

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR DVB-RCT EN UN AMBIENTE DE SIMULACIÓN



**NILSON ARMANDO CERÓN CERÓN
JORGE EDUARDO JIMÉNEZ VILLAMIL**

Director: Ing. Luis Felipe Cadena

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT
Popayán, Noviembre de 2013**

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR DVB-RCT EN UN AMBIENTE DE SIMULACIÓN



Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

**NILSON ARMANDO CERÓN CERÓN
JORGE EDUARDO JIMÉNEZ VILLAMIL**

Director: Ing. Luis Felipe Cadena.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT
Popayán, Noviembre de 2013**

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTERACTIVIDAD	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO	4
2. GENERALIDADES DEL ESTÁNDAR DVB-RCT	5
2.1 MODELO DE REERENCIA DEL ESTÁNDAR DVB-RCT	5
2.2 NIVEL FÍSICO	7
2.2.1 Parámetros de Transmisión	7
2.2.2 Técnica de Acceso	9
2.2.2.1 OFDMA	11
2.2.3 Esquema de Transmisión	13
2.2.4 Aleatorización	14
2.2.5 Codificación de Canal	15
2.2.5.1 Codificación Reed-Solomon	16
2.2.5.2 Codificación Convolutiva	17
2.2.6 Intercalado	20
2.2.7 Esquemas de Modulación y Modulación Adaptativa	20
2.2.8 Mapeo y Estructura de Ráfaga	23
2.2.8.1 Símbolos Piloto	24
2.2.8.2 Estructura de Ráfaga (BS3)	25
2.2.9 Transformación al Dominio del Tiempo de la Señal OFDM en Banda Base	29
2.2.10 Organización del Canal Radiofrecuencia	29
2.2.10.1 Filtro Nyquist	29
2.2.10.2 Filtro Rectangular	30

2.2.10.3 Intervalo de Guarda	30
2.2.11 Transmisión de la Señal OFDM	31
2.3 CANAL DE COMUNICACIONES	32
2.3.1 Canal con Ruido Gaussiano	32
2.4 AMBIENTE DE SIMULACIÓN	32
3. MODELO DE SIMULACIÓN	35
3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS	35
3.1.1 Adquisición de Información del Funcionamiento del Sistema	35
3.1.1.1 Transmisor	35
3.1.1.2 Canal.....	36
3.1.1.1 Receptor	37
3.1.2 Identificación de los Fines de la Simulación.....	38
3.1.3 Formulación de los Objetivos	38
3.2 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	39
3.2.1 Modelo del Transmisor.....	39
3.2.1.1 Identificación de Clases y Objetos	39
3.2.1.2 Identificación de Estructuras	39
3.2.1.3 Identificación de los Sujetos.....	43
3.2.1.4 Identificación de los Atributos	41
3.2.1.5 Identificación de los Servicios o Métodos	45
3.2.2 Modelo del Canal	47
3.2.2.1 Identificación de Clases y Objetos	47
3.2.2.2 Identificación de Estructuras	47
3.2.2.3 Identificación de los Sujetos.....	48
3.2.2.4 Identificación de los Atributos	48
3.2.2.5 Identificación de los Servicios o Métodos	48
3.2.3 Modelo del Receptor	48
3.2.3.1 Identificación de Clases y Objetos	48
3.2.3.2 Identificación de Estructuras	49
3.2.3.3 Identificación de los Sujetos.....	51
3.2.3.4 Identificación de los Atributos	51
3.2.3.5 Identificación de los Servicios o Métodos	53
3.3 MODELO DE SIMULACIÓN	54

3.3.1 Modelo de Simulación del Transmisor	55
3.3.1.1 Estructura Interna y Caracterización del Generador de Datos.....	55
3.3.1.2 Estructura Interna y Caracterización del Codificador de Canal.....	56
3.3.1.3 Estructura Interna y Caracterización del Modulador Digital	57
3.3.1.4 Estructura Interna y Caracterización del Modulador OFDMA DVB-RCT	58
3.3.2 Modelo de Simulación del Canal.....	60
3.3.2.1 Estructura Interna y Caracterización del Canal de Transmisión	60
3.3.3 Modelo de Simulación del Receptor.....	61
3.3.3.1 Estructura Interna y Caracterización del Demodulador OFDMA DVB- RCT	61
3.3.3.2 Estructura Interna y Caracterización del Demodulador Digital.....	63
3.3.3.3 Estructura Interna y Caracterización del Decodificador de Canal	64
3.3.3.4 Estructura Interna y Caracterización del Receptor de Datos	66
3.4 FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	67
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Despliegue de los Sistemas de TDT a Nivel Mundial. Enero de 2013 ...	1
Figura 2.1. Modelo de Referencia del Estándar DVB-RCT	6
Figura 2.2. Ubicación de las Portadoras y Modo de Transmisión	8
Figura 2.3. Espectro de una Portadora y Espectro de un Símbolo OFDM	11
Figura 2.4. Asignación de Recursos en OFDMA.....	12
Figura 2.5. Asignación de las Portadoras en los Subcanales	12
Figura 2.6. Esquemas de Transmisión y Recepción	13
Figura 2.7. Aleatorizador del RCTT.....	14
Figura 2.8. Estructura de la Ráfaga de Datos a ser Aleatorizados	15
Figura 2.9. Estructura de la Palabra de Código.....	17
Figura 2.10. Esquema del Codificador Convolutivo.....	18
Figura 2.11. Diagrama de Bloques del Codificador Convolutivo.....	19
Figura 2.12. Generador PRBS para el Intercalado Aleatorio.....	20
Figura 2.13. Diagrama de Constelaciones	22
Figura 2.14. Organización general de BS1, BS2 y BS3	24
Figura 2.15. Secuencia del Generador PRBS para la Modulación Piloto.....	25
Figura 2.16. Organización de una BS3	26
Figura 2.17. Interferencia Inter Simbólica.....	30
Figura 2.18. Adición del Intervalo de Guarda	31
Figura 3.1. Estructura del Generador de Datos.....	40
Figura 3.2. Estructura del Codificador de Canal.....	40
Figura 3.3. Modulador Digital	41
Figura 3.4. Estructura del Modulador OFDMA DVB-RCT	42
Figura 3.5. Estructura del Componente Estructura de Ráfaga.....	43
Figura 3.6. Estructura del Canal de Transmisión	48
Figura 3.7. Estructura del Demodulador OFDMA DVB-RCT.....	49
Figura 3.8. Estructura del Demodulador Digital.....	50
Figura 3.9. Estructura del Decodificador de Canal	50
Figura 3.10. Estructura del Receptor de Datos	51

Figura 3.11. Estructura del Modelo de Simulación	55
Figura 3.12. Estructura del Transmisor	55
Figura 3.13. Estructura Interna del Generador de Datos.....	55
Figura 3.14. Estructura Interna del Codificador de Canal.....	56
Figura 3.15. Estructura Interna del Modulador Digital	58
Figura 3.16. Estructura Interna del Modulador OFDMA DVB-RCT	58
Figura 3.17. Estructura del Canal.....	60
Figura 3.18. Estructura Interna del Canal de Transmisión	61
Figura 3.19. Estructura Interna del Receptor.....	61
Figura 3.20. Estructura Interna del Demodulador OFDMA DVB-RCT	62
Figura 3.21. Estructura Interna del Demodulador Digital.....	64
Figura 3.22. Estructura Interna del Decodificador de Canal.....	64
Figura 3.23. Modelo de Simulación del Estándar DVB-RCT	67
Figura 4.1. Desempeño de QPSK con diferentes Tasas de Codificación	73
Figura 4.2. Desempeño de 16QAM con diferentes Tasas de Codificación	74
Figura 4.3. Desempeño de 64QAM con diferentes Tasas de Codificación	75
Figura 4.4. Desempeño con Tasa de Codificación 1/2 variando Modulación	76
Figura 4.5. Desempeño con Tasa de Codificación 3/4 variando Modulación.....	77
Figura 4.6. Cobertura con Modulación Adaptativa	78
Figura 4.7. Desempeño de QPSK-1/2 Variando el Número de Subcanales	81
Figura 4.8. SNR vs Número de Subcanales para QPSK 1/2.....	84
Figura 4.9. Desempeño de 64QAM-3/4 Variando el Número de Subcanales.	84
Figura 4.10. SNR vs Número de Subcanales para 64 QAM-3/4	81
Figura 4.11. Desempeño de la Configuración QPSK-1/2 para los Modos 1K y 2K con Número Máximo de Subcanales.....	86
Figura 4.12. Desempeño QPSK-1/2 para el Modo 2K con 29 y 59 Subcanales	87
Figura 4.13. Desempeño 64QAM-3/4 para el Modo 2K y 1K con Número Máximo de Subcanales.....	89
Figura 4.14. Desempeño de 64QAM-3/4 para el Modo 2K con 29 y 59 Subcanales Utilizados.....	89
Figura 4.15. Constelación para un Canal AWGN Modulación QPSK con SNR=4 dB	90

Figura 4.16. Constelación para un Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=15 dB	91
Figura 4.17. Diagrama de ojo del Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=4 dB	91
Figura 4.18. Diagrama de ojo del Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=15 dB	92
Figura 4.19. Constelación para un Canal AWGN Modulación 64QAM con un valor SNR=18 dB	92
Figura 4.20. Constelación para un Canal AWGN Modulación 16QAM con un valor SNR=18 dB	93
Figura 4.21. Diagrama de ojo del Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=18 dB	93
Figura 4.22. Diagrama de ojo del Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=23 dB	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valor de Reloj del Sistema DVB-T.....	8
Tabla 2.2. Parámetros de Transmisión del Estándar DVB-RCT	9
Tabla 2.3. Tasa y Esquema de Codificación RS	18
Tabla 2.4. Patrón de Perforación para el Estándar DVB-RCT.....	19
Tabla 2.5. Tasa de Codificación Total	19
Tabla 2.6. Factor de Normalización para QPSK, 16 QAM y 64 QAM.....	22
Tabla 2.7. Configuración de Parámetros para la Codificación de Canal	23
Tabla 2.8. Parámetros en el dominio de la frecuencia en una BS3.....	27
Tabla 4.1. Escenarios de Estudio.....	70
Tabla 4.2. Parámetros Generales de Configuración.	71
Tabla 4.3. Parámetros de Configuración para el Escenario 1.	71
Tabla 4.4. Carga Útil para cada Modulación y Codificación en el Escenario 1	72
Tabla 4.5. Valores de BER vs SNR Simulados para el Escenario 1	72
Tabla 4.6. SNR para diferentes objetivos de BER con QPSK en el Escenario 1	73
Tabla 4.7. SNR para diferentes objetivos de BER con 16QAM en el Escenario 1	74
Tabla 4.8. SNR para diferentes objetivos de BER con 64QAM en el Escenario 1.	75
Tabla 4.9. SNR para diferentes objetivos de BER con Tasa de Codificación 1/2 en el Escenario 1.....	76
Tabla 4.10. SNR para diferentes objetivos de BER con Tasa de Codificación 3/4 en el Escenario 1.....	77
Tabla 4.11. Parámetros de Configuración para el Escenario 2	79
Tabla 4.12. BER vs SNR Simulados para QPSK-1/2 Variando el Número de Subcanales.....	80
Tabla 4.13. SNR para diferentes objetivos de BER variando el Número de Subcanales en QPSK-1/2.	81
Tabla 4.14. Subcanales utilizables para valores de SNR con QPSK-1/2.	82
Tabla 4.15. BER vs SNR Simulados para 16QAM-3/4 Variando el Número de Subcanales.....	83

Tabla 4.16. SNR para diferentes objetivos de BER Variando el Número de Subcanales en 16QAM-3/4	84
Tabla 4.17. Subcanales utilizables para valores de SNR con 64QAM-3/4.....	85
Tabla 4.18. Parámetros de Configuración para el Escenario 3	85
Tabla 4.19. BER vs SNR Simulados para 16QAM-3/4 Modo (1K, 2K)	86
Tabla 4.20. SNR para QPSK-1/2 en los Modos 1K y 2K.....	87
Tabla 4.21. BER vs SNR Simulados para 16QAM-3/4 modo (1K, 2K)	88
Tabla 4.22. SNR para 64QAM-3/4 en los Modos 1K y 2K.....	89

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADSL	Línea de Abonado Digital Asimétrica <i>(Asymmetric Digital Subscriber Line)</i>
AM	Modulación Adaptativa <i>(Adaptive Modulation)</i>
ARQ	Solicitud de Retransmisión Automática <i>(Automatic Repeat Request)</i>
ATSC	Comité del Sistema de Televisión Avanzada <i>(Advanced Television System Committee)</i>
AWGN	Ruido Blanco Gaussiano Aditivo <i>(Additive White Gaussian Noise)</i>
BER	Tasa de Error de Bit <i>(Bit Error Rate)</i>
BIM	Módulo de Interfaz de Difusión <i>(Broadcast Interface Module)</i>
BNA	Adaptador de Red de Difusión <i>(Broadcast Network Adapter)</i>
BS	Estructuras de Ráfaga <i>(Burst Structure)</i>
BSP	Proveedor de Servicios de Difusión <i>(Broadcast Service Provider)</i>
BW	Ancho de Banda <i>(Bandwidth)</i>
CS	Espaciamiento entre Portadoras

