

Universidad de Cuenca



Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

**“Implementación de las Etapas de Codificación, Mapeo y Mapeo Inverso
QAM de un Transmisor de Radio Digital Según el Estándar DRM30”**

Tesis Presentada Previa a la Obtención del Título de
Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones
Universidad Estatal de Cuenca

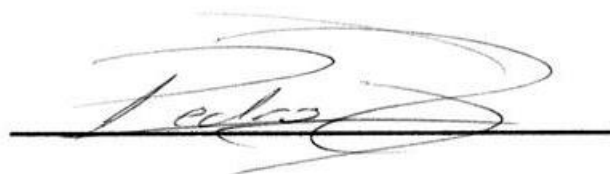
Autores: Pedro David Gil Peñafiel
Franklin Gustavo Santillán Sacoto

Director: Ing. Lizandro Damián Solano Quinde, PhD

Cuenca - 2015

Yo, Pedro David Gil Peñafiel, autor de la tesis “Implementación de las Etapas de Codificación, Mapeo y Mapeo Inverso QAM de un Transmisor de Radio Digital Según el Estándar DRM30”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 26 de Octubre de 2015

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pedro', is written over a solid horizontal line.

Pedro David Gil Peñafiel

C.I: 0103797130

Yo, Pedro David Gil Peñafiel autor de la tesis “Implementación de las Etapas de Codificación, Mapeo y Mapeo Inverso QAM de un Transmisor de Radio Digital Según el Estándar DRM30”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de Octubre de 2015

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pedro', is written over a solid horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Pedro David Gil Peñafiel

C.I: 0103797130

Yo, Franklin Gustavo Santillán Sacoto, autor de la tesis “Implementación de las Etapas de Codificación, Mapeo y Mapeo Inverso QAM de un Transmisor de Radio Digital Según el Estándar DRM30”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 26 de Octubre de 2015



Franklin Gustavo Santillán Sacoto

C.I: 010450243-0

Yo, Franklin Gustavo Santillán Sacoto autor de la tesis “Implementación de las Etapas de Codificación, Mapeo y Mapeo Inverso QAM de un Transmisor de Radio Digital Según el Estándar DRM30”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de Octubre de 2015



Franklin Gustavo Santillán Sacoto

C.I: 010450243-0

Agradecimiento

Después de 5 años de arduo trabajo, sacrificio, y ver esta meta cumplida no tengo nada más que expresar mi inmenso aprecio y agradecimiento a todas las personas que de alguna u otra manera estuvieron conmigo en este trayecto.

A mi amada esposa Tatiana, por su total apoyo incondicional durante toda mi carrera y en especial en esta última etapa por sus palabras de aliento y cariño.

A mi familia padres y hermanos por su apoyo y cariño durante toda esta etapa de formación académica, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

Al Ingeniero Lizandro Solano y al Ingeniero Kenneth Palacio, que gracias a su guía este proyecto pudo ser culminado.

A todos mis profesores, muchos grandes amigos, por compartir sus conocimientos para poder culminar esta meta profesional.

Pedro

Dedicatoria

A mis padres que con su cariño, inculcaron en mí, los deseos de superación y perseverancia para nunca caer ante ningún obstáculo, para Uds. que este logro cumplido sea un nuevo orgullo.

A mi esposa, que gracias a ti, siempre busco ser una mejor persona, amigo y esposo cada día.

Pedro

Agradecimiento

Quiero compartir este agradecimiento a todas esas personas que siempre me apoyaron para así poder culminar esta etapa académica de mi vida.

A mi familia por acompañarme, motivarme y aconsejarme durante todo este arduo camino.

A mis amigos que siempre estuvieron ahí presentes brindándome su apoyo en las etapas más difíciles de la carrera y extendiéndome una mano para así salir adelante.

Al Ingeniero Lizandro Solano y al Ingeniero Kenneth Palacio, que sin su guía hubiera sido imposible culminar exitosamente este proyecto.

A todos mis profesores tanto de Universidad como de Colegio, que sin sus enseñanzas y consejos no estaría culminando esta etapa de mi vida.

Franklin

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro alcanzado a mis padres y mi hermana que son las personas más importantes de mi vida, todo esto hubiera sido imposible de alcanzar sin sus consejos, motivaciones, apoyo incondicional y sobre todo su infinita paciencia hacia mí.

A mis amigos más cercanos que sé que siempre puedo contar con ellos para todo, les dedico todo esto a ustedes.

Franklin

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el estándar de radio digital Europeo DRM (Digital Radio Mondiale) para la difusión en AM, llamado DRM30, con la finalidad de realizar una implementación parcial del mismo, en sus etapas de codificación, mapeo y mapeo inverso QAM. Al realizar el estudio del estándar DRM se determinó que está constituido por 3 canales lógicos: Canal Principal de Servicio (MSC), Canal de Acceso Rápido (FAC) y Canal de Descripción de Servicio (SDC).

La implementación del sistema se realizó en un sistema Windows con el lenguaje de programación C++ con la finalidad de que el mismo sea escalable hacia otras plataformas y sea complementado en trabajos futuros.

Para la validación del proyecto se utilizaron módulos decodificadores implementados por el instituto alemán Karlsruhe Institute Of Technology Communications Engineering Lab, para el software GNU radio, basados en el receptor de código libre DreaM. También se envió un archivo de audio cargado en el MSC con la finalidad de reproducirlo una vez decodificado el canal.

Los resultados de la validación mostraron que la implementación cumple con el estándar, ya que al pasar los canales codificados por los módulos, estos fueron reconstruidos correctamente, esto se comprobó, realizando una comparación de los bits de los tres canales. Adicionalmente el audio transportado por el MSC tuvo una reconstrucción y reproducción exitosa.

Palabras clave: DRM30, MSC, SDC, FAC, DreaM, GNU radio.

Abstract

The present paper aims to analyze the European digital radio standard DRM (Digital Radio Mondiale) for broadcast on AM Band, called DRM30, in order to perform a partial implementation of the coding stages, mapping and inverse QAM mapping. While conducting the study, it was determined that the standard consisted of 3 logical channels: Main Service Channel (MSC), fast access channel (FAC) and Service Description Channel (SDC).

The implementation of the system was performed on a Windows system using the C ++ programming language in order to be scalable to other platforms and so it can be completed as part of future work.

For the project validation, decoder modules implemented by the German institute Karlsruhe Institute of Technology Communications Engineering Lab, for GNU Radio software based on open source DreaM receptor, were used. Also an audio file loaded into the MSC was sent, in order to play it, once the channel is decoded.

The validation results shown that our encoder implementation complies the standard, because the encoded channels were reconstructed properly, which was tested making a comparison between the bits of the three channels. In addition, the audio carried in the MSC had a successful reproduction and reconstruction.

Keywords: DRM30, MSC, SDC, FAC, DreaM, GNU radio.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1	Introducción.....	18
1.1	El Espectro Radioeléctrico.....	18
1.2	Bandas de Frecuencias	19
1.3	Modelos de Propagación	19
1.3.1	Onda Terrestre	20
1.3.2	Onda Superficial.....	21
1.3.3	Onda Celeste (Skywaves)	22
1.4	Radiodifusión Analógica.....	24
1.4.1	Radiodifusión con Modulación en Amplitud (AM)	24
1.4.2	Radiodifusión con Modulación en Frecuencia (FM)	26
1.5	Radiodifusión Digital Terrestre.....	27
1.5.1	Características Generales	27
1.5.2	Ventajas de los Sistemas Digitales	29
1.5.3	Los Problemas del Espectro	30
1.6	Tecnologías de Radio Digital Terrestre	31
1.6.1	FM In-Band On-Channel (IBOC)	31
1.6.1.1	Modos de Operación de IBOC.....	32
1.6.1.2	Estado de IBOC.....	33
1.6.2	Eureka 147 Digital Audio Broadcasting (DAB)	33
1.6.2.1	Modos de Operación de Eureka 147 DAB.....	34
1.6.2.2	Estado de Eureka 147 DAB.....	35
1.6.3	DRM (Digital Radio Mondiale).....	35
1.6.3.1	Modos de Operación de DRM.....	36
1.6.3.2	Estado de DRM	36
Capítulo 2	El Estándar DRM.....	38
2.1	Características Generales	38
2.2	Arquitectura del Estándar DRM	40
2.3	Modos de Transmisión	42
2.3.1	Parámetros Relacionados con el Ancho de Banda de la Señal	42
2.3.2	Parámetros Relacionados con la Eficiencia de Transmisión	42
2.3.2.1	Tasas de Código y Constelaciones.....	45
2.3.2.2	Conjunto de Parámetros OFDM	45
2.4	Codificación de Fuente.....	48
2.4.1	Codificador de Audio AAC	50
2.4.2	Codificador AAC Extendido de Alta Eficiencia (xHE-AAC)	51
2.5	Herramientas Auxiliares para Codificación	52
2.5.1	Replicación de Banda Espectral (SBR).....	52
2.5.2	Codificación Estéreo Paramétrico (PS)	52
2.6	Supertramas de Audio.....	53
2.6.1	Protección Desigual de Errores (UEP)	54
2.6.2	Chequeo por Redundancia Cíclica (CRC)	54

2.7	Proceso de Codificación AAC (Advanced Audio Coding)	55
2.7.1	La Supertrama DRM	56
2.7.1.1	Cabecera	56
2.7.1.2	Bloque de Alta Protección	57
2.7.1.3	Bloque de Baja Protección	57
2.8	AAC + SBR	57
2.9	Ocultamiento de Error en AAC	58
2.10	Multiplexación	59
2.10.1	Main Service Channel (MSC)	59
2.10.1.1	Estructura del MSC	59
2.10.1.2	Construcción del Canal MSC	60
2.10.1.3	Tramas Multiplexadas	60
2.10.1.4	Mensajería de Texto	61
2.10.1.5	Estructura de la Mensajería de Texto	61
2.10.1.6	Ejemplo del Mapeo de Tramas Lógicas en la Trama Multiplexada	62
2.10.2	Fast Access Channel (FAC)	63
2.10.2.1	Estructura del FAC	64
2.10.3	Service Description Channel (SDC)	64
2.10.3.1	Estructura	65
2.10.3.2	Entidades de Datos	67
2.10.3.3	Cambio de Tipo de Contenido del Canal SDC	69
2.10.3.4	Señalización de Reconfiguración	69
2.10.3.5	Reconfiguración de Servicios	69
2.10.3.6	Reconfiguración de Canal	70
2.11	Codificación de Canal y Modulación	70
2.11.1	Introducción	70
2.11.2	Dispersión de Energía	72
2.11.3	Codificación Multinivel	73
2.11.3.1	Códigos Convolutivos	73
2.11.4	Modulación QAM	75
2.11.5	Aplicación de la Codificación a los Canales	77
2.11.5.1	Codificación del MSC	77
2.11.5.2	Codificación del SDC	77
2.11.5.3	Codificación del FAC	78
2.11.6	Entrelazado de Células MSC	78
2.11.7	Modulación COFDM	79
2.11.8	Células Piloto DRM	84
2.11.9	Células de Control DRM	84
Capítulo 3	Implementación del sistema Codificador DRM30	86
3.1	Introducción	86
3.2	Canal MSC	87
3.2.1	Calculo del Canal	88

3.2.2	Construcción del Canal	92
3.2.2.1	Codificación de Fuente.....	93
3.3	Canal FAC.....	95
3.3.1	Información del Canal.....	95
3.3.1.1	Parámetros de Canal.....	96
3.3.1.2	Parámetros de Servicio	99
3.3.1.3	CRC.....	103
3.4	Canal SDC.....	104
3.4.1	Calculo del canal	104
3.4.2	Información del canal	105
3.4.2.1	Entidad de Datos Tipo 0: Descripción del Multiplex	106
3.4.2.2	Entidad de Datos Tipo 1: Etiqueta de Identidad.....	108
3.4.2.3	Entidad de Datos Tipo 8: Información de Hora y Fecha.....	109
3.4.2.4	Entidad de Datos Tipo 9: Información de Audio.....	110
3.5	Dispersión de Energía	113
3.6	Particionador	115
3.6.1	Codificación Multinivel	115
3.6.2	Partición del Flujo de Bits en SM.....	116
3.7	Codificador de Canal	118
3.8	Entrelazado de Bits.....	122
3.8.1	Entrelazado del Canal FAC	123
3.8.2	Entrelazado del Canal SDC.....	124
3.8.3	Entrelazado del Canal MSC	124
3.9	Mapeo QAM y Mapeo Inverso QAM	125
3.10	Entrelazado de Células	128
Capitulo 4	Evaluación y Resultados.....	131
4.1	Introducción.....	131
4.2	Decodificador DRM30 de GNU Radio	131
4.2.1	Mapeo Inverso QAM.....	132
4.2.2	Desentrelazador de Bits.....	134
4.2.3	Decodificador de Canal	134
4.2.3.1	Algoritmo de Viterbi.....	135
4.2.4	Departicionado de Bits	135
4.2.5	Dispersión de Energía Inversa (Unscrambling).....	136
4.3	Evaluación y Resultados.....	136
4.3.1	Evaluación Comparando Bit a Bit los Tres Canales DRM.	136
4.3.2	Evaluación del Audio Transportado en el MSC	138
Capitulo 5	Conclusiones y Recomendaciones	140
5.1	Conclusiones.....	141
5.2	Recomendaciones	143
Bibliografía	145	

Lista de tablas

Tabla 1.1 Bandas de Frecuencia.....	19
Tabla 2.1 Modos de Robustez de DRM y sus Condiciones de Propagación.....	46
Tabla 2.2 Valor de los Parámetros OFDM en Disitintos Modos de Robustez.	47
Tabla 2.3 Ocupación del Espectro en DRM.	48
Tabla 2.4 Niveles de Protección de Cada Flujo de la trama multiplexada.	62
Tabla 2.5 Longitud del Campo de Datos del Service Description Channel.....	66
Tabla 2.6 Tipos de Entidades del Service Description Channel (SDC)	67
Tabla 2.7 Tasas de Código y Constelaciones para los Canales DRM.	71
Tabla 2.8 Tipo de Protección y Estrategia de Mapeo de los Canales DRM.	72
Tabla 2.9 Conjunto de Parámetros OFDM.	82
Tabla 3.1 Parametros QAM para el MSC.	90
Tabla 3.2. Tasas de Código para el MSC para mapeo 16-QAM.	91
Tabla 3.3 Tasas de código para el canal FAC en modos A, B, C, D.....	95
Tabla 3.4 Configuración del Lenguaje de transmisión en el canal FAC.	100
Tabla 3.5 Configuración del Tipo de Programa en el Canal FAC.....	101
Tabla 3.6 Valor de los Parámetros del Canal FAC.....	102
Tabla 3.7 Numero de Células OFDM para el SDC.....	105
Tabla 3.8 Tasas de Código para el SDC en 4-QAM.	105
Tabla 3.9 Parámetros de perforado para los canales.....	120
Tabla 3.10 Patrón de Perforado para la Codificación	121
Tabla 3.11 Valores IQ y binarios para 4-QAM.	127
Tabla 3.12 Valores IQ y binarios para 16-QAM.	128

Lista de figuras

Fig. 1.1 Espectro Electromagnético.	18
Fig. 1.2 Propagación de Ondas.	21
Fig. 1.3 Onda Superficial.	22
Fig. 1.4 Propagación Ionosférica.	24
Fig. 1.5 La Modulación AM.	25
Fig. 1.6 La Modulación FM.	27
Fig. 2.1 Regiones de la ITU.	38
Fig. 2.2 Diagrama de Bloques del Sistema DRM.	44
Fig. 2.3 Parámetros OFDM.	47
Fig. 2.4 Codificador de Fuente DRM.	50
Fig. 2.5 Funcionamiento de la Replicación de Banda Espectral (SBR).	52
Fig. 2.6 Transmisión de Estéreo Paramétrico (PS).	53
Fig. 2.7 Diagrama General para el Chequeo por Redundancia Cíclica (CRC). ..	54
Fig. 2.8 Supertrama DRM.	57
Fig. 2.9 Trama AAC+SBR.	58
Fig. 2.10 Servicios del Main Service Channel (MSC).	60
Fig. 2.11 Tramas Multiplexadas.	63
Fig. 2.12 Estructura del Fast Access Channel (FAC)	64
Fig. 2.13 Estructura del Service Description Channel (SDC).	66
Fig. 2.14 Cabecera de una Entidad de Datos del Service Description Channel (SDC).	67
Fig. 2.15 Proceso de Codificación DRM.	70
Fig. 2.16 Representación Octal de los Polinomios Generadores de Códigos Convolutionales.	75
Fig. 2.17 Diagrama Lógico de la Modulación Digital 16-QAM.	76
Fig. 2.18 Constelaciones QAM.	76
Fig. 2.19 Representación de los Errores de Ráfaga.	78
Fig. 2.20 Interferencias Producidas por MultiTrayecto.	80
Fig. 2.21 Parámetros COFDM.	81
Fig. 2.22 Supertrama de Transmisión DRM.	81
Fig. 3.1 Diagrama del Sistema codificador DRM30.	86
Fig. 3.2 Generador PRBS para la Dispersión de Energía.	114
Fig. 3.3 Esquema de codificación de 2 niveles.	115
Fig. 3.4 Esquema de codificación de 1 nivel.	116
Fig. 3.5 Diagrama de la codificación matriz DRM.	119
Fig. 3.6 Esquema de Mapeo 16-QAM.	126
Fig. 3.7 Esquema de Mapeo 4-QAM.	126
Fig. 4.1 Diagrama de bloques del sistema DRM 30.	133
Fig. 4.2 Diagrama de Bloques para receptor DRM30.	133
Fig. 4.3 Canal de acceso rápido FAC generado.	137
Fig. 4.4 Canal de descripción de servicio SDC generado.	137

<i>Fig. 4.5 Canal de acceso rápido FAC decodificado.</i>	137
Fig. 4.6 Canal de descripción de servicio SCD decodificado.	138
Fig. 4.7 Forma de onda del archivo de entrada en formato wave (.wav).	139
Fig. 4.8 Forma de onda del archivo de salida en formato wave (.wav).....	140

Capítulo 1 Introducción

1.1 El Espectro Radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un espacio incluido dentro de la totalidad del espectro electromagnético, caracterizado por tener frecuencias y longitudes de onda capaces de transmitir información. El límite del espectro radioeléctrico se encuentra por debajo de los 300 GHz como se observa en la Figura 1.1.

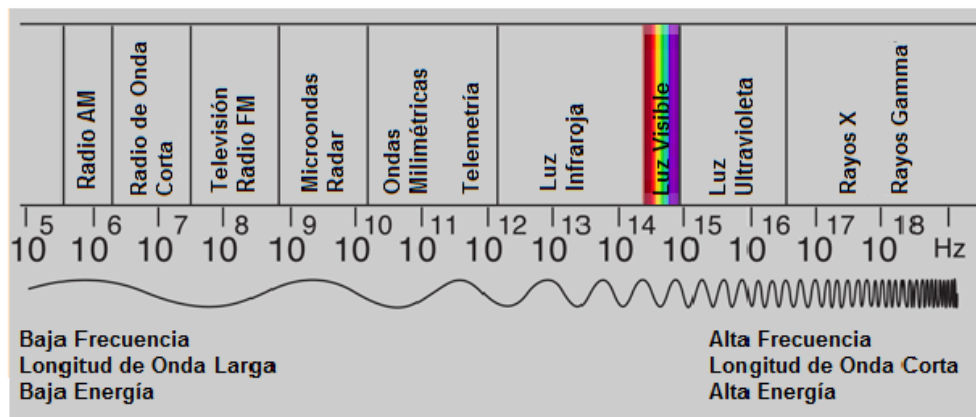


Fig. 1.1 Espectro Electromagnético.

Otro término usualmente usado cuando se habla de espectro radioeléctrico es el ancho de banda. Por ancho de banda se entiende la anchura que se ocupa dentro del espectro. Las señales tienen generalmente un ancho de banda infinito, pero la energía se concentra en su gran mayoría en una porción pequeña, lo que es denominado ancho de banda útil de la señal.

Un problema al que se enfrentan todas las señales al ser transmitidas en el espectro radioeléctrico son las pérdidas. Las pérdidas ocasionan que la señal se debilite con la distancia recorrida y sufra distintas atenuaciones que distorsionan de varias maneras la información de dicha señal. Algunas de las pérdidas que pueden ser sufridas son el desvanecimiento, refracción atmosférica, reflexiones en el suelo, multirayecto, pérdidas por vegetación, lluvia, nieve y nubes. Otro efecto importante a tomar en cuenta, al menos en



radiodifusión, es el efecto de atenuación Doppler, producido por cambios de fase y frecuencia en receptores que se encuentran en movimiento. [1]

1.2 Bandas de Frecuencias

El espectro radioeléctrico es fijado convencionalmente por debajo de los 3GHz hasta los 3kHz y se encuentra asignado a distintos servicios de telecomunicaciones usando como mecanismo de propagación el ambiente sin necesidad de tener una guía artificial. Todo este espectro está dividido en bandas y sub-bandas de frecuencias como se puede ver en la Tabla 1.1. [2]

Tabla 1.1 Bandas de Frecuencia.

Símbolo	Gama de Frecuencias	Subdivisión Métrica
VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas
LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
MF	300 a 3000 kHz	Ondas hectométricas
HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
UHF	300 a 3000 MHz	Ondas centimétricas
SHF	3 a 30 GHz	Ondas milimétricas
EHF	30 a 300 GHz	Ondas decimilimétricas

Cada una de estas bandas de frecuencia presenta características propias de propagación y respuesta frente a interferencias y ruido. Cada banda tiene su propia capacidad de transmisión, por lo que en frecuencias bajas se tiene una menor capacidad, limitado a unos pocos kHz. Mientras que a frecuencias más altas la capacidad viene a ser de varios MHz. [1] [3]

1.3 Modelos de Propagación

La propagación es referida al conjunto de fenómenos físicos que transportan a las ondas radioeléctricas desde el transmisor al receptor. Estos fenómenos son más o menos marcados dependiendo la frecuencia de la señal a transmitir,



dando así ciertas ventajas y desventajas en la transmisión en cada una de las bandas de frecuencia.

Las ondas radioeléctricas se propagan en líneas rectas bajo ciertas condiciones, denominadas estables, pero debido a la forma redondeada de la tierra la comunicación entre puntos situados más allá del horizonte, donde no se tiene línea de vista, solo se podrá lograr bajo ciertas condiciones y a determinadas frecuencias. Para poder realizar una comunicación entre dos puntos distantes en la tierra se utilizan las frecuencias de HF (Onda Corta), ya que estas pueden ser reflejadas en la atmosfera. Las frecuencias más altas en las bandas de VHF hasta EHF no tienen este patrón de propagación, por lo que al trabajar con estas frecuencias es necesario tener una línea de vista entre emisor y receptor.

Los fenómenos que permiten este tipo de comunicaciones son: refracción, reflexión, dispersión y difracción. Las ondas radioeléctricas pueden propagarse en el vacío a la velocidad de la luz, la atmosfera terrestre produce una pequeña reducción de esta velocidad, pero para fines prácticos esta reducción es considerada despreciable. [3]

1.3.1 Onda Terrestre

Este tipo de ondas se propagan cerca de la superficie terrestre de varias maneras, alcanzando al receptor sin tener que abandonar la troposfera. Algunas de estas ondas tienen la capacidad de seguir la curvatura de la tierra mediante reflexiones en la troposfera, avanzando usualmente unas cuantas millas en la superficie, a este tipo de propagación se le conoce como dispersión troposférica usada en telecomunicaciones de radio aficionados ubicadas en los 50 MHz.

Es necesario que las ondas se reflejen una gran cantidad de veces para de esta manera poder seguir la curvatura terrestre, la cantidad de estos reflejos depende de la frecuencia de la onda. A bajas frecuencias existe una mayor cantidad de reflejos que a altas frecuencias, las ondas de frecuencia baja al llegar al horizonte óptico se reflejan en la atmosfera y regresan hacia la tierra avanzando cierta distancia que depende del ángulo de incidencia contra la atmosfera. Para altas frecuencias cuando las ondas llegan al horizonte estas continúan con su trayectoria atravesando las capas atmosféricas, abandonando la superficie terrestre. Ver Figura 1.2.

También son consideradas ondas terrestres a las que son capaces de alcanzar directamente al receptor, sin la necesidad de reflejarse o difractarse en algún punto, este tipo de propagación es denominado con línea de vista. [3]

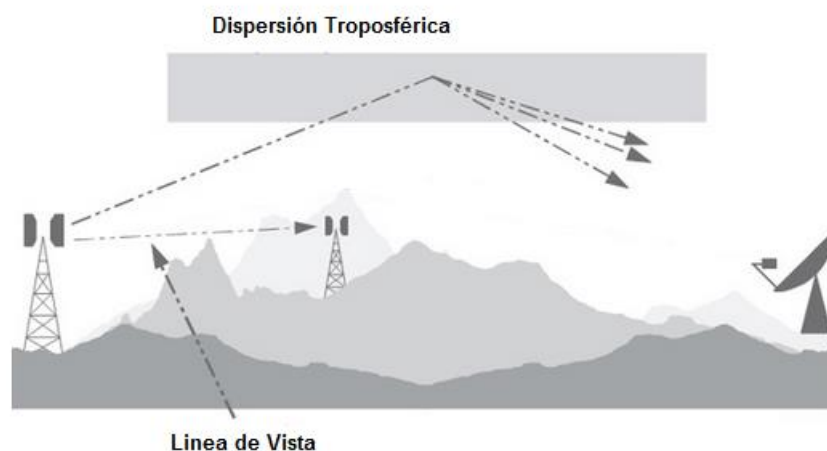


Fig. 1.2 Propagación de Ondas.

1.3.2 Onda Superficial

Las ondas superficiales viajan en contacto con la superficie de la tierra, siguiendo su curvatura. Si la tierra fuese un conductor perfecto la transmisión

alcanzaría distancias muy grandes, pero se producen tensiones inducidas en las ondas y el suelo dando lugar a pérdidas. Ver Figura 1.3.

La conductividad aumenta cuanto más húmedo se encuentre el suelo, de la misma manera la conductividad es mucho mayor sobre un cuerpo de agua que en tierra firme. Por esta razón, transmisoras situadas junto al mar tienen un mayor alcance en las emisiones emitidas en esa dirección. La alta conductividad y la ausencia de obstáculos físicos en este tipo de transmisiones permiten que la onda transmitida se ajuste a la curvatura terrestre, este tipo de emisiones son dedicadas a comunicaciones de largas distancias con barcos. Las bandas a las que sucede este fenómeno se encuentran entre 15 a 300 kHz. [3]

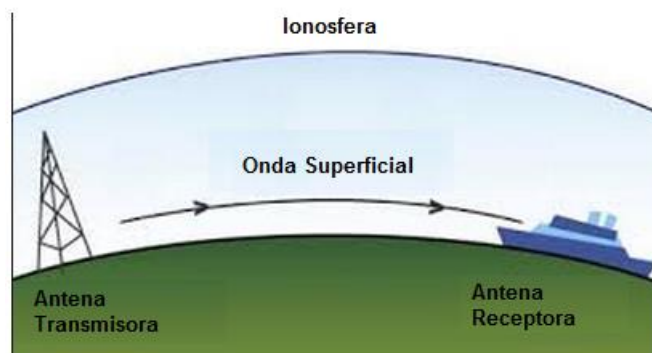


Fig. 1.3 Onda Superficial.

