.67780171	924	22.46326315	4.358044944
103	108.2908195	21.60175085	926	22.28103904	4.324979353
105	107.8932396	21.52239343	928	22.09881493	4.288607202
107	107.5122255	21.44634257	930	21.93315665	4.252235052
109	107.1312115	21.37029171	932	21.75093253	4.21916946
111	106.7667633	21.29424085	934	21.58527425	4.18279731
113	106.3857492	21.22149655	936	21.40305014	4.146425159
115	106.021301	21.14875225	938	21.22082603	4.113359568
117	105.6568528	21.07600795	940	21.05516775	4.076987417
119	105.3089704	21.00326364	942	20.87294364	4.040615267
121	104.9445222	20.9338259	944	20.69071952	4.007549675
123	104.5966398	20.8610816	946	20.52506124	3.971177525
125	104.2487574	20.79164386	948	20.34283713	3.934805374
127	103.900875	20.72551268	950	20.17717885	3.901739783
129	103.5695584	20.65607494	952	19.99495474	3.865367632
131	103.2382419	20.58994375	954	19.81273063	3.828995482
133	102.8903595	20.52050601	956	19.64707234	3.79592989
135	102.5590429	20.45437483	958	19.46484823	3.75955774
137	102.2442922	20.38824365	960	19.29918995	3.723185589
139	101.9129756	20.32541902	962	19.11696584	3.690119998
141	101.5982249	20.25928784	964	18.93474173	3.653747848
143	101.2669083	20.19646322	966	18.76908344	3.620682256
145	100.9521576	20.13363859	968	18.58685933	3.584310106
147	100.6374068	20.06750741	970	18.42120105	3.547937955
149	100.3226561	20.00798934	972	18.23897694	3.514872364
151	100.0079053	19.95177784	974	18.05675283	3.478500213
150.93	100.0244712	6.563519889	976	17.89109454	3.442128063
802	33.26418319	6.527147738	978	17.70887043	3.409062471
804	33.09852491	6.490775588	980	17.54321215	3.372690321
806	32.9163008	6.457709997	982	17.36098804	3.33631817
808	32.73407669	6.421337846	984	17.19532976	3.303252579
810	32.55185257	6.384965696	986	17.01310565	3.266880428
812	32.38619429	6.348593545	988	16.83088153	3.233814837
814	32.20397018	6.312221395	990	16.66522325	3.197442686
816	32.02174607	6.279155803	992	16.48299914	3.161070536
818	31.83952196	6.242783653	994	16.31734086	3.128004945
820	31.67386368	6.206411502	996	16.13511675	3.091632794
822	31.49163956	6.170039352	998	15.96945846	3.058567203
			1000	15.78723435	3.012

La siguiente tabla muestra los valores para la banda lateral DRM de la señal analógica con frecuencia central en 690 [kHz]

$f_{c1}=690$ [kHz]	$f= 680$ [kHz] Parte Digital						
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)						
1	127.6480448	89	78.7468843	826	24.29275914	914	18.98529396
3	116.3083064	91	78.454623	828	24.16416417	916	18.86838944
5	111.0125317	93	78.1623617	830	24.04725965	918	18.75148492
7	107.5053961	95	77.8701004	832	23.93035513	920	18.6345804
9	104.8633539	97	77.58952956	834	23.80176016	922	18.50598543
11	102.7473821	99	77.30895871	836	23.68485564	924	18.38908091
13	100.9821239	101	77.02838786	838	23.56795112	926	18.27217639
15	99.45067469	103	76.75950747	840	23.43935615	928	18.15527187
17	98.10627272	105	76.49062707	842	23.32245163	930	18.03836735
19	96.90215617	107	76.22174668	844	23.20554711	932	17.90977238
21	95.81494414	109	75.95286628	846	23.07695214	934	17.79286786
23	94.82125572	111	75.69567634	848	22.96004762	936	17.67596334
25	93.90940047	113	75.4384864	850	22.8431431	938	17.55905882
27	93.05599748	115	75.19298691	852	22.71454813	940	17.43046385
29	92.26104675	117	74.93579696	854	22.59764361	942	17.31355933
31	91.51285782	119	74.69029747	856	22.48073909	944	17.19665481
33	90.8114307	121	74.44479798	858	22.35214412	946	17.07975029
35	90.14507494	123	74.21098894	860	22.2352396	948	16.95115532
37	89.50210009	125	73.96548945	862	22.11833508	950	16.8342508
39	88.90588704	127	73.73168041	864	21.98974011	952	16.71734628
41	88.32136444	129	73.49787138	866	21.87283559	954	16.60044176
43	87.7719132	131	73.26406234	868	21.75593107	956	16.48353724
45	87.24584286	133	73.0302533	870	21.63902655	958	16.35494227
47	86.73146298	135	72.80813471	872	21.51043158	960	16.23803775
49	86.24046399	137	72.58601612	874	21.39352706	962	16.12113323
51	85.76115546	139	72.36389754	876	21.27662254	964	16.00422871
53	85.29353739	141	72.14177895	878	21.14802757	966	15.88732419
55	84.84930021	143	71.91966036	880	21.03112305	968	15.75872922
57	84.41675349	145	71.69754178	882	20.91421853	970	15.6418247
59	83.99589722	147	71.47542319	884	20.78562356	972	15.52492018
61	83.5867314	149	71.26499505	886	20.66871904	974	15.40801566
63	83.18925604	151	71.05456692	888	20.55181452	976	15.29111114
65	82.80347112	802	70.84413878	890	20.43491	978	15.16251617
67	82.41768621	804	70.68047246	892	20.30631503	980	15.04561165
69	82.0552822	806	25.50856614	894	20.18941051	982	14.92870713
71	81.69287819	808	25.37997117	896	20.07250599	984	14.81180261
73	81.34216463	810	25.26306665	898	19.95560147	986	14.69489809
75	80.99145107	812	25.13447168	900	19.8270065	988	14.57799357
77	80.65242797	814	25.01756716	902	19.71010198	990	14.4493986
79	80.32509531	816	24.90066264	904	19.59319746	992	14.33249408
81	79.99776266	818	24.77206767	906	19.46460249	994	14.21558956
83	79.67043	820	24.65516315	908	19.34769797	996	14.09868505
85	79.36647825	822	24.53825863	910	19.23079345	998	13.98178053
87	79.05083605	824	24.40966366	912	19.11388893	1000	13.85318555