	<i>(Carrier Spacing)</i>
DSP	Procesamiento Digital de Señales <i>(Digital Signal Processing)</i>
DTMB	Difusión Multimedia Digital Terrestre <i>(Digital Terrestrial Multimedia Broadcast)</i>
DTT	Televisión Digital Terrestre <i>(Digital Terrestrial Television)</i>
DVB	Difusión de Video Digital <i>(Digital Video Broadcasting)</i>
DVB-RCT	Difusión de Video Digital - Canal de Retorno Terrestre <i>(Digital Video Broadcasting - Return Channel Terrestrial)</i>
DVB-T	Difusión de Video Digital - Terrestre <i>(Digital Video Broadcasting - Terrestrial)</i>
EPG	Guía Electrónica de Programación <i>(Electronic Program Guide)</i>
FD	División de Frecuencia <i>(Frequency Division)</i>
FH	Salto de Frecuencia <i>(Frequency Hopping)</i>
GI	Intervalo de Guarda <i>(Guard Interval)</i>
GSM	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles <i>(Global System for Mobile Communications)</i>
ICI	Interferencia Entre Portadoras <i>(Inter Carrier Interference)</i>

IFFT	Transformada de Fourier Rápida Inversa <i>(Inverse Fast Fourier Transform)</i>
IIM	Módulo de Interfaz Interactivo <i>(Interactive Interface Module)</i>
INA	Adaptador de Red de Interacción <i>(Interaction Network Adapter)</i>
ISDB-T	Difusión Digital de Servicios Integrados - Terrestre <i>(Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial)</i>
ISI	Interferencia Inter Simbólica <i>(Inter Symbol Interference)</i>
ISP	Proveedor de Servicios Interactivos <i>(Interactive Service Provider)</i>
ITU-R	Unión Internacional de Telecomunicaciones - Sector de Normalización de las Radiocomunicaciones <i>(International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector)</i>
MAC	Control de Acceso al Medio <i>(Medium Access Control)</i>
MSB	Bit Más Significativo <i>(Most Significant Bit)</i>
NIU	Unidad de Interfaz de Red <i>(Network Interface User)</i>
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales <i>(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</i>
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales <i>(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)</i>

PLC	Comunicaciones por Línea de Potencia <i>(Power Line Communications)</i>
PRBS	Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria <i>(Pseudo Random Binary Sequence)</i>
QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura <i>(Quadrature Amplitude Modulation)</i>
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase <i>(Quadrature Phase Shift Keying)</i>
RCTT	Terminal Terrestre de Canal de Retorno <i>(Return Channel Terrestrial Terminal)</i>
RSC	Convolucionales Sistemáticos Recursivos <i>(Recursive Systematic Convolutional)</i>
SBTVD	Sistema Brasileño de Televisión Digital <i>(Sistema Brasileiro de Televisão Digital)</i>
SNR	Relación Señal a Ruido <i>(Signal to Noise Ratio)</i>
STB	Unidad de Adaptación Multimedia <i>(Set Top Box)</i>
TD	División de Tiempo <i>(Time Division)</i>
TDT	Televisión Digital Terrestre <i>(Terrestrial Digital Television)</i>
TF	Trama de Transmisión <i>(Transmission Frame)</i>
TSC	Total de Portadoras del Sistema

	<i>(Total System Carrier)</i>
TU	Duración Útil de Símbolo <i>(Useful Symbol Duration)</i>
UB	Ancho de Banda Usado <i>(Used Bandwidth)</i>
UC	Potadoras Usadas <i>(Used Carriers)</i>
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles <i>(Universal Mobile Telecommunications System)</i>
WIMAX	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas <i>(Worldwide Interoperability for Microwave Access)</i>

1. INTRODUCCIÓN

La Televisión Digital Terrestre (DTT, *Digital Terrestrial Television*) o TDT, se está difundiendo rápidamente en el mundo. Así, en enero de 2013 se cuenta con 166 países que han adoptado algún estándar o ya han establecido sus redes de difusión, de los cuales 144 (lo que representa el 87%) han escogido el estándar europeo de Difusión de Video Digital Terrestre (DVB-T, *Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) o su versión mejorada DVB-T2, 11 han adoptado el japonés, denominado Difusión Digital de Servicios Integrados Terrestre (ISDB-T, *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*) o su versión latinoamericana, mediante el Sistema Brasileño de Televisión Digital (SBTVD, *Sistema Brasileiro de Televisão Digital*), 8 han seguido el estadounidense llamado Comité del Sistema de Televisión Avanzada (ATSC, *Advanced Television Systems Committee*) y 3 han optado por el sistema chino diseñado para terminales fijos y móviles, es decir, el de Difusión Multimedia Digital Terrestre (DTMB, *Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*); dejando sólo a 47 países que no han tomado la decisión de migrar a la TDT [1]. En la figura 1.1 se muestra el despliegue de la TDT, especificando los distintos estándares de difusión de televisión digital terrestre.

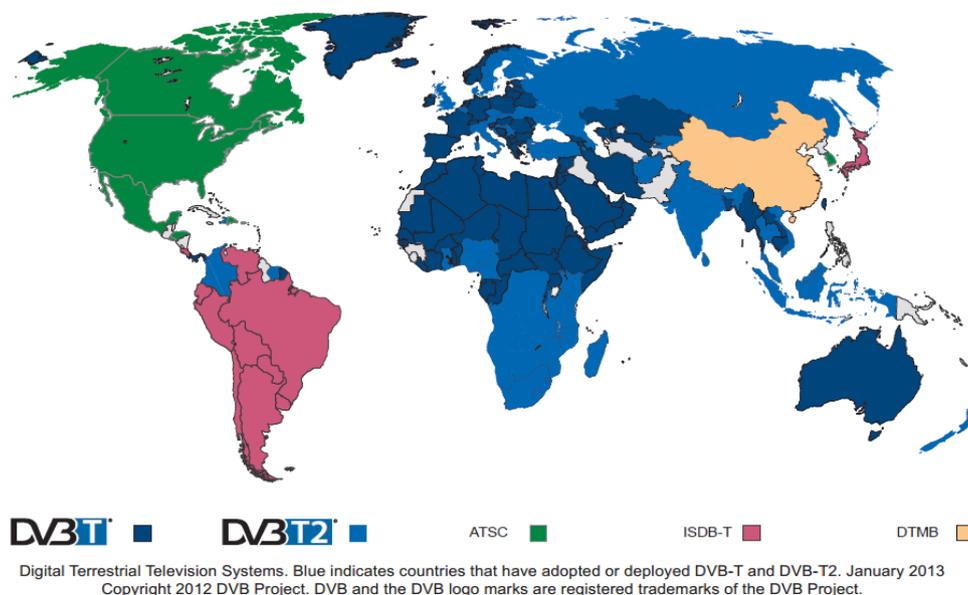


Figura 1.1. Despliegue de los Sistemas de TDT a Nivel Mundial. Enero de 2013.

La base del éxito de la TDT se debe a la inclusión de Técnicas de Procesamiento Digital de Señales (DSP, *Digital Signal Processing*)¹, que permiten hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico al reducir el ancho de banda de transmisión, comparado con el que se necesita en la televisión analógica; la señal es más robusta frente a efectos de multitrayecto, se logra la compresión de contenidos, brinda una mejor calidad de sonido e imagen al incorporar un formato panorámico, en alta definición y múltiples idiomas. También, es posible la emisión de servicios multimedia y acceso a información adicional al contenido principal del programa mediante algún grado de interactividad [2]. Esta última característica aporta un valor agregado a la televisión que puede cambiar la función pasiva del televidente, quien se limita a sintonizar los programas que le ofrecen los operadores del servicio para pasar a participar activamente con ellos, además el grado en el que pueda hacerlo depende del tipo de interactividad ofrecida.

1.1. INTERACTIVIDAD

La interactividad se define como la capacidad de ofrecer contenidos adicionales a los programas de televisión, permitiendo al televidente recibir información asociada al contenido audiovisual e interactuar con la misma, se puede clasificar en:

- Local o Unidireccional [3]. El televidente establece una comunicación únicamente con alguna aplicación alojada en el televisor o en la Unidad de Adaptación Multimedia (STB, *Set Top Box*), como lo puede ser un juego, la Guía Electrónica de Programación (EPG, *Electronic Program Guide*) o información acerca del clima o el tráfico.
- Remota o Bidireccional. El usuario además de prestar atención a contenidos complementarios a los programas principales y explorar los mismos, puede enviar información mediante un enlace de subida, haciendo posible la participación en tiempo real de los servicios ofrecidos, de tal manera que pueda votar en encuestas o concursos, acceder a Internet e incluso comunicarse y compartir temas de interés con otras personas alrededor del mundo.

Sin duda, uno de los beneficios más interesantes en la TDT es el de interactividad remota y son varias las tecnologías y sistemas de telecomunicaciones que lo soportan. Por ejemplo, se pueden emplear las redes

¹ DSP en los procesos de codificación de fuente, multiplexación, codificación de canal, modulación, y transmisión.

que utilizan la Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*), Comunicaciones por Línea de Potencia (PLC, *Power Line Communications*), el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*), el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*), el Sistema de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WIMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), *Ethernet* o *WiFi*.

En cualquier caso es factible lograr buenos resultados para la implementación de un enlace de subida. Sin embargo, es importante comprender el potencial técnico del estándar ETSI EN 301 958 publicado por el consorcio de Difusión de Video Digital (DVB, *Digital Video Broadcasting*) en el año 2002 denominado Difusión de Video Digital - Canal de Retorno Terrestre (DVB-RCT, *DVB Return Channel - Terrestrial*) [4], el cual cuenta con la recomendación para el mismo propósito por parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones Sector de Normalización de las Radiocomunicaciones (ITU-R, *International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector*) [5]. Si bien, el estándar está diseñado para formar un enlace bidireccional junto al estándar DVB-T, en general se puede considerar independiente del enlace de bajada por lo que es aplicable como enlace de subida a otros estándares de difusión, en los cuales se requiera el servicio de interactividad remota en la TDT. De esta manera, se han realizado varias investigaciones al respecto para su implementación junto al estándar SBTVD [6] o el ATSC [7] en los que se ha considerado una viabilidad positiva.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Evaluar y analizar el desempeño a nivel físico en banda base del enlace de subida en el sistema TDT definido por el estándar DVB-RCT en un ambiente de simulación.

1.2.2. Objetivos Específicos

Obtener el modelo de simulación del nivel físico en banda base del enlace de subida en el sistema TDT definido por el estándar DVB-RCT según la norma ETSI EN 301 958, basado en la adaptación y aplicación de la "Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones" [8].

Evaluar el desempeño a nivel físico en banda base del enlace de subida en el sistema TDT definido por el estándar DVB-RCT, en unos escenarios específicos.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El presente trabajo de grado se enfoca en la evaluación y análisis del desempeño a nivel físico del estándar DVB-RCT, en un ambiente de simulación.

En el capítulo 2, se presenta una base teórica que permite comprender el funcionamiento del estándar DVB-RCT en el enlace de subida con un modelo de referencia. También, se dan las especificaciones técnicas del nivel físico en el enlace de subida que permiten identificar los parámetros modificables para los fines de la simulación.

En el capítulo 3, se muestra la adaptación y aplicación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones al presente trabajo. Se analizan aspectos como la definición del sistema y la formulación del modelo, además de la selección de la herramienta de simulación y el establecimiento del plan de pruebas.

En el capítulo 4, se definen los escenarios de simulación y se presentan los resultados obtenidos para determinar el desempeño a nivel físico en banda base del enlace de subida del estándar DVB-RCT, variando distintos parámetros.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones del trabajo de grado y se proponen futuras investigaciones.

2. GENERALIDADES DEL ESTÁNDAR DVB-RCT

DVB-RCT es un estándar basado en el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) el cual describe los lineamientos técnicos para implementar un enlace inalámbrico de subida en las bandas UHF y VHF² en la TDT.

En la norma ETSI EN 301 958, se hace una descripción general del modelo de referencia del sistema de interacción y los parámetros que maneja a nivel físico, tales como anchos de banda, número de portadoras, espaciamiento entre las mismas o período de símbolo. Además, especifica las técnicas de codificación de canal, esquemas de modulación y el mapeo de los datos sobre Estructuras de Ráfaga (BS, *Burst Structure*) que conforman la Trama de Transmisión (TF, *Transmission Frame*) para el envío de señales desde el dispositivo de usuario denominado Terminal Terrestre de Canal de Retorno (RCTT, *Return Channel Terrestrial Terminal*) hacia la estación base.

Por otra parte, el estándar define la configuración del esquema de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) referente a los permisos de transmisión, criterios de seguridad, control y sincronización del terminal. También, se hacen recomendaciones para la selección de frecuencias de operación en el enlace de subida, así como para la configuración y ubicación de antenas y televisores en el lado del terminal de usuario.

2.1. MODELO DE REFERENCIA DEL ESTÁNDAR DVB-RCT

La figura 2.1 muestra el modelo de referencia del estándar DVB-RCT en donde se ilustran los principales elementos que conforman los bloques de usuario y la estación base, así como las relaciones de interacción a través de las cuales se transmiten datos tanto en el enlace de subida como en el de bajada.