1.3.3 Onda Celeste (Skywaves)

Este tipo de propagación es producido por las ondas que son reflejadas en la ionosfera. Las reflexiones dependen de la frecuencia de la onda, el ángulo de incidencia y la potencia de la onda transmitida desde la superficie y el estado de la ionosfera, variando entre ciclos diarios y estaciones anuales. Estas variaciones se dan ya que la ionosfera consiste en capas de gases ionizados



por la radiación del sol, variando así de acuerdo a la hora o estación. En este tipo de propagación se usa el término de distancia de salto, que hace referencia al punto donde llega la onda después del primer reflejo en la ionosfera. Ver Figura 1.4.

Existen varias capas en la ionosfera que se forman dependiendo de la hora, las cuales son llamadas D, E y F (la cual se divide durante el día en dos F1 y F2).

- La capa D: Es la más cercana a la tierra a aproximadamente unos 60 km de altura. La ionización del sol aumenta la densidad de esta capa, por lo que las ondas radioeléctricas son fuertemente absorbidas. Durante la noche al no recibir radiación, esta capa desaparece. La capa D produce una alta atenuación a frecuencias por debajo de los 10 MHz, siendo menos atenuadas mientras atraviesen esta zona lo más cerca de la vertical.
- La capa E: La capa E tiene la propiedad de reflejar las ondas de radio incidentes. Es formada por la ionización de los gases atmosféricos sin depender de la radiación solar, se cree que esta radiación puede ser generada por la fricción producida en la ionosfera.
- La capa F: Durante el día y a ciertas horas del ciclo solar la región F1 se junta con la región F2. Durante la noche la región desaparece siendo solamente la F2 la única disponible para realizar comunicaciones. Esta región F2 es la más importante para la propagación de ondas en HF, ya que siempre está presente sin importar la hora del día y permite lograr el mayor rango de comunicación. [3]

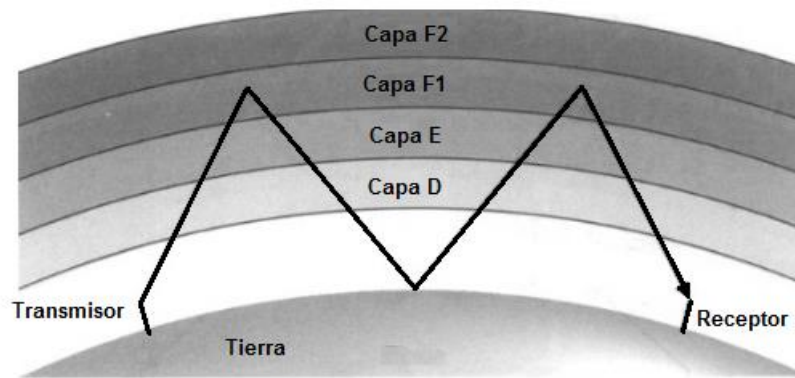


Fig. 1.4 Propagación Ionosférica.

1.4 Radiodifusión Analógica

La radiodifusión analógica es el método por el cual se puede enviar información de audio, ya sea música o voz, mediante técnicas analógicas de transmisión por medio del espectro radioeléctrico. Entre las técnicas de radiodifusión analógica usadas en la actualidad, podemos mencionar dos: AM (Amplitude Modulation) y FM (Frequency Modulation). La modulación en frecuencia es actualmente la más usada gracias que nos ofrece una mayor calidad de sonido en comparación con la modulación en amplitud.

1.4.1 Radiodifusión con Modulación en Amplitud (AM)

La radiodifusión en AM consiste en la transmisión de la información a enviar (audio y voz) en una señal portadora de mayor frecuencia modulada en amplitud. Las frecuencias en las que funciona esta tecnología son entre 535 a 1605 kHz, las cuales caen en la banda de LF. Debido a la gran cobertura que se puede alcanzar con estas frecuencias, principalmente gracias a la propagación de onda superficial, es muy usada en zonas rurales. En AM también operan las denominadas estaciones de onda corta, las cuales suelen ser usadas en transmisiones internacionales para emisiones a nivel mundial, usando el fenómeno de propagación ionosférica propio de las ondas celestes.

El tipo de modulación usado en este tipo de transmisiones es la denominada modulación de amplitud de doble banda lateral gran portadora (AM DSB-LC, Amplitude Modulation Double SideBand Large-Carrier). Esta modulación es usada para poder obtener receptores de bajo costo, a cambio de tener que usar una mayor potencia de transmisión. Este método gráficamente se puede expresar como en la Figura 1.5.

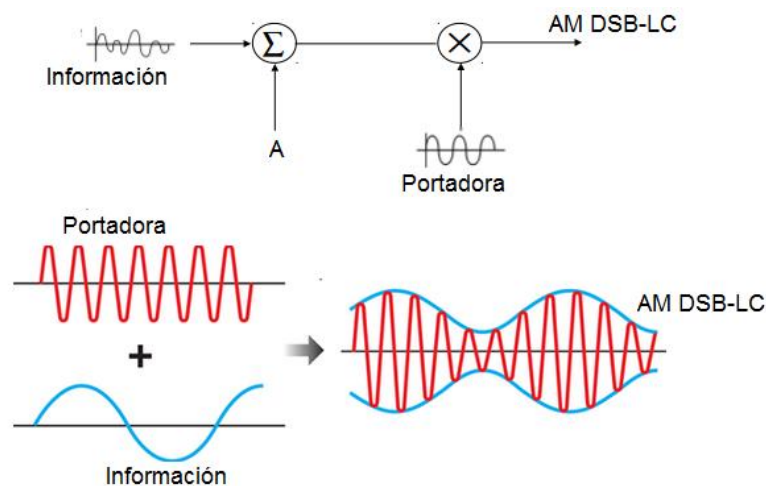


Fig. 1.5 La Modulación AM.

La información es primero compensada para luego pasar a ser modulada. La modulación consiste en multiplicar la información por una onda sinodal portadora con la frecuencia a la que se desea realizar la transmisión. La ecuación matemática que representa la modulación AM es la siguiente:

$$\phi_{AM}(\omega) = f(t) \cos \omega_c t + A \cos \omega_c t$$

La ventaja de esta modulación es la facilidad para obtener la señal de información en el receptor, esto se puede lograr usando un simple circuito detector de envolvente.

Actualmente en el país la canalización de AM es cada 20 kHz con un ancho de banda de 10 kHz, estableciendo así 118 canales en toda la banda. Esta limitación de ancho de banda es impuesta por la ITU (International



Telecommunication Union), causa que la calidad de sonido sea mala. Esta modulación está prácticamente en desuso, no solo por la mala calidad del audio sino también por la cantidad de interferencias producidas por motores y la estática. [4]

1.4.2 Radiodifusión con Modulación en Frecuencia (FM)

Este tipo de radiodifusión opera en el rango entre 88 a 108 MHz, en la banda de VHF, usando una canalización de 400 kHz y un ancho de banda de 180 kHz, para estaciones monofónicas y 200kHz para estaciones estereofónicas. FM logra transmitir la información mediante la modulación en frecuencia en una portadora, esta técnica hace la señal más inmune al ruido y a interferencias, esto conjuntamente con el mayor ancho de banda que esta banda permite hace que la calidad del audio sea mucho mejor que la AM.

Se pueden formar sistemas con una estación central y varias repetidoras para mejorar el alcance de la transmisión. FM es muy usada en zonas urbanas y su cobertura depende de gran manera en tener línea de vista y en la difracción en obstáculos agudos.

La FM funciona de manera que la información es transmitida en los cambios de frecuencia de la señal portadora. El principal problema de la modulación AM es que esta transmite la información en los cambios de amplitud de la portadora, con lo que las interferencias del canal son sumadas directamente en la señal, distorsionándola. En cambio en FM la información no sufre distorsiones por cambios de amplitud, ya que esta se encuentra modulada en la frecuencia. La señal de la modulación FM se muestra en la Figura 1.6.

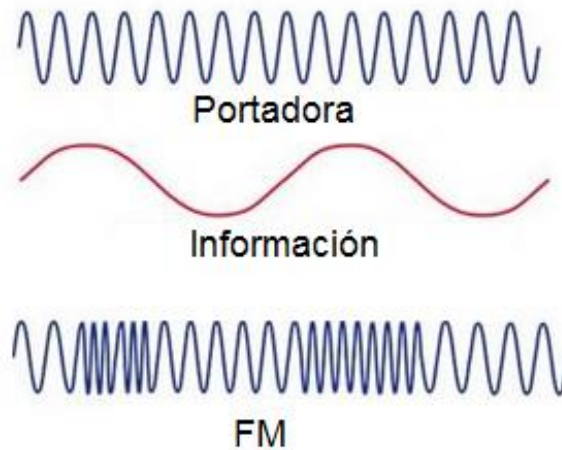


Fig. 1.6 La Modulación FM.

Los receptores de FM son mucho más complejos que los de AM. Generalmente se usan dos técnicas de demodulación:

- Discriminador Reactivo: Usando reactancias, normalmente bobinas acopladas, se intenta lograr que los cambios de frecuencia varíen la impedancia de las bobinas, obteniendo así una señal modulada en amplitud y se obtiene la información con un detector de envolvente.
- Detector PLL (Phase Locked Loop): La implementación de un seguidor de fase entrega directamente la señal demodulada. Generalmente estos detectores se consiguen comercialmente como circuitos integrados. [4]

1.5 Radiodifusión Digital Terrestre

1.5.1 Características Generales

Son sistemas de radiodifusión de audio que emiten señales digitales, estas señales consisten en sonidos e imágenes muestreadas y codificadas, convertidas en un flujo de datos binarios (unos y ceros). El flujo es transmitido mediante una red de transporte, que puede ser terrestre, cableada o satelital, hacia un dispositivo receptor encargado de la decodificación y reconstrucción de la señal original.



La radiodifusión digital es el avance más significativo en tecnología de radio desde la invención de la FM estéreo, esta tecnología ofrece un mejor rendimiento en comparación a su contraparte analógica. Dispone de sistemas de prevención y corrección de errores de transmisión y entrega una mejor calidad de sonido para los radioescuchas. El sistema también aumenta la flexibilidad, calidad y rango del contenido ya que permite la transmisión de datos conjuntamente con el audio.

Por parte de las emisoras de radio las ventajas que ofrece son variadas. Permite configurar Redes de Frecuencia Única que permiten la recepción en una misma frecuencia por todo el territorio de cobertura, sin tener la necesidad de realizar re sintonizaciones en el equipo receptor, esto es de gran utilidad ya que no se usarían redes multifrecuencia como en FM para grandes áreas de cobertura o zonas orográficamente complicadas. El sistema garantiza una calidad elevada de recepción con niveles de relación señal a ruido muy bajos.

Los sistemas digitales ofrecen altas protecciones contra el ruido, interferencias, desvanecimiento, doppler y multitrayecto siendo muy superiores a las actuales transmisiones analógicas al mismo tiempo que mejoran el uso de ancho de banda y la capacidad del canal. Al ser canales digitales, se puede multiplexar varios servicios de alta calidad y este ser configurado dinámicamente para introducir o retirar servicios.

Algunas desventajas que actualmente tienen estos sistemas son los altos precios de los receptores para el público general y la dificultad que propone el cambio de todo el sistema analógico a sistemas digitales. [5]



1.5.2 Ventajas de los Sistemas Digitales

Los últimos avances en tecnología han permitido el desarrollo de nuevos equipos capaces de implementar redes terrestres de televisión y radio digital. Este nuevo tipo de redes ofrecen una competencia directa a los sistemas satelitales y cableados, además de presentar la misma capacidad que los anteriores, añade ciertas ventajas únicas de este sistema.

La tecnología de radio difusión digital soporta técnicas de multiprogramación, esto es la transmisión de varios programas por un mismo canal de radio frecuencia, también se tienen que usar espacios de guarda más pequeños entre frecuencias gracias a los sistemas de filtrado digital, de esta manera teniendo un mejor rendimiento en el uso del espectro radioeléctrico. Así evitando el problema que tienen los sistemas de transmisión analógicos, que para lograr transmisiones en grandes áreas de cobertura o en lugares orográficamente difíciles, usan un gran número de canales de radiofrecuencia, con lo que evitan problemas por interferencia co-canal pero resulta ineficiente en el uso del espectro radioeléctrico.

Los sistemas digitales de radio tienen una mejor calidad de audio, ya que el sistema es inmune a interferencias y atenuaciones por desvanecimientos producidos en el canal, la señal dispone de una calidad uniforme en toda su área de cobertura, a diferencia de los sistemas analógicos que su calidad sufre degradaciones dependiendo de los obstáculos que se encuentren en su área de cobertura. La tecnología digital no sufre de problemas de degradación acumulativa de la señal, producida por las distintas etapas y repetidoras que tiene que cruzar para llegar a su destino, como pasa con la tecnología analógica. Esto es logrado usando métodos de corrección de errores para



corregir cualquier distorsión que la señal se pueda encontrar en su camino. Haciendo así que la información digital sea fácilmente transportable y almacenable.

Los sistemas de radio analógicos tienen el constante problema del ruido de estática. En radio digital no está presente este ruido, ya que dentro de los receptores digitales existen microcontroladores capaces de distinguir entre la información y el ruido, filtrando de esa manera señales indeseables del canal.

Finalmente, los sistemas digitales añaden la interoperabilidad entre servicios de aplicaciones y los equipos de telecomunicaciones. Esto permite desplegar distintos tipos de aplicaciones en sistemas de radio, debido al envío de datos que disponen los sistemas digitales. En algunos casos se puede implementar un canal de retorno desde el usuario usando tecnología celular, facilitando así una interacción con la emisora y el radioescucha, como un servicio de valor agregado. Entre los servicios que la radio digital puede ofrecer, se encuentran: la mensajería (paging), información de tráfico, noticias, navegación, información relacionada a los programas emitidos en la emisora, información específica (estadísticas, noticias temáticas, etc.), información del clima, entre otros. [5] [6]

1.5.3 Los Problemas del Espectro

El espectro radioeléctrico es considerado como un recurso natural limitado y es fundamental para la implementación y provisión de servicios de telecomunicaciones. Su utilización debe de ser ajustada a parámetros técnicos establecidos conforme la disponibilidad del mismo y a la tecnología a implementar, por lo tanto se tiene la necesidad de adoptar reglas para que su uso responda a principios de optimización y efectividad. Debido a esto el



espectro radioeléctrico es considerado como bien de dominio público por lo que su gestión, administración y control dependen enteramente del estado.

La disponibilidad del espectro es un problema considerable para la implementación de las tecnologías de radio digital, cada sistema tiene sus propios requisitos en lo referente a las bandas de frecuencia y los anchos de banda requeridos para su canal digital. Algunos sistemas pueden operar conjuntamente en el mismo canal con los sistemas analógicos actuales, mientras otros sistemas digitales requerirán de nuevos canales en las mismas bandas pudiendo así producir una saturación del espectro radioeléctrico. [1] [7]

1.6 Tecnologías de Radio Digital Terrestre

Radiodifusión digital terrestre es el nombre de las tecnologías para la transmisión de señales de radio digital. Actualmente existen varias tecnologías que implementan distintos criterios, por lo cual no ha sido posible definir un solo estándar digital a nivel mundial. Algunas de las tecnologías más influyentes se describen a continuación.

1.6.1 FM In-Band On-Channel (IBOC)

IBOC tecnología de radio digital desarrollada por iBiquity Digital Corporation, referida internacionalmente como Sistema Digital C (Digital System C), facilita la introducción de la radio digital permitiendo a las estaciones FM existentes transmitir la misma programación de manera analógica y digital sin la necesidad de reubicaciones de espectro para la señal digital, de esta manera la implementación no tendría problemas con la infraestructura de transmisión existente. IBOC es el estándar de radio digital más ampliamente implementado en Estados Unidos. [5]



El sistema es capaz de transmitir servicios de audio y una variedad de servicios de datos inalámbricos en la banda de VHF. IBOC permite a las emisoras transmitir datos relevantes a la programación de audio digital, incluyendo el título de la canción, artista e información de la estación. Las aplicaciones iniciales en el receptor pueden mostrar en pantalla la información enviada. Servicios adicionales de datos incluyen la entrega de servicios de mensajería (paging), información de tráfico, clima, deportes, entre otros. [7]

1.6.1.1 Modos de Operación de IBOC

Existen 3 modos de operación para IBOC. El sistema permite la transmisión de analógico a digital a través de un modo de operación Híbrido y un modo Híbrido Extendido, antes de adoptar un modo de operación Todo Digital. La señal digital es modulada en un gran número de sub portadoras, usando multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), las cuales son transmitidas simultáneamente.

En los modos híbridos, la señal analógica es complementada con una señal digital que se inserta en el espectro analógico para ser transmitida al mismo tiempo. En el modo todo digital la señal analógica es completamente removida y la señal digital es configurada de tal manera que así se perfecciona la desigualdad del sistema y se potencia la capacidad de cobertura del mismo.

IBOC permite la capacidad de seleccionar la calidad de audio y la tasa de transmisión deseada, existiendo un intercambio entre los valores de estos dos parámetros. Por ejemplo si se desea una calidad de audio cercana a la calidad de CD de 96 kb/s, en modo híbrido solo se permite una tasa de transmisión de 1 kb/s para datos. Mientras que si la calidad no es muy importante la tasa de bits de audio puede ser reducida hasta a 48 kb/s.



El diseño del sistema IBOC tiene la ventaja que puede ofrecer a las radio emisoras una migración progresiva al modo digital, adaptándose a la infraestructura existente y así siendo un sistema económico de implementar. [7]

1.6.1.2 Estado de IBOC

La NRSC (National Radio Systems Committee) publicó el reporte de evaluación de FM IBOC Digital Radio, adoptado el 29 de noviembre del 2001 y recomienda que el sistema evaluado debe de ser autorizado por la FCC (Federal Communications Commission) como un realce a las transmisiones FM en los Estados Unidos.

El sistema IBOC ha sido probado y presentado en el reporte de la NRSC usando MPEG-2 AAC, como tecnología de compresión. A pesar de esto sus desarrolladores, iBiquity Digital Corporation han usado su propia tecnología de compresión digital para equipos comerciales IBOC, sin embargo la sustitución de los códec no causa impacto en los resultados de las pruebas de rendimiento. [7]

1.6.2 Eureka 147 Digital Audio Broadcasting (DAB)

La familia de estándares DAB incluye a DAB y DAB+ para radio digital y DMB para televisión móvil. Son tecnologías flexibles, globales y de estándares abiertos desarrollados en Europa e implementadas ampliamente en Canadá, Reino Unido, Alemania, entre otros. [5]

El Eureka 147 DAB ha sido diseñado para entregar una alta calidad, multiprogramación de sonido digital y servicios de transmisión de datos. El sistema plantea la recepción para receptores fijos pero en particular para la recepción en vehículos donde es necesario un receptor portátil usando los sistemas ya instalados en los vehículos como es el uso de la antena de látigo.



El sistema puede operar en cualquier banda dedicada de transmisión como VHF y UHF. Incluso trabaja en condiciones severas de multitrayecto, como por ejemplo en áreas urbanas densas, el sistema provee una inigualable calidad de sonido en el receptor gracias a la codificación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex) que utiliza. DAB también ha sido diseñado como un sistema flexible de transmisión digital de servicios integrados de propósito general, el cual soporta una gran cantidad de fuentes y opciones de codificación de canal así también como servicios de datos asociados con la programación e independientes.

DAB al ser una tecnología más antigua, en comparación con los estándares más nuevos, sus técnicas para la compresión de audio son menos eficaces, por lo que esto significa que menos programas de audio pueden ser transmitidos dentro de un ancho de banda dado. [8]

1.6.2.1 Modos de Operación de Eureka 147 DAB

Técnicamente el sistema puede ser usado a cualquier frecuencia entre 30 MHz y 3 GHz. Este amplio rango de frecuencias incluye a las bandas de VHF I, II y III, las bandas de UHF IV y V y la banda L (L-Band, 1.5GHz aproximadamente). Dado que las condiciones de propagación varían con la frecuencia a la que se trabaje, DAB tiene cuatro modos de transmisión.

Estos modos son detectados automáticamente por el receptor y son transparentes al usuario. El modo I es adecuado para operar a frecuencias debajo 300 MHz. El modo II ha sido diseñado para servicios locales y regionales a frecuencias menores a 1.5 GHz y el modo III está disponible para transmisiones satelitales bajo 3 GHz. El modo IV ha sido introducido recientemente para proveer una cobertura óptima de amplias áreas operando



en la banda L (L-Band). Los parámetros de este modo están intermedios entre el modo I y modo II.

1.6.2.2 Estado de Eureka 147 DAB

La EBU (European Broadcasting Union) ha establecido un único estándar DAB a nivel Europeo y a nivel internacional. En 1994 el sistema fue adoptado por el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) como un estándar Europeo y fue publicado en febrero de 1995.

El estándar ETSI describe los detalles técnicos de la transmisión en una señal al aire y es aplicable a transmisiones terrestres, satelitales y cableadas, en todas las bandas de frecuencia sobre los 30 MHz. Este estándar permite diferentes niveles de implementación frente a una variedad de requerimientos de mercado, costos de producción y tipos de receptor. [8]

1.6.3 DRM (Digital Radio Mondiale)

Digital Radio Mondiale (DRM) es un sistema de radio transmisión digital que utiliza las bandas de transmisión bajo los 30MHz las bandas de LF, MF y HF. El sistema ofrece una mayor calidad de audio transmitido, mejorando el consumo de ancho de banda, la relación señal a ruido y contrarrestando los efectos del desvanecimiento selectivo de frecuencias e interferencia audible de otras estaciones de radio gracias a que utiliza la codificación COFDM. El estándar DRM también incorpora el denominado DRM+ para su uso en bandas de VHF para transmisiones FM. [5]

DRM funciona manteniendo la canalización actual usada para transmisión analógica AM en esas bandas, el sistema proporciona una calidad muy cercana a la FM comercial, reduciendo la potencia empleada por AM para cubrir una



misma área geográfica y reusando las instalaciones de transmisión existentes para la AM analógica.

El sistema permite la aplicación de redes de frecuencia única (SFN), haciendo así más fácil la interacción con los oyentes y aumentando su flexibilidad de ofrecer contenido. DRM tiene la posibilidad de emitir simultáneamente la señal digital y la señal analógica usando una misma portadora durante el periodo en que se realice la transmisión. [9]

1.6.3.1 Modos de Operación de DRM

DRM permite cambiar entre 5 modos de operación dependiendo de cómo se use el sistema. Los parámetros del sistema varían dependiendo de las condiciones de transmisión para así proveer diversos modos de robustez para la señal digital transmitida.

El modo de transmisión A es usado para ambientes donde se tiene poco desvanecimiento de la señal transmitida, mientras que los modos B, C, D son distintas variaciones para canales selectivos en tiempo y con grandes dispersiones de retardo. El modo de transmisión E es usado solamente por DRM+ centrado a canales selectivos en tiempo y frecuencia.

1.6.3.2 Estado de DRM

DRM fue creado y es mantenido gracias al consorcio DRM (DRM Consortium), que es una organización internacional sin fines de lucro. DRM fue formado en china en 1997 inicialmente con el objetivo de digitalizar las bandas de transmisión AM hasta los 30 MHz. Esta tecnología ha sido certificada por varios organismos internacionales, entre ellos la ETSI que fue la encargada de

Universidad de Cuenca



realizar, aprobar y publicar el estándar DRM en 2001 y en este mismo año la ITU aprobó bajo sus términos el estándar. [10]

Capítulo 2 El Estándar DRM

2.1 Características Generales

El sistema DRM fue diseñado para poder entregar servicios de amplia cobertura que en la actualidad puedan coexistir con las transmisiones moduladas en amplitud (AM) y en el futuro reemplazarlas.

Actualmente las bandas de frecuencia menores a 30 MHz son usadas para la transmisión de audio en AM, por lo que este espacio de frecuencia es denominado *Banda AM*. Esta banda está ubicada en los rangos conocidos como LF (Low Frequency) que va desde 148.5 kHz hasta 283.5 kHz en la Zona 1 de la ITU, MF (Medium Frequency) desde 526.5 kHz a 1606.5 kHz, en las Zonas 1 y 3 y también desde 525 kHz a 1705kHz en la Zona 2, y HF (High Frequency) que va desde 2.3 MHz a 27 MHz en todas las regiones, ver Figura 2.1. [5] La Banda AM es útil para radiodifusores debido a los modelos de propagación usados, tales como Ondas Terrestres y Ondas Celestes, que dan cobertura a amplias áreas. La propagación por ondas celestes es de gran utilidad para la radiodifusión internacional por sus propiedades de transmisión.

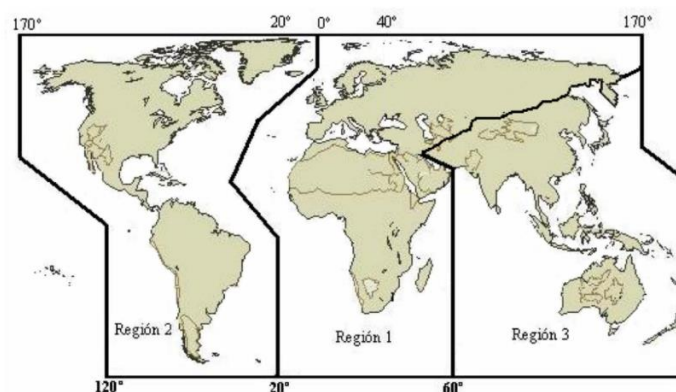


Fig. 2.1 Regiones de la ITU.

En la actualidad los radioescuchas se han sofisticado y tienen mejores fuentes de entretenimiento con los que la radiodifusión AM tradicional no puede



competir en calidad. Por lo que los servicios ofrecidos en estas bandas deben evolucionar, de manera que las ventajas de transmisión en esta banda sean usadas en su totalidad. La manera de lograr esto es aplicar técnicas de procesamiento digital, como se ha hecho con otras bandas de frecuencia y otros medios. Al diseñar el estándar DRM se tomaron en cuenta varias consideraciones, como:

- Tiene que ser un sistema abierto (no propietario), esto significa que no se necesitan licencias para el desarrollo de tecnologías de transmisión y recepción, facilitando así el despliegue del sistema.
- Mantener las canalizaciones actuales en las bandas asignadas (anchos de banda y asignaciones de frecuencia).
- La calidad de audio ofrecida a los radioescuchas debe de ser muy superior a las actuales transmisiones usando AM.
- La posibilidad de fabricación en serie de receptores de costo asequible al público en general.
- Capacidad de transmisión de datos relacionados con la programación y servicios de datos adicionales.
- Capacidad de planificación y uso de redes de frecuencia única (SFN), estas redes de radiocomunicaciones son construidas por transmisores que emiten la misma programación por el mismo canal de frecuencia a grandes zonas geográficas sin que esto provoque interferencias.
- Soportar servicios de Simulcast, lo que permite a las radiodifusoras transmitir servicios analógicos AM simultáneamente con el servicio digital DRM usando la misma infraestructura. [10] [11]



2.2 Arquitectura del Estándar DRM

El estándar DRM está diseñado para su funcionamiento bajo restricciones de canalización y condiciones de propagación, que varían de acuerdo a las bandas de operación. Para poder satisfacer estas restricciones de funcionamiento, se tiene disponible distintos modos de transmisión. Cada modo es definido por parámetros de transmisión clasificados en 2 tipos:

- Parámetros relacionados con el ancho de banda de la señal.
- Parámetros relacionados con la eficiencia de transmisión.