La siguiente tabla muestra los valores para la banda lateral DRM de la señal analógica con frecuencia central en 710 [kHz]

$f_{c2}=710$ [kHz]	f= 700 [kHz] Parte Digital	$f_{c2}=710$ [kHz]	f= 700 [kHz] Parte Digital	$f_{c2}=710$ [kHz]	f= 700 [kHz] Parte Digital	$f_{c2}=710$ [kHz]	f= 700 [kHz] Parte Digital
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)	Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)
1	57.08071294	89	35.14871158	826	10.26804545	914	7.852649829
3	52.00942776	91	35.01278023	828	10.21053603	916	7.795140409
5	49.63585717	93	34.882077	830	10.15825474	918	7.742859119
7	48.06741846	95	34.75137378	832	10.10074532	920	7.685349699
9	46.88586129	97	34.62067055	834	10.04846403	922	7.633068409
11	45.93956994	99	34.49519545	836	9.990954609	924	7.575558989
13	45.14489432	101	34.36972036	838	9.938673319	926	7.523277699
15	44.46000942	103	34.24424526	840	9.881163899	928	7.470996408
17	43.85354645	105	34.12399829	842	9.828882609	930	7.413486989
19	43.31504916	107	34.00375132	844	9.771373189	932	7.361205698
21	42.82883315	109	33.88873248	846	9.71386377	934	7.303696279
23	42.38444218	111	33.76848552	848	9.661582479	936	7.251414988
25	41.97141999	113	33.65346668	850	9.60407306	938	7.193905569
27	41.58976657	115	33.53844784	852	9.551791769	940	7.141624278
29	41.23425379	117	33.42865713	854	9.49428235	942	7.089342988
31	40.89442541	119	33.31363829	856	9.442001059	944	7.031833568
33	40.58073766	121	33.20384758	858	9.38449164	946	6.979552278
35	40.27750618	123	33.09405687	860	9.332210349	948	6.922042858
37	39.99518721	125	32.98426616	862	9.27470093	950	6.869761568
39	39.7233245	127	32.87970358	864	9.222419639	952	6.812252148
41	39.46191805	129	32.775141	866	9.16491022	954	6.759970858
43	39.21619598	131	32.67057842	868	9.112628929	956	6.707689567
45	38.97570205	133	32.56601583	870	9.05511951	958	6.650180148
47	38.74566437	135	32.46145325	872	9.002838219	960	6.597898857
49	38.52085482	137	32.35689067	874	8.9453288	962	6.540389438
51	38.30650153	139	32.25755622	876	8.893047509	964	6.488108147
53	38.1026045	141	32.15822177	878	8.83553809	966	6.435826857
55	37.89870746	143	32.05888732	880	8.783256799	968	6.378317437
57	37.70526669	145	31.95955287	882	8.72574738	970	6.326036147
59	37.51705404	147	31.86021841	884	8.673466089	972	6.268526727
61	37.3288414	149	31.76088396	886	8.61595667	974	6.216245437
63	37.15108501	151	31.66677764	888	8.563675379	976	6.163964147
65	36.97855675	152.74	31.58312757	890	8.50616596	978	6.106454727
67	36.80602849	802	10.93201784	892	8.453884669	980	6.054173437
69	36.63872836	804	10.87450842	894	8.39637525	982	5.996664017
71	36.47665636	806	10.82222713	896	8.344093959	984	5.944382727
73	36.31458436	808	10.76471771	898	8.28658454	986	5.892101436
75	36.16296862	810	10.70720829	900	8.234303249	988	5.834592017
77	36.00612475	812	10.654927	902	8.17679383	990	5.782310726
79	35.85973713	814	10.59741758	904	8.124512539	992	5.724801307
81	35.70812139	816	10.54513629	906	8.072231249	994	5.672520016
83	35.56696191	818	10.48762687	908	8.014721829	996	5.620238726
85	35.42580242	820	10.43534558	910	7.962440539	998	5.562729306
87	35.28464294	822	10.37783616	912	7.904931119	1000	5.510448016
		824	10.32032674				