² Para la prestación de servicios de TDT, la banda VHF comprende de 170 MHz a 230 MHz y UHF de 470 MHz a 860 MHz

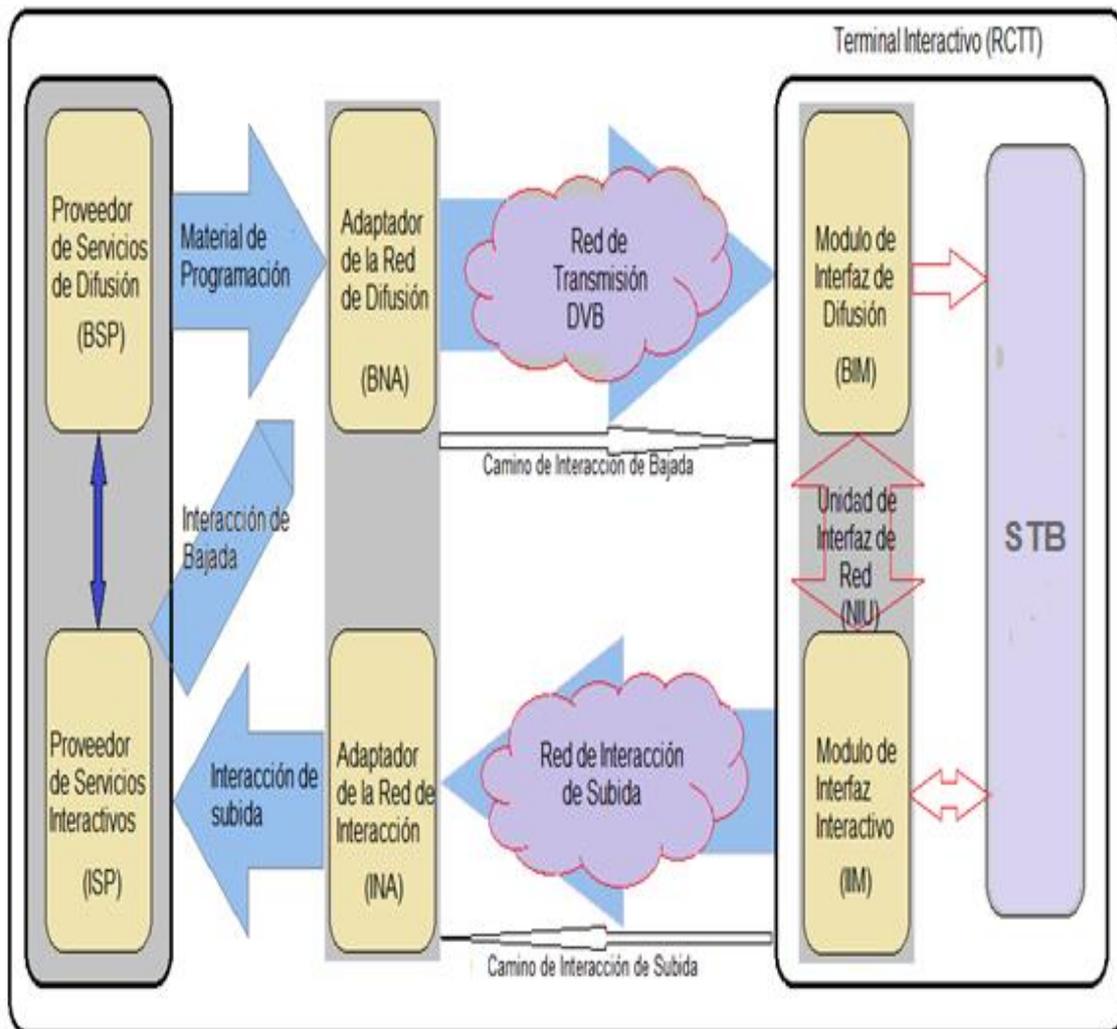


Figura 2.1. Modelo de Referencia del Estándar DVB-RCT.

La parte derecha del modelo de referencia corresponde a un usuario o terminal interactivo (RCTT) y se compone de dos secciones: una corresponde al STB, es decir, el dispositivo físico manipulado directamente por el usuario a través de unos comandos de control de aplicaciones definidos por el fabricante, conjuntamente con el proveedor de servicios y la otra sección es la Unidad de Interfaz de Red (NIU, *Network Interface User*) que comprende la sección física que se conecta con el canal de transmisión tanto en el enlace de bajada como en el de subida.

Este bloque, se compone del Módulo de Interfaz Interactivo (IIM, *Interactive Interface Module*) que corresponde a la unidad donde se realiza la transmisión de datos interactivos en el enlace de subida. La función complementaria a la realizada por el módulo IIM dentro del bloque NIU, se lleva a cabo en el Módulo de Interfaz de Difusión (BIM, *Broadcast Interface Module*) para recibir la señal

que contiene la información principal de televisión del enlace de bajada (video, audio y texto multiplexados), así como de interactividad, ya sea como respuesta a las solicitudes realizadas por el televidente o algún contenido adicional al programa de televisión.

En la parte izquierda del modelo de referencia se ubica el módulo correspondiente a la estación base. Esta contiene los elementos encargados de recibir y gestionar las peticiones del usuario y los elementos que generan las señales de televisión para enviarlas por difusión a los televidentes. De esta manera, se ubica el Adaptador de Red de Interacción (INA, *Interaction Network Adapter*), cuya función es recibir la señal proveniente del RCTT y realizar el proceso de demodulación para identificar los datos originales. Estos son dirigidos al Proveedor de Servicios Interactivos (ISP, *Interactive Service Provider*) con el fin de dar respuesta a la solicitud del usuario y luego al Proveedor de Servicios de Difusión (BSP, *Broadcast Service Provider*). EL BSP envía el material de programación al módulo de la estación de transmisión denominado Adaptador de Red de Difusión (BNA, *Broadcast Network Adapter*) para convertir la información principal de televisión (de alta prioridad), así como de interactividad (de baja prioridad), en una señal capaz de soportar las características del canal inalámbrico de transmisión sobre la banda UHF/VHF.

2.2. NIVEL FÍSICO

2.2.1. Parámetros de Transmisión

A continuación se listan y describen los parámetros de transmisión del sistema:

- Número Total de Portadoras del Sistema (TSC, *Total System Carrier*). El estándar permite manejar en total 1024 (1K) o 2048 (2K) portadoras, para ser transmitidas sobre canales de 6 MHz, 7MHz u 8 MHz.
- Potadoras Usadas (UC, *Used Carriers*). En el modo 1K se emplean 842 portadoras en la transmisión de datos de carga útil, de referencia y sincronización; las 182 portadoras restantes se emplean como banda de guarda, distribuyendo 91 a cada lado del canal para proteger las portadoras adyacentes de interferencia. En el modo 2K se usan 1712 portadoras para el envío de información y las 336 restantes se usan como banda de guarda, con 168 a cada lado del canal.
- Espaciamiento entre Portadoras (CS, *Carrier Spacing*). Se definen tres tipos de espaciamiento en frecuencia: CS1, CS2 y CS3. Varían en cada Ancho de Banda (BW, *Bandwidth*) de canal. Por ejemplo, en el de 6 MHz, CS1 equivale a 837 Hz, CS2 a 1674 Hz y CS3 a 3348 Hz.

- Ancho de Banda Usado (UB, *Used Bandwidth*). Está dado por la multiplicación del número de portadoras usadas efectivamente por el RCTT (UC) y el CS escogido. De esta manera, existen 6 modos de transmisión (1K ó 2K con CS1, CS2 ó CS3) y solamente uno de ellos debe utilizarse para una transmisión específica. La figura 2.2 permite identificar de manera general cómo se ubican las portadoras en el ancho de banda usado.

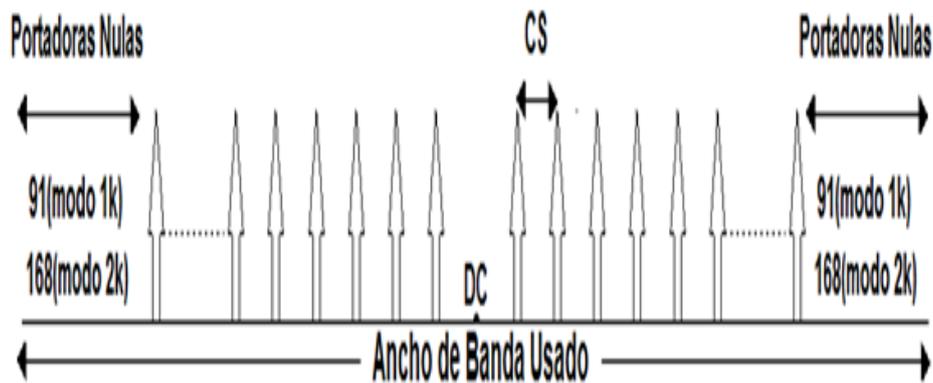


Figura 2.2. Ubicación de las Portadoras y Modo de Transmisión.

El reloj T (período de transmisión de bits) del estándar DVB-RCT se deriva del valor de reloj (T') en el modo 2K del enlace de bajada del estándar DVB-T definido en ETSI EN 300 744 [9]. La tabla 2.1 muestra el valor del reloj del sistema DVB-T en los distintos anchos de banda de canal.

Ancho de Banda del Sistema DVB-T (MHz)	8	7	6
Frecuencia (MHz)	64/7	8	48/7
Tiempo T' (μs)	7/64	1/8	7/48

Tabla 2.1. Valores de Reloj del Sistema DVB-T.

Siendo así, se define el período del reloj T como cuatro veces T' en el caso de CS1, dos veces T' cuando se tiene en cuenta CS2 y una vez el valor T' para CS3. Por otra parte, la Duración Útil de Símbolo (TU, *Useful Symbol Duration*) se expresa como $TU = TSC \times T$, o también, $TU = 1/CS$.

En la tabla 2.2 se indican los valores que relacionan el número de portadoras con el espaciamiento entre ellas. También, se incluyen los valores del reloj RCT y la duración útil de símbolo en cada BW de canal.

Ancho de Banda de Canal (BW)	8MHz		7MHz		6MHz	
	2048	1024	2048	1024	2048	1024
Número Total de Portadoras (TSC)						
Portadoras Usadas (UC)	1712	842	1712	842	1712	842
T (μ s)	0,438	0,875	0,500	1	0,583	1,167
Tu (μ s)	896	896	1024	1024	1195	1195
CS1 (Hz)	1116	1116	977	977	837	837
UB (MHz)	1,911	0,940	1,672	0,822	1,433	0,705
T (μ s)	0,219	0,438	0,250	0,500	0,292	0,583
Tu (μ s)	448	448	512	512	597	597
CS2 (Hz)	2232	2232	1953	1953	1674	1674
UB (MHz)	3,281	1,879	3,344	1,645	2,866	1,410
T (μ s)	0,109	0,219	0,125	0,250	0,146	0,292
Tu (μ s)	224	224	256	256	299	299
CS3 (Hz)	4464	4464	3906	3906	3348	3348
UB (MHz)	7,643	3,759	6,688	3,289	5,732	2,819

Tabla 2.2. Parámetros de Transmisión del Estándar DVB-RCT.

2.2.2. Técnica de Acceso

DVB-RCT emplea la técnica de acceso OFDMA la cual hace uso de 1024 o 2048 portadoras ortogonales entre sí para generar la señal de transmisión. Éstas se agrupan para formar subcanales, asignando uno o varios a un mismo usuario [10]. La ortogonalidad de las portadoras se deriva de la técnica de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal*

Frequency Division Multiplexing) en la cual el flujo de información en banda base se distribuye sobre $N=BW/CS$ portadoras de banda estrecha pre-mapeadas mediante la Modulación por Desplazamiento de Fase (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*) o la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) de 16 o 64 estados (16QAM o 64QAM respectivamente). Específicamente, se puede asociar cada portadora con la función denotada en la ecuación 2.1.

$$X_n(t) = \sin(2\pi f_n t) \quad (2.1)$$

$$0 \leq n \leq N - 1$$

Donde f_n corresponde a la frecuencia central de la n-ésima portadora. Ahora, si se selecciona CS igual al inverso de la duración del símbolo T_u , entonces las portadoras son ortogonales sobre ese período de símbolo y no hay dependencia entre sus fases. Esto se expresa en la ecuación 2.2.

$$\int_0^{T_u} \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \sin(2\pi f_k t + \varphi_k) dt = 0 \quad (2.2)$$

Donde f_n y φ_n representan la frecuencia y la fase de la portadora n-esima, mientras que f_k y φ_k , hacen lo mismo con la portadora k-ésima. Así, cada portadora tendrá un número entero de ciclos en un periodo de símbolo y desde que no exista diafonía³ en la frecuencia central de cada una de ellas, no hay Interferencia Entre Portadoras (ICI, *Inter Carrier Interference*). Esto permite ubicarlas lo más cerca posible unas de otras al punto que se traslapan con lo cual se hace muy eficiente el uso del canal. En el dominio de la frecuencia, el espectro de cada portadora presenta un nulo en la frecuencia central de las demás, como se ilustra en la figura 2.3.

³ Se presenta diafonía cuando parte de las señales presentes en un circuito, considerado perturbador, aparece en el otro, considerado perturbado.

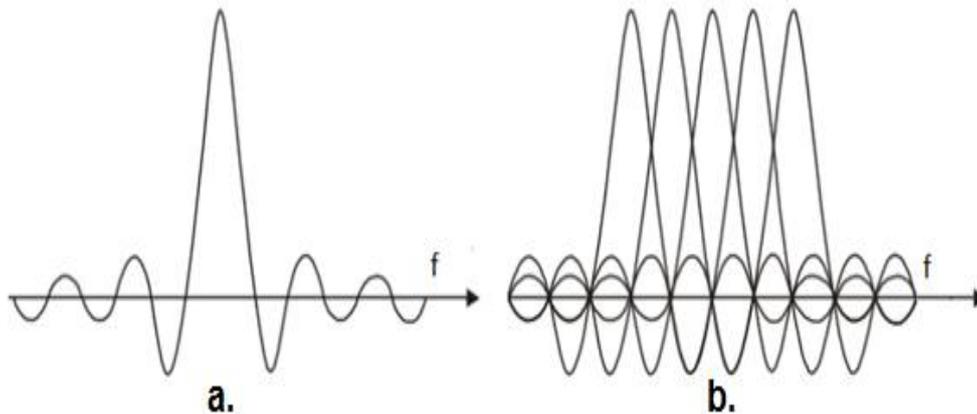


Figura 2.3. a. Espectro de Una Portadora. b. Espectro de Un Símbolo OFDM.