El primer tipo de parámetros definen la cantidad total de ancho de banda asignado para la transmisión. Los parámetros relacionados con la eficiencia permiten tener una compensación entre capacidad del sistema (Tasa de bits útiles), robustez al ruido, al multitrayecto y al efecto Doppler.

Dichos parámetros tienen un efecto directo en el diseño de los diferentes bloques que componen la arquitectura del estándar DRM. La Figura 2.2 presenta los bloques de la arquitectura del estándar DRM para el transmisor, los cuales son descritos a continuación. [11]

El codificador de fuente y los pre-codificadores aseguran la adaptación de las tramas de entrada a una transmisión digital apropiada. Para el caso de la fuente de audio ésta funcionalidad incluye técnicas de compresión. La salida del codificador de fuente y la trama de datos pre-codificada pueden ser comprimidas en dos partes con distintos niveles de protección dentro del codificador de canal subsecuente. Sin embargo, todos los servicios tendrán que usar los mismos dos niveles de protección.

El multiplexador combina los niveles de protección de los servicios de datos y de audio.



El dispersador de energía provee un complemento de bits determinístico selectivo para poder reducir la posibilidad de que patrones sistemáticos resulten en regularidades no deseadas en la señal transmitida.

El codificador de canal añade información redundante que permite proveer transmisión de datos cuasi libre de errores y define el mapeo de la información codificada a células QAM.

El entrelazador de células separa células QAM consecutivas a una secuencia de células cuasi aleatoria separada en tiempo y frecuencia, lo que permite proveer una transmisión robusta en canales dispersivos de tiempo y frecuencia.

El generador de pilotos provee medios para obtener información del estado del canal en el receptor, permitiendo el desarrollo de una demodulación coherente de la señal.

El mapeo de células OFDM recoge diferentes clases de células QAM y las coloca en una cuadrícula definida en tiempo y frecuencia.

El generador de señal OFDM transforma cada ensamblado de células con el mismo índice a una señal representada en el dominio del tiempo desde la cual el símbolo OFDM es obtenido. Posteriormente a este símbolo se le adiciona un intervalo de guardia al final del mismo.

El modulador convierte la representación digital de la señal OFDM a una señal analógica de radiofrecuencia. Esta operación involucra conversión Digital-Analógica y filtrado de la señal para que cumpla con los requerimientos de espectro del estándar.

Los bloques que conforman el receptor son los equivalentes a los del transmisor, realizando el proceso inverso. El primer bloque realiza la sincronización y demodulación de la señal, el segundo realiza la decodificación



del canal, corrigiendo los errores de transmisión que puedan existir. A continuación, el tercer bloque procede a la demultiplexación de los datos transmitidos y finalmente, el cuarto bloque obtiene las señales de audio y datos mediante una decodificación de fuente. [6] [11]

2.3 Modos de Transmisión

2.3.1 Parámetros Relacionados con el Ancho de Banda de la Señal

El ancho de banda de los canales actuales usados para transmisiones de radio por debajo de 30MHz es de 9kHz y 10kHz. El estándar DRM está diseñado para ser usado dentro de estos anchos de banda nominales, para de esta manera satisfacer la situación de planificación actual, también puede ser usado dentro de la mitad de esos anchos de banda (4.5kHz o 5kHz) para poder permitir una transmisión simultánea con señales análogas AM (Simulcast). O finalmente fuera de estos anchos de banda, en 18 kHz y 20kHz, en casos donde esto sea factible. [11]

2.3.2 Parámetros Relacionados con la Eficiencia de Transmisión

Independientemente del valor de los parámetros de ancho de banda de la señal, los parámetros relacionados con la eficiencia de transmisión son definidos de tal manera que permitan eficiencia en la capacidad (Tasa útil de bits), robustez al ruido y al multitrayecto. Estos parámetros son:

- Tasa de codificación y parámetros de constelación, los cuales definen la tasa útil y constelaciones QAM a ser utilizadas para transmitir datos.
- Parámetros de los símbolos OFDM, los cuales definen la estructura de los símbolos OFDM para ser usados en las diferentes condiciones de propagación.



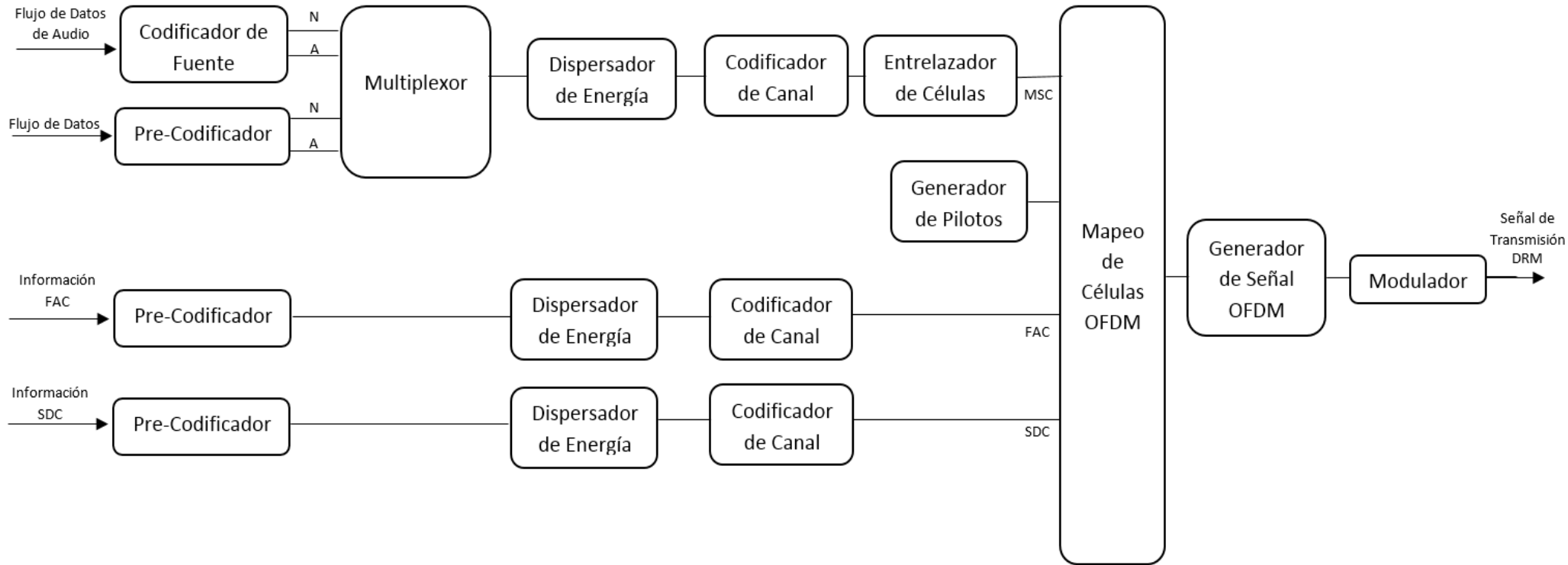


Fig. 2.2 Diagrama de Bloques del Sistema DRM.



2.3.2.1 Tasas de Código y Constelaciones

El estándar DRM implementa un amplio rango de alternativas para lograr diferentes niveles de protección en las transmisiones, dependiendo de la función deseada dentro de cada servicio o parte de un servicio. De acuerdo a los requisitos de estos servicios, los niveles de protección son determinados por tres parámetros:

- El orden de constelación QAM, el cual representa a la señal en el plano complejo en términos de amplitud y fase.
- El uso de una modulación jerárquica, utilizada para transmitir dos tramas distintas de datos (alta protección y baja protección) en una sola trama de información.
- La tasa de código del codificador de canal, la cual es definida como la porción útil (no redundante) de la transmisión de datos.

2.3.2.2 Conjunto de Parámetros OFDM

Estos parámetros son definidos por distintas condiciones de transmisión que permiten proveer varios modos de robustez para la señal. Para un ancho de banda dado, diferentes modos de robustez proveen diferentes tasas de datos disponibles. En la Tabla 2.1 se aprecian los modos de robustez y sus condiciones típicas de propagación. [11]



Tabla 2.1 Modos de Robustez de DRM y sus Condiciones de Propagación.

Modo de Robustez	Condiciones Típicas de Propagación	Ancho de Banda (kHz)	Bandas Empleadas
A	Canales gaussianos con poco desvanecimiento.	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	LF y MF
B	Canales selectivos de tiempo y frecuencia con dispersión Doppler.	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	MF y HF
C	Como en modo B, pero con una mayor dispersión Doppler.	10, 20	HF
D	Como en modo B, pero con una severa dispersión Doppler y retardo.	10, 20	HF
E	Canales selectivos de tiempo y frecuencia.	100	VHF

La señal transmitida comprende una sucesión de símbolos OFDM, en donde cada símbolo está constituido por un intervalo de guarda seguido de la llamada parte útil del símbolo, estos símbolos son conjuntos de sub-portadoras durante un periodo de tiempo. Cada símbolo es la suma de varias porciones de ondas seno espaciadas equitativamente en frecuencia. Cada porción de onda seno, llamada *Célula*, es transmitida con una amplitud y fase dada, correspondiente a la posición de la portadora. Se hace referencia a cada portadora por el índice k , perteneciente al intervalo $[k_{min}, k_{max}]$ donde $k = 0$ corresponde a la frecuencia de referencia de la señal transmitida. El número exacto de portadoras depende del modo de transmisión utilizado.

Los parámetros OFDM relacionados con el tiempo, indicados en la Figura 2.3 [12], son:

- T_g : Duración del intervalo de guarda.
- T_s : Duración del símbolo OFDM.
- T_u : Duración de la parte útil (ortogonal) de un símbolo OFDM.

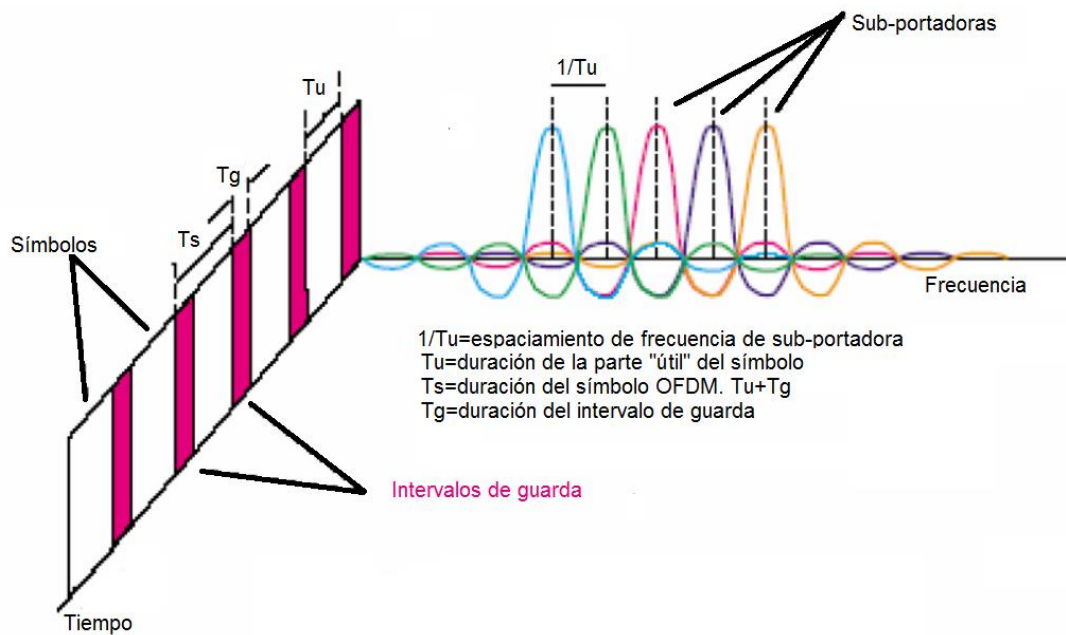


Fig. 2.3 Parámetros OFDM.

Los símbolos OFDM son agrupados en tramas de duración T_f . Un cierto número de células en cada símbolo OFDM se transmiten con una amplitud y fase determinada, para así poder usarlas como información de sincronización en la demodulación y son llamadas *referencias piloto*. [13]

La Tabla 2.2 indica el valor de cada uno de los parámetros OFDM en los distintos modos de robustez. [11]

Tabla 2.2 Valor de los Parámetros OFDM en Distintos Modos de Robustez.

Lista de Parámetros	Modo de Robustez				
	A	B	C	D	E
T (us)	$83^{1/3}$	$83^{1/3}$	$83^{1/3}$	$83^{1/3}$	$83^{1/3}$
T_u (ms)	24 ($288 \times T$)	$21^{1/3}$ ($256 \times T$)	$14^{2/3}$ ($176 \times T$)	$9^{1/3}$ ($112 \times T$)	$21/4$ ($27 \times T$)
T_g (ms)	$22/3$ ($32 \times T$)	$51/3$ ($64 \times T$)	$51/3$ ($64 \times T$)	$71/3$ ($88 \times T$)	$01/4$ ($3 \times T$)
T_g/T_u	$1/9$	$1/4$	$4/11$	$11/14$	$1/9$
T_s = $T_u + T_g$ (ms)	$26^{2/3}$	$26^{2/3}$	400	$16^{2/3}$	$21/2$
T_f (ms)	400	400	400	400	100



Los parámetros OFDM dependen del ancho de banda disponible, el número de portadoras y su localización con respecto a una frecuencia de referencia. El ancho de banda nominal del canal está definido por la Ocupación del Espectro, como se indica en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Ocupación del Espectro en DRM.

	Modo de Funcionamiento	Ocupación del Espectro					
		0	1	2	3	4	5
Ancho de Banda del Canal (kHz)	Modos A, B, C y D	4.5	5	9	10	18	20
	Modo E	100	-	-	-	-	-

2.4 Codificación de Fuente

La codificación de fuente debe tener una eficiencia muy alta para de esta forma lograr una buena calidad de audio. Basados en varias pruebas realizadas por el consorcio DRM en conjunto con MPEG, se escogió los algoritmos de codificación de voz y de audio pertenecientes al estándar MPEG-4, que ofrece una óptima calidad de sonido a tasas de bit definidas. En este contexto, tasa de bits es el número de bits a ser transmitidos por una unidad de tiempo. [14]

Los esquemas de codificación de fuente usados en DRM son los siguientes:

- El subconjunto MPEG-4 AAC, que incluye herramientas de robustez contra errores para transmisiones en audio mono y estéreo.
- El subconjunto de MPEG-4 CELP, que codifica muestras de voz para así tener una mayor robustez en la transmisión de voz en mono, usado en los casos cuando se necesita una baja tasa de bits o se necesita alta robustez a los errores.



- El subconjunto de MPEG-4 HVXC, que codifica muestras de voz para tasas de bits muy bajas, lo que provee alta robustez a errores de transmisión de voz en mono.

La Replicación de Banda Espectral (SBR), es una de las herramientas usadas por MPEG-4 para mejorar la codificación de audio, especialmente a bajas tasas de bits. El algoritmo compresor de MPEG-4 transmite las frecuencias más bajas mientras que el SBR reconstruye las altas frecuencias a partir de información proporcionada por el rango de frecuencias ya comprimido. El SBR usa una herramienta de mejora de codificación de audio llamado Estéreo Paramétrico (PS) que permite la codificación estéreo a bajas tasas de bits. [15] El estándar DRM utiliza el formato AAC (Advanced Audio Coding) para comprensión y codificación de audio el cual consta de dos modos: AAC y xHe-AAC.

Estos modos se combinan con las herramientas SBR (Spectral Band Replication) y PS (Parametric Stereo) con el objetivo de obtener una comprensión de mayor calidad. En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de bloques para un codificador de fuente del estándar DRM. [11]

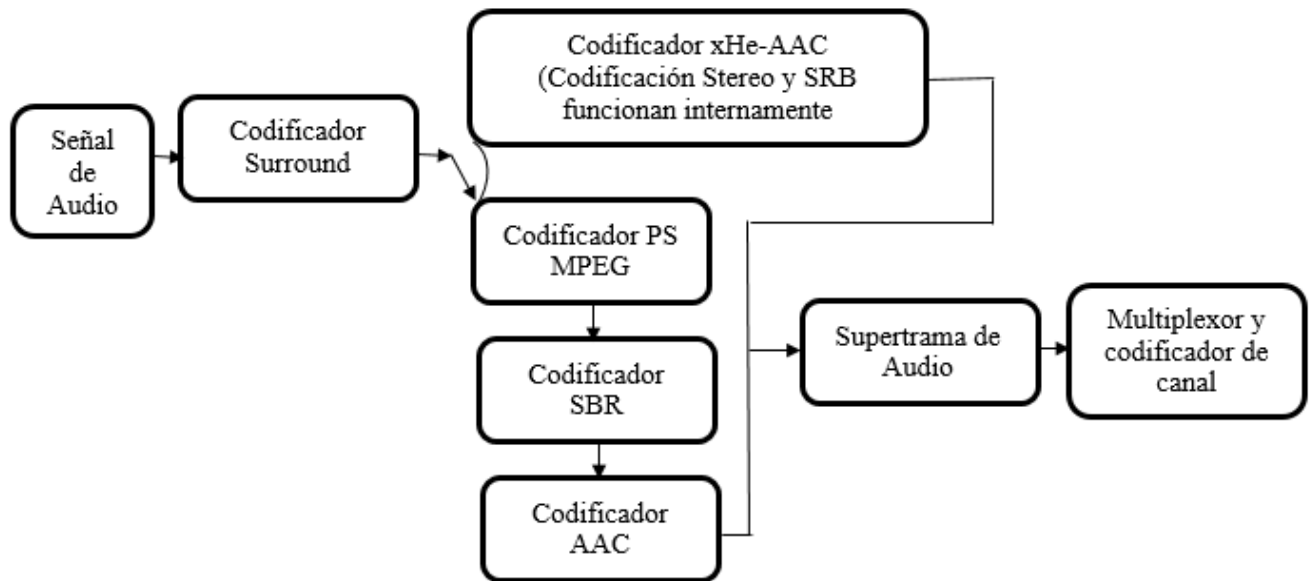


Fig. 2.4 Codificador de Fuente DRM.

2.4.1 Codificador de Audio AAC

Este codificador se volvió un estándar internacional en 1997, ofreciendo un desempeño superior para tasas de bits mayores a 64 kbps y menores a 16 kbps. Es el primero en cumplir en su totalidad con la norma ITU-R/EBU para calidad a 128 kbps en estéreo. Sus características específicas para el sistema DRM son: [16]

- Tasa de bits: Para los modos A, B, C, y D usa una tasa de bits de 20 kbps y para el modo E una de 80 kbps.
- Tasas de muestreo: Para los modos A, B, C, D las tasas son de 12 kHz y 24 kHz, mientras que para el modo E son de 24 kHz y 48 kHz.
- Longitud de la transformada de coseno modificada: La longitud de la transformada utilizada es de 960 muestras, para así asegurar que una trama de audio corresponda a 80 ms o 40 ms (modos A, B, C, D), o 40 ms o 20 ms (modo E).



- Supertrama de audio: 5 o 10 tramas de audio componen una supertrama, esto permite tener un número entero de tramas de audio para construir supertramas de audio de 400 ms (modos A, B, C, D) o 200 ms (modo E).
- Protección de error desigual (UEP): Aplicando este tipo de protección se obtiene una mejor tasa de error de bit (BER) en el flujo de bits AAC. El BER se define como el número de bits recibidos de manera errónea. UEP se realiza mediante una multiplexación de las unidades codificadas.

2.4.2 Codificador AAC Extendido de Alta Eficiencia (xHE-AAC)

A inicios del año 2012 MPEG finalizó la estandarización de este códec de la familia AAC, obteniendo importantes mejoras en la calidad de audio y voz con tasas de datos muy bajas (8 kbps). Sus características específicas para el sistema DRM son:

- Tasa de bits: Para los modos A, B, C, y D se utiliza una tasa de bits de 20 bps, mientras que para el modo E utiliza 80bps.
- Tasa de muestreo: Soporta tasas de muestreo de 48kHz para señales de audio.
- Supertramas de audio: permiten garantizar la mejor calidad de audio posible especialmente a bajas tasas de bits. Las supertramas de audio son de un tamaño constante, mientras que el número de tramas de audio que ésta contenga no siempre lo será. Una supertrama de audio es colocada en una trama lógica DRM para los modos A, B, C, D y dos supertramas para el modo E.
- Protección de error desigual (UEP), la cual define un sistema basado en dos niveles distintos de codificación y no es usada en este códec.

2.5 Herramientas Auxiliares para Codificación

2.5.1 Replicación de Banda Espectral (SBR)

Al trabajar con bajas tasas de bits, los algoritmos clásicos de codificación necesitan limitar el ancho de banda para poder operar a bajas tasas de muestreo y ofrecer un alto desempeño en el ancho de banda del audio, lo cual puede ser logrado con la replicación de la banda espectral (SBR).

Esta técnica consiste en recuperar las bandas de alta frecuencia de la señal de audio que pudieron ser eliminadas por el algoritmo codificador al momento de la compresión. Para recuperar las frecuencias perdidas, cierta cantidad de información de guía referente a la señal debe ser transmitida en el flujo de bits de audio, reduciendo la velocidad de codificación. La información de guía es calculada con el ancho de banda total de la señal de audio antes de la codificación con lo que se pueden recuperar las bandas de alta frecuencia antes de la decodificación. Este proceso es ilustrado en la Figura 2.5. [11]

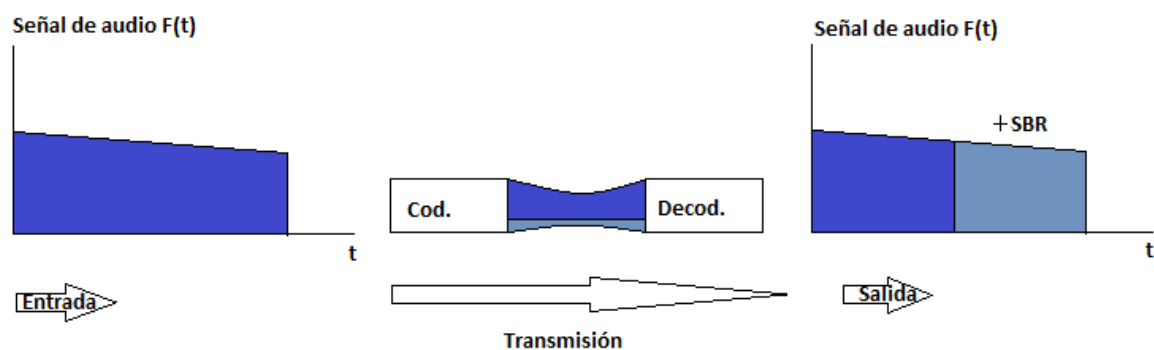


Fig. 2.5 Funcionamiento de la Replicación de Banda Espectral (SBR).

2.5.2 Codificación Estéreo Paramétrico (PS)

Esta técnica es utilizada para mejorar el rendimiento de la codificación estéreo a bajas tasas de bits. La idea general de esta técnica es enviar una imagen estéreo que describa los datos como información guía junto con una señal

mono downmix. Esta información es concisa y solo necesita una pequeña fracción de la tasa de bits total. La síntesis del estéreo en el decodificador reconstruye propiedades espaciales pero no afecta a la energía total del espectro.

Si la difusión contiene datos PS la respectiva herramienta especificada en MPEG-4 audio debe ser usada. En la Figura 2.6 se ilustra la transmisión de este codificador: [11]

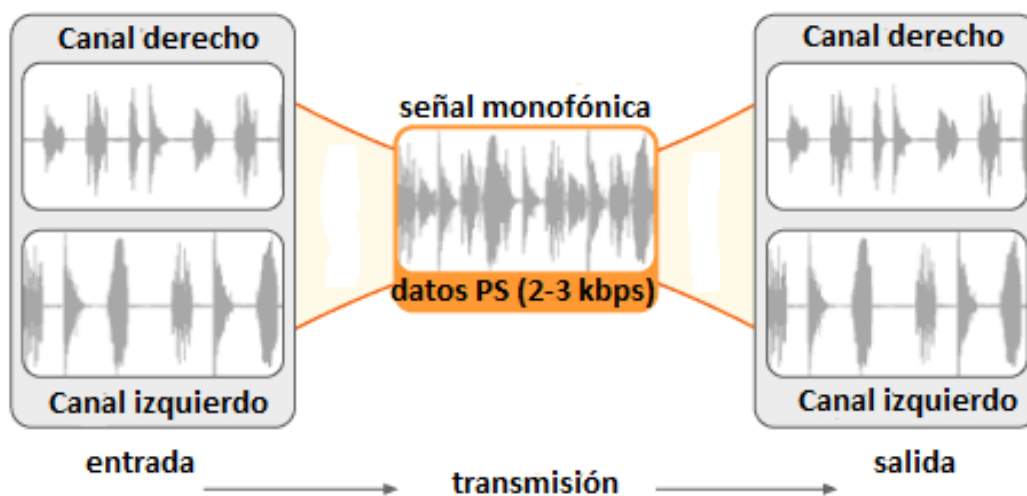


Fig. 2.6 Transmisión de Estéreo Paramétrico (PS).

2.6 Supertramas de Audio

En el estándar DRM las tramas lógicas tienen una tasa de bits constante para cualquier combinación de parámetros. Los esquemas de codificación AAC y xHE-AAC generan tramas que tienen longitudes variables que sin embargo son agrupadas en una supertrama de tamaño constante. El estándar DRM se ajusta a esto por lo que para los modos A, B, C, y D la supertrama de audio se mapea directamente en la trama lógica DRM ya que contienen la misma longitud, por otra parte para el modo E la supertrama se mapea en dos tramas lógicas DRM.



2.6.1 Protección Desigual de Errores (UEP)

Este tipo de protección se utiliza para la codificación AAC con la finalidad de dar una mayor protección a las partes más sensibles del audio y una menor protección a las partes menos sensibles. Por lo tanto el audio codificado se debe dividir en estos dos bloques de alta y baja protección.