La siguiente tabla muestra los valores para la banda lateral DRM de la señal analógica con frecuencia central en 730 [kHz]

$f_{c3}=730$ [kHz]	$f=740$ [kHz] Parte Digital						
Distancia [km]	Campo eléctrico [dB] ($\mu\text{V/m}$)						
1	180.4719978	89	110.6705344	828	29.13078601	916	21.19504407
3	164.4186531	91	110.2406817	830	28.94892525	918	21.01318332
5	156.8962311	93	109.810829	832	28.7670645	920	20.83132257
7	151.9198596	95	109.3975091	834	28.58520375	922	20.64946182
9	148.166915	97	108.9841892	836	28.403343	924	20.46760106
11	145.1579462	99	108.5708693	838	28.23801504	926	20.28574031
13	142.6449612	101	108.1575494	840	28.05615429	928	20.12041235
15	140.4626322	103	107.7607623	842	27.87429353	930	19.9385516
17	138.5448279	105	107.3639752	844	27.69243278	932	19.75669085
19	136.8254171	107	106.9837209	846	27.51057203	934	19.5748301
21	135.2878671	109	106.6034666	848	27.32871128	936	19.39296934
23	133.8660467	111	106.2232123	850	27.14685052	938	19.21110859
25	132.5434223	113	105.842958	852	26.96498977	940	19.04578064
27	131.336529	115	105.4792365	854	26.78312902	942	18.86391988
29	130.1957661	117	105.115515	856	26.60126827	944	18.68205913
31	129.1211343	119	104.7517935	858	26.41940751	946	18.50019838
33	128.1126338	121	104.388072	860	26.23754676	948	18.31833762
35	127.1537317	123	104.0408833	862	26.05568601	950	18.13647687
37	126.2444279	125	103.6936946	864	25.87382526	952	17.95461612
39	125.3681897	127	103.3465059	866	25.6919645	954	17.78928816
41	124.5415499	129	102.9993171	868	25.51010375	956	17.60742741
43	123.7479757	131	102.6521284	870	25.328243	958	17.42556666
45	122.9709343	133	102.3214725	872	25.16291504	960	17.2437059
47	122.2434913	135	101.9742838	874	24.98105429	962	17.06184515
49	121.5325811	137	101.6436279	876	24.79919354	964	16.8799844
51	120.8382037	139	101.312972	878	24.61733278	966	16.71465644
53	120.1768919	141	100.9988489	880	24.43547203	968	16.53279569
55	119.5321128	143	100.668193	882	24.25361128	970	16.35093494
57	118.9038666	145	100.3540698	884	24.07175052	972	16.16907418
59	118.2921532	147	100.0234139	886	23.88988977	974	15.98721343
61	117.6969725	149	99.70929081	888	23.70802902	976	15.82188548
63	117.1348575	149.18	99.67622522	890	23.52616827	978	15.64002472
65	116.5727424	802	31.49497579	892	23.34430751	980	15.45816397
67	116.0106274	804	31.31311504	894	23.17897956	982	15.27630322
69	115.4815779	806	31.13125428	896	22.99711881	984	15.09444247
71	114.9525284	808	30.94939353	898	22.81525805	986	14.92911451
73	114.4400118	810	30.76753278	900	22.6333973	988	14.74725376
75	113.9440279	812	30.58567203	902	22.45153655	990	14.565393
77	113.448044	814	30.40381127	904	22.26967579	992	14.38353225
79	112.968593	816	30.22195052	906	22.08781504	994	14.2016715
81	112.4891419	818	30.04008977	908	21.90595429	996	14.03634354
83	112.0262236	820	29.85822902	910	21.72409354	998	13.85448279
85	111.5633053	822	29.67636826	912	21.55876558	1000	13.67262204
87	111.1169198	824	29.49450751	914	21.37690483	1000	17.42556666
		826	29.31264676				