2.2.2.1. OFDMA

En OFDMA, el acceso múltiple se refiere a que en el tiempo de duración de un símbolo OFDM las portadoras se asignan a distintos RCTT's para transmisiones simultáneas, lo cual permite mejorar sustancialmente el desempeño del sistema. Por lo tanto, asigna recursos tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia para separar las múltiples transmisiones de los usuarios.

Por otra parte, se define un *slot* OFDMA como la mínima unidad de recursos de transmisión disponible para un usuario y corresponde a la asignación de un subcanal (formado por 1, 4 o 29 portadoras) para transmitir una cantidad variable de símbolos OFDM que pueden ser de datos o de sincronización de acuerdo con un tipo específico de trama de transmisión. El esquema básico de la asignación de los recursos se muestra en la figura 2.4. Además, se pueden asignar varios *slots* OFDMA a un mismo usuario o compartir un símbolo entre varios de ellos. Por ejemplo, el símbolo OFDM número 1 es concedido a los usuarios 1, 2 y 3 en los primeros seis subcanales.

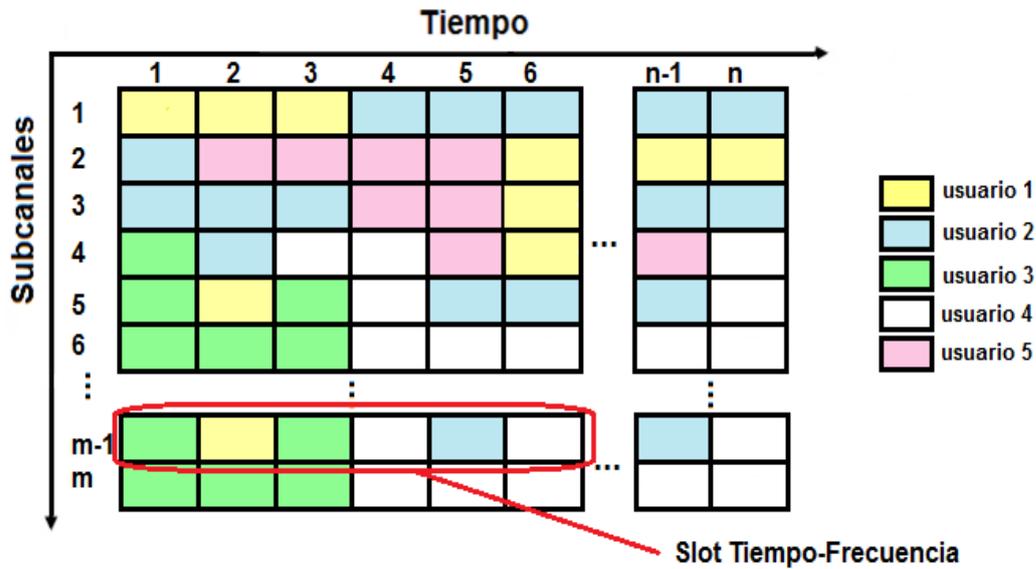


Figura 2.4. Asignación de Recursos en OFDMA.

La asignación de las portadoras que conforman un subcanal en particular puede realizarse de manera adyacente o distribuida. En la primera, las portadoras se disponen consecutivamente de acuerdo a su numeración dentro del canal y se espera que la respuesta en frecuencia sobre las mismas esté muy correlacionada, afectándolas de forma similar. Este método se puede aplicar para conformar subcanales en condiciones de baja movilidad. Por otra parte, el método de asignación distribuida requiere de unos algoritmos pseudoaleatorios especiales de permutación que garanticen la diversidad en frecuencia, para que las portadoras no se interfieran cuando se hacen variaciones instantáneas en el del canal [11]. La figura 2.5 muestra una configuración general de los dos métodos.

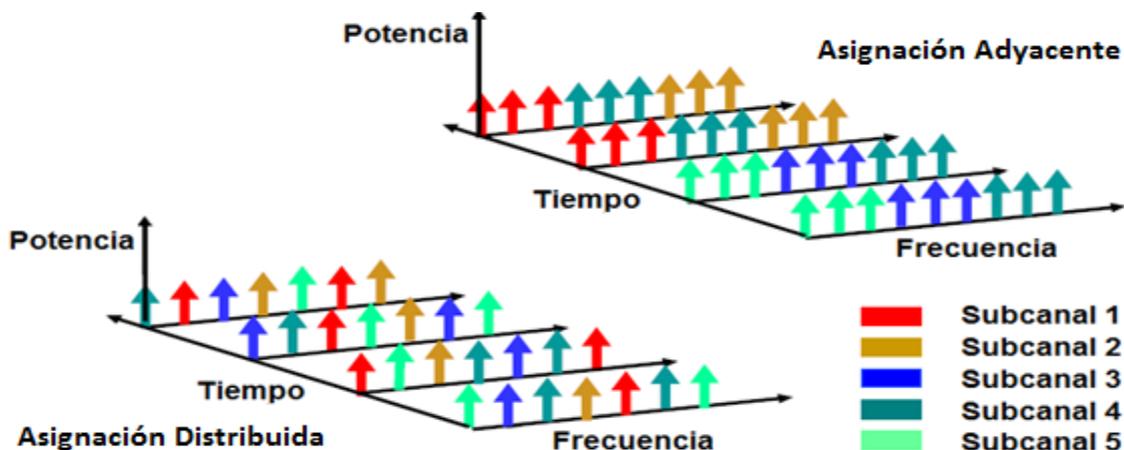


Figura 2.5. Asignación de las Portadoras en los Subcanales.

2.2.3. Esquema de Transmisión

En la figura 2.6 se muestra el diagrama de bloques de referencia de los sistemas de transmisión y recepción a nivel físico.

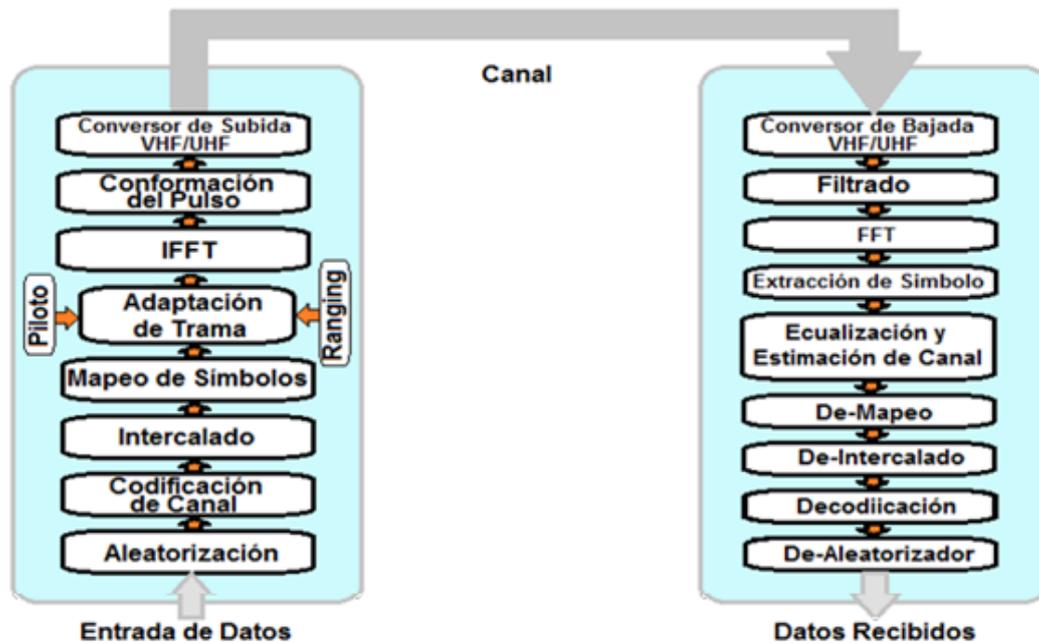


Figura 2.6. Esquema de Transmisión (Izquierda) y Recepción (Derecha).

El proceso de transmisión de los datos en el canal de subida que corresponde a ráfagas de 144 bits (18 bytes), 216 bits (27 bytes), 288 bits (36 bytes), 432 bits (54 bytes) o 648 bits (81 bytes), comienza con un bloque de aleatorización, el cual se emplea para mantener dispersa la energía de los bits en todo el ancho de banda ocupado. Un bloque para la codificación de errores de canal (bien sea un código Turbo ó concatenado Reed-Solomon y convolucional) continúa a la salida de la aleatorización. Luego se establece un mecanismo de Intercalado para proteger la información frente a errores de ráfaga (uno detrás de otro) y se establece su representación en números complejos, ubicándola en un diagrama de constelaciones para dar comienzo a un proceso de modulación. En la entrada de la etapa de modulación los datos codificados se agrupan en 144 símbolos de 2, 4 o 6 bits, mapeados mediante QPSK, 16QAM o 64QAM respectivamente.

Posteriormente, entre los símbolos de datos se insertan símbolos pilotos para poder referenciarlos en la recepción. El estándar también permite adicionar símbolos de relleno (null) y/o ranging para la sincronización de la estación base y el RCTT, es decir, aquellos que no representan carga útil de datos sino que cumplen funciones para la detección correcta de la información. La señal

OFDM en banda base se debe generar en el dominio del tiempo mediante la Transformada de Fourier Rápida Inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*). Los puntos de entrada de la IFFT corresponden a las 1024 o 2048 portadoras mapeadas. Luego, una técnica de generación de pulsos (Nyquist ó rectangular) continúa el proceso de transmisión y finaliza con el envío de la señal por el canal.

Para efectos de simulación en la que se enfoca este trabajo de grado, el tratamiento de la señal se realiza en banda base, por lo que en este último paso no se realiza la conversión de frecuencia a la banda UHF/VHF. Por otra parte, en el sistema de recepción se realiza un proceso contrario al realizado por el RCTT en el sistema de transmisión, que permite comparar y medir la cantidad de errores que se introducen en los datos originales.

2.2.4. Aleatorización

La aleatorización es un mecanismo que combina los bits de información con una secuencia pseudoaleatoria para evitar que se envíen cadenas continuas de 1's y 0's. Esto se consigue mediante el uso de un generador de Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS, *Pseudo Random Binary Sequence*) con polinomio $1+X^{14}+X^{15}$, el cual se encarga de insertar transiciones de unos y ceros en las cadenas de bits de los datos originales para convertirlos en una nueva secuencia de bits. La figura 2.7 muestra el bloque aleatorizador, el cual está comprendido por compuertas XOR⁴ y un registro de desplazamiento de 15 bits (10010101000000) que debe utilizarse por cada RCTT.

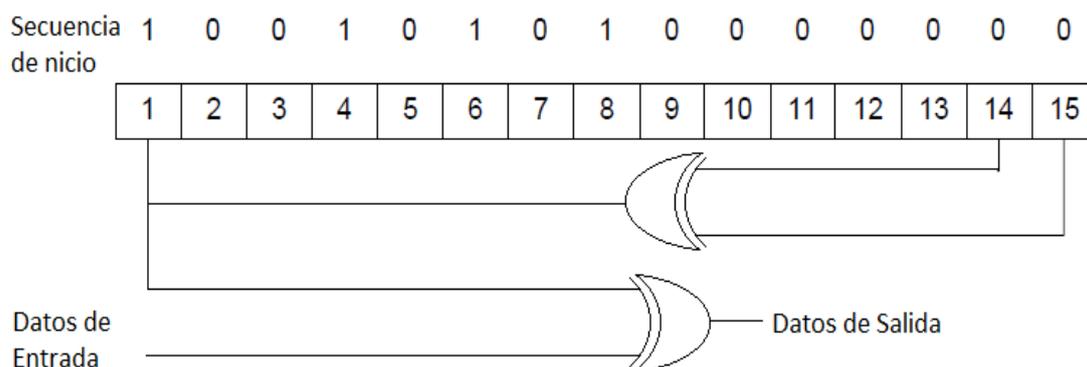


Figura 2.7. Aleatorizador del RCTT.

⁴ La compuerta XOR realiza sumas bit a bit cuyo resultado es 1 para sumas de bits distintos y 0 para sumas de bits iguales.

La secuencia inicial del PRBS debe aplicarse para cada nueva carga útil de datos, así por ejemplo, si entran 144 bits (18 bytes) que corresponden a la mínima ráfaga de datos útiles, entonces cada 18 bytes será el período para inicializar nuevamente el registro, como se aclara en la figura 2.8. Además, cada byte de datos a ser transmitido debe entrar secuencialmente al bloque teniendo en cuenta el Bit Más Significativo (MSB, *Most Significant Bit*) primero. Por ejemplo, si entra un byte de datos 11001100, entonces se debe tomar el bit 1 como el inicial en la secuencia a ser aleatorizada por el PRBS.