2.6.2 Chequeo por Redundancia Cíclica (CRC)

La implementación de códigos CRC permiten la detección de errores transmitidos en el receptor, por lo que palabras CRC se deben transmitir con los datos enviados. El procedimiento es el siguiente:

Se define un código CRC a partir del polinomio generador de grado n:

$$G_n(x) = x^n + g_{n-1}x^{n-1} + \dots + g_2x^2 + g_1x + 1$$

Con $n \geq 1$ y $g_i \in \{0,1\}$, $i = 1 \dots n - 1$

Para un código de 8 bits el polinomio generador es el siguiente:

$$G_8(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$$

El cálculo de la palabra CRC se lo realiza mediante un registro de desplazamiento de n etapas, el cual es ilustrado en la Figura 2.7. [11]

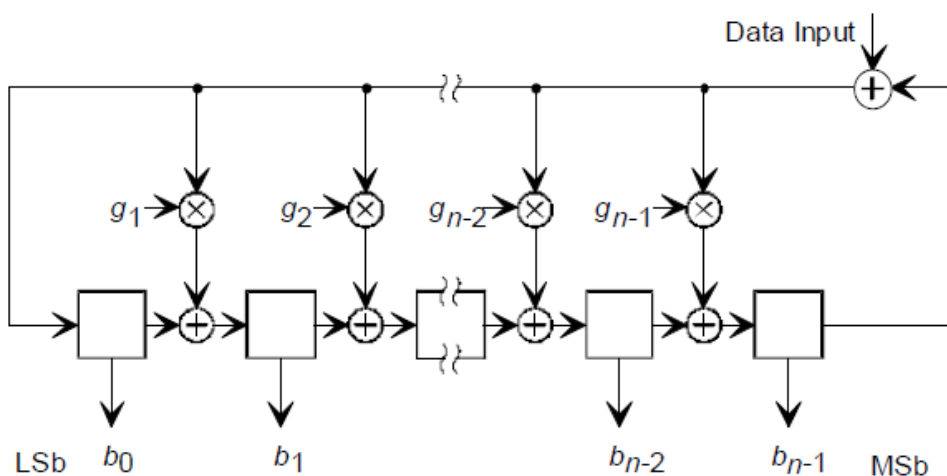


Fig. 2.7 Diagrama General para el Chequeo por Redundancia Cíclica (CRC).



Los registros son inicializados a 1, luego de aplicar el bit más significativo (MSb) al bloque de datos de entrada el registro de cambio desplaza el contenido a la siguiente etapa, mientras carga los siguientes estados con el resultado de las respectivas operaciones XOR. El proceso se repite hasta el bit menos significativo (LSb), donde finalizara la operación y se obtendrá la palabra CRC, la misma que debe ser invertida (complemento de 1) antes de ser transmitida.

2.7 Proceso de Codificación AAC (Advanced Audio Coding)

ISO/IEC 14496-3 define el estándar MPEG-4 para codificación de audio en el cual se encuentra el estándar para el codificador AAC. El estándar DRM utiliza la herramienta de robustez contra errores AAC, para un perfil de audio de alta calidad.

Esta herramienta contiene tres tipos de robustez contra errores: [14]

- Reordenación de palabras de código Huffman (HCR).
- Libros virtuales de código (VCB11).
- Longitud de código variable reversible (RVLC).

Dentro del estándar DRM todos los flujos de bits deben usar HCR ya que reduce significativamente la sensibilidad a errores. El tamaño de la transformada debe ser de 960 muestras para encajar correctamente el flujo de bits a la trama multiplexada.

Para los modos A, B, C y D: [11]

- Cuando se usa una tasa de muestreo de 12kHz, 5 tramas AAC se deben combinar en una supertrama de audio.



- Cuando se usa una tasa de muestreo de 24kHz, 10 tramas AAC se deben combinar en una supertrama de audio. Esta tasa de muestreo debe ser usada cuando está activado el modo estéreo.

Para el modo E:

- Cuando se usa una tasa de muestreo de 24kHz, 5 tramas AAC se deben combinar en una supertrama de audio.
- Cuando se usa una tasa de muestreo de 48kHz, 10 tramas AAC se deben combinar en una supertrama de audio. Esta tasa de muestreo debe ser usada cuando está activado el modo estéreo.

En modo estéreo el canal izquierdo y derecho se transmiten entrelazados con la finalidad de reducir la sensibilidad al error de la trama estéreo. El estándar MPEG-4 define como se almacenan los bits para la trama de audio AAC. [16]

2.7.1 La Supertrama DRM

La supertrama DRM está compuesta por una cabecera, una parte con protección alta, una con protección baja, cuando se utiliza el perfil UEP y la verificación de redundancia cíclica (CRC).

2.7.1.1 Cabecera

Contiene la información del tamaño de las tramas almacenadas en la supertrama de audio. Todas las longitudes se derivan de la posición absoluta de los bordes de las tramas, donde cada borde de trama es almacenada usando 12 bits (entero sin signo). Los bordes están medidos en bytes desde el inicio de la secuencia del flujo de bits, 4 bits de relleno son añadidos de ser necesario.

2.7.1.2 Bloque de Alta Protección

Un bloque de alta protección puede contener una cierta cantidad de bytes desde el inicio de cada trama AAC, dependiendo del perfil UEP (protección desigual de error) seguido de una verificación por redundancia cíclica (CRC) de 8 bits.

2.7.1.3 Bloque de Baja Protección

Estos bytes de la trama AAC se encuentran almacenados consecutivamente a la parte con alta protección. La Figura 2.8 ilustra una supertrama con 10 tramas de audio. [11]

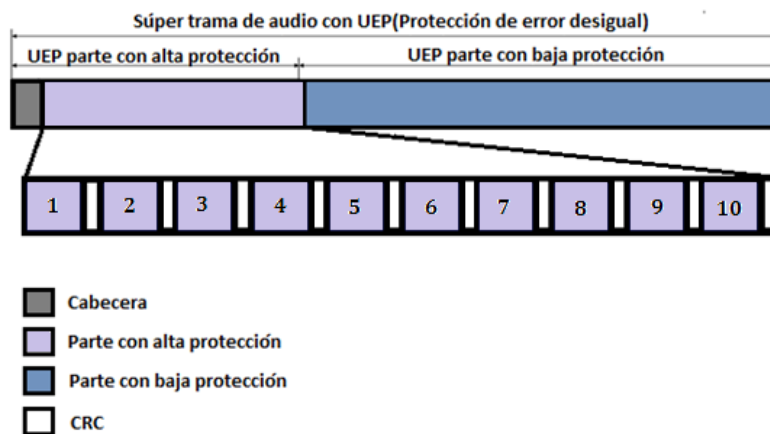


Fig. 2.8 Supertrama DRM.

2.8 AAC + SBR

El codificador AAC por sí solo no alcanza una alta calidad de audio por lo que se debe usar la herramienta SBR, especificada en el estándar MPEG-4 de audio, cuya tasa de transmisión es el doble de la del codificador. [14] Los datos SBR están localizados al final de la trama y su primer bit se encuentra al final de la misma, es decir sus datos se encuentran invertidos, por lo que es fácil localizar y leer. En la Figura 2.9 se encuentra ilustrada esta trama. [11]

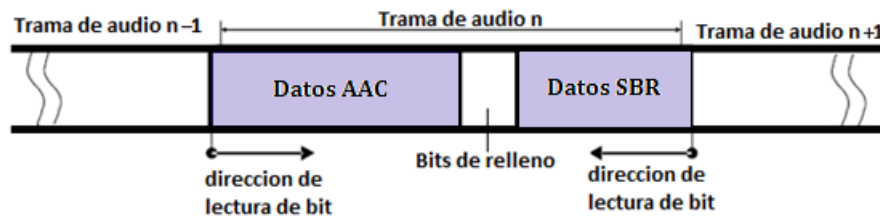


Fig. 2.9 Trama AAC+SBR.

SBR toma el audio que se encuentra en las frecuencias más altas, los cuales pueden ser:

- Ruido (sonidos agudos).
- Periódicos (sonidos de trasfondo en voz o armónicos).

El proceso antes mencionado analiza las bandas superiores de frecuencia, y prepara información guía basándose en esto. Posteriormente, el codificador extrae la banda superior y procede a realizar la codificación del audio.

En el receptor se realiza un proceso inverso, reconstruye la banda superior a partir de la información lateral enviada y la une con la señal decodificada. De esta manera se obtiene una calidad de audio superior a la que entregaría únicamente el codificador AAC.

2.9 Ocultamiento de Error en AAC

Existen varias pruebas de error, empezando con los códigos CRC y una variedad de métodos de verificación, si alguno de estos falla, el ocultamiento es aplicado de la misma manera que si existieran datos de trama corruptos.

Esta función trabaja en los datos espectrales justo antes de la conversión final hacia el dominio del tiempo. En caso de que una sola trama este dañada, el ocultamiento interpola entre la trama anterior y la siguiente para crear datos espectrales para la trama perdida.



2.10 Multiplexación

La trama a transmitir se conoce como DRM multiplexado (multiplex DRM), la cual está constituida por tres canales: Main Service Channel (MSC - canal de servicio principal) para datos de los servicios, el Fast Access Channel (FAC - canal de acceso rápido) proporciona datos sobre el ancho del canal y parámetros que ofrecen la selección de información para un escaneo rápido de la transmisión y el Service Description Channel (SDC - canal de descripción de servicio) proporciona información de cómo decodificar el MSC, como encontrar fuentes alternativas a los mismos datos y da los atributos de los servicios con el multiplexado. [11]

2.10.1 Main Service Channel (MSC)

Este canal contiene los datos de todos los servicios contenidos en el multiplexado DRM, puede llevar de 1 a 4 servicios los cuales pueden ser de datos o audio. Estos servicios pueden ser transmitidos tanto de forma síncrona como asíncrona. La tasa de bits de transmisión de este canal depende del ancho de banda elegido en cada modo de transmisión.

2.10.1.1 Estructura del MSC

Contiene entre 1 y 4 flujos de datos, cada uno de los cuales está dividido en tramas lógicas. Los flujos de audio pueden contener audio comprimido y, opcionalmente, mensajes de texto. Los flujos de datos están constituidos por paquetes de datos que llevan información de hasta 4 sub-flujos.

Un servicio de audio comprende un flujo de audio y opcionalmente de 1 a 4 flujos o sub-flujos de datos. Un servicio de datos puede comprender un flujo o sub-flujo de datos, en la Figura 2.10 se ilustra la manera en la que pueden formarse estos servicios. [11]

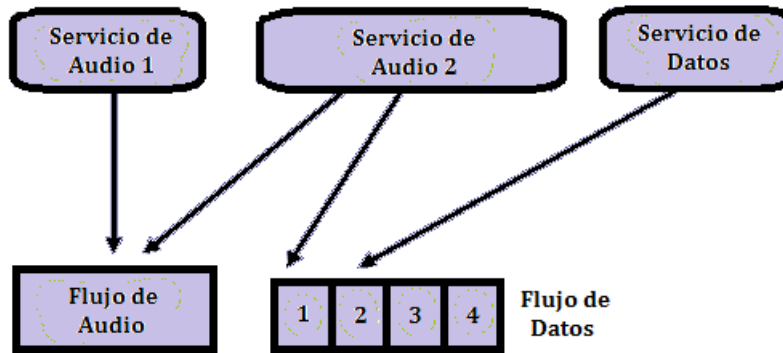


Fig. 2.10 Servicios del Main Service Channel (MSC).

Cada trama lógica consiste de dos partes las cuales cuentan con su propio nivel de protección. El tamaño de cada una es asignado independientemente, proporcionando una protección contra errores desigual (UEP).

Para los modos de robustez A, B, C y D las tramas lógicas tienen una longitud de 400 ms. Si el flujo contiene audio, la trama lógica lleva los datos de una supertrama de audio.

Las tramas lógicas de todos los flujos son mapeadas en las tramas de multiplexación de la misma duración que luego son pasadas a la codificación del canal. La configuración de la multiplexación se la realiza mediante la señalización del canal Service Description Channel (SDC).

2.10.1.2 Construcción del Canal MSC

El canal MSC consiste de una secuencia de tramas multiplexadas, si se usa modulación jerárquica también se debe incluir una secuencia jerárquica de tramas las cuales son pasadas por separado al codificador del canal.

2.10.1.3 Tramas Multiplexadas

Las tramas multiplexadas se construyen colocando las tramas lógicas de cada flujo no jerárquico juntas. Estas tramas se construyen tomando los datos de la parte con protección más alta de las tramas lógicas del flujo empezando con la



numeración más baja, continuando hacia la numeración más alta, hasta que todos los flujos son transferidos. Posteriormente, se realiza el mismo proceso para las partes con protección más baja del flujo. La parte con protección más alta se la denomina parte A y con la protección más baja se denomina parte B. La capacidad de las tramas multiplexadas es mayor o igual a la suma de las tramas lógicas de las que están formadas. El espacio que sobre en estas tramas se las debe llenar con bits de relleno, los cuales consisten en una sucesión de ceros lógicos.

2.10.1.4 Mensajería de Texto

Los mensajes de texto son un elemento adicional a un servicio de audio, es una parte básica del sistema DRM y no consume mucha capacidad de datos. Al ser un servicio opcional, esta capacidad puede ahorrarse si el proveedor de servicio DRM decide no usar la mensajería.

2.10.1.5 Estructura de la Mensajería de Texto

Cuando esté presente el servicio de mensajes de texto, este ocupara los últimos 4 bytes de la parte menos protegida de cada trama lógica que transporta secuencias de audio. De esta manera el mensaje es dividido en varios segmentos empleándose la codificación de caracteres UTF-8 (8-bit Unicode Transformation Format). Los mensajes pueden comprender hasta 8 segmentos, siendo transmitido un segmento por trama lógica. Cada segmento compuesto por un encabezado, un cuerpo y un CRC.

El cuerpo del mensaje se codificara como una cadena de caracteres (máximo 16). El CRC del mensaje de 16 bits se calculara en el encabezado y el cuerpo, usando el polinomio generador:



$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

2.10.1.6 Ejemplo del Mapeo de Tramas Lógicas en la Trama Multiplexada

En este ejemplo se tiene dos servicios, uno de audio (A) y otro de datos (D), además el servicio de audio lleva datos de aplicación como sigue:

- Servicio A: Consta de dos flujos, los datos de audio (flujo 0) y los datos de aplicación (flujo 1).
- Servicio D: Consta de un flujo de datos (flujo 2).

Los niveles de protección en los que cada flujo es colocado se ilustran en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4 Niveles de Protección de Cada Flujo de la trama multiplexada.

Parte A		Parte B	
Nivel de protección 0		Nivel de protección 1	
Flujo 0	Flujo 2	Flujo 0	Flujo 1
266 bytes	19 bytes	798 bytes	59 bytes

En la Figura 2.11 se ilustra la trama multiplexada generada. [11]

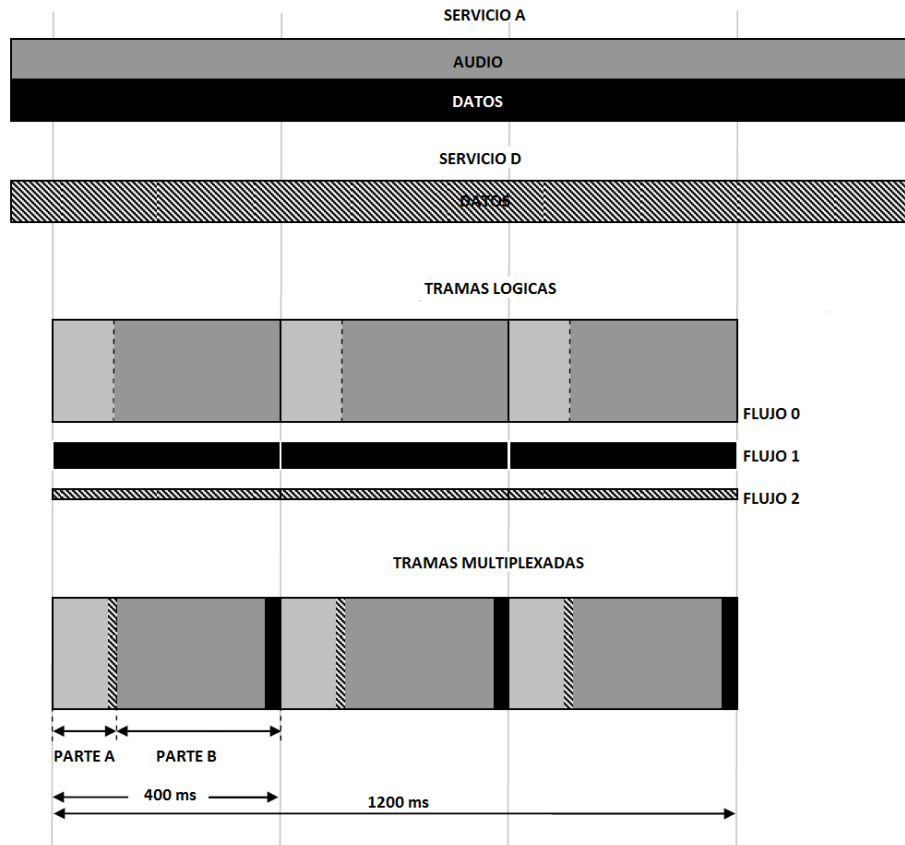


Fig. 2.11 Tramas Multiplexadas.

2.10.2 Fast Access Channel (FAC)

Este canal lleva información de los parámetros necesarios para la demodulación y selección de información para un escaneo de frecuencia rápido. Es el primer componente que el receptor tiene que decodificar antes de proceder a los demás y contiene la información más sensible para la sincronización del sistema por lo cual tiene la modulación más robusta de 4 QAM. Debido a la complejidad relativamente baja de la modulación, este canal no es entrelazado en el tiempo como el MSC y el SDC, asegurando así que el receptor se demore lo mínimo posible en obtener los datos del canal.

El canal FAC también entrega información sobre el ancho de banda de la señal y de los servicios disponibles. La información del ancho de banda incluye la ocupación del espectro y la profundidad del entrelazado, para que el receptor

pueda realizar la decodificación eficazmente. En caso de que la decodificación del SDC y el MSC fallara por causa de algún desvanecimiento, el FAC puede mantener la sincronización en la recepción, minimizando el tiempo de recuperación del servicio.

2.10.2.1 Estructura del FAC

Cada trama transmitida contiene un bloque FAC de 400 ms, el canal está constituido por parámetros de servicio (44 bits), parámetros de canal (20 bits) y bits CRC (8 bits) con una longitud total de 9 bytes esto se ilustra en la Figura 2.12. [11] Los parámetros de servicio son transportados en tramas FAC sucesivas, un servicio por cada trama. Cuando más de un servicio se transmite en la multiplexación, se requieren varios bloques FAC para describir todos los servicios.

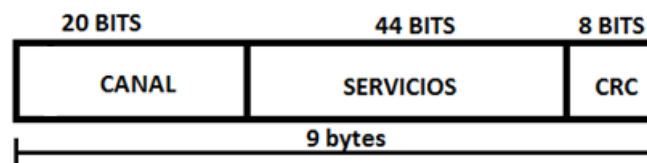


Fig. 2.12 Estructura del Fast Access Channel (FAC)

Los parámetros de canal son los encargados de llevar datos de información general sobre el modo de operación del sistema, el ancho de banda usado y el modo en que está trabajando el MSC y el SDC. Los parámetros de servicio son los encargados de especificar información sobre el tipo de servicio de audio que el sistema está ofreciendo ya sea el lenguaje de la transmisión, el tipo de programa, etc.

2.10.3 Service Description Channel (SDC)

Una vez que la información del FAC ha sido demodulada, el receptor puede comenzar la decodificación del SDC. Los datos del SDC siempre son



entrelazados para así aumentar su resistencia a desvanecimientos. En los datos que lleva el SDC se puede lograr la verificación de frecuencias alternativas para los mismos servicios de audio, por lo que los datos de este canal tienen que ser manejados con cuidado.

Este canal da información sobre como decodificar el MSC, como encontrar fuentes alternativas de los mismos datos y da atributos a los servicios transportados en el multiplexado. La capacidad del canal varía dependiendo del espectro ocupado, el uso del índice AFS, entre otros parámetros. El canal siempre usa una modulación menos compleja que la que usa el MSC por consiguiente si este último emplea 64 QAM, el SDC empleara 16 QAM o en caso de que el MSC emplee 16 QAM el SDC empleara 4 QAM.

Este canal cuenta con protección variable en contra de errores ya que lleva información sensible sobre como decodificar los servicios, los parámetros que describen este proceso deben tener una mayor protección.

2.10.3.1 Estructura

La cantidad total de datos a ser enviados puede requerir que sea transmitido en más de un solo bloque SDC. Este bloque, ilustrado en la Figura 2.13 [11], está contenido en la transmisión de una supertrama de 1200 ms y se compone de:

- Índice AFS de 4 bits
- Campo de datos n bits (entidades de datos de tamaño variable)
- CRC 16 bits



Fig. 2.13 Estructura del Service Description Channel (SDC).

Índice AFS: Es un número binario sin signo en el rango de 0 a 15 que indica el número de supertramas transmitidas y separa el bloque SDC del siguiente con contenido idéntico, este índice debe ser idéntico en todos los bloques SDC.

Campo de datos: Contiene un número variable de entidades de datos, su longitud depende del modo de robustez, ilustrado en la Tabla 2.5. [11]

Tabla 2.5 Longitud del Campo de Datos del Service Description Channel.

Modo de Robustez	Modo SDC	Longitud del campo de datos (Bytes)					
		Ocupación del espectro					
		0	1	2	3	4	5
A	0	37	43	85	97	184	207
	1	17	20	41	47	91	102
B	0	28	33	66	76	143	161
	1	13	15	32	37	70	79
C	0	-	-	-	68	-	147
	1	-	-	-	32	-	72
D	0	-	-	-	33	-	78
	1	-	-	-	15	-	38
E	0	113	-	-	-	-	-
	1	55	-	-	-	-	-

CRC: Al igual que en el FAC se utiliza la verificación por redundancia cíclica, el código CRC de 16 bits se calcula a partir del índice AFS y del campo de datos, usando el siguiente polinomio generador:

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$



Relleno: Este campo contiene de 0 a 7 bytes para completar la transmisión de una supertrama. La longitud depende del modo de robustez, modo SDC y la ocupación del espectro. Los bits de relleno se los debe establecer en ceros lógicos, los cuales serán ignorados por el receptor.

2.10.3.2 Entidades de Datos

El campo de datos se encuentra compuesto de entidades de datos, donde cada entidad consta de 12 bits de cabecera y un cuerpo de longitud variable. La cabecera, ilustrada en la Figura 2.14 [11], tiene el siguiente formato:

- **Longitud del cuerpo:** Formado por 7 bits, da el número de bytes ocupados por el cuerpo de la entidad de datos.
- **Bandera de versión:** Formado por 1 bit que controla la administración de datos en el receptor.
- **Tipo de identidad de datos:** Formado por 4 bits que determina el número de identidades de datos.

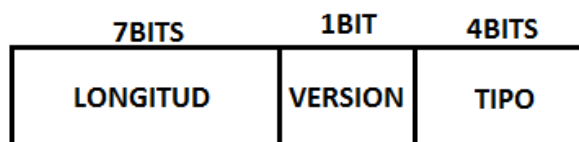


Fig. 2.14 Cabecera de una Entidad de Datos del Service Description Channel (SDC).

Existen un total de 16 entidades de datos de diferente índole, mostradas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Tipos de Entidades del Service Description Channel (SDC)

Tipo de entidad	Nombre de Entidad	Descripción
Tipo-0	Descripción del Multiplexado.	Describe información sobre el multiplexado.



Tipo-1	Etiqueta de Identidad	Utilizado para realizar un desplegado rápido de información.
Tipo-2	Parámetros de Acceso Condicional	Genera un acceso condicionado a los parámetros a ser enviados.
Tipo-3	Señalización de Frecuencia Alternativa: Red de Información de Múltiples Frecuencias	Entrega información a los receptores sobre frecuencias DRM donde los servicios enviados pueden ser encontrados.
Tipo-4	Señalización de Frecuencia Alternativa: Definición de Horario	Transmite un horario de frecuencias.
Tipo-5	Información de Aplicación	Entidad que describe todos los servicios de datos.
Tipo-6	Anuncio de Soporte y Conmutación	Indica los tipos de anuncios.
Tipo-7	Señalización de Frecuencia Alternativa: Definición de Región	Define las áreas geográficas para las cuales un conjunto de frecuencias alternativas están disponibles.
Tipo-8	Fecha y Hora	Define la fecha y la hora.
Tipo-9	Información de Audio	Descripción de los parámetros de decodificación de audio.
Tipo-10	Parámetros del Canal FAC	Indica la siguiente configuración de los parámetros del canal FAC.
Tipo-11	Señalización Alternativa de Frecuencia: Otros Servicios de Datos	Señalización de fuentes alternativas para un servicio DRM sintonizado.
Tipo-12	Lenguaje y País	Señaliza información sobre el país y el lenguaje que usa la transmisión.
Tipo-13	Señalización de Frecuencia Alternativa: Definición Detallada de Región	Permite la definición de áreas geográficas donde un conjunto de frecuencias alternativas es permitido.
Tipo-14	Parámetros FEC para el Flujo de Paquetes	Los parámetros FEC para los paquetes son descritos por esta entidad.
Tipo-15	Extensión	Esta entidad permite que más entidades sean definidas.



2.10.3.3 Cambio de Tipo de Contenido del Canal SDC

El contenido del canal SDC es importante para la operación de AFS (Alternative Frequency checking and Switching). Para este propósito el índice AFS es enviado en el canal SDC y posteriormente el canal FAC valida este índice usando el campo de identidad.

En transmisiones sin frecuencias alternativas, el contenido del canal SDC puede ser completamente dinámico y alterable sin la necesidad de un índice AFS.

En transmisiones con frecuencias alternativas, la asignación de entidades de datos al bloque SDC debe ser realizada con cuidado, con la finalidad de que el contenido SDC sea lo más estático posible.

2.10.3.4 Señalización de Reconfiguración

La trama multiplexada DRM en el canal MSC, puede ser reconfigurada en los extremos de la transmisión de una supertrama. La reconfiguración de la trama multiplexada DRM debe ser señalizada en el SDC para permitir al receptor realizar las mejores decisiones sobre como manejar los cambios.

Existen dos tipos de reconfiguración: una reconfiguración de servicios y una reconfiguración del canal. Todos los tipos de entidades de datos que usan la reconfiguración están presentes en la configuración actual del sistema y los mismos son necesarios para la nueva configuración.

2.10.3.5 Reconfiguración de Servicios

La reconfiguración de servicios es necesaria cuando la capacidad del MSC es reestructurada entre sus servicios. Esto sucede cuando el número de servicios o el tamaño de los flujos enviados cambian. La reconfiguración debe ser

enviada con la mayor anticipación posible con la finalidad de que el receptor obtenga toda la información necesaria para la nueva configuración.

Si el servicio seleccionado es descontinuado en la reconfiguración, entonces el receptor debe tratar de encontrar otra fuente o frecuencia de ese servicio usando información de las entidades de datos tipo 3 y 11.

2.10.3.6 Reconfiguración de Canal

Esta reconfiguración se da cuando uno o más parámetros del canal FAC son alterados, tales como: la ocupación del espectro, la profundidad de entrelazado, el modo MSC o el modo de robustez. Como ya se mencionó, la reconfiguración se debe hacer con la mayor anticipación posible para que el receptor tenga toda información necesaria. Si la transmisión es descontinuada en la frecuencia sintonizada, entonces la reconfiguración debe ser señalizada en la entidad de datos tipo 10. En este caso específico las entidades con mecanismos de reconfiguración para la bandera de versión no deben ser señalizadas.

2.11 Codificación de Canal y Modulación

2.11.1 Introducción

El estándar DRM consta de tres canales lógicos, el MSC, SDC y FAC. Cada canal tiene distintas necesidades por lo que se aplican diferentes esquemas de codificación y de mapeo. Una revisión del proceso de codificación se muestra en la Figura 2.17. [11]



Fig. 2.15 Proceso de Codificación DRM.