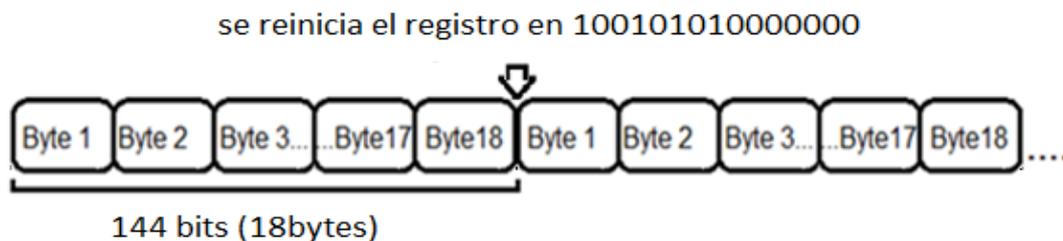


Figura 2.8. Estructura de la Ráfaga de Datos a ser Aleatorizados.

2.2.5. Codificación de Canal

La finalidad de la codificación de canal es la detección y corrección de errores producidos en el canal de transmisión, como consecuencia del ruido y la distorsión introducidos, tanto por el medio de propagación, como por las no linealidades en el propio sistema. Comúnmente se conocen dos formas de controlar los errores, una de ellas es empleada para detectarlos, esta técnica es conocida como Solicitud de Retransmisión Automática (ARQ, *Automatic Repeat Request*) en la que el receptor verifica los datos recibidos y en caso de detectar un error, solicita la retransmisión de los datos, de lo contrario, envía al transmisor un mensaje de confirmación de recepción correcta. El otro mecanismo de controlar los errores se denomina Corrección de Errores hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*), el cual, no solamente detecta errores sino que los corrige y lo hace teniendo en cuenta unos bits de paridad o redundancia que se agregan a los bits originales de información en la sección de transmisión y posteriormente, en recepción se hace una comparación y estimación de los bits transmitidos con mayor probabilidad, determinando así cuáles son los datos originales [12].

Para mantener controlados los errores generados en el canal de subida, el estándar define dos métodos FEC y solamente uno de ellos debe implementarse. Por una parte, están los turbo códigos, formados por la concatenación de dos o más codificadores Convolucionales Sistemáticos Recursivos (RSC, *Recursive Systematic Convolutional*) y un dispersor, cuyo

análisis se explica en [13]. La segunda opción, se refiere a los códigos concatenados en serie: Reed-Solomon y convolucional. Para ambos tipos de codificador, la relación de codificación que se puede aplicar es de 1/2 o 3/4. En la primera tasa, se emplean palabras de dos bits codificados por cada bit de información, lo cual significa que brinda una alta protección frente a errores pero reduce a la mitad el ancho de banda utilizado. Para la tasa de codificación de 3/4 se emplean palabras de cuatro bits codificados por cada tres bits de información, lo que representa una menor protección frente a errores, pero aprovecha más el canal. Así, en cualquiera de las dos, se emplea un bit de redundancia.

Si bien, se puede emplear cualquiera de las dos opciones de codificación de canal mencionadas, se ha escogido la codificación concatenada Reed-Solomon y convolucional por simplicidad y porque es la que generalmente se utiliza en los sistemas de TDT.

2.2.5.1. Codificación Reed-Solomon

Un código Reed-Solomon es un tipo de código bloque cíclico que trabaja con símbolos, cada uno de m bits individuales en serie y se especifica como $RS(n, k)$, donde n es la longitud en símbolos de la palabra de código, k es el número de símbolos de información y $n-k$ representa de número de símbolos de paridad.

La relación entre la longitud de la palabra de código y el número de símbolos (2^m) está dada por la ecuación (2.3):

$$n = 2^m - 1 \quad (2.3)$$

Además, el código puede corregir hasta t símbolos que contienen errores en una palabra de código y su relación está dada por la ecuación (2.4):

$$t = \frac{n - k}{2} \quad (2.4)$$

Donde k es despejado en la ecuación (2.5):

$$2^m - 1 - 2t \quad (2.5)$$

La tasa de codificación R , está dada por la relación entre los símbolos de información y los símbolos de la palabra de código, como se expresa en la ecuación (2.6):

$$R = \frac{k}{n} \quad (2.6)$$

Finalmente, el bloque de símbolos de la palabra de código tiene la estructura mostrada en la figura 2.9.

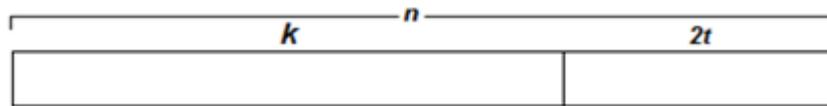


Figura 2.9. Estructura de la Palabra de Código.

El estándar DVB-RCT especifica el código RS (63, 55), es decir, que se emplean 63 símbolos de palabra de código en total, de los cuales 55 corresponden a símbolos de datos y 8 de paridad. De acuerdo con esto, en la ecuación (2.7) se muestra que m es equivalente a 6 y t a 4, es decir, que se emplean símbolos de seis bits y que el código puede corregir hasta cuatro símbolos que contienen errores.

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t) = (63, 55) \quad (2.7)$$

Los códigos Reed-Solomon se basan en la teoría de campos finitos o de Galois, los cuales tienen la propiedad que las operaciones aritméticas sobre elementos del campo siempre tienen un resultado en el mismo. Se debe determinar el campo para la codificación, el cual está definido en función de la longitud del símbolo (m). En este caso se tienen 6 bits por símbolo y el polinomio especial generador del campo de Galois correspondiente está dado por la ecuación (2.8) cuya explicación matemática se da en [14]. Además, se debe determinar el polinomio generador de la palabra código como muestra la ecuación (2.9), donde el grado de $g(x)$ está dado por el número de símbolos de paridad, es decir 8 en este caso.

$$P(x) = x^6 + x + 1 \quad (2.8)$$

$$g(x) = (x + \lambda^0) + (x + \lambda^1) + (x + \lambda^2) \dots + (x + \lambda^7) \quad (2.9)$$

Donde λ se conoce como un elemento primitivo del campo.

En la tabla 2.3 se establecen las tasas de codificación Reed Solomon, así como el tipo y número de símbolos codificados.

Tasa de Codificación	Esquema de Codificación	Esquema de Transmisión
3/4	31 símbolos cero y 24 de datos.	32 símbolos
9/10	19 símbolos cero. 36 símbolos de datos. 4 enmendaduras, empleando los 4 primeros símbolos de paridad de los 8 en total	40 símbolos

Tabla 2.3. Tasa y Esquema de Codificación RS.

2.2.5.2. Codificación Convolutiva

Un código convolutiva es lineal, es decir, que la suma de dos palabras cualesquiera de código también es otro código. A diferencia del código Reed-Solomon, trabaja bit a bit y no símbolo a símbolo. Además, tiene memoria. Esto significa que su n salida en cualquier unidad de tiempo no dependen solamente de las k entradas (bits originales de información) en ese tiempo, sino que también, de los bits almacenados en cada uno de los m bloques del codificador. De esta manera, el conjunto de k entradas, n salidas y m bloques previos se denota como código convolutiva (n,k,m) y se ve como una codificación continua, en la cual la secuencia de bits codificada depende de los bits anteriores. La figura 2.10 representa el diagrama de bloques del codificador convolutiva que se debe emplear en el enlace de subida.

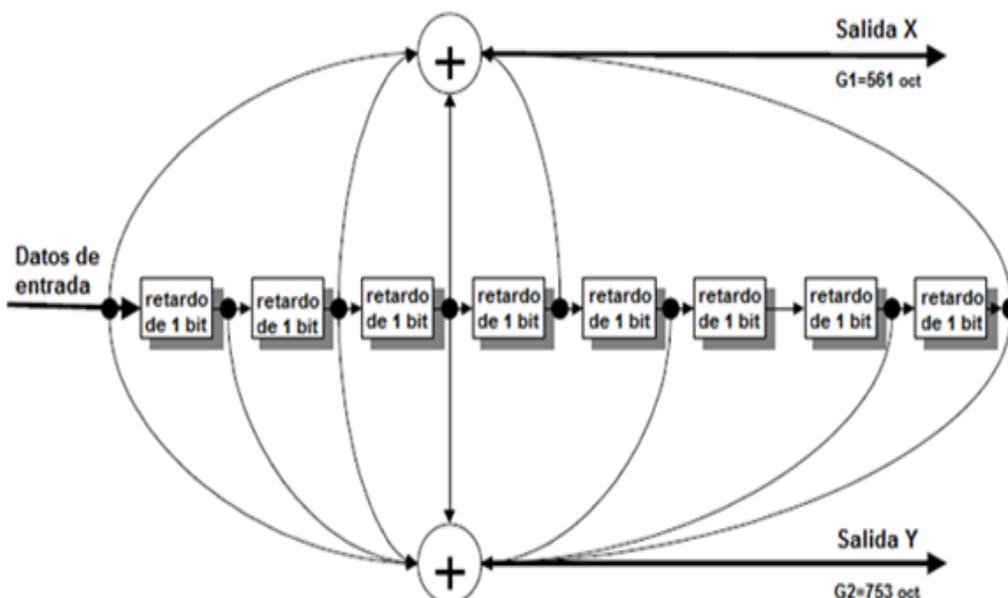


Figura 2.10. Esquema del Codificador Convolutiva.

En el esquema del codificador convolucional se puede apreciar que el bloque está orientado a bits y que distribuye en dos salidas (X e Y) el flujo original de datos al combinarlo con los bits almacenados o que se encuentran en un instante de tiempo dado en los registros, mediante sumas módulo 2, también conocidas como compuertas XOR. El codificador está formado por ocho registros de almacenamiento y dos bits de salida por cada bit que entra al sistema y el estándar define los polinomios generadores $G_1=561$ octal (101110001bin) para la salida X y $G_2=753$ octal (111101011bin) para la salida Y.

Una vez los datos pasan por el codificador convolucional, la palabra de código entra a un bloque de perforación (como se ilustra en la figura 2.11) que consiste en eliminar algunos bits de redundancia, dejando de transmitir algunos símbolos de paridad y se generan diferentes modos de transmisión que dependen del esquema de perforación elegido, tal como se indica en la tabla 2.4.

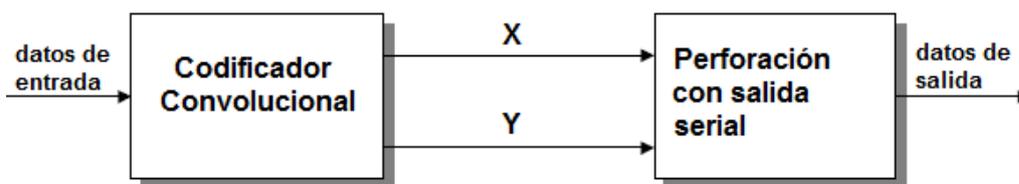


Figura 2.11. Diagrama de Bloques del Codificador Convolucional.

Tasa de Codificación Código Convolucional	Esquema de Perforado	Secuencia Transmitida (después de la conversión paralelo a serial)
2/3	X: 00 Y: 11	$X_1Y_1Y_2$
5/6	X: 10101 Y: 11010	$X_1Y_1Y_2X_3X_4X_5$

Tabla 2.4. Patrón de Perforación para el Estándar DVB-RCT.

Luego de aplicar los dos códigos concatenados se define una tasa de codificación total, es decir a la salida de estos códigos y debe ser la descrita en la tabla 2.5.

Tasa de Codificación Total	Codificación Reed-Solomon	Codificación Convolucional
1/2	3/4	2/3
3/4	9/10	5/6

Tabla 2.5. Tasa de Codificación Total.

En el sistema de recepción se recurre a la utilización del decodificador convolucional de Viterbi de tal manera que se pueda recuperar la secuencia de código original. Este procedimiento se explica en [15].

2.2.6. Intercalado

Sobre los datos que salen del codificador de canal, debe aplicarse un bloque de intercalado bit a bit para proteger la información frente a errores de ráfaga. Este tipo de errores, afectan a varios bits seguidos y al emplear este bloque, los errores de ráfaga se ven distribuidos entre varias palabras, facilitando la función correctora del código empleado. Un generador de PRBS mostrado en la figura 2.12, que utiliza el polinomio $1 + X^3 + X^{10}$ debe emplearse para generar el reordenamiento aleatorio.

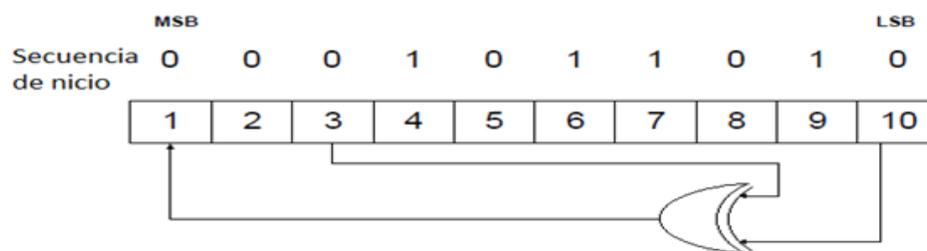


Figura 2.12. Generador PRBS para el Intercalado Aleatorio.

2.2.7. Esquemas de Modulación y Modulación Adaptativa

Dependiendo de las condiciones del canal, el sistema DVB-RCT permite que en la misma celda⁵ y al mismo tiempo se puedan asignar los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM. Esto se conoce como Modulación Adaptativa (AM, *Adaptive Modulation*) y le permite a la estación base controlar el uso de espectro. Así, cuando el canal es hostil, se le puede asignar a un RCTT el esquema de modulación QPSK ya que los puntos de las constelaciones se encuentran más separados en el plano complejo en comparación con los otros esquemas de modulación, lo cual hace más fácil la identificación de los símbolos en recepción. Sin embargo, únicamente emplea dos bits por portadora, lo cual conduce a un desperdicio del ancho de banda disponible para transmitir datos.