Los parámetros, como el tipo de constelación QAM y las tasas de código, que pueden ser implementadas en cada uno de los canales del estándar DRM se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Tasas de Código y Constelaciones para los Canales DRM.

Canal	Constelación	Tasas de Código
FAC	4 QAM	0.6
SDC	4 / 16 QAM	0.5
MSC	16 QAM	0.5 / 0.62
	64 QAM	0.5 / 0.6 / 0.71 / 0.78

La codificación está basada en un esquema de codificación multinivel (MLC), logrando así que la codificación de canal y la modulación sean optimizadas de manera conjunta. La codificación multinivel logra asegurar que los componentes más críticos de la trama multiplexada tengan mayor tolerancia a distorsiones en la propagación que los componentes menos sensibles.

DRM implementa la Modulación de Amplitud en Cuadratura, o QAM por sus siglas en inglés. Las posiciones de bits más propensos a tener errores en el esquema QAM consiguen mayor protección. El sistema necesita, para una decodificación satisfactoria de la señal, que siempre exista una diferencia resultante en las relaciones de señal a ruido en los canales MSC y SDC. Esta diferencia se consigue cuando el MSC usa 64-QAM y el SDC usa 16-QAM, de la misma manera cuando el MSC usa 16-QAM y el SDC usa 4-QAM.

Debido a las diferentes necesidades de protección contra errores dentro de un servicio o para diferentes servicios dentro de distintos esquemas de mapeo, multiplexación y combinación de tasas de código se aplica: Protección desigual de errores (UEP) y protección igual de errores (EEP), las cuales pueden ser combinadas en modulación jerárquica (usada en 64-QAM). La técnica de EEP



usa una única tasa de código para proteger todos los datos en el canal, siendo obligatoria su uso en los canales FAC y SDC. Mientras que la técnica UEP usa dos tasas de código, de esta forma permitiendo a los datos del MSC que sean asignados a la parte más protegida y a la parte menos protegida de la trama multiplexada DRM. [9]

Cuando se usa un esquema de modulación jerárquica se pueden aplicar tres estrategias de mapeo en el MSC: Mapeo Estándar (SM), Mapeo Jerárquico simétrico (HMsym) y una mezcla de las dos previas HMmix que resulta en el componente real de la constelación siguiendo el HMsym y la parte imaginaria siguiendo el SM. El mapeo jerárquico divide el flujo de datos decodificables en dos partes: una parte fuertemente protegida (VSPP) y una parte con protección estándar (SPP). El mapeo SM solamente consiste en SPP. En cualquiera de los casos, se debe aplicar hasta dos diferentes tasas de código a la codificación del SPP del canal MSC. Para el FAC y el SDC solamente se permite usar SM. Esto es resumido en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Tipo de Protección y Estrategia de Mapeo de los Canales DRM.

	MSC	FAC	SDC
Tipo de Protección	UEP	EEP	EEP
Estrategia de Mapeo	SM HMsym HMmix	SM	SM

2.11.2 Dispersión de Energía

El propósito de la dispersión de energía es evitar la transmisión de patrones sistemáticos de señal, los cuales puedan resultar en una regularidad no deseada en la señal transmitida. Para los canales SDC y FAC, la salida de la



dispersión de energía debe formar el flujo de entrada u_i para la correspondiente codificación de multinivel.

La salida de la dispersión de energía de la trama multiplexada MSC debe formar el flujo protegido estándar u_i para el proceso de codificación de multinivel para el MSC.

La dispersión de energía se realiza a través de un complemento de bits selectivos determinísticos mediante la adición en modulo-2 (XOR) de una secuencia Pseudo-Aleatoria Binaria (PRBS, Pseudo-Random Binary Sequence).

El PRBS puede ser generado mediante un registro de cambio de retroalimentación lineal (LFSR, Linear Feedback Shift Register) el cual dependiendo del número de registros que posea, genera el PRBS. [17]

2.11.3 Codificación Multinivel

El proceso de codificación de canal es basado en un esquema de codificación multinivel. El principio de la codificación multinivel es la optimización conjunta de la codificación y la modulación para alcanzar el mejor rendimiento en la transmisión. Esto denota que los bits más propensos a tener errores en el mapeo QAM tendrán una mayor protección. Los distintos niveles de protección son alcanzados con diferentes componentes de código los cuales son realizados con códigos convolucionales perforados, derivados del mismo código matriz base.

2.11.3.1 Códigos Convolucionales

Son códigos correctores de error que tienen capacidad de memoria, esto es que la codificación en un momento dado no dependerá solo de la palabra a



codificar, sino también de las palabras codificadas anteriormente. Este tipo de codificación es especialmente útil en canales con altas distorsiones.

La codificación de una palabra de información varía en función de las palabras transmitidas anteriormente, el número de palabras previamente transmitidas es denominada memoria m del código. Teniendo en cuenta un código convolucional C se tienen tres parámetros:

- k : Número de bits de la palabra de datos que se codifica en cada paso.
- n : Número de bits de la palabra codificada a partir de k bits.
- L : Restricción de distancia, $L = m + 1$. Es el número de fases en las que una palabra ejerce influencia sobre la salida.

La tasa del código está definida por:

$$r = \frac{\text{Bits que se codifican}}{\text{Bits enviados}} = \frac{k}{n}$$

Generalmente los bits son codificados uno a uno, por lo que se tiene que $k = 1$ y $r = \frac{1}{n}$. Esto permite transmitir grandes tasas de bits cuyas salidas serán combinadas de forma preestablecida en la codificación. [18]

La implementación de un codificador convolucional se lo puede realizar mediante circuitos secuenciales lineales (registros de cambio). Usando L registros cuyas salidas se sumen de forma que se obtenga una palabra de código para cada entrada. Con la entrada de una nueva palabra a codificar las anteriores se desplazan al siguiente registro, obteniendo así una nueva palabra codificada.

Los polinomios generadores del código se obtienen con los coeficientes de las secuencias generadoras, siendo así polinomios de grado m . Estos polinomios pueden ser representados en su forma octal, como observa en la Figura 2.18.

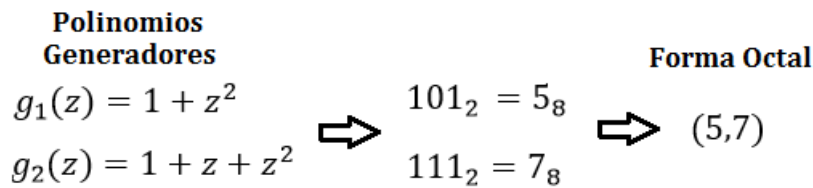


Fig. 2.16 Representación Octal de los Polinomios Generadores de Códigos Convolutionales.

La decodificación consiste en encontrar las palabras de código correspondientes a la secuencia recibida. Como en el canal de transmisión pudieron existir errores, se buscará la palabra más probable. Esta palabra será aquella para la que la distancia de Hamming (diferencia entre una palabra válida de código y otra) entre su salida y la secuencia recibida sea menor.

Una mejora aplicable a este tipo de codificación son los códigos perforados, mediante esta técnica se eliminan algunos de los bits de la salida de forma que no sean enviados al canal de transmisión. De esta manera se puede conseguir un código de mayor tasa, sacrificando la capacidad correctora del mismo. Un código perforado puede ser definido por una matriz cuyos elementos son 1 si se debe enviar el bit correspondiente o 0 en el caso contrario. [18]

2.11.4 Modulación QAM

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es un tipo de modulación digital en la cual la información a ser enviada está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida. Esto es posible modulando los datos en una misma portadora desfasada 90 grados entre mensajes, de esta manera se forman dos canales ortogonales en fase (I) y en cuadratura (Q) con el mismo ancho de banda consiguiendo así una mejora de eficiencia en el uso del espectro. El diagrama de bloques de la modulación QAM es mostrado en la Figura 2.19. [19]

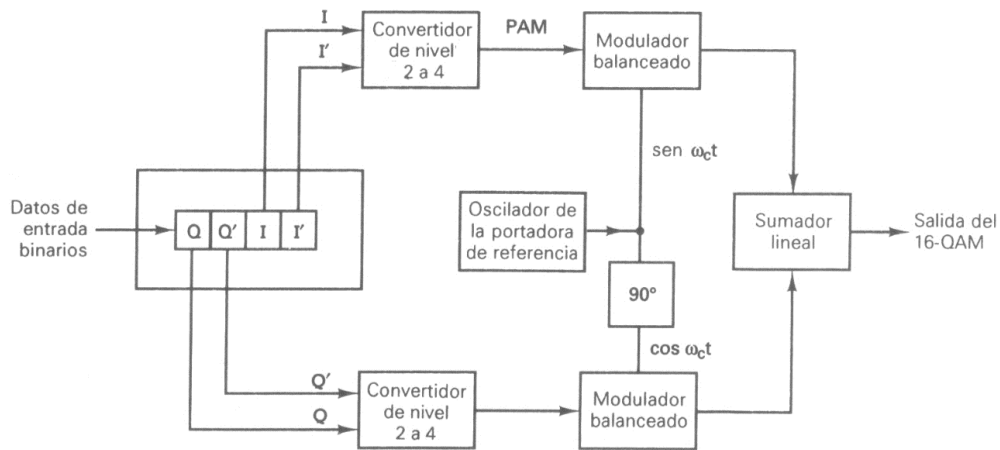


Fig. 2.17 Diagrama Lógico de la Modulación Digital 16-QAM.

La modulación digital QAM tiene como ingreso un flujo de datos binarios, los cuales son divididos por un convertidor serie/paralelo para generar N estados de modulación, de aquí se puede tener la terminología de N-QAM. Los estados de modulación posibles son representados por los diagramas de constelación, los puntos de la constelación son ubicados con igual separación vertical y horizontal. Las comunicaciones digitales al tener combinaciones de 1 y 0, el número de puntos de la constelación es una potencia de dos. Ejemplos de los diagramas de constelación más usados se pueden apreciar en la Figura 2.20.

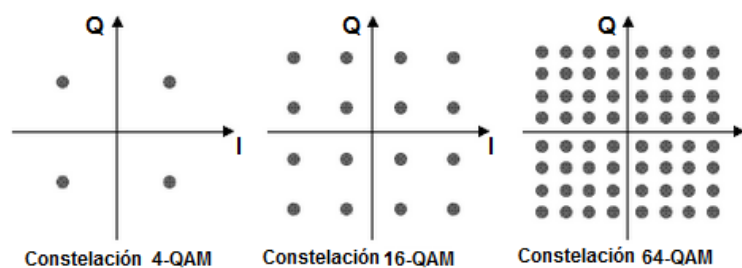


Fig. 2.18 Constelaciones QAM.

Generalmente el número de N estados de modulación en QAM es un número cuadrado por lo que los esquemas más usados son 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM. Mientras más alta sea la constelación de la modulación, se podrán transmitir más bits por célula QAM. Pero la energía promedio



enviada al ser la misma, los símbolos tienen que ser más cercanos unos a los otros aumentando así la susceptibilidad al ruido y a las distorsiones. [4]

2.11.5 Aplicación de la Codificación a los Canales

2.11.5.1 Codificación del MSC

El canal MSC puede usar los esquemas de mapeo 64-QAM o 16-QAM en modo de robustez A, B, C, D y mapeo 16-QAM o 4-QAM en modo de robustez E. Para todos los modos de robustez, una mayor constelación provee alta eficiencia espectral mientras que una menor constelación provee una robustez mayor a los errores.

En cada caso, un rango de tasas de código está disponible para proveer el nivel de corrección de errores más apropiado para cada transmisión dada. Las combinaciones disponibles de constelación y tasa de código proveen un gran grado de flexibilidad sobre un amplio rango de canales de transmisión. UEP puede ser usado para proveer dos niveles de protección para el MSC. Para el caso de 64-QAM, modulación jerárquica puede ser usada para proveer un tercer nivel de robustez a errores para una parte del MSC. [11]

2.11.5.2 Codificación del SDC

El canal SDC puede usar mapeo sea 16-QAM o 4-QAM con una tasa de código de 0.5 para modos de robustez A, B, C y D y mapeo 4-QAM con una tasa de código de 0.5 o 0.25 para modo de robustez E. En cada modo de robustez se tiene la opción, entre mayor capacidad o más robustez en rendimiento de error. En cada caso una tasa de código fija es aplicada.

La constelación y la tasa de código deben ser elegidas con respecto a los parámetros del MSC para proveer más robustez para el SDC que para el MSC.



2.11.5.3 Codificación del FAC

El canal FAC debe usar un mapeo 4-QAM con una tasa de código de 0.6 para modos de robustez A, B, C y D o mapeo 4-QAM con una tasa de código de 0,25 para el modo de robustez E.

2.11.6 Entrelazado de Células MSC

La mayoría de sistemas que utilizan métodos de corrección de errores sin un canal de retorno para la información, tienen la necesidad de utilizar técnicas de entrelazado. El entrelazado consiste en organizar la información digital de forma no contigua para así mejorar las prestaciones del sistema, protegiendo de mejor manera la información de los errores de ráfaga (Burst Errors). Este tipo de errores afectan a información digital consecutiva invalidando la capacidad correctiva de los códigos de redundancia usados. Estos efectos pueden ser observados en la Figura 2.21.

Mensaje sin error:	aaaabbbbccccddddeeeeffffgggg
Mensaje con error de ráfaga:	aaaabbbbccc___deeeeffffgggg
Entrelazado:	abcdefgabcdefgabcdefgabcdefg
Transmisión con error de ráfaga:	abcdefgabcd___bcdefgabcdefg
Desentrelazado:	aa_abbbbccccdddde_eef_ffg_gg

Fig. 2.19 Representación de los Errores de Ráfaga.

Un buen entrelazado de células debe ser aplicado a los símbolos QAM (células) del MSC después de codificación multinivel. Para modos de robustez A, B, C y D existe la posibilidad de elegir la profundidad del entrelazado alto o bajo (denotado como entrelazado corto o largo) de acuerdo con las condiciones de propagación predichas existentes. Para el modo de robustez E solo una profundidad de entrelazador es permitida, la cual corresponde al algoritmo para



la profundidad alta de entrelazado. Los parámetros de entrelazador básico son adoptados al tamaño de la trama multiplexada.

Para canales de propagación menores a 30MHz con comportamiento moderado selectivo en el tiempo (típica propagación de onda terrestre en LF y MF) el entrelazado corto provee suficiente tiempo y diversidad de frecuencia para una operación correcta del proceso de decodificación en el receptor.

Los desvanecimientos selectivos pueden afectar a grupos de portadoras próximas, mientras que los desvanecimientos uniformes pueden degradar simultáneamente todas las portadoras de un símbolo OFDM. Por esta razón DRM usa entrelazadores tanto en tiempo como en frecuencia.

Para canales severamente selectivos en tiempo y frecuencia (propagaciones de onda corta en HF), la profundidad de entrelazado puede aumentarse, minimizando los tiempos de transferencia de datos de audio totales.

El estándar DRM agrupa en tramas los datos de audio, el retardo total que produce el proceso de entrelazado/desentrelazado es de aproximadamente 800 ms, para el entrelazado corto. Para el caso del entrelazado largo este tiempo es de aproximadamente de 2.4 s. Adicionalmente este retardo se incrementa durante la transmisión debido a que al inicio de las supertramas de transmisión se inserta el bloque del canal SDC. [11]

2.11.7 Modulación COFDM

La mayor parte de las interferencias producidas durante la recepción móvil de señales son causadas por la propagación multitrayecto, esto es que la señal que recibe el receptor en su antena es el resultado de una sumatoria de la señal transmitida y de sus reflexiones en los objetos que encuentre en su

camino, este efecto es ilustrado en la Figura 2.22. Las diferencias de amplitud y fase de las reflexiones causan las interferencias en la señal a recibir. [20]

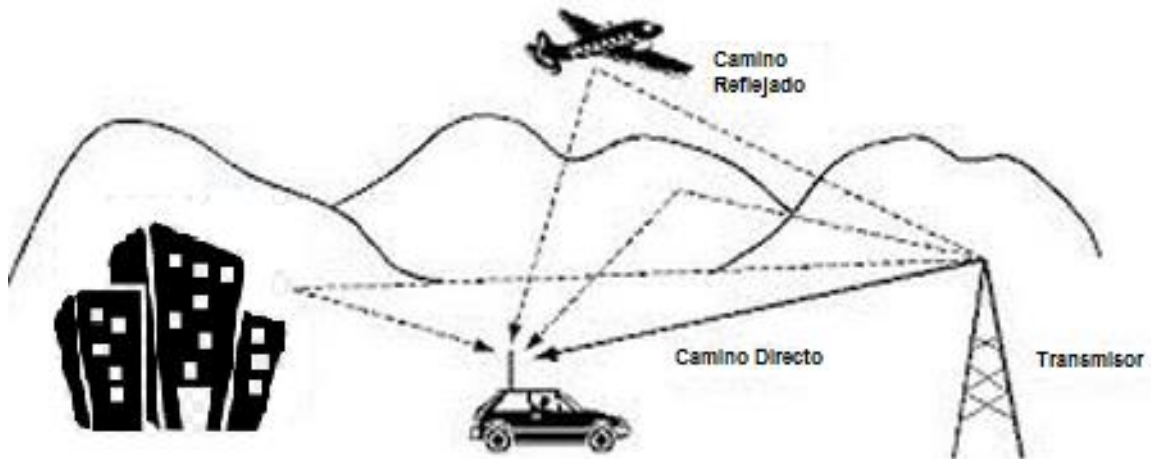


Fig. 2.20 Interferencias Producidas por MultiTrayecto.

El estándar DRM usa la modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex), que funciona usando la modulación OFDM en combinación con la codificación multinivel (MLC). COFDM surge para resolver el problema de las interferencias ocasionadas por el multitrayecto, utiliza modulación QAM para distribuir la información codificada en células y a su vez las células son colocadas en paralelo sobre un gran número de portadoras. Una propiedad importante es que estas portadoras son ortogonales entre sí, por lo que aunque existan solapamientos entre sí, sus espectros no se interferirán. [21]

Un problema común al usar esta modulación es la interferencia entre símbolos (ISI) que es producida en el receptor al recibir ecos del símbolo OFDM anterior sobre el último transmitido. Esto es solucionado al introducir un retardo en la transmisión de símbolos nuevos en el transmisor. Este retardo es llamado tiempo de guarda. [20]

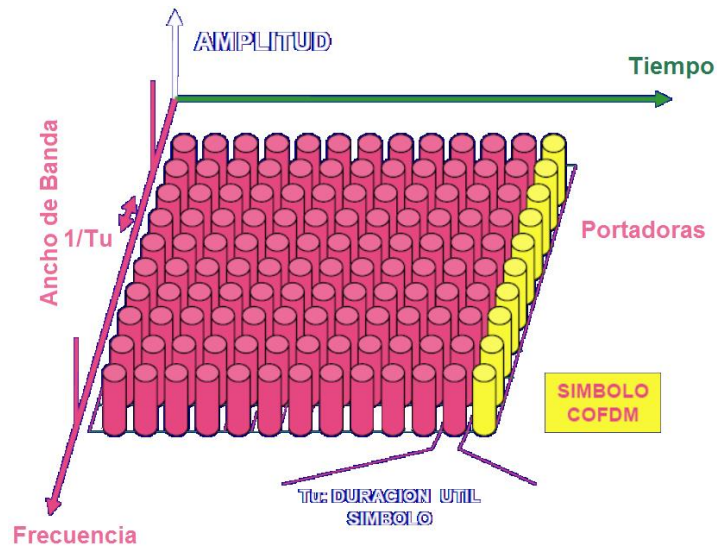


Fig. 2.21 Parámetros COFDM.

La señal transmitida es organizada en supertramas de transmisión, cada supertrama consiste en tres tramas que a su vez consisten en un cierto número de símbolos OFDM, como se puede ver en la Figura 2.23 [12], definido por el modo de robustez usado. Cada trama transmitida es de duración T_f . La trama de transmisión OFDM contiene celdas de datos (MSC), celdas de control y celdas piloto para sincronización. Las celdas de control consisten en los canales FAC y SDC, el SDC es repetido en cada supertrama de transmisión, esto se puede apreciar en la figura 2.24. [11]

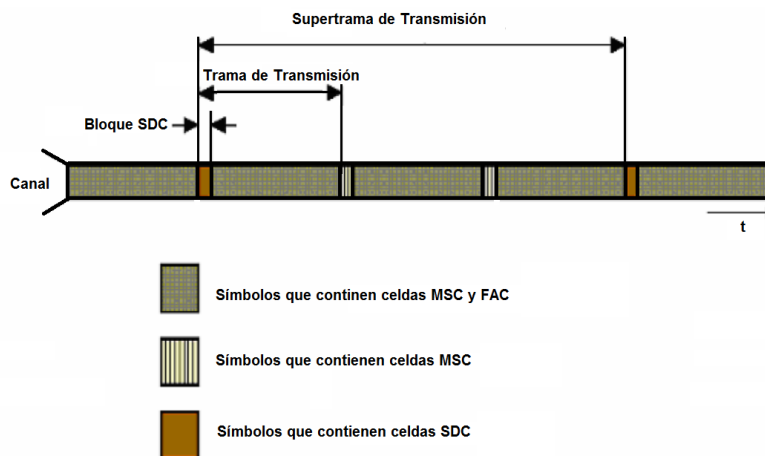


Fig. 2.22 Supertrama de Transmisión DRM.



Las sub-portadoras individuales son espaciadas en frecuencia de tal manera que la duración útil de los símbolos T_u impresa en las portadoras tenga un periodo $F_u = 1/T_u$. De esta manera, la duración del símbolo OFDM es la suma de la duración útil de los símbolos (T_u) y el tiempo de guarda (T_g). [22]

Los parámetros OFDM deben de ser escogidos para compensar las condiciones de propagación y el área de cobertura deseada. Los conjuntos de parámetros OFDM para distintos modos y condiciones de propagación se listan en la Tabla 2.9. [11]

Tabla 2.9 Conjunto de Parámetros OFDM.

Modo de Robustez	Duración de T_u [ms]	Espacio entre portadoras ΔF [Hz]	Duración de intervalo de guarda T_g [ms]	Duración del símbolo $T_s = T_u + T_g$ [ms]	T_g/T_u	Numero de símbolos por trama N_s
A	24	$41^{2/3}$	2,66	26,66	1/9	15
B	21,33	$46^{7/8}$	5,33	26,66	1/4	15
C	14,66	$68^{2/11}$	5,33	20	4/11	20
D	9,33	$107^{1/7}$	7,33	16,66	11/14	24
E	2,25	$444^{4/9}$	0,25	2,5	1/9	40

La C de COFDM viene de la codificación FEC (Forward Error Correction) para la corrección de errores. La codificación añade redundancia, permitiendo detectar errores de transmisión y así poder corregirlos. Mediante el FEC se puede tener una tasa de error aceptable (BER, Bit Error Rate) con una relación señal a ruido (SNR) bastante baja.

DRM usa una demodulación coherente en el receptor. Para demodular cada una de las sub-portadoras, la respuesta del canal debe de ser determinada y aplicar una sincronización. Para este proceso, varias celdas piloto de referencia son ubicadas a lo largo de las secuencias de modulación. Estas celdas usan



características de frecuencia, de amplitud y de fase específicas, ocurriendo en una secuencia previamente definida. De esta forma el demodulador puede programarse para reconocer la secuencia piloto, sincronizando el receptor. Para los modos de DRM más robustos la proporción de las celdas piloto es aumentada para asegurar la demodulación exacta en los canales de propagación más difíciles. [22]

El efecto de dispersión Doppler es el principal factor que degrada una señal DRM. Este tipo de dispersión causa una variación de la frecuencia portadora en el receptor, se da cuando existe multitrayecto mientras el receptor y la fuente tengan una velocidad relativa entre sí. El efecto de dispersión Doppler es directamente proporcional al cambio de la velocidad relativa del receptor, si esta velocidad es suficientemente baja este cambio puede ser corregido en el mismo receptor. Pero a velocidades muy altas existe una pérdida de ortogonalidad en las portadoras OFDM que hace que el sistema falle. La velocidad máxima que el sistema puede soportar va a depender del modo de transmisión que se utilice.

Para prevenir las interferencias destructivas en el receptor es importante asegurarse que las reflexiones de la señal lleguen dentro del intervalo de guarda. Para poder contrarrestar los efectos Doppler, se debe usar un intervalo de guarda largo junto con grandes espaciamientos de frecuencia para las portadoras OFDM. Las ventajas de COFDM solo pueden obtenerse si los parámetros son escogidos de tal manera que se compensen los deterioros del canal de manera apropiada.



2.11.8 Células Piloto DRM

Las células piloto tienen dos propósitos en el sistema, pueden usarse para sincronización en tiempo y frecuencia, y para la estimación del canal. Se tienen tres tipos de células piloto:

- De referencia de ganancia.
- De referencia de frecuencia.
- De referencia de tiempo.

Las células piloto de referencia de ganancia son las más numerosas, usadas para la demodulación coherente son dispersadas equitativamente a lo largo de la dirección del tiempo y de frecuencia. Son usadas por el receptor para obtener una aproximación de la función de transferencia del canal.

Las células de referencia de frecuencia son usadas en el receptor para detectar la presencia de la señal recibida y poder estimar el desplazamiento en frecuencia que ésta tenga. Pueden ser usadas también para la estimación del canal y en procesos de rastreo de la señal.

Finalmente las células de referencia de tiempo son localizadas en el primer símbolo OFDM de cada una de las tramas de transmisión. Son usadas para la sincronización detectando el primer símbolo de la transmisión. También pueden ser usadas para la detección de desplazamiento de frecuencia. [11]

2.11.9 Células de Control DRM

El sistema DRM usa en sus transmisiones dos tipos de células de control, células FAC y células SDC.

- Las células FAC son integradas en cada una de las tramas de transmisión. Transmiten células QAM altamente protegidas en las cuales



llevan información necesaria para que el receptor pueda demodular de manera correcta la señal recibida.

- Las células SDC son repetidas en cada supertrama de transmisión y son las encargadas de transmitir información adicional que describe los servicios disponibles.



Universidad de Cuenca

Capítulo 3 Implementación del sistema Codificador DRM30

3.1 Introducción

En este capítulo se describe la implementación del sistema codificador DRM30, particularmente las fases de codificación mostradas en la Figura 3.1.

En adición a las etapas de codificación, se describe la implementación del bloque del receptor correspondiente al mapeo inverso QAM.

Es importante indicar que para garantizar independencia de plataforma de sistema operativo, la implementación del codificador se realizó usando el lenguaje de programación C++. Para las pruebas y depuración se utilizó compiladores para la plataforma Windows, sin embargo, los programas escritos podrían ser compilados para diferentes plataformas, con ligeras modificaciones.



Fig. 3.1 Diagrama del Sistema codificador DRM30

De acuerdo a lo indicado en la Figura 3.1, el canal MSC del codificador requiere como entrada un archivo de audio sin comprimir, es decir archivos en formato wave (.wav). Para los canales FAC y SDC, las entradas requeridas siguen el formato establecido por el estándar.