⁵ Una celda es un área geográfica compuesta por uno o varios transmisores en el enlace de bajada DVB-T con uno o más canales de enlace de subida controlados por una o varias estaciones base INAs.

Por otra parte, para enviar más información por portadora y por lo tanto, aprovechar mejor el ancho de banda disponible, se puede emplear la modulación 64QAM, puesto que permite manejar seis bits por portadora o 64 símbolos pero no permite sobrepasar tanto los efectos de ruido y dispersión como lo hace QAM ya que los estados, representados por los puntos en las constelaciones se encuentran mucho más cerca y es más difícil realizar una detección correcta en recepción. La otra posibilidad es 16QAM, en un punto intermedio con 16 estados, es decir, permite usar 4 bits por portadora. De esta manera, es posible variar el tipo de modulación en el RCTT, asignando la modulación 16QAM o 64QAM a los dispositivos que se encuentren más cerca de la estación base y la modulación QPSK a los terminales de usuario que se encuentren en la frontera de la zona de cobertura.

Los datos codificados entran secuencialmente al sistema de mapeo de constelaciones en grupos de 2, 4 o 6 bits para los esquemas de modulación QPSK, 16QAM o 64QAM respectivamente; donde el valor correspondiente de magnitud y fase de cada portadora se realiza mediante una asignación de código Gray⁶ en el plano complejo. En la figura 2.13 se muestra la ubicación de los símbolos en el plano complejo para cada uno de los esquemas de modulación mencionados.

⁶ El código Gray es un sistema de numeración binario, donde dos valores sucesivos difieren solamente en uno de sus dígitos. Para convertir binario a Gray simplemente se aplica suma módulo 2 al mismo número, con 1 desplazamiento a la derecha.

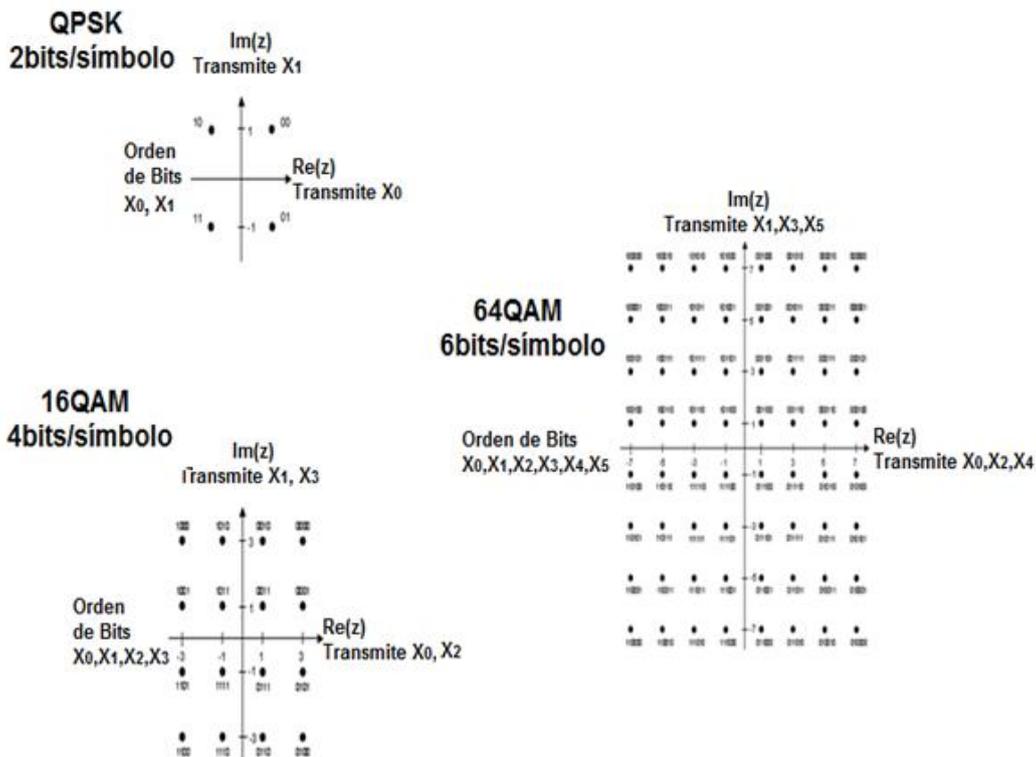


Figura 2.13. Diagrama de Constelaciones.

Dependiendo del esquema de modulación seleccionado, los símbolos complejos obtenidos como resultado del mapeo de la constelación deben ser normalizados con un factor C , para mantener constante la energía de la constelación como se muestra en la tabla 2.6.

Esquema de Modulación	Factor de Normalización
QPSK	$C=z/\sqrt{2}$
16QAM	$C=z/\sqrt{10}$
64QAM	$C=z/\sqrt{42}$

Tabla 2.6. Factor de Normalización para QPSK, 16QAM y 64QAM.

La ráfaga de datos generada luego de la codificación y el mapeo debe tener 144 símbolos complejos. La Tabla 2.7 muestra los parámetros de codificación, para las distintas combinaciones de tasa de codificación y tipo de modulación.

QPSK			
Tasa de Codificación	Entrada del RS	Entrada del Codificador Convolutivo	Salida del Codificador Concatenado
1/2	144 bits (24 símbolos)	192 bits (32 símbolos RS)	288 bits (2*144)
3/4	216bits (36 símbolos)	240 bits (40 símbolos RS)	288 bits (2*144)
16QAM			
Tasa de Codificación	Entrada del RS	Entrada del Codificador Convolutivo	Salida del Codificador Concatenado
1/2	288 bits (2x24 símbolos)	384 bits (2x32 símbolos RS)	576 bits (4*144)
3/4	432 bits (2x36 símbolos)	480 bits (2x40 símbolos RS)	576 bits (4*144)
64QAM			
Tasa de Codificación	Entrada de RS	Entrada de Codificador Convolutivo	Salida del Codificador Concatenado
1/2	432 bits (3x24 simbolos)	576 bits (3x32 símbolos RS)	864 bits (6*144)
3/4	648 bits (3x36 símbolos)	720 bits (3x40 símbolos RS)	864 bits (6*144)

Tabla 2.7. Configuración de Parámetros para la Codificación de Canal.

2.2.8. Mapeo y Estructuras de Ráfaga

Entre la carga útil de datos codificados que corresponde a 144 símbolos de 2, 4 o 6 bits deben insertarse símbolos piloto, para formar una de tres posibles estructuras de ráfaga BS1, BS2 ó BS3. Cada una de estas estructuras hace

uso de un conjunto de portadoras denominado subcanal y la selección correspondiente para una transmisión determinada se relaciona con una compensación entre diversidad de frecuencia y la duración de la ráfaga de datos de usuario. Así, se define una BS1 como la estructura de ráfaga que emplea una única portadora para transportar el total de los símbolos de datos (carga útil y piloto), con una norma opcional de Salto de Frecuencia (FH, *Frequency Hopping*) aplicada mientras dura la ráfaga; BS2 debe emplear simultáneamente 4 portadoras, cada una transportando la cuarta parte de la ráfaga total. Por otra parte, BS3 debe usar 29 portadoras, cada una llevando la veintinueveava parte de la ráfaga total. La figura 2.14 muestra la configuración básica de las estructuras de ráfaga BS1, BS2 y BS3, teniendo en cuenta el número de portadoras y su representación en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

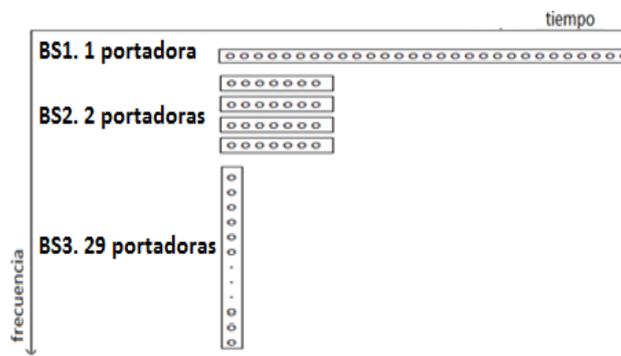


Figura 2.14. Organización de BS1, BS2 y BS3.

Así, una ráfaga corta le brinda robustez al sistema contra interferencia, pero también la asignación de más portadoras a un único usuario, por lo cual pocos usuarios pueden ser servidos; mientras que con una ráfaga larga hace un uso más eficiente del espectro.

2.2.8.1. Símbolos Piloto

Los símbolos piloto son conocidos tanto en transmisión como en recepción y se insertan en determinadas posiciones de la señal OFDM con el objeto de formar la estructura de ráfaga y referenciar los datos. Esta inserción debe hacerse con un nivel de potencia mayor a la de los demás símbolos para lograr una buena relación de señal a ruido y poder así hacer una estimación correcta de cuáles son los datos transmitidos [16]. Para su efecto, se emplea un generador PRBS con polinomio $X^{11}+X^2+1$, mostrado den la figura 2.15, con el fin de producir una secuencia denominada Wk . Así, la inserción piloto en la portadora k , se debe derivar de esta secuencia.

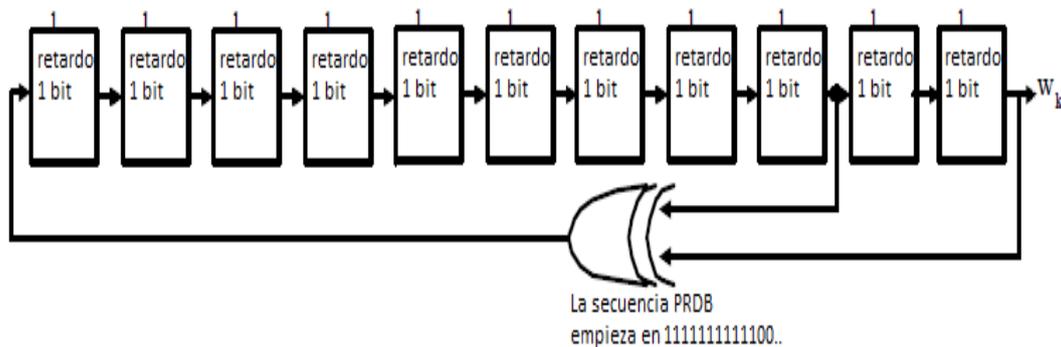


Figura 2.15. Secuencia del Generador PRBS para la Modulación Piloto.

El PRBS debe inicializarse de tal manera que su primer bit de salida coincida con la primera portadora útil y un nuevo valor debe generarse por el PRBS en cada portadora útil. Además, se establecen dos niveles de potencia para las portadoras piloto, los cuales son 2.5 dB y 0 dB que corresponden a la potencia de símbolo útil, cuyo valor depende de la posición de la piloto en la BS (entre las portadoras de datos). De esta manera, las portadoras piloto se modulan con las ecuaciones 2.10 o 2.11:

Portadoras piloto impulsadas (2.5 dB):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{C_k\} & \left(\frac{4}{3}\right) * 2 \left(\frac{1}{2} - W_k\right) \\ \Im\{C_k\} & = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Portadoras piloto no impulsadas (0 dB):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{C_k\} & 2 \left(\frac{1}{2} - W_k\right) \\ \Im\{C_k\} & = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Donde C_k , hace referencia a la portadora k .

A continuación se especifica la estructura de ráfaga BS3 (la cual se ha seleccionado en el presente trabajo para los fines de la simulación) dejando la explicación de las estructuras de ráfaga BS1, BS2 y la disposición de las mismas dentro de una trama de transmisión en el Anexo A.

2.2.8.2. Estructura de Ráfaga 3 (BS3):

La estructura de ráfaga BS3 debe usar veintinueve portadoras simultáneamente por subcanal. En esta configuración cada portadora lleva la veintinueveava parte de la ráfaga para transportar 144 símbolos de datos y 30 pilotos, para un total de 174 símbolos OFDM de usuario. Se emplea una conformación rectangular de portadoras para protección frente a interferencias

entre portadoras. La inserción de los símbolos piloto se establece como se muestra en la figura 2.16.

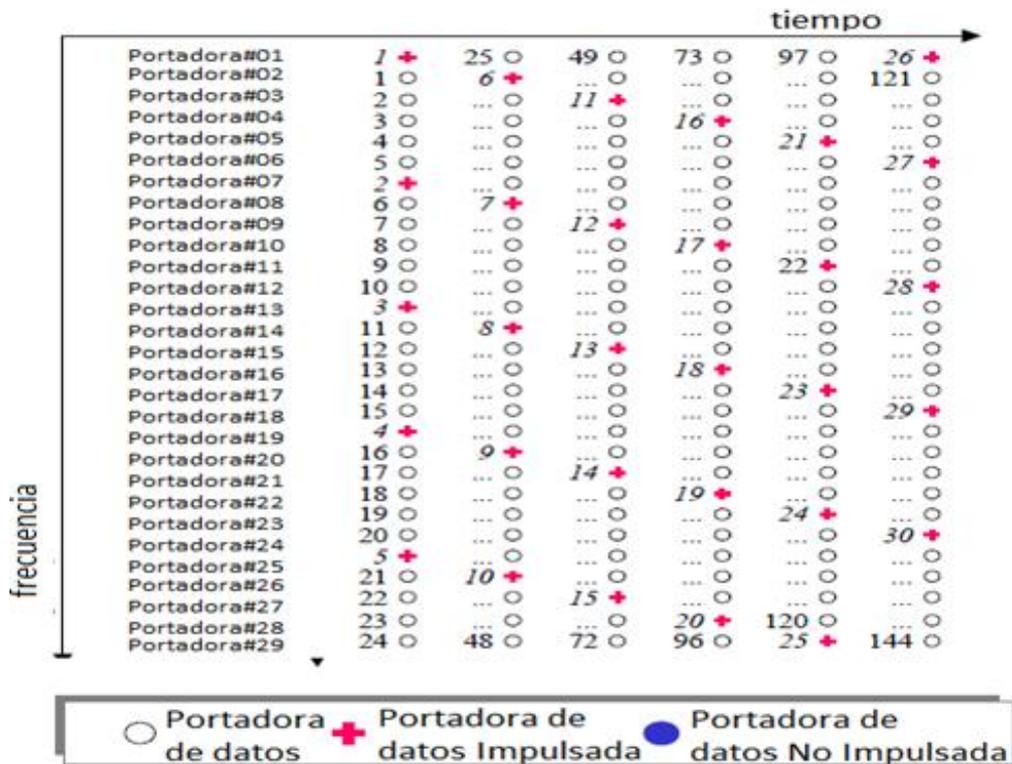


Figura 2.16. Organización de una BS3

- Numeración de subcanales en una BS3

En el dominio de la frecuencia, la BS3 sigue los siguientes parámetros mostrados en la tabla 2.8.

Parámetro	Modo 2K	Modo 1K
Portadoras Usadas Totales	2048	1024
Portadoras Útiles	1712	842
Numeración de Portadoras	0..1711	0..841
Banda de Guarda Izquierda	168	91
Banda de Guarda Derecha	168	91
Portadora Excluída (DC)	856	421
Número de Subcanales	59	29
Numeración de Subcanales SCN	0,10,20,30,...,580	0,10,20,30,...,280

Tabla 2.8. Parámetros en el dominio de la frecuencia en una BS3.

- **Formación de los Subcanales en el modo 2K.**

En el modo 2K se emplean 1711 portadoras pues se excluye la portadora DC que es utilizada por el RCTT para localizar el centro de la banda de frecuencias, de esta manera se forman 59 subcanales de 29 portadoras cada uno. Para ubicar las portadoras en los subcanales se emplea un código de permutaciones basado en la siguiente serie:

11, 3, 33, 9, 40, 27, 2, 22, 6, 7, 18, 21, 54, 4, 44, 12, 14, 36, 42, 49, 8, 29, 24, 28, 13, 25, 39, 16, 58, 48, 56, 26, 50, 19, 32, 57, 37, 53, 0, 52, 41, 38, 5, 55, 15, 47, 45, 23, 17, 10, 51, 30, 35, 31, 46, 34, 20, 43, 1.

La serie debe realizar un movimiento cíclico, lo cual da 59 permutaciones rotando hacia la izquierda, de tal manera que el primer valor de la serie actual será el último de la siguiente, así: 3, 33, 9, 40, 27, 2, 22, 6, 7, 18, 21, 54, 4, 44, 12, 14, 36, 42, 49, 8, 29, 24, 28, 13, 25, 39, 16, 58, 48, 56, 26, 50, 19, 32, 57, 37, 53, 0, 52, 41, 38, 5, 55, 15, 47, 45, 23, 17, 10, 51, 30, 35, 31, 46, 34, 20, 43, 1, 11.

Para obtener un subconjunto de 29 números, es decir, los números de las portadoras que conformarán un subcanal; solamente se van a tener en cuenta los primeros 29 valores de la serie. Así, un subconjunto sería: 11, 3, 33, 9, 40, 27, 2, 22, 6, 7, 18, 21, 54, 4, 44, 12, 14, 36, 42, 49, 8, 29, 24, 28, 13, 25, 39, 16, 58.

Haciendo una rotación hacia la izquierda el siguiente subconjunto quedaría: 3, 33, 9, 40, 27, 2, 22, 6, 7, 18, 21, 54, 4, 44, 12, 14, 36, 42, 49, 8, 29, 24, 28, 13, 25, 39, 16, 58, 48. Y el siguiente: 33, 9, 40, 27, 2, 22, 6, 7, 18, 21, 54, 4, 44, 12, 14, 36, 42, 49, 8, 29, 24, 28, 13, 25, 39, 16, 58, 48, 56, etc.

Para definir un subcanal formado por un conjunto de 29 portadoras, se debe aplicar la ecuación 2.12.

$$Carrier\# = 59 * n + (index(n) + Unique_{Key}) \bmod 59 \quad (2.12)$$

Y si $Carrier \geq 856$, entonces $Carrier\# = Carrier\# + 1$

Donde,

- ✓ Carrier#: denota el número de la portadora en el subcanal. Va de 0 a 1711 (excepto la 856).
- ✓ n: es el índice de la portadora y está comprendido entre 0 y 28.
- ✓ Index(n): denota el número que tiene el índice n en el subconjunto. Por ejemplo, en la serie original si n es 0, entonces index (0) es 11, para n igual a 1, index(1) equivale a 3.
- ✓ Unique_{Key}: es un valor entero único para cada canal de subida, el cual DVB-RCT lo establece entre 0 y 255.

En conclusión, este procedimiento matemático genera 59 subcanales (de 0 a 58) de 29 portadoras (de 0 a 28) cada uno. Estos subcanales se denotan como Carrier-sets#J, donde J está ubicado 0 y 58.

- **Formación de los Subcanales en el modo 1K.**

En el modo 1K se deben generar 29 subcanales de 29 portadoras cada uno. Para esto se emplea la siguiente serie de permutación cíclica:

10, 13, 14, 24, 8, 22, 17, 25, 18, 6, 2, 20, 26, 28, 19, 16, 0, 15, 5, 21, 7, 12, 4, 11, 23, 27, 9, 3, 1. Y al rotar número a número hacia la izquierda queda entonces la nueva serie:

13, 14, 24, 8, 22, 17, 25, 18, 6, 2, 20, 26, 28, 19, 16, 0, 15, 5, 21, 7, 12, 4, 11, 23, 27, 9, 3, 1, 10.

Igualmente se debe aplicar una fórmula que permita obtener un subcanal formado por 29 portadoras como indica la ecuación 2.13. Este proceso crea 29 subcanales (de 0 a 28) de 29 portadoras cada uno (de 0 a 28) y se denotan como Carrier-Sets#J, donde J está entre 0 y 28.

2.2.9. Transformación al Dominio del Tiempo de la Señal OFDM en Banda Base

Para generar la señal OFDM en banda base se debe emplear la técnica IFFT cuyo procedimiento matemático se explica en [17]. Esta técnica convierte las portadoras representadas por números complejos de la constelación correspondiente del esquema de modulación empleado, con una amplitud y fase definidas, en muestras en el dominio del tiempo. Así, las entradas al bloque dependen del modo de transmisión empleado. En el modo 1K, toma 842 puntos que corresponden a las portadoras usadas y rellena con ceros los 182 restantes, para completar 1024. En el modo 2K, la entrada es de 1712 puntos y rellena con 336 ceros para completar 2048, ya que esta técnica recibe datos de entrada en potencias de dos.

2.2.10. Organización del canal Radiofrecuencia

El acceso multiusuario se consigue gracias a que el canal de radiofrecuencia de subida emplea las técnicas de División de Tiempo (TD, *Time Division*) y División de Frecuencia (FD, *Frequency Division*) por cualquiera de dos métodos de formación de pulsos y solamente se debe emplear uno: Nyquist ó rectangular.

2.2.10.1. Filtro Nyquist

Emplea un filtro Nyquist en cada portadora cuya función matemática debe implementarse con el fin de generar un pulso de coseno alzado de raíz cuadrada con un factor de roll-off de 0.25. Su respuesta en el dominio del tiempo en un periodo de duración de ocho símbolos está dada por la ecuación (2.14):

$$C(t) = \frac{\sin \left[\frac{\pi t}{TS} (1 - \alpha) \right] + \frac{4\alpha t}{Tu} \cos \left[\frac{\pi t}{Tu} (1 + \alpha) \right]}{\frac{\pi t}{Tu} \left[1 - \left(\frac{4\alpha t}{Tu} \right)^2 \right]} \quad (2.14)$$

$t \in \{-4Ts, 4Ts\}$

Donde, Tu es la duración del símbolo, α es el factor de roll-off y TS es la duración total del símbolo. Además, la relación entre Tu , el espacio entre portadoras CS y el factor de roll-off; establece la separación individual espectral y está dada por la ecuación (2.15):

$$T_s = (1 + \alpha) \cdot C_S \quad (2.15)$$

2.2.10.2. Filtro Rectangular

En la formación de los pulsos rectangulares se utiliza un arreglo ortogonal de portadoras y un tiempo o Intervalo de Guarda (GI, *Guard Interval*) entre los símbolos modulados para brindar inmunidad contra ICI e Interferencia Inter Simbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*). La función del filtro rectangular está dada por la ecuación (2.16):

$$g(t) = 1; 0 \leq t \leq T_s \quad (2.16)$$

0; en otro caso

Donde, $g(t)$ denota la función de filtrado, t es el tiempo y toma un valor de 0 al comienzo de la trama y T_s es la duración total del símbolo, es decir, la duración de símbolo útil adicionando la del intervalo de guarda.

2.2.10.3. Intervalo de Guarda

Cuando se transmite una señal por un canal inalámbrico ocurren múltiples reflexiones lo cual genera retardos en los símbolos recibidos, debido a los distintos caminos que puede recorrer la señal, como consecuencia los símbolos se traslapan lo que ocasiona ISI. En la figura 2.17 se muestra una representación de este fenómeno.

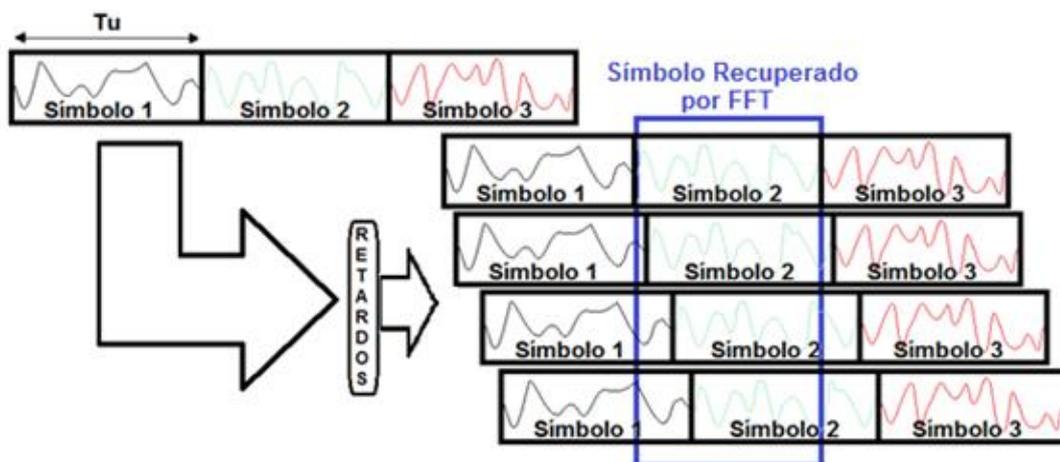


Figura 2.17. Interferencia Inter Simbólica.

El sistema de recepción debe determinar cuál es el símbolo OFDM que corresponde con el transmitido, sin embargo, en un instante dado puede haber información del símbolo 1 y del símbolo 2 e incluso una parte de este último no se detecta. Una de las propiedades más importantes de las transmisiones

OFDM es la robustez frente a los retardos ocasionados por la multitrayecto y se logra teniendo un periodo de símbolo suficientemente largo para minimizar la ISI. El nivel de robustez aún puede mejorarse adicionando un intervalo de guarda entre los símbolos transmitidos, durante el cual una continuación cíclica (o prefijo cíclico) de la parte final del símbolo útil se inserta al comienzo del mismo como se aprecia en la figura 2.18.

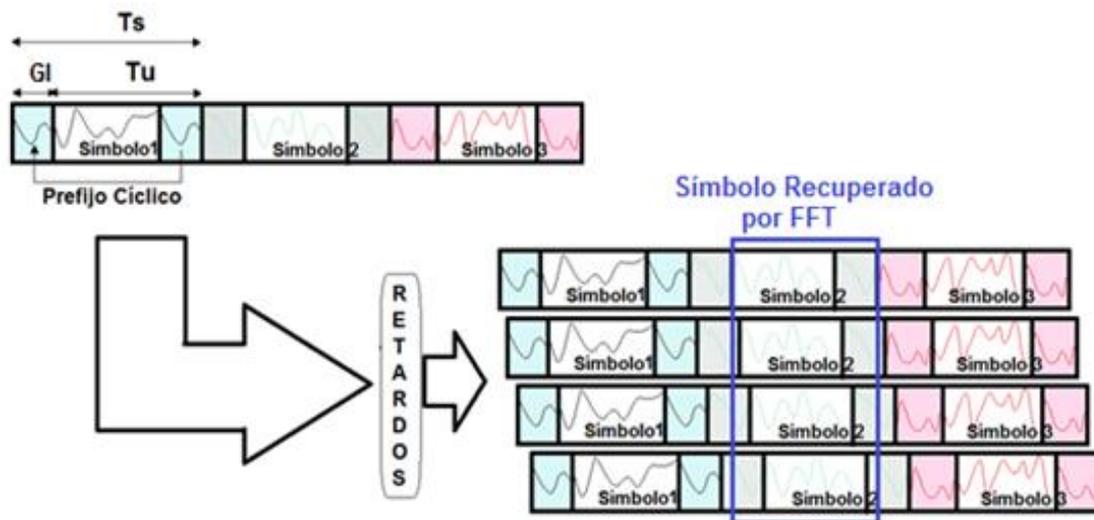


Figura 2.18. Adición del Intervalo de Guarda para minimizar ISI.