En este proyecto el codificador será implementado para el modo de funcionamiento B con un valor de Ocupación del Espectro igual a 3, lo que



Universidad de Cuenca

corresponde a un ancho de banda de 10kHz y utilizando únicamente EEP. Para el mapeo de los canales MSC, SDC, FAC se usará el mapeo estándar (SM) con 16-QAM para el MSC y 4-QAM para el SDC y FAC. Se utiliza el B ya que es uno de los modos usados para las bandas de AM en DRM30, el cual particularmente se especializa en canales selectivos en tiempo y frecuencia con retrasos en la propagación de la señal, condiciones típicas para servicios de onda ionosférica en las bandas de HF (Alta Frecuencia) y MF (Media Frecuencia).

El parámetro de 3 para Ocupación del Espectro provee una cantidad de información a procesar manejable en la codificación de cada uno de los tres canales lógicos. En este contexto, EEP es usado por su mayor sencillez de implementación y manejo.

3.2 Canal MSC

El canal principal MSC nos brinda diferentes opciones de servicios, ya sea audio o datos, que pueden ser transmitidos. Se implementará únicamente un servicio de audio sin texto ni datos, con lo cual este canal está conformado por una supertrama de audio multiplexada. La supertrama es la encargada de transportar los bloques AAC codificados para su respectiva reproducción en el receptor, la señalización correspondiente a cada uno de estos servicios se encuentra en la información del canal SDC.



Universidad de Cuenca

3.2.1 Calculo del Canal

El número de bits de los que está formada la trama multiplexada es denotado por L_{mux} . Para calcular el valor de L_{mux} se debe tomar en cuenta el modo de robustez, la ocupación del espectro y la constelación a utilizar.

Partiendo de los parámetros definidos para el canal MSC en la Sección 3.1, la fórmula para el cálculo de L_{mux} es la siguiente:

$$L_{mux} = L1 + L2 \quad (1)$$

Donde:

- $L1$: Es el número de bits de la Parte A (alta protección).
- $L2$: Es el número de bits de la Parte B (baja protección).

Al considerar un único nivel de protección con EEP el valor de $L1$ es cero, las ecuaciones para $L1$ y $L2$ son las siguientes:

$$L1 = \sum_{p=0}^{P_{max}-1} 2 * N1 * R_p \quad (2)$$

$$L2 = \sum_{p=0}^{P_{max}-1} R_{Xp} \left[\frac{2 * N2 - 12}{R_{Yp}} \right] \quad (3)$$

Donde:

- P_{max} es el número de niveles usados en la modulación QAM (4-QAM: $P_{max} = 1$;
16-QAM: $P_{max} = 2$; 64-QAM: $P_{max} = 3$).



Universidad de Cuenca

- RX_p es el numerador de las tasas de código de cada nivel individual.

Tomado de la Tabla 3.2

- RY_p es el denominador de las tasas de código de cada nivel individual.

Tomado de la Tabla 3.2

- R_p es la tasa de código de cada nivel individual. Tomado de la Tabla 3.2
- N_1 es el número de células OFDM usadas para la parte más protegida (Parte A).
- N_2 es el número de células OFDM usadas en la parte menos protegida (Parte B) incluyendo los bits de cola.

Cuando se usa dos niveles de protección (UEP), el número total de células OFDM por trama multiplexada para el MSC, N_{MUX} , se define de la siguiente manera:

$$N_{MUX} = N_1 + N_2 \quad (4)$$

Para calcular el número N_1 de células OFDM en la parte más protegida (parte A), en un esquema de mapeo estándar se usa:

$$N_1 = \left\lceil \frac{8X}{2RY_{lcm} \sum_{p=0}^{p_{max}-1} R_p} \right\rceil * RY_{lcm} \quad (5)$$

Donde:

- X : Número de bits en la parte más protegida (como se encuentren señalizados en el SDC).



Universidad de Cuenca

- RY_{lcm} : Tomado de la Tabla 3.2.
- [*]: Operación de redondeo al entero inmediatamente superior.
- R_p : Tasa de código de cada nivel individual.

Debido al uso de EEP, no existen bits en la parte más protegida, por lo tanto X es cero, y por consiguiente el valor de N1 es cero.

Para calcular el número de células OFDM en la parte menos protegida (Parte B), N_2 , se aplica:

$$N_2 = N_{MUX} - N_1 \quad (6)$$

Tomando en cuenta las siguientes restricciones:

$$N_1 \in \{0, \dots, N_{MUX} - 20\}$$

$$N_2 \in \{20, \dots, N_{MUX}\}$$

El valor de N_{MUX} se lo obtiene de la tabla 3.1. [11]

Tabla 3.1 Parametros QAM para el MSC.

Parámetros	Ocupación del Espectro					
	0	1	2	3	4	5
Número disponible de células MSC por supertrama (Nsfa)	2900	3330	6153	7013	12747	14323
Número útil de células MSC por supertrama (Nsfu)	2898	3330	6153	7011	12747	14322
Número de células MSC por trama	966	1110	2051	2337	4249	4774



Universidad de Cuenca

multiplexada (Nmux)						
Células perdidas por supertrama	2	0	0	2	0	1

Con lo cual:

$$N_2 = N_{MUX}$$

$$N_2 = 2.337$$

$$N_1 \in \{0, \dots, 2317\}$$

$$N_2 \in \{20, \dots, 2337\}$$

Para realizar el cálculo de L2 partimos de la Ecuación (3)

$$L2 = \sum_{p=0}^{P_{max}-1} RXp \left[\frac{2 * N2 - 12}{RYp} \right] = RX_0 \left[\frac{2 * N2 - 12}{RY_0} \right] + RX_1 \left[\frac{2 * N2 - 12}{RY_1} \right]$$

El MSC usara un mapeo de 16-QAM, con lo que P_{max} es dos y se debe obtener la correspondiente combinación de tasas de código de la tabla 3.2. [11]

Tabla 3.2. Tasas de Código para el MSC para mapeo 16-QAM.

Nivel de protección	Rall	R0	R1	RYlcm
0	0,5	1/3	2/3	3
1	0,62	1/2	3/4	4

Al considerar un solo nivel de protección se debe tener en cuenta solo el nivel 1 de la Tabla 3.2, con lo que los valores de RX0, RY0, RX1 y RY1 son obtenidos, ya que estos representan el numerador y denominador de R0 y R1 respectivamente por lo que: RX0=1, RY0=2, RX1=3 y RY1=4.

Así reemplazando en la Ecuación (3).



$$L2 = 1 \left[\frac{2 * (2337) - 12}{2} \right] + 3 \left[\frac{2 * (2337) - 12}{4} \right] = 2331 + 3495 = 5826$$

En consecuencia el número de bits por trama multiplexada para el canal MSC será:

$$L_{mux} = L1 + L2 = 0 + 5826 = 5826 \text{ bits} \approx 728 \text{ bytes}$$

3.2.2 Construcción del Canal

Una vez que se ha obtenido el número de bits por trama multiplexada disponemos de la longitud del canal MSC. Como se describió anteriormente el proyecto transportará únicamente un servicio de audio sin texto, por lo que el canal MSC estará conformado por una supertrama de audio la cual consta de:

- 6 bytes de cabecera: En los cuales se encuentran las longitudes de cada trama-AAC.
- 5 bytes que corresponden al CRC de cada trama.
- 717 bytes de carga útil de audio en la cual viajan las tramas-AAC

Esto nos da un total de 728 bytes por supertrama de audio y por canal MSC.

En el programa implementado se envían 5 bloques a la codificación, debido al modo de robustez usado y a la tasa de muestreo del audio de 12 kHz, con lo cual se obtienen 5 bloques comprimidos en AAC. Las longitudes de cada bloque comprimido son guardadas en un vector, el cual será posteriormente adicionado al canal. De manera equivalente el byte de CRC de cada trama es almacenado.



Universidad de Cuenca

Finalmente los bloques AAC son guardados teniendo en cuenta que quepan en la longitud del canal, caso contrario serán enviados a la siguiente supertrama.

3.2.2.1 Codificación de Fuente

La codificación de fuente o compresión de audio fue realizada con la librería de código abierto libfaac la cual es un compresor de audio AAC de acuerdo al estándar MPEG-2 y MPEG-4. [23] Libfaac posee las siguientes características:

- Portable.
- Razonablemente veloz.
- Soporta perfiles AAC-LC (Low Complexity), AAC-Main y AAC-LTP (Long Term Prediction).
- Soporta formatos contenedores ADTS, AAC y MP4.
- Soporta DRM a través del receptor DreaM.

Para el uso en programas compilados en C++ la librería cuenta con:

- El archivo de cabecera faac.h que contiene los prototipos de funciones.
- El núcleo del codificador reside en la librería estática libfaac.lib (Microsoft Windows) o libfaac.a (UNIX).

Esta librería cuenta con una serie de métodos necesarios para realizar la compresión, [24] los cuales deben ser llamados en la secuencia expuesta a continuación:

- faacEncOpen(): Este método crea una instancia del codificador.



Universidad de Cuenca

- `faacEncGetCurrentConfiguration()` y `faacEncSetConfiguration()`: Estos métodos se deben llamar para obtener la configuración actual del codificador y posteriormente establecer la configuración deseada.
- `faacEncEncode()`: Este método se debe llamar mientras existan muestras para codificar, una vez que este proceso termine el codificador devolverá cero muestras, con lo cual indicara que todo el audio ha sido comprimido.
- `faacEncClose()`: Finalmente se debe cerrar la instancia creada.

En el proyecto realizado la siguiente configuración del codificador fue implementada:

- `inputFormat`: Hace referencia al formato de entrada al codificador se eligió: `FAAC_INPUT_16BIT`.
- `outputFormat`: Indica el formato del contenedor de salida, se escogió 1 lo cual indica ADTS.
- `useTns`: Se activó esta opción dándole el valor de `true`.
- `useLfe`: Se desactivo esta opción dándole el valor de `false`.
- `aacObjectType`: Indica el tipo de codificación AAC, se escogió `LOW`.
- `mpegVersion`: Indica la versión mpeg, se escogió `MPEG4`.
- `bandWidth`: Indica el ancho de banda, se estableció en 0 con lo cual el codificador establece el ancho de banda.
- `bitRate`: Indica la tasa de bits, se estableció en 0 con lo cual el codificador establece la tasa de bits.



Universidad de Cuenca

El codificador de fuente AAC, de acuerdo al estándar DRM30, es obtenido usando los métodos de la librería y configurando correctamente los parámetros ya mencionados.

3.3 Canal FAC

El canal FAC es usado para proveer información de los parámetros del canal requeridos para la demodulación de la trama multiplexada, así también como información básica de la selección de servicios para un escaneo rápido de los mismos.

Cada trama de transmisión contiene un bloque FAC, mientras que una supertrama de transmisión contiene 3 bloques FAC. [11]

El número de bits L_{FAC} por bloque FAC es igual a 72 bits en modo de robustez A, B, C y D y es de 116 bits en el modo E.

El número total N_{FAC} de células OFDM por bloque FAC es igual a 65 en modo de robustez A, B, C y D y de 244 bits en modo de robustez E.

Las tasas de código usadas en el canal FAC se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Tasas de código para el canal FAC en modos A, B, C, D.

Rall	R0
0,6	3/5

3.3.1 Información del Canal

La información llevada en el canal FAC está dividida en tres partes:

- Los parámetros de canal, los cuales ocupan 20 bits del canal.



Universidad de Cuenca

- Parámetros de servicio, que deben ser indicados en 44 bits.
- Bloque CRC, el cual ocupa 8 bits.

3.3.1.1 Parámetros de Canal

Los parámetros del canal FAC son:

- **Bandera de Base/Mejora:** Formado por un bit que describe:
 - 0: Capa base: Decodificable con cualquier receptor DRM.
 - 1: Capa de mejora: Decodificable por receptores con capacidades de capa de mejora.
- **Identidad:** Formado por dos bits que identifican el bloque FAC, valida los índices SDC y AFS:
 - 00: Verifica que el primer bloque FAC de la transmisión y que los índices SDC y AFS sean válidos.
 - 01: Verifica el bloque FAC intermedio de la transmisión de la súper trama.
 - 10: Verifica el último bloque FAC de la transmisión de la súper trama.
 - 11: Verifica si el primer bloque FAC de la transmisión, el SDC y AFS son inválidos.
- **Bandera RM:** Indica el modo de robustez formado por un bit de la siguiente manera:
 - 0: Robustez de modos A, B, C o D, contiene un conjunto de parámetros de servicio.



- 1: Robustez de modo E, contiene dos conjuntos de parámetros de servicio.
- **Ocupación de espectro:** Utiliza 3 bits, los cuales representan un entero sin signo, especifica el ancho de banda nominal y la configuración de la señal digital como se indica a continuación:

Si Bandera RM = 0, entonces: 0: 4,5 kHz; 1: 5 kHz; 2: 9 kHz; 3: 10 kHz; 4: 18 kHz; 5: 20 kHz; 6, 7, 8: reservados.

Si Bandera RM = 1, entonces: 0: 100 kHz, los demás valores son reservados.
 - **Bandera de entrelazado:** Formada por un bit e indica el entrelazado de tiempo como sigue:

Si Bandera RM = 0, entonces: 0: 2 s (espaciado largo); 1: 400 ms (espaciado corto).

Si Bandera RM = 1, entonces: 0: 600 ms; 1: reservado.
 - **Modo MSC:** Usa 2 bits he indica el modo de modulación del MSC.

Si Bandera RM = 0, entonces: 00: 64-QAM no jerárquica; 01: 64-QAM jerárquica en I; 10: 64-QAM jerárquica en IQ; 11: 16-QAM no jerárquica.

Si Bandera RM = 1, entonces: 00: 16-QAM no jerárquica; 01: reservado; 10: reservado; 11: 4-QAM no jerárquica.
 - **Modo SDC:** Usa un bit que indica el modo de modulación y la tasa de código para el SDC.



Universidad de Cuenca

Si Bandera RM = 0, entonces: 0: 16-QAM, Tasa de código = 0.5; 1: 4-QAM, Tasa de código = 0.5.

Si Bandera RM = 1, entonces: 0: 4-QAM, Tasa de código = 0.5; 1: 4-QAM, Tasa de código = 0.25.

- **Numero de servicio:** Usa 4 bits he indica el nuevo de servicios de audio o datos

0000: 4 servicios de audio

0001: 1 servicio de datos

0010: 2 servicio de datos

0011: 3 servicio de datos

0100: 1 servicio de audio

0101: 1 servicio de datos y 1 de audio

0110: 2 servicio de datos y 1 de audio

0111: 3 servicio de datos y 1 de audio

1000: 2 servicios de audio

1001: 1 servicio de datos y 2 de audio

1010: 2 servicio de datos y 2 de audio

1011: reservado

1100: 3 servicios de audio

1101: 1 servicio de datos y 3 de audio

1110: reservado



Universidad de Cuenca

1111: 4 servicios de datos

- **Índice de reconfiguración:** Usa 3 bits que indican el estado y temporización de la reconfiguración de multiplexación.
- **Bandera de conmutación:** Esta bandera de un bit indica que la transmisión posiblemente contenga el inicio de una súper trama de audio.
Si Bandera RM = 0, entonces: Bandera de conmutación fijada en 0
Si Bandera RM = 1, entonces: 0: Para el primer y tercer bloque FAC de la transmisión; 1: Para el segundo y cuarto bloque FAC de la transmisión.
- **Rfu:** Este parámetro está por definir, mientras tanto debe ser 0.

3.3.1.2 Parámetros de Servicio

Los parámetros de servicio de la multiplexación son transportados en tramas FAC sucesivas, es decir un servicio por trama. Todos los parámetros de servicio son representados como se describen a continuación.

- **Identificador de servicio:** Usa 24 bits e indica el identificador único de servicio, como se describe a continuación:
 - o **Servicios domésticos:** Estos servicios se refieren a las transmisiones locales, generalmente reguladas por las autoridades. El sistema contiene códigos de país (CC) y códigos extendidos de país (ECC) con los cuales se recomienda construir este



identificador, normalmente se suele colocar en los 8 bits más significativos el ECC, en los siguientes 4 el CC y los 12 restantes para los servicios individuales.

- **Servicios internacionales:** Normalmente utilizados para transmisiones internacionales, y asignados aleatoriamente por el comité coordinador de alta frecuencia (HFCC).
- **Id corto:** Usa 2 bits e indica un identificador corto asignado al servicio, además es utilizado para referenciar al SDC. Se asigna para indicar la duración del servicio así como para la reconfiguración de las tramas multiplexadas.
- **Indicador de audio CA:** Usa un bit e indica si el servicio usa un acceso condicional (CA) para el flujo de audio, 0: no usa, 1: si usa.
- **Lenguaje:** Este campo de 4 bits indica el lenguaje de la audiencia a quien está dirigida la transmisión como se puede apreciar en la Tabla 3.4. [11]

Tabla 3.4 Configuración del Lenguaje de transmisión en el canal FAC.

Número Decimal	Lenguaje	Número Decimal	Lenguaje
0	Sin especificar	8	Hindi
1	Árabe	9	Japonés
2	Bengalí	10	Javanés
3	Chino(Mandarín)	11	Coreano
4	Holandés	12	Portugués
5	Inglés	13	Ruso
6	Francés	14	Español
7	Alemán	15	Otro



- **Bandera Audio/Datos:** Indica si es un servicio de audio o datos
 - 0: Servicio de audio
 - 1: Servicio de datos
- **Descripción de servicio:** Este campo de 5 bits depende del valor de la bandera anterior:
 - 0: Tipo de programa
 - 1: identificador de aplicación

Sin importar el valor de la bandera audio/datos si el valor es 31 (todos los bits en 1) indica que el receptor DRM debe saltar esta difusión y continuar escaneando los servicios.
- **Tipo de programa:** Este campo de 5 bits indica el tipo de programa de un servicio de audio como lo indica la tabla 3.5. [11]

Tabla 3.5 Configuración del Tipo de Programa en el Canal FAC.

Número Decimal	Tipo de Programa	Número Decimal	Tipo de Programa
0	No existe programa	16	Clima
1	Noticias	17	Finanzas
2	Actualidades	18	Programación infantil
3	Información	19	Sociales
4	Deportes	20	Religión
5	Educación	21	Teléfono
6	Drama	22	Viajes



7	Cultura	23	Ocio
8	Ciencia	24	Música Jazz
9	Variedad	25	Música Country
10	Música Pop	26	Música Nacional
11	Música Rock	27	Música antigua
12	Música relajante	28	Música folclórica
13	Clásicos suaves	29	Documentales
14	Clásicos serios	30	Sin usar
15	Otra música	31	Sin usar

- **Identificador de aplicación:** Este campo de 5 bits contiene el identificador de aplicación de los servicios de datos.
- **Indicación de datos CA:** Usa un bit e indica si el servicio usa un acceso condicional de la siguiente manera:
 - 0: No se usa un sistema CA en el flujo y sub-flujo de datos
 - 1: Se usa un sistema CA en el flujo y sub-flujo de datos
- **Rfa:** Estos 6 bits serán definidos en un futuro hasta el momento deben ser establecidos en 0

Los parámetros FAC elegidos en la implementación sin contar con la palabra CRC se indican en la Tabla 3.6. [11]

Tabla 3.6 Valor de los Parámetros del Canal FAC

Parámetro FAC	Valor	Descripción
Base/Bandera de realce	0	Decodificable por cualquier dispositivo
Identidad	11 01 10	Correspondientes a cada una de las 3 tramas de transmisión



		FAC
Bandera RM	0	Modos A, B, C, D
Ocupación del Espectro	011	10kHz de ancho de banda
Bandera de Entrelazador	0	Entrelazado largo (2 segundos)
Modo MSC	11	16-QAM, no hierarchical
Modo SDC	1	4-QAM, code rate = 0.5
Número de Servicios	0100	1 servicio de audio
Indice de Reconfiguración	000	Sin reconfiguración
Bandera de Conmutación	0	En modo A-D
Rfu	0	Cero hasta nueva configuración
Identificador de Servicio	0x12345	Elegido Aleatoriamente por efectos de prueba
Id Corto	00	Elegido Aleatoriamente por efectos de prueba
Audio CA	0	Sin Audio CA
Idioma	1110	Español
Audio/Datos	0	Audio
Decripción del Servicio	00011	Información
Datos CA	0	Sin CA
Rfu	000000	Cero hasta nueva configuración

3.3.1.3 CRC

Los 8 bits de CRC (Cyclic Redundancy Check) se deben calcular sobre los parámetros de servicio y de canal. Se debe generar usando el polinomio:

$$G_8(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (7)$$

El método para el cálculo de la palabra CRC usando la Ecuación (7) ya se definió en el punto 2.7.2.



Universidad de Cuenca

Cuando la bandera RM es 0, el CRC es calculado sobre los 64 bits formados por los 20 bits de parámetros de canal y los 44 bits de parámetros de servicio

Cuando RM es 1, se debe calcular sobre los 112 bits formados por los 20 bits de canal y 88 bits de parámetros (2 conjuntos de 44 bits) y 4 bits establecidos en 0. Estos últimos bits se usan para calcular el CRC pero no se reenvían para la codificación y transmisión.

3.4 Canal SDC

El canal SDC entrega información sobre como decodificar el canal MSC, como encontrar fuentes alternativas de la misma información y da atributos a los servicios dentro de la trama multiplexada.

3.4.1 Calculo del canal

El número de bits L_{SDC} por bloque SDC es dependiente del modo de robustez, ancho de banda y constelación, usados. Las fórmulas dadas para el canal MSC son válidas para el SDC bajo la restricción de EEP (Equal Error Protection) y SM (solamente 4-QAM: $P_{max} = 1$; 16-QAM: $P_{max} = 2$) por lo que se tiene:

$$L_{SDC} = L_2 \quad (8)$$

$$N_{SDC} = N_2 \quad (9)$$

El número total N_{SDC} de células OFDM por bloque SDC están dados por la Tabla 3.8. [11]



Tabla 3.7 Numero de Células OFDM para el SDC.

Modo de Robustez	Ocupación del Espectro					
	0	1	2	3	4	5
A	167	190	359	405	754	846
B	130	150	282	322	588	662
C	-	-	-	288	-	607
D	-	-	-	152	-	332
E	936	-	-	-	-	-

Tabla 3.8 Tasas de Código para el SDC en 4-QAM.

Nivel de Protección	Rall	R0
0	0,5	1/2

Usando la Ecuación 9, los valores de la Tabla 3.8 para el modo B con una ocupación del espectro de 3 y las tasas de código dadas para 4-QAM, indicadas en la Tabla 3.9, se tiene:

$$N_{SDC} = N_2 = 322$$

Usando la Ecuación (3) para el cálculo del MSC

$$L_{SDC} = \sum_{p=0}^{Pmax-1} RXp \left[\frac{2 * N_{SDC} - 12}{RYp} \right]$$

$$L_{SDC} = 1 * \left[\frac{2 * 322 - 12}{2} \right] = 316 \text{ bits}$$

3.4.2 Información del canal

La información llevada en el SDC consta de un índice AFS el cual consiste de 4 bits, un campo de datos de n bits en el cual se lleva la información de las



Universidad de Cuenca

entidades de datos elegidas, un bloque CRC de 16 bits y finalmente k bits de relleno para completar el tamaño de la trama.

El polinomio usado para generar el bloque CRC está definido por (10).

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (10)$$

Usando la Tabla 2.5 para el modo B y un valor de ocupación del espectro de 3, se tiene que $n = 37$ bytes (296 bits). De lo anterior se deduce que:

$$L_{SDC} = L_{AFS} + n + L_{CRC} + k \quad (11)$$

Los n bits no necesariamente deben ser llenados completamente, ya que la información de las entidades de datos tiene longitudes variables y dependiendo de que entidades sean incluidas, sobrara una k cantidad de bits de relleno que deben tener un valor de cero.

Las entidades incluidas en la implementación del proyecto se describen en las secciones continuas.

3.4.2.1 Entidad de Datos Tipo 0: Descripción del Multiplex

Cada bloque SDC debe tener una descripción del canal multiplex, esta identidad de datos usa los mecanismos de reconfiguración para la bandera de versión. Mientras se realiza la reconfiguración, la nueva configuración se debe señalar en esta identidad describiendo los flujos de multiplexación con el MSC y el perfil UEP. La información es la siguiente:

- Nivel de protección de parte A - 2 bits.
- Nivel de protección de parte B - 2 bits.



Universidad de Cuenca

- Descripción de flujo para flujo 0 - 24 bits.

Opcionalmente, dependiendo del número de flujos en el multiplex:

- Descripción para flujo 1: 24 bits.
- Descripción para flujo 2: 24 bits.
- Descripción para flujo 3: 24 bits.

La descripción del flujo 0 depende la presencia de la trama jerárquica, la cual es indicada en el campo *modo MSC* del canal FAC. Si la trama jerárquica no está presente entonces la descripción del flujo es la siguiente:

- Longitud de datos de la parte A - 12 bits.
- Longitud de datos de la parte B - 12 bits.

Si está presente la trama jerárquica:

- Nivel de protección jerárquica - 2 bits.
- Rfu - 10 bits.
- Longitud de datos jerárquicos - 12 bits.

La descripción de flujo para los flujos 1, 2, 3 es la siguiente:

- Longitud de datos de la parte A - 12 bits.
- Longitud de datos de la parte B - 12 bits.
- **Nivel de protección para la parte A:** Indica la tasa de codificación global para los datos en la parte A.



Universidad de Cuenca

- **Nivel de protección para la parte B:** Indica la tasa de codificación global para los datos en la parte B.
- **Longitud de datos de la parte A:** Longitud de datos en bytes en la parte A de la trama lógica usada por el flujo de transmisión.
- **Longitud de datos de la parte B:** Longitud de datos en bytes en la parte B de la trama lógica usada por el flujo de transmisión.
- **Nivel de protección para jerarquía:** Indica la tasa de codificación global para los datos en la trama jerárquica.
- **Rfu (10 bits):** Reservados para uso futuro.
- **Longitud de datos para jerarquía:** Longitud de datos en bytes en la parte jerárquica de la trama lógica usada por el flujo.

Cuando se usa igual protección de error (EEP) en la trama multiplexada, entonces la longitud de los campos de la parte A se debe establecer en 0 y el nivel de protección de los campos en la parte A debe ser 0. Cuando no se usa igual protección de error en la trama de multiplexado, entonces la parte A tiene protección más alta que la parte B.

3.4.2.2 Entidad de Datos Tipo 1: Etiqueta de Identidad

La etiqueta se debe enviar en cada bloque SDC para habilitar un despliegado rápido de los servicios enviados en la trama multiplexada.

Esta identidad de datos usa un mecanismo único para la bandera de versión la información, la cual es la siguiente:



Universidad de Cuenca

- **Id corta:** Usa 2 bits contiene una id corta relacionada con la id de servicio del canal FAC.
- **Rfu:** Usa 2 bits reservados para uso futuro se los debe establecer en 0.
- **Etiqueta:** Contiene n bytes, este campo de longitud variable de hasta 64 bytes contiene hasta 16 caracteres (7 bits por caracter) de datos usando codificación UTF-8.

3.4.2.3 Entidad de Datos Tipo 8: Información de Hora y Fecha

Se puede especificar la hora y fecha para permitir al receptor seguir los horarios, se usa el mecanismo único para la bandera de versión y se forma como sigue:

- **Fecha juliana modificada:** Usa 17 bits e indica la fecha en formato MJD.
- **UTC (hora y minutos):** Usa 11 bits y expresa la hora UTC en horas (5 bits) y minutos (6 bits).
- **Rfu:** Reservado para uso futuro se lo debe establecer en 0.
- **Ajuste de hora local:** Este campo de 1 bit debe indicar el sentido del ajuste de hora (LTO) en UTC como sigue:
 - 0: Ajuste positivo, el tiempo local está avanzado al UTC.
 - 1: Ajuste negativo, el tiempo local está atrasado al UTC.
- **Valor de ajuste de hora local:** Este campo de 5 bits debe indicar el valor del ajuste de hora (LTO).



3.4.2.4 Entidad de Datos Tipo 9: Información de Audio

Cada servicio de audio necesita una descripción detallada de los parámetros para decodificarlo, esta entidad usa el mecanismo de reconfiguración para la bandera de versión y está constituido por:

- **Id corta:** Usa 2 bits e indica una id corta para el servicio que se esté usando.
- **Id de flujo:** Este campo de 2 bits indica la id de flujo del flujo que lleva el servicio que se esté usando.
- **Codificación de audio:** Consta de 2 bits como sigue:
 - 00: AAC.
 - 01: reservado.
 - 10: reservado.
 - 11: xHE-AAC.
- **Bandera SBR:** Este campo usa 1 bit depende del valor del campo anterior como sigue:
 - Codificación de audio = 00, entonces: 0: SBR no usado, 1: SBR usado.
 - Codificación de audio = 01, 10 o 11, entonces: Rfa 1 bit.
- **Modo de audio:** Depende del valor del campo de codificación de audio como sigue:
 - Codificación de audio = 00, entonces: 00: mono, 01: estéreo paramétrico,
 - 10: estéreo, 11: Reservado.



Universidad de Cuenca

- Codificación de audio = 01 o 10, entonces: Rfa usa 2 bits.
- Codificación de audio = 11, entonces: 00: Mono, 01: Reservado, 10: Estéreo, 11: Reservado.
- **Taza de muestreo de audio:** Este campo indica la tasa de muestreo de audio depende del campo de codificación de audio:
Codificación de audio = 00, entonces: 000: reservado, 001: 12 kHz, 010: reservado, 011: 24 kHz, 100: reservado, 101: 48 kHz, 110: reservado, 111: reservado.
Codificación de audio = 01 o 10, entonces: Rfa 3 bits.
Codificación de audio = 11, entonces: 000: 9.6 kHz, 001: 12 kHz, 010: 16 kHz, 100: 24 kHz, 101: 32 kHz, 110: 38.4 kHz, 111: 48 kHz.
 - **Bandera de texto:** Este campo indica si los datos de aumento de audio están disponibles en otro canal, como sigue:
0: No hay aumento disponible.
1: Hay aumento disponible.
 - **Campo codificador:** Depende del campo de codificación de audio y la bandera SBR, como sigue:
Codificador de audio = 00 o 11
MPEG modo Surround 3 bits.
Rfa 2 bits.
Codificador de audio = 01 o 10



Universidad de Cuenca

- Rfa 5 bits.
- **MPEG modo Surround:** Usa 3 bits e indica, si la información de MPEG Surround está en la codificación AAC, se estructura como sigue:
000: No hay disponible información MPEG Surround.
001: reservado.
010: MPEG Surround 5.1.
011: MPEG Surround 7.2.
100: reservado.
101: reservado.
110: reservado.
111: otro modo.
 - **Configuración específica de codificador:** Este campo de 8xn bits depende del valor del campo codificador como sigue:
Codificador de audio = 00, 01, 10
El campo no está presente.
Codificador de audio=11
xHE-AAC configuración estática, este campo debe llenarse completamente por bits colocando el ultimo byte a 0.
 - **rfu:** Campo reservado para uso futuro

Sumando la cantidad de bits usados de cada una de las entidades, se tiene que:

$$n = L0 + L1 + L8 + L9$$



Universidad de Cuenca

$$n = 40 + 128 + 48 + 32 = 248$$

Con lo que usando la ecuación (11)

$$k = 316 - 4 - 248 - 16 = 48 \text{ bits}$$

Con esto se aprecia que las entidades pueden ser transportadas en el SDC bajo los parámetros escogidos usando un bloque de relleno de 48 bits.

3.5 Dispersión de Energía

La dispersión de energía de cada uno de los canales lógicos DRM se logra mediante la adición en modulo-2 (XOR) con una secuencia Pseudo-Aleatoria Binaria (PRBS, Pseudo-Random Binary Sequence), antes de pasar a la codificación del canal.

El PRBS puede ser generado usando registros de cambio con retroalimentación lineal (LFSR, Linear Feedback Shift Register), dichos registros deben de ser iniciados con un patrón semilla (palabra de inicialización). Un LFSR de L bits genera $2^L - 1$ bits de PRBS, estos L bits representan a un polinomio de grado L con el cual el LFSR puede ser denotado. [17]

El PRBS se define como la salida de la retroalimentación del registro de cambio de la Figura 3.2. El cual debe usar un polinomio de grado 9 definido por:

$$P(x) = x^9 + x^5 + 1$$

Al tener un valor de $L = 9$, se define el número de bits del PRBS como sigue:

$$L_{PRBS} = 2^L - 1$$

$$L_{PRBS} = 511 \text{ bits}$$

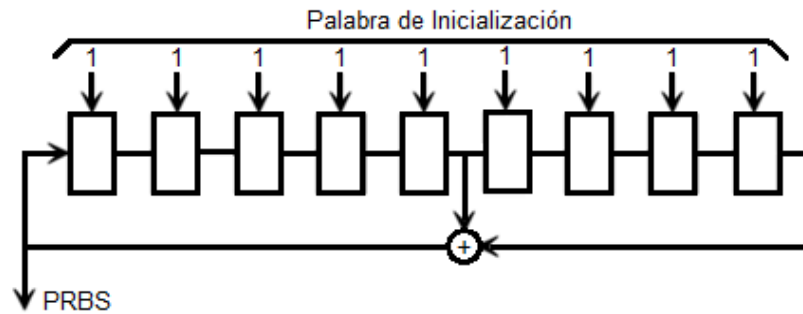


Fig. 3.2 Generador PRBS para la Dispersión de Energía.

En el proceso de demodulación, para obtener las tramas lógicas originales, se procede a realizar la misma operación modulo-2 con otro PRBS generado a partir del mismo polinomio en el receptor.

Los canales deben ser procesados por los mezcladores de dispersión de energía como sigue:

- El largo del vector para procesamiento en el canal FAC iguala un bloque FAC, un bloque SDC para el SDC y una trama multiplexada para el MSC.
- El largo del bloque del FAC es dependiente del modo de robustez, los largos del bloque para el SDC y MSC son dependientes del modo de robustez, ancho de banda y constelación como se definió previamente.
- Los bloques deben de ser procesados independientemente. El vector de entrada debe ser mezclado con el PRBS, el primer bit del vector siendo adicionado en modulo-2 (XOR) al bit de índice 0 del PRBS, el segundo bit del vector adicionado al índice 1 del PRBS, así hasta completar el vector de entrada.



Universidad de Cuenca

Los PRBS de los diferentes canales son reiniciados como sigue:

- FAC: Reiniciado después de cada bloque FAC
- SDC: Reiniciado después de cada bloque SDC
- MSC: Reiniciado después de cada trama multiplexada para la parte de protección estándar.

3.6 Particionador

3.6.1 Codificación Multinivel

Dependiendo del diagrama de constelación y el mapeo usado, se pueden aplicar cinco esquemas de codificación distintos. El esquema de 1 nivel de protección (nivel 1) debe ser considerado como un caso especial del esquema de código multinivel. Diferentes esquemas de mapeo son únicamente aplicables a la constelación de 64-QAM. Para el mapeo estándar y la modulación jerárquica simétrica (SM y HMsym), mapeos idénticos se deberían usar para las componentes real e imaginaria de la constelación de la señal.

En el proyecto se aplica un esquema de codificación de 2 niveles para el MSC y un esquema de 1 nivel para el FAC y SDC como se aprecia en las Figuras 3.3 y 3.4 respectivamente. [11] [25]

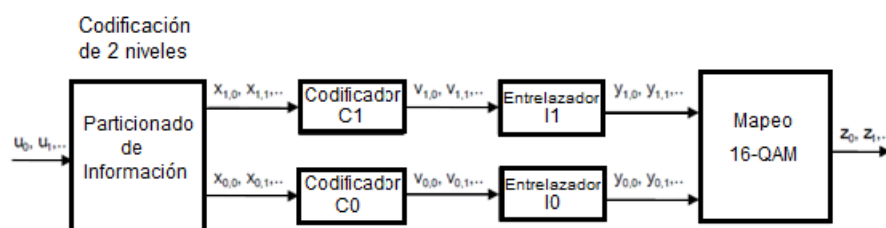


Fig. 3.3 Esquema de codificación de 2 niveles.

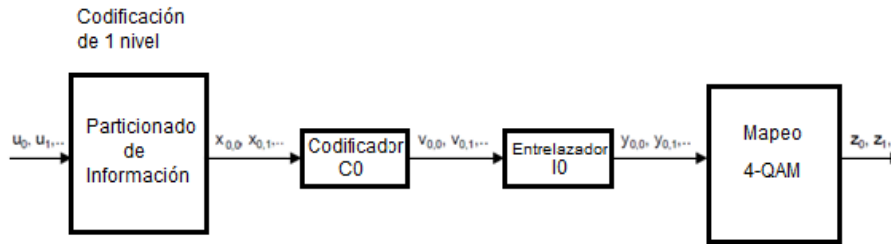


Fig. 3.4 Esquema de codificación de 1 nivel.

3.6.2 Partición del Flujo de Bits en SM

El flujo de datos u_i obtenido de la dispersión de energía debe ser particionado en varios flujos $x_{p,i}$ de acuerdo al número de niveles de codificación. Los bits de la parte más protegida deben alimentar a los codificadores en $p = 0$, hasta $P_{max} - 1$, entonces los bits de la parte menos protegida deben alimentar los codificadores en $p = 0$, hasta $P_{max} - 1$ [11] [26]. Los resultados son:

- Para codificación de 2 niveles:

$$\left(\begin{array}{l} x_{0,0}, x_{0,1}, \dots, x_{0,M_{0,1}-1}, x_{1,0}, x_{1,1}, \dots, x_{1,M_{1,1}-1}, x_{0,M_{0,1}}, x_{0,M_{0,1}+1}, \dots, x_{0,M_{0,1}+M_{0,2}-1}, x_{1,M_{1,1}}, \\ x_{1,M_{1,1}+1}, \dots, x_{1,M_{1,1}+M_{1,2}-1} \end{array} \right) = (u_0, u_1, \dots, u_{L_1+L_2-1})$$

- Para codificación de 1 nivel:

$$\left(x_{0,0}, x_{0,1}, \dots, x_{0,M_{0,1}-1}, x_{0,M_{0,1}}, x_{0,M_{0,1}+1}, \dots, x_{0,M_{0,1}+M_{0,2}-1} \right) = (u_0, u_1, \dots, u_{L_1+L_2-1})$$

Cuando se usa solo un nivel de protección (EEP) los elementos con índices negativos no deben de ser tomados en cuenta.



Universidad de Cuenca

El número de bits en cada nivel, p , es calculado para la parte más protegida y para la parte menos protegida de acuerdo a:

$$M_{p,1} = 2N_1R_p \quad p \in \{0,1,2\} \quad (12)$$

$$M_{p,2} = RX_p \left\lfloor \frac{2N_2 - 12}{RY_p} \right\rfloor \quad p \in \{0,1,2\} \quad (13)$$

El número real de bits en la parte más protegida (L1) puede ser más grande a lo señalado en el SDC. Esto significa que algunos bits que pertenecen a la parte B de la trama multiplexada están protegidas a alto nivel.

El número total de bits en cada nivel p es:

$$M_p = M_{p,1} + M_{p,2} \quad (14)$$

De estas fórmulas se derivan que los flujos de bits de entrada $x_{p,i}$ tienen diferentes longitudes y usando distintas tasas de código en los codificadores C_p , se logra que todos los flujos de salida del codificador $v_{p,i}$ tengan el mismo largo. Reemplazando los valores previamente obtenidos en las Ecuaciones (12) y (13) se tiene para la parte más protegida del MSC:

$$M_{0,1} = 2 * 0 * R_0 = 0$$

$$M_{1,1} = 2 * 0 * R_1 = 0$$

Para la parte menos protegida del MSC se obtiene:

$$M_{0,2} = RX_0 \left\lfloor \frac{2N_2 - 12}{RY_0} \right\rfloor = 2331 \text{ bits}$$

$$M_{1,2} = RX_1 \left\lfloor \frac{2N_2 - 12}{RY_1} \right\rfloor = 3495 \text{ bits}$$



Universidad de Cuenca

Con lo que en el MSC se tiene una parte más protegida de cero bits (por el uso de EEP) y una parte menos protegida de 5826 bits divididos en una estructura de codificación de dos niveles, el primero siendo de 2331 bits y el segundo de 3495 bits.

Para el SDC usamos de igual manera las Ecuaciones (12) y (13), pero para un esquema de un nivel de codificación obteniendo así:

$$M_{0,1} = 2 * 0 * R_0 = 0$$

$$M_{0,2} = RX_0 \left\lfloor \frac{2 * N_{SDC} - 12}{RY_0} \right\rfloor = 322 \text{ bits}$$

En el canal FAC no se usa un particionador para la codificación, por lo que se tiene un solo bloque de 72 bits a codificar.

La tasa de código total para cada parte protegida en SM es aproximadamente:

$$R_{all} = \frac{\sum_{p=0}^{P_{max}-1} R_p}{P_{max}}$$

Cuando se usan P_{max} niveles.

3.7 Codificador de Canal

El código componente C_p es basado en codificación convolucional perforada partiendo desde un código matriz de tasa 1/6 y una restricción de distancia igual a 7. El codificador convolucional matriz genera desde el vector $(x_{p,i})_{i=0}^{M_p-1} = (a_i)_{i=0}^{I-1}$ una palabra de código $\{(b_{0,i}, b_{1,i}, b_{2,i}, b_{3,i}, b_{4,i}, b_{5,i})\}_{i=0}^{I+5}$. Esta palabra de código es definida por:



$$\begin{aligned}
 b_{0,i} &= a_i \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-5} \oplus a_{i-6} \\
 b_{1,i} &= a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-6} \\
 b_{2,i} &= a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-4} \oplus a_{i-6} \\
 b_{3,i} &= a_i \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-5} \oplus a_{i-6} \\
 b_{4,i} &= a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-2} \oplus a_{i-3} \oplus a_{i-6} \\
 b_{5,i} &= a_i \oplus a_{i-1} \oplus a_{i-4} \oplus a_{i-6}
 \end{aligned}$$

Para $i = 0, 1, 2$ hasta $I + 5$.

Cuando i no pertenece al conjunto $\{0, 1, 2 \text{ hasta } I - 1\}$, a_i es cero por definición.

La codificación puede lograrse usando el codificador convolucional presentado en la Figura 3.5. [11]

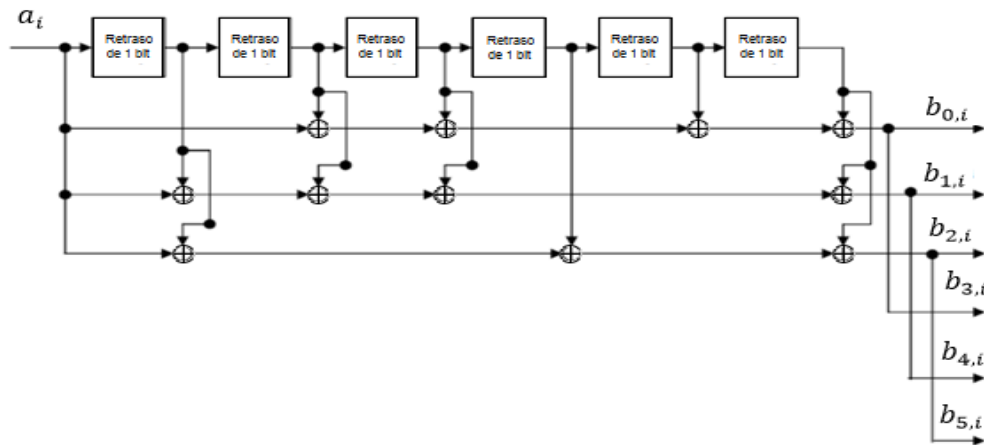


Fig. 3.5 Diagrama de la codificación matriz DRM.

Las formas octales del generador polinomial son 133, 171, 145, 133, 171 y 145, respectivamente. El vector $(a_{-6}, a_{-5}, a_{-4}, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1})$ corresponde a los estados iniciales todos-cero del registro de cambio y el vector



Universidad de Cuenca

$(a_I, a_{I+1}, a_{I+2}, a_{I+3}, a_{I+4}, a_{I+5})$ corresponde al estado final todos-cero del registro de cambio.

Complementario al código matriz, el sistema debe permitir tasas perforadas. Los códigos perforados son una mejora a los códigos convolucionales, funcionan eliminando ciertos bits redundantes de la salida del codificador evitando así que estos sean enviados. Estos bits son eliminados de acuerdo a matrices de perforación que dependen de la tasa de código que se desee obtener. Las matrices de perforación usadas en la implementación del proyecto se muestran en la Tabla 3.10. [11]

Tabla 3.9 Parámetros de perforado para los canales.

Canal	Tasa de Código	Numerador RX_p	Denominador RY_p	Patrón de Perforado	Secuencia Transmitida
MSC	1/2	1	2	$B_0:1$ $B_1:1$ $B_2:0$ $B_3:0$ $B_4:0$ $B_5:0$	$b_{0,0} b_{1,0} etc$
	3/4	3	4	$B_0:111$ $B_1:100$ $B_2:000$ $B_3:000$ $B_4:000$ $B_5:000$	$b_{0,0} b_{1,0} b_{0,1}$ $b_{0,2} etc$
SDC	1/2	1	2	$B_0:1$ $B_1:1$ $B_2:0$ $B_3:0$ $B_4:0$ $B_5:0$	$b_{0,0} b_{1,0} etc$
	3/5	3	5	$B_0:111$ $B_1:101$	$b_{0,0} b_{1,0} b_{0,1}$



FAC				$B_2:000$ $B_3:000$ $B_4:000$ $B_5:000$	$b_{0,2} \ b_{1,2} \ etc$
-----	--	--	--	--	---------------------------

Para el canal FAC, todos los bits son perforados de acuerdo a la Tabla 3.10.

Para el canal MSC y el canal SDC, los últimos 36 bits (los bits de cola) de la palabra generada con el código matriz deben ser perforados como sigue:

El índice r_p debe ser usado para encontrar el vector de perforación para los bits de cola de cada nivel. Este índice es calculado con la Ecuación (15) en un esquema de SM.

$$r_p = (2N_2 - 12) - RY_p \left\lfloor \frac{2N_2 - 12}{RY_p} \right\rfloor \quad \text{para } p \in \{0,1,2\} \quad (15)$$

Aplicando los valores correspondientes para el SDC y el MSC en la Ecuación (15) se obtiene un valor de $r_p = 0$, para una tasa de código de 1/2 y un valor de $r_p = 2$ para la tasa de código de 3/4, por lo que los vectores de perforación de los bits de cola se definen en la Tabla 3.10. [11]

Tabla 3.10 Patrón de Perforado para la Codificación

r_p	Patrón de perforado	Secuencia transmitida
0	$B_0:111111$ $B_1:111111$ $B_2:000000$ $B_3:000000$ $B_4:000000$ $B_5:000000$	$b_{0,0} \ b_{1,0} \ b_{0,1} \ b_{1,1} \ b_{0,2}$ $b_{1,2} \ b_{0,3} \ b_{1,3} \ b_{0,4} \ b_{1,4} \ b_{0,5} \ b_{1,5} \ etc$
	$B_0:111111$ $B_1:111111$	$b_{0,0} \ b_{1,0} \ b_{2,0} \ b_{0,1} \ b_{1,1} \ b_{0,2}$ $b_{1,2} \ b_{0,3} \ b_{1,3} \ b_{2,3} \ b_{0,4} \ b_{1,4} \ b_{0,5} \ b_{1,5} \ etc$



2	$B_2:100100$ $B_3:000000$ $B_4:000000$ $B_5:000000$	
---	--	--

3.8 Entrelazado de Bits

El entrelazado bit a bit consiste en intercalar las posiciones de los bits entre sí, para de esta manera mejorar la robustez contra los errores de propagación. El entrelazado debe ser aplicado en algunos de los niveles del esquema de codificación. La permutación $\Pi_p(i)$ es la encargada de generar los índices para el intercambio de los bits y así logrando el entrelazado [11]. Esta permutación es obtenida de las siguientes relaciones:

Para 16-QAM: $t_0 = 13, t_1 = 21$

Para 4-QAM: $t_0 = 21$

$$p \in \{0,1,2\}$$

$$s = 2^{\lceil \log_2 x_{in} \rceil}$$

$$q = \frac{s}{4} - 1$$

Donde x_{in} es el número de bits de entrada y $\lceil * \rceil$ significa redondear al siguiente entero superior.

El algoritmo básico mostrado en (16) resulta en un bit pseudo-aleatorio, el algoritmo debe ser usado independientemente para los canales FAC, SDC y el MSC.



$$\prod_p(0) = 0 \quad (16)$$

Para $i = 1, 2, \dots, x_{in} - 1$

$$\prod_p(i) = (t_p \prod_p(i-1) + q)(mod s)$$

Mientras $\prod_p(i) \geq x_{in}$

$$\prod_p(i) = (t_p \prod_p(i) + q)(mod s)$$

3.8.1 Entrelazado del Canal FAC

El tamaño de bloque debe ser en cada caso el mismo para el entrelazador I_p solamente con un valor para p de 0. El número de elementos por bit entrelazado x_{in} es igual a $2 * N_{FAC}$. El vector de entrada es definido por:

$$V(p) = (v_{p,0}, v_{p,1}, v_{p,2}, \dots, v_{p,2*N_{FAC}-1})$$

El vector de salida entrelazado es el subconjunto de permutaciones $\prod_p(i)$ definido por:

$$Y(p) = (y_{p,0}, y_{p,1}, y_{p,2}, \dots, y_{p,2*N_{FAC}-1})$$

Los elementos de salida son seleccionados de los elementos de entrada de acuerdo a:

$$y_{p,i} = v_{p,\prod_p(i)}$$



3.8.2 Entrelazado del Canal SDC

El tamaño de bloque debe ser en cada caso el mismo para el entrelazador I_p . El número de elementos por bit entrelazado x_{in} es igual a $2 * N_{SDC}$. Para cada bit entrelazado el vector de entrada es definido por:

$$V(p) = (v_{p,0}, v_{p,1}, v_{p,2}, \dots, v_{p,2*N_{SDC}-1})$$

El vector de salida entrelazado es el subconjunto de permutaciones $\Pi_p(i)$ definido por:

$$Y(p) = (y_{p,0}, y_{p,1}, y_{p,2}, \dots, y_{p,2*N_{SDC}-1})$$

Los elementos de salida son seleccionados de los elementos de entrada de acuerdo a:

$$y_{p,i} = v_{p,\Pi_p(i)}$$

3.8.3 Entrelazado del Canal MSC

El tamaño de bloque debe ser el mismo para cada entrelazador I_p , pero debe depender del modo de robustez, el ancho de banda y la constelación. El número de elementos por bit entrelazado es igual a $2(N_1 + N_2)$. Por cada bit entrelazado el vector de entrada es definido por:

$$\begin{aligned} V(p) &= (v_{p,0}, v_{p,1}, v_{p,2}, \dots, v_{p,2(N_1+N_2)-1}) \\ &= (v_{1,p,0}, v_{1,p,1}, \dots, v_{1,p,2N_1-1}, v_{2,p,0}, v_{2,p,1}, \dots, v_{2,p,2N_2-1}) \end{aligned}$$

El vector de salida entrelazado es el subconjunto de dos permutaciones $\Pi_p(i)$

definidas por:



Universidad de Cuenca

$$\begin{aligned} Y(p) &= (y_{p,0}, y_{p,1}, y_{p,2}, \dots, y_{p,2(N_1+N_2)-1}) \\ &= (y_{1,p,0}, y_{1,p,1}, \dots, y_{1,p,2N_1-1}, y_{2,p,0}, y_{2,p,1}, \dots, y_{2,p,2N_2-1}) \end{aligned}$$

Las dos partes con diferentes niveles de protección no deben superponerse en el proceso de entrelazado. Por lo tanto la parte menos protegida entrelazada debe ser adjuntada a la parte entrelazada más protegida donde los elementos de salida son seleccionados de los elementos de entrada de acuerdo a:

$$y_{1,p,i} = v_{1,p,\Pi_p(i)}$$

$$y_{2,p,i} = v_{2,p,\Pi_p(i)}$$

Para cada parte respectivamente.

El número de bits de entrada usados para la permutación para la parte más protegida es $x_{in} = 2N_1$, y para la parte menos protegida es $x_{in} = 2N_2$.

3.9 Mapeo QAM y Mapeo Inverso QAM

La estrategia de mapeo para cada célula OFDM es dependiente de la asignación del canal (FAC, SDC y MSC) y el modo de robustez. Todas las células de datos pueden ser 4-QAM, 16-QAM o 64-QAM.

Para el canal MSC se ocupara un esquema de mapeo de 16-QAM ilustrado en la Figura 3.6, mientras que para los canales SDC y FAC se usa un esquema de mapeo 4-QAM como en la Figura 3.7.

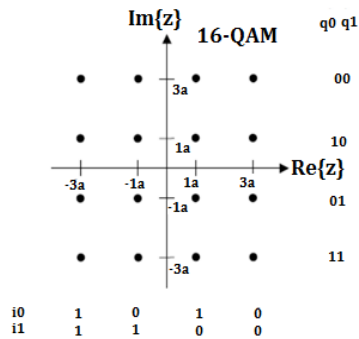


Fig. 3.6 Esquema de Mapeo 16-QAM.

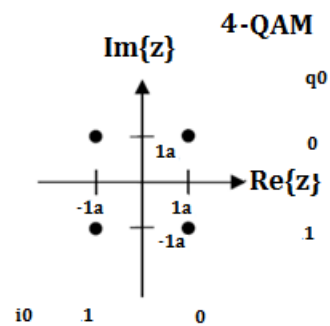


Fig. 3.7 Esquema de Mapeo 4-QAM.

Para 16-QAM, el factor de normalización es:

$$a = \frac{1}{\sqrt{10}}$$

Y el orden de los bits es:

$$\{i_0 \ i_1 \ q_0 \ q_1\} = \{y'_0 \ y'_1 \ y'_2 \ y'_3\}$$

Para 4-QAM, el factor de normalización es

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Y el orden de los bits es:



$$\{i_0 q_0\} = \{y'_0 y'_1\}$$

El flujo de datos a las salidas de los entrelazadores consiste en una trama de bits, las cuales son mapeadas sobre un punto en el diagrama de constelación de acuerdo al número complejo z que dichos bits representen. Para SM en 16-QAM los bits deben ser mapeados de acuerdo a:

$$(y'_0 y'_1 y'_2 y'_3) = (y_{0,0} y_{1,0} y_{0,1} y_{1,1})$$

Para el SM en 4-QAM los bits deben ser mapeados de acuerdo a:

$$(y'_0 y'_1) = (y_{0,0} y_{0,1})$$

Para el correspondiente mapeo inverso de los bits en el decodificador se tiene que tomar como inicio las constelaciones QAM donde cada punto de la constelación tiene un valor definido de bits [27]. A partir de esto se comparan los valores de cada punto para asignar la secuencia de bits correspondiente tomando en cuenta los criterios de las Tablas 3.11 y 3.12, cuyos valores de modulación IQ se obtienen usando los respectivos factores de normalización de cada esquema de mapeo.

Tabla 3.11 Valores IQ y binarios para 4-QAM.

Valores IQ	Valores Binarios
$0.707+0.707i$	00
$0.707-0.707i$	01
$-0.707+0.707i$	10
$-0.707-0.707i$	11



Tabla 3.12 Valores IQ y binarios para 16-QAM.

Valores IQ	Valores Binarios
0.9486+0.9486i	0000
0.9486-0.3162i	0001
0.9486+0.3162i	0010
0.9486-0.9486i	0011
-0.3162+0.9486i	0100
-0.3162-0.3162i	0101
-0.3162+0.3162i	0110
-0.3162-0.9486i	0111
0.3162+0.9486i	1000
0.3162-0.3162i	1001
0.3162+0.3162i	1010
0.3162-0.9486i	1011
-0.9486+0.9486i	1100
-0.9486-0.3162i	1101
-0.9486+0.3162i	1110
-0.9486-0.9486i	1111

3.10 Entrelazado de Células

El mismo esquema de entrelazado usado para el entrelazado de bits en el codificador multinivel, es también aplicado a las células N_{MUX} de una trama multiplexada para todos los modos de robustez.

El vector de entrada al bloque del entrelazador correspondiente a N_{MUX} células QAM de la trama multiplexada n es dado por:

$$Z_n = (z_{n,0}, z_{n,1}, z_{n,2}, \dots, z_{n,N_{MUX}-1})$$

El vector de salida con el mismo número de células es dado por:



Universidad de Cuenca

$$\hat{Z}_n = (\hat{z}_{n,0}, \hat{z}_{n,1}, \hat{z}_{n,2}, \dots, \hat{z}_{n,N_{MUX}-1})$$

Donde los elementos de salida son seleccionados de los elementos de entrada de acuerdo a:

$$\hat{z}_{n,i} = z_{n,\Pi(i)}$$

La permutación $\Pi(i)$ es obtenida mediante las siguientes relaciones:

$$s = 2^{\lceil \log_2 N_{MUX} \rceil}$$

$$q = \frac{s}{4} - 1$$

$$t_0 = 5$$

Donde $\lceil * \rceil$ es la operación de redondeo al entero inmediatamente superior.

$$\Pi(0) = 0$$

Para $i = 1, 2, \dots, N_{MUX} - 1$

$$\Pi(i) = (t_0 \Pi(i-1) + q) \pmod{s}$$

Mientras $\Pi(i) \geq N_{MUX}$

$$\Pi(i) = (t_0 \Pi(i) + q) \pmod{s}$$

En el sistema DRM se puede elegir un esquema de profundidad de entrelazado para agregar más robustez a la información transmitida en el MSC. Para esta profundidad de entrelazado se define el valor D . Lo que se busca es un equilibrio



Universidad de Cuenca

entre rendimiento y el retraso en procesamiento, con lo que se tiene un valor de $D=5$ para modos de robustez A, B, C, D y $D=6$ para modo E.

El vector de salida para entrelazado largo con N_{MUX} células es procesado en casi la misma manera para entrelazado corto. La única excepción es que la permutación es basada no solo en lo actual, pero también en las últimas $D-1$ tramas multiplexadas. La permutación $\Pi(i)$ como definida antes es usada de nuevo para determinar la relación entre los índices dentro del vector de salida \hat{Z}_n y los D vectores de entrada $Z_n, Z_{n-1}, \dots, Z_{n-D+1}$.

Los elementos de salida son seleccionados desde los elementos de entrada de acuerdo a:

$$\hat{Z}_{n,i} = z_{n-\Gamma(i),\Pi(i)}$$

Para un valor dado i la selección del número del vector de entrada $n - \Gamma(i)$ para el correspondiente elemento $\Pi(i)$ es echo con la siguiente formula.

$$\Gamma(i) = i(\text{mod } D) \text{ para } i = 0,1,2, \dots, N_{MUX} - 1$$

Tomando en consideración la transmisión de todo el contenido de una trama multiplexada el retraso total del proceso entrelazado/desentrelazado es dado por aproximadamente $2*400\text{ms}$, para el entrelazado corto para modos de robustez A, B, C, D. En caso de entrelazado largo corresponde a 2.4s para modos A, B, C, D y 0.7s para modo E.



Capítulo 4 Evaluación y Resultados

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se presentó la implementación del codificador según el estándar DRM30. Para evaluar el codificador implementado se utilizaron los módulos decodificadores desarrollados por el instituto alemán Karlsruhe Institute Of Technology Communications Engineering Lab, para el software GNU radio basados en el receptor DreaM el cual es uno de los receptores de software libre más utilizado por radio aficionados utilizando el estándar DRM. [26] [28]

Adicionalmente, se implementó un programa en C++ para reconstruir el audio codificado a partir de las muestras AAC contenidas en la supertrama de audio del canal principal (MSC). En las siguientes secciones se describen los módulos decodificadores y los resultados obtenidos al decodificar los canales. En la Figura 4.1 se presenta el diagrama de bloques del sistema con los archivos generados por el codificador.

Los módulos decodificadores, escritos en Matlab, fueron acoplados para recibir los archivos de texto descritos anteriormente, con la finalidad de recuperar la información codificada de los canales de descripción de servicio (SDC), acceso rápido (FAC) y principal (MSC).

4.2 Decodificador DRM30 de GNU Radio

Las etapas del decodificador, presentadas en la Figura 4.2, se describen en las siguientes secciones.



4.2.1 Mapeo Inverso QAM

Este módulo del decodificador fue desarrollado en lenguaje C++ como parte del sistema implementado, tiene como entrada los archivos de texto: MSC_MAPEADO, SDC_MAPEADO y FAC_MAPEADO en los cuales se encuentran los valores IQ generados en el proceso de mapeo QAM. El mapeo inverso es el encargado de asignar el valor en binario correspondiente a cada valor IQ según las correspondientes constelaciones de la Sección 3.9. Una vez finalizado este proceso se generan los siguientes archivos de texto:

- MSC0_ENTRELEZADO.txt
- MSC1_ENTRELAZADO.txt
- FAC_DEMAPEADO.txt
- SDC_DEMAPEADO.txt

Estos archivos contienen los datos de los tres canales DRM con bits entrelazados, los cuales son los datos de entrada para el decodificador de GNU radio. Mediante el método leerArchivo(), que acepta como parámetros la ruta del archivo y el tipo de canal que este

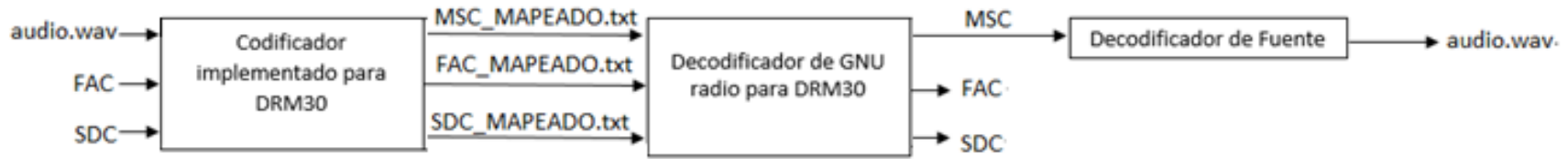


Fig. 4.1 Diagrama de bloques del sistema DRM 30.

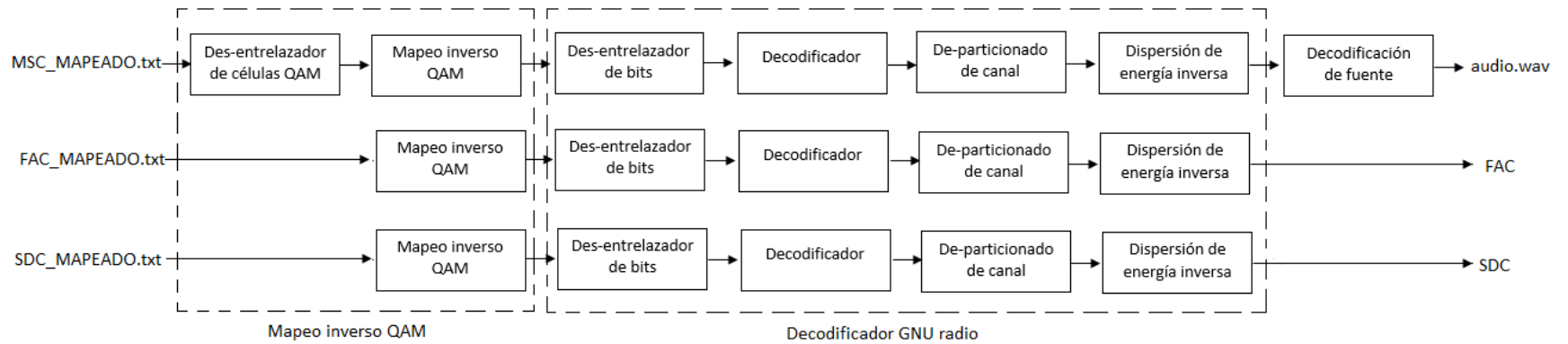


Fig. 4.2 Diagrama de Bloques para receptor DRM30.



Universidad de Cuenca

sea: MSC, SDC o FAC, almacenando los datos leídos en vectores, los cuales serán enviados a los módulos decodificadores restantes.

4.2.2 Desentrelazador de Bits

Una vez almacenados en vectores los datos correspondientes a cada canal entrelazado, se procede a enviarlos a través del método `drm_mlc_deinterleaver()`, el cual recibe como parámetros al vector de datos y el tipo de canal ya sea MSC, FAC o SDC. Este método se encarga de realizar las permutaciones correspondientes para devolver los bits a su posición original mediante el llamado del método `drm_mlc_permutation()`, el mismo que recibe como parámetros, al igual que el método anterior, los datos y tipo de canal.

4.2.3 Decodificador de Canal

Una vez realizado el desentrelazado de bits de cada canal, se procede a decodificarlos, para esto se utiliza el método `drm_mlc_decoder()`, al cual ingresan los canales y el tipo de canal. Según esto, el programa realizará la decodificación correspondiente acorde a los parámetros del MSC, SDC y FAC.

Dependiendo del patrón de perforado requerido por cada canal, el módulo utilizará la decodificación a través del método propio de Matlab llamado `vitdec()`, el cual está basado en el algoritmo de Viterbi que recibe el canal y su patrón de perforado para realizar la decodificación.



Universidad de Cuenca

4.2.3.1 Algoritmo de Viterbi

Este algoritmo es usado para decodificar códigos convolucionales, basándose en un diagrama de Trellis, el cual contiene todos los estados posibles del codificador. Este algoritmo usa un patrón de nodos, donde partiendo de cada uno de ellos surgen ramificaciones que permiten una representación lineal de los eventos.

El algoritmo consiste en tomar en cuenta todas las posibles combinaciones del diagrama para finalmente tomar una decisión, que pueden ser dos:

- Decisión fuerte: Se basa en la distancia de Hamming, que es el número de bits en los que difieren dos palabras de código, tomando la combinación con el menor peso.
- Decisión suave: Se basa en la distancia euclidiana teniendo en cuenta el valor analógico recibido, tomando la distancia de menor valor.

4.2.4 Departicionado de Bits

Una vez decodificados los canales se los debe pasar por la etapa de departicionado en la cual, por la modulación estándar (SM) y la protección igual (EEP) utilizados en la implementación, únicamente el canal MSC debe ser re-ensamblado, mediante el método `drm_mlc_departitioning()`. Este método concatena las dos partes del canal comenzando por los bits de MSC0, para esto, recibe únicamente como parámetro el canal MSC decodificado compuesto por MSC0 y MSC1.



4.2.5 Dispersión de Energía Inversa (Unscrambling)

Finalmente, para completar la decodificación de los canales, estos deben pasar por otro dispersor de energía, ya que al ser registros adicionados (XOR) se los recupera realizando nuevamente la misma operación sobre los datos de cada uno de los canales, para esto se utiliza el método `drm_descrambler()`, el cual recibe como único parámetro al canal.

4.3 Evaluación y Resultados

Para evaluar el codificador desarrollado, se verificaron las salidas generadas a través del decodificador genérico descrito en la Sección 4.2. Para esto se generó y codificó los canales lógicos MSC, FAC y SDC, a través del codificador desarrollado, para proceder a decodificarlos con los módulos decodificadores. Las salidas decodificadas serán comparadas con las entradas generadas, con la finalidad de verificar la correcta implementación de los procesos de codificado según el estándar DRM30.

4.3.1 Evaluación Comparando Bit a Bit los Tres Canales DRM.

Las pruebas iniciales, consistieron en codificar y decodificar los canales MSC, FAC y SDC. En las Figuras 4.3 y 4.4, se presenta los canales generados por la etapa de codificación implementada descrito en el Capítulo 3.



```

sdc_data =
0  0  0  1  0  0  0  0  0  1  1  0  0  0  0  0  0  0  1  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  1  1  0  1  1  0
0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  1  0  0  1  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0
0  0  0  1  0  0  0  0  0  1  0  1  0  1  0  1  0  0  1  0  1
1  1  0  0  1  0  0  0  0  1  1  0  1  1  1  1  0  1  0  1  0  1
1  0  0  1  0  1  0  1  1  0  1  1  1  1  0  0  1  1  0  0  0  1
1  0  1  1  0  0  0  0  1  0  1  0  0  0  1  0  0  0  1  0  1
0  0  1  0  0  1  0  0  1  1  0  1  0  0  1  0  1  1  1  0  0
1  0  1  0  0  0  0  0  1  0  0  0  1  1  1  0  1  0  0  0  1
1  0  0  1  0  1  0  0  1  1  0  0  0  0  0  1  1  0  1  0  0
0  0  1  1  0  1  0  1  1  1  0  1  0  0  0  1  1  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  1  1  1  0  1  1  0  1  0  1  0  1  0  1  0
0

```

Fig. 4.6 Canal de descripción de servicio SCD decodificado.

Realizando una comparación bit a bit de los canales generados en contraste a los canales resultantes del proceso de decodificación, se pudo verificar que son exactamente iguales, con lo cual la validación de estos canales y su proceso de codificación es exitosa. Para el MSC de la misma manera, se realizó una comparación byte a byte del canal generado con el recuperado, obteniendo una equivalencia entre ambos al igual que con los canales SDC y FAC.

4.3.2 Evaluación del Audio Transportado en el MSC

Las pruebas siguientes consistieron en la verificación del canal MSC, para esto se realizó una grabación de audio de 8 segundos. Esta grabación debe contar con una tasa de muestreo de 12 kHz, acorde a los parámetros elegidos del estándar, ver Figura 4.7.

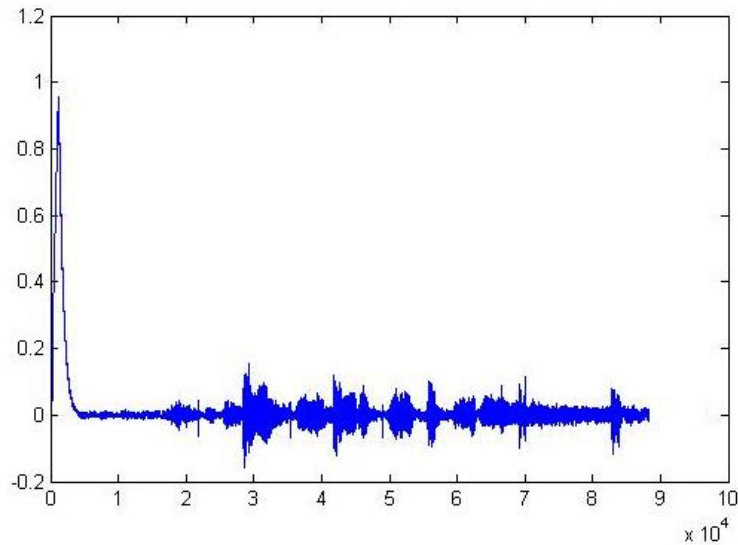


Fig. 4.7 Forma de onda del archivo de entrada en formato wave (.wav).

El objetivo de esta prueba es codificar en el formato AAC el archivo sin compresión de formato wave, formar las supertramas de audio y almacenarlas en el canal MSC para codificarlo. Realizado este procedimiento el canal codificado es enviado a través del decodificador y el programa implementado en C++ para realizar la decodificación de fuente y la reconstrucción del audio. En la Figura 4.8 se presenta la forma de onda del archivo de audio regenerado.

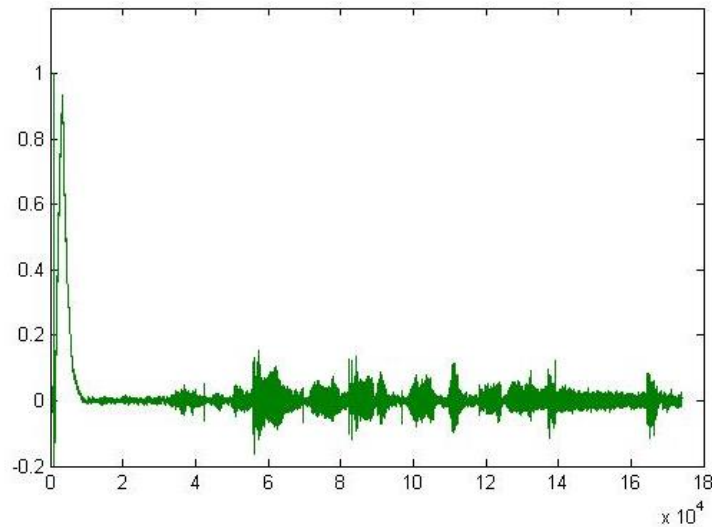


Fig. 4.8 Forma de onda del archivo de salida en formato wave (.wav).

Realizando una comparación de la formas de onda de los archivos de entrada y salida, evidentemente se aprecia que son iguales. De esta manera se logra verificar, al igual que con los canales FAC y SDC, que la codificación se encuentra correctamente implementada. Adicionalmente se realizó la reproducción del archivo de audio de salida, con la finalidad de verificar su correcta reconstrucción, la cual fue exitosa.

Capitulo 5 Conclusiones y Recomendaciones



5.1 Conclusiones

En el presente se realizó el estudio e implementación de las etapas de codificación del estándar de radio digital, Digital Radio Mondiale (DRM), para las transmisiones en la banda de AM denominado DRM30. La implementación se realizó en el lenguaje de programación C++ y fue evaluado con los módulos decodificadores implementados por el instituto alemán Karlsruhe Institute Of Technology Communications Engineering Lab, para el software GNU radio, basados en el receptor de código abierto DreaM.

Se realizó un estudio detallado del estándar para determinar la arquitectura del sistema, en el cual se determinó que el estándar DRM, está conformado por 3 canales lógicos sobre los cuales se debe efectuar la codificación siguiendo los lineamientos descritos en dicho estándar. Estos canales lógicos son el Main Service Channel (MSC), Fast Access Channel (FAC) y Service Description Channel (SDC). Adicionalmente se definieron los lineamientos y parámetros necesarios para formular los canales mencionados, los cuales son: la ocupación del espectro, tipo de modulación, modo de robustez y los niveles de protección. Partiendo de estos parámetros se realizó el cálculo para determinar el tamaño de los canales lógicos con la finalidad de que puedan ser interpretados por un receptor basado en el estándar. Para la implementación del codificador se determinaron los siguientes parámetros a ser utilizados: el modo de robustez B por ser ideal para canales selectivos en tiempo y frecuencia para servicios de



Universidad de Cuenca

onda Ionosférica en las bandas HF y MF; una ocupación del espectro de 3 que corresponde a 10 kHz; niveles de protección equitativa (EEP) por su simplicidad y manejo; y tipo de modulación estándar (SM).

Una vez establecidos los parámetros con los cuales el codificador deberá trabajar, se procedió a la implementación del sistema, la cual debe tomar los tres canales lógicos generados y codificarlos según los lineamientos que el estándar establece; uno de ellos es realizar una modulación de amplitud en cuadratura (QAM) sobre cada uno de los canales. Este lineamiento fue implementado con su respectivo proceso de demodulación, después del cual los canales son enviados a un proceso de decodificación con los módulos basados en el receptor DreaM para el estándar DRM.

Se realizaron pruebas generando, codificando, modulando, demodulando y decodificando los canales de acceso rápido (FAC) y de descripción de servicio (SDC), a partir de lo cual según lo mostrado en la Sección 4.3 se obtuvo una recuperación exitosa de los canales, con esto se garantiza la correcta implementación del sistema codificador, modulador y demodulador QAM para el estándar DRM30.

Adicionalmente se realizaron pruebas para comprobar la correcta implementación del sistema sobre el canal de servicio principal (MSC), para esto se capturó audio, almacenándolo en un archivo de formato wave sin compresión, con la finalidad de aplicar un audio a la entrada del sistema, realizar el proceso



Universidad de Cuenca

de codificación, modulación, demodulación y decodificación y finalmente reproducirlo. Las pruebas realizadas para este proceso fueron exitosas, ya que según lo mostrado en el apartado 4.3 las formas de onda de las señales tanto de entrada como salida son iguales, adicionalmente al realizar la reproducción del archivo resultante, efectivamente se comprobó que el audio es el mismo.

Finalmente al verificar que los resultados de las pruebas realizadas cumplen con el estándar, podemos garantizar que esta tesis cuenta con fundamento sobre el cual se puede continuar su investigación para completar los procesos de modulación COFDM y transmisión de radio frecuencia, ya que al estar escritos en el lenguaje C++ cuenta con la capacidad de multiplataforma, para llevarlo a un sistema portable y generar un transmisor físico basado en el estándar DRM30.

5.2 Recomendaciones

Con la finalidad de usar este trabajo como base, para completar el sistema transmisor DRM30, se recomienda lo siguiente:

- Realizar una investigación sobre una plataforma de hardware que proporcione las mejores prestaciones de procesamiento y memoria con la capacidad de compilación para programas escritos en C++.
- Realizar un correcto estudio sobre la modulación COFDM, ya que de esto depende la correcta construcción de la trama de transmisión DRM y que un receptor genérico del estándar la pueda interpretar con facilidad.



Universidad de Cuenca

Para la implementación de radio frecuencia es necesario tomar en cuenta la regulación pertinente del país, al momento de establecer las celdas piloto (portadoras) que se encargarán de transportar los datos del sistema, considerando que la finalidad es brindar un servicio de radio digital, dentro de la banda de AM para mejorar su calidad en contraparte a su homóloga analógica.



Bibliografía

- [1] A. Llanos, de *Gestión del Espectro Radioeléctrico en Ecuador nueva modalidad para radiodifusión y televisión abierta*, Quito, Corporación Editora Nacional, 2013.
- [2] I. T. Union, "Nomenclatura de las Bandas de Frecuencias y de las Longitudes de Onda Empleadas en Telecomunicaciones," in *Recomendación UIT-R V.431.6*, 1993.
- [3] J. T. T. Cortés, *Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF*, Puebla: Universidad de las Américas Puebla, 2003.
- [4] F. G. Stremmer, *Introducción a los Sistemas de Comunicación*, Tercera ed., Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1990.
- [5] M. F. P. Villalva, *Estudio de la Factibilidad para la Implementación del Servicio de Radiodifusión Digital DRM en el Ecuador.*, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2005.
- [6] EBU-UER, *Technical Bases for DRM Services Coverage Planning*, Geneva: EBU, 2008.
- [7] R. Morris, *FM In-Band On-Channel (IBOC) Digital Radio*.
- [8] F. Kozamernik, *Digital Audio Broadcasting - Radio Now and For the Future*.
- [9] G. Prieto and I. Pichel, *Digital Radio Mondiale: Broadcasting and Reception*, Dubrovnik, Croatia, 2004.
- [10] J. Stott, *DRM - Key Technical Features*, BBC Research & Development, 2001.
- [11] E. T. S. Institute, *Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification*, 2014.
- [12] V. Medios, "SlideShare," 25 Enero 2005. [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/Abasota/introduccion-al-sistema-drm>. [Accessed 26 Mayo 2015].
- [13] W. Zou and Y. Wu, *COFDM: An Overview*, IEEE Transactions, 1995.
- [14] ISO/IEC, *Information Technology-Coding of Audio-Visual Objects- Part3: Audio, International Standard: ISO/IEC*, 2001.
- [15] F. Institute and R. Bosch, *Using MPEG-4 audio for DRM Digital Narrowband Broadcasting*, Geneva, 2000.
- [16] ISO/IEC, *Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information - Part 7: Advanced Audio Coding (AAC)*, ISO/IEC, 2006.
- [17] Advantest Corporation, *DSP-Based Testing - Fundamentals 50 PRBS*



- (Pseudo Random Binary Sequence), 2013.
- [18] C. S. Sanchez, Códigos Convolucionales.
 - [19] H. Samueli and B. Wong, A VLSI Architecture for a High-Speed All-Digital Quadrature Modulator and Demodulator for Digital Radio Applications, IEEE Journal , 1990.
 - [20] A. E. J. Cardenas, Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada (COFDM), Universidad Austral de Chile, 2005.
 - [21] O. Daound and A. Al-Qawasmi, Efficient Performance of COFDM-Based DVB-T, Philadelphia: Department of Communication and Electronics Engineering , 2009.
 - [22] J. M. V. Gonzáles, Simulación de un Esquema de Modulación/Demodulación OFDM Utilizando un Modelo de Canal Multitrayectoria, Guayaquil : Escuela Superior Politécnica del Litoral , 2008.
 - [23] F. A. A. Coding, FAAC-ISO/MPEG 2/4 AAC Encoder Library V1.0, 2001.
 - [24] "DogFoot Note," 21 Abril 2011. [Online]. Available: <http://blog.tcltk.co.kr/?p=2130>. [Accessed 18 Julio 2015].
 - [25] N. Zhu and Z. Li, Research and Implement of DRM Baseband Encoder and Modulator Based on Embedded System, Beijing, China : Communication University of China , 2010.
 - [26] G. Radio, "gr-drm," GitHub, 11 Enero 2014. [Online]. Available: <https://github.com/kit-cel/gr-drm>. [Accessed 15 Julio 2015].
 - [27] A. Zafar and Z. Farooq, Implementation and Analysis of QPSK & 16-QAM Modulator and Demulator, Islamabad, Pakistan : Institute of Space Technology, 2008.
 - [28] G. Radio, "GNU Radio Manual and C++ API Reference," Doxygen , 7 Agosto 2015. [Online]. Available: <http://gnuradio.org/doc/doxygen/>. [Accessed 2 Septiembre 2015].