Ahora, con la adición del GI la información contenida en las señales reflejadas coincide en el tiempo útil del símbolo de la señal principal. Debido a que el receptor ignora la señal recibida durante dicho intervalo entonces se reduce la ISI. Los valores de GI que define el estándar son 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32. Así mismo, cuanto mayor sea el valor de este período, mayor protección frente a ISI va a presentar pero menor eficiencia espectral se consigue.

2.2.11. Transmisión de la señal OFDM

Luego de aplicar las técnicas de procesamiento digital, la señal transmitida por un RCTT se define por la fórmula mostrada en la ecuación (2.17).

$$S_u(t) = \Re \sum_{k=k'}^{\infty} \sum_{n=N_0}^{NE} a_{k,n} X g(t - nTs) \exp \left[i2\pi \left(f_0 + \frac{k}{ts} \right) t \right] \quad (2.17)$$

Donde,

- ✓ k : denota el índice de la portadora transmitida
- ✓ K' : denota un conjunto de portadoras definidas como Sub-Canal.
- ✓ n : denota el número del símbolo dentro la trama transmitida.
- ✓ N_0 : denota el número del símbolo de inicio dentro de la trama transmitida.
- ✓ N_E : denota el número del símbolo final dentro la trama transmitida.
- ✓ T_s : es la duración total del símbolo.
- ✓ t_s : es el inverso del espacio entre portadoras (T_u).
- ✓ f_0 : es la frecuencia de la primera portadora (con la frecuencia más baja del conjunto).
- ✓ $a_{k,n}$: es el símbolo de la modulación compleja de la portadora k del símbolo de datos número n .
- ✓ $g(t)$: denota la función de filtrado (Nyquist o rectangular).
- ✓ t : es el tiempo, se coloca cero en el comienzo de una estructura de ráfaga.

2.3. CANAL DE COMUNICACIONES

En el presente trabajo se evalúa y analiza el desempeño a nivel físico del estándar DVB-RCT en el enlace de subida considerando que está afectado por el Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Aditive White Gaussian Noise*).

2.3.1. Canal con Ruido Gaussiano

En los elementos activos y pasivos de los sistemas de comunicaciones, existe un tipo de ruido que está presente independientemente si hay o no señal de entrada. A esta perturbación se le conoce como ruido no correlacionado y el más común es el AWGN. El modelo de canal que tiene en cuenta esta naturaleza, considera que el ruido tiene una densidad espectral de potencia uniforme, es decir, que está presente en toda la gama de frecuencias con la misma potencia (ruido blanco) y se adiciona a la señal original (lo que ocasiona limitantes en la detección correcta de la información en el sistema de recepción).

2.4. AMBIENTE DE SIMULACIÓN

La simulación es una herramienta que permite realizar el diseño, planeación, dimensionamiento y análisis de muchos sistemas digitales de telecomunicaciones, que resulta muy económica, práctica y aproximada a la realidad. Su importancia en el presente trabajo se refleja en cuanto no hay disponibilidad de dispositivos físicos de telecomunicaciones específicos que permitan una experimentación real para el análisis del estándar DVB-RCT,

tales dispositivos pueden ser el decodificador RCTT o equipos de transmisión y recepción que incluyen antenas, amplificadores de potencia o conversores de frecuencia UHF/VHF y elementos digitales de medición de los niveles y la calidad de la señal.

3. MODELO DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo del modelo de simulación a nivel físico del estándar DVB-RCT en el enlace de subida, según la norma ETSI EN 301 958 funcionando en un sistema banda base se tienen en cuenta los lineamientos planteados en el documento metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones. En este capítulo se desarrollan las siguientes fases propuestas por los autores de la metodología.

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS

De acuerdo con la metodología empleada en la formulación de los objetivos de la simulación se tuvieron en cuenta los siguientes pasos:

- Adquisición de información del funcionamiento del sistema.
- Identificación de los fines de la simulación.
- Formulación de los objetivos.

3.1.1. Adquisición de Información del Funcionamiento del Sistema.

3.1.1.1. Transmisor.

¿Qué tipo de señales se procesan en el transmisor?

El transmisor procesa una señal binaria pseudoaleatoria que representa los datos de carga útil generados en un terminal RCTT. El procesamiento de la señal se realiza secuencialmente pasando por las etapas de codificación de canal y modulación digital, en donde se mapea el vector de datos binarios en el plano complejo para obtener una señal modulada en fase y en cuadratura. La señal obtenida es un vector de 144 símbolos que es mapeada en una estructura de ráfaga, haciendo una inclusión de señales piloto que se genera a partir de un polinomio PRBS. Para crear los símbolos OFDMA que define el estándar DVB-RCT, se realiza un proceso de transformación mediante la IFFT de la señal del dominio de la frecuencia al dominio temporal. En la salida, se obtendrá una señal OFDMA modulada en banda base⁷, teniendo en cuenta los esquemas de modulación QPSK, 16QAM ó 64QAM.

⁷ Una señal modulada en banda base Indica que el sistema no realizará el traslado de la señal modulada a una frecuencia específica

¿Qué pasos sigue el transmisor para el procesamiento de las señales en cuestión?

El transmisor emplea técnicas utilizadas para crear una señal OFDMA mediante una combinación selectiva de portadoras que se modulan en amplitud y fase de acuerdo a la estructura de ráfaga, la trama de transmisión y el esquema de modulación propuesto. En el inicio la fuente genera datos aleatorios cuyo tamaño depende de la tasa de codificación y el esquema de modulación empleados. Seguidamente, se aplican las técnicas de codificación de canal mediante los códigos concatenados Reed-Solomon y los códigos convolucionales que añaden símbolos de redundancia a la palabra mensaje originada en la fuente. Posteriormente, se realiza un proceso de intercalado que permite una dispersión de los bits para proteger la señal transmitida frente a errores de ráfaga. Los datos modulan las portadoras haciendo uso de los esquemas QPSK, 16QAM ó 64QAM.

Los datos modulados (mapeados) son organizados en una estructura de ráfaga, siguiendo un patrón de inserción de portadoras piloto producido por un polinomio PRBS. La unidad mínima de asignación de recursos es un *slot* formado por 29 portadoras en el dominio en frecuencia y 6 símbolos OFDMA en el dominio del tiempo. Las 29 portadoras del *slot* se obtienen mediante el cálculo de valores que se realiza en el proceso de subcanalización. Cada subcanal obtenido se forma por una serie única de valores que indican la posición de cada portadora en el espectro de frecuencias en el ancho de banda asignado. Dependiendo del número de portadoras totales se utiliza una serie de permutación específica. Cada símbolo OFDMA se genera en banda base al convertir la señal espectral del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo mediante la IFFT. El empleo de esta técnica permite un uso más eficiente del ancho de banda del canal. Luego de esto, la señal se protege frente a ISI mediante la adición de un prefijo cíclico y se envía por el canal.

¿Qué factores serán evaluados en la simulación?

En el transmisor se varía el esquema de modulación, la tasa de codificación, el número de subcanales y el número de portadoras, para analizar los diagramas de constelación, gráficas de desempeño, diagramas de ojo y el espectro de frecuencias de las señales procesadas.

3.1.1.2. Canal.

¿Qué tipo de señales va a procesar el canal?

El canal recibe una señal OFDMA que proviene del transmisor, a la salida de este subsistema se entrega una señal OFDMA afectada por las características intrínsecas de un canal inalámbrico como son la multitrayectoria y el ruido AWGN. En el modelo propuesto se consideran solamente los efectos producidos por el ruido.

¿Qué pasos sigue el canal para el procesamiento de las señales en cuestión?

En este subsistema se modela el canal de tal forma que se apliquen procedimientos que simulen las características de un canal inalámbrico con un modelo de propagación de ruido AWGN.

¿Qué factores serán evaluados en la simulación?

Ruido Blanco Aditivo Gaussiano: adiciona el AWGN para entregar al receptor una señal afectada por este tipo de degradación.

3.1.1.3. Receptor.

¿Qué tipo de señales va a procesar el receptor?

Al receptor llegará la señal OFDMA afectada por los efectos de un canal con ruido AWGN. A su vez el receptor entregará la señal binaria correspondiente a los datos de carga útil originados en la fuente.

¿Qué pasos sigue el receptor para el procesamiento de las señales en cuestión?

Para obtener la señal de información como se originó en la fuente es necesario configurar el receptor de tal manera que se logre interpretar las señales recibidas y se extraiga de estas los parámetros que se requieren tal como fueron enviados por el transmisor, se realicen procesos de detección de errores a nivel de bit y a nivel de byte hasta reconstruir la ráfaga de datos original.

En recepción se procesa una señal distorsionada por los efectos del canal, siguiendo unas etapas similares a las realizadas en la transmisión. Inicialmente se hace una eliminación del prefijo cíclico y un de-filtrado sobre la duración útil del símbolo OFDMA. Luego, se realiza una conversión del símbolo al dominio de la frecuencia por medio de la FFT y se procede a identificar las portadoras que conforman los subcanales (ya sea en el modo 1K o 2K) empleadas para transmitir los símbolos. En seguida, se establece una extracción de los 144 símbolos de datos entre la estructura de ráfaga enviada y se decodifican

mediante el código de detección convolucional de Viterbi y un decodificador Reed-Solomon. Finalmente se aplica un bloque de-aleatorizador para recibir los datos originales.

¿Qué factores serán evaluados en la simulación?

En el receptor se evalúa la Tasa de Errores de Bit (BER, *Bit Error Rate*) respecto a la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) que permite determinar el desempeño a nivel físico del enlace de subida del estándar DVB-RCT.

3.1.2. Identificación de los Fines de la Simulación.

Mediante la adaptación y aplicación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, se busca evaluar el desempeño a nivel físico en el enlace de subida de un sistema en banda base definido por el estándar DVB-RCT en un entorno de simulación. Para este propósito se hacen variaciones en la tasa de codificación, esquema de modulación, número de subcanales y número de portadoras totales usadas, teniendo en cuenta los efectos que involucra usar un canal inalámbrico con AWGN.

3.1.3. Formulación de los Objetivos

- Evaluar el desempeño a nivel físico en el enlace de subida del estándar DVB-RCT, funcionando en un sistema en banda base, para diferentes esquemas de modulación, para diferentes tasas de codificación.
- Evaluar el desempeño a nivel físico en el enlace de subida del estándar DVB-RCT, funcionando en un sistema en banda base, para diferentes esquemas de modulación.
- Evaluar el desempeño a nivel físico en el enlace de subida del estándar DVB-RCT, funcionando en un sistema en banda base, para diferente número de subcanales.
- Evaluar el desempeño a nivel físico en el enlace de subida del estándar DVB-RCT, funcionando en un sistema en banda base, para diferentes modos de transmisión 1K ó 2K.

Para la evaluación de desempeño en cada configuración se consideraron los parámetros de, BER en relación a la SNR.

3.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El sistema a simular presenta cierto grado de complejidad por lo tanto requiere de un proceso dispendioso que incluye la identificación de clases y objetos, de las estructuras, los sujetos, los atributos y servicios o métodos, de cada uno de los subsistemas (transmisor, modelo de canal y receptor). Para la correcta identificación de estos elementos se recurre a la información disponible en la norma ETSI EN 301 958. Así mismo, para obtener resultados satisfactorios en la formulación del modelo de simulación se seguirán los siguientes pasos:

- Identificación de clases y objetos.
- Identificación de estructuras.
- Identificación de sujetos.
- Definición de atributos.
- Identificación de servicios o métodos.

3.2.1. Modelo del Transmisor.

3.2.1.1. Identificación de Clases y Objetos.

Tomando como referencia el libro basado en la adaptación y aplicación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, en el que se especifica que un objeto para un sistema de telecomunicaciones es un componente que procesa y/o genera una o varias señales, en el sistema a simular se consideran los siguientes objetos en el transmisor: generador de datos, codificador, modulador digital y modulador OFDMA DVB-RCT.

3.2.1.2. Identificación de Estructuras.

El término estructura es una expresión que se emplea para manejar la complejidad de un sistema. El análisis orientado a objetos basa su trabajo en las estructuras Gen-Spec⁸ (Generalización-Especificación) y Whole-Part⁹ (Todo-Parte).

A continuación se presentan los respectivos diagramas de las estructuras del generador de datos, codificador, modulador digital y modulador OFDMA DVB-RCT.

⁸ Gen-Spec (Generalización-Especificación). Esta estructura es conocida como estructura de clasificación. Va desde las clases con atributos y servicios generales hasta las clases más especializadas.

⁹ Whole-Part (Todo-Parte). Conocida como estructura de ensamblaje.

a. Generador de Datos

El generador de datos se define mediante la estructura que se indica en la figura 3.1.

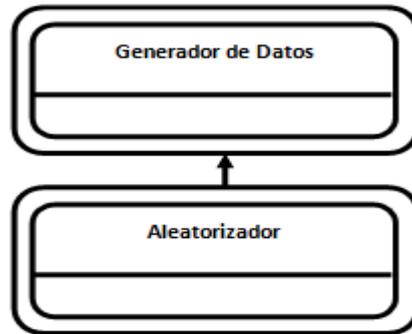


Figura 3.1. Estructura del Generador de Datos.

b. Codificador de Canal.

El codificador de canal se define mediante la estructura Whole-Part (Todo-Parte), donde se establecen dos componentes que se denominan: codificador concatenado e intercalador. El codificador concatenado a su vez se compone de otros dos componentes; el codificador Reed-Solomon y el codificador convolucional. La estructura del codificador de canal se indica en la figura 3.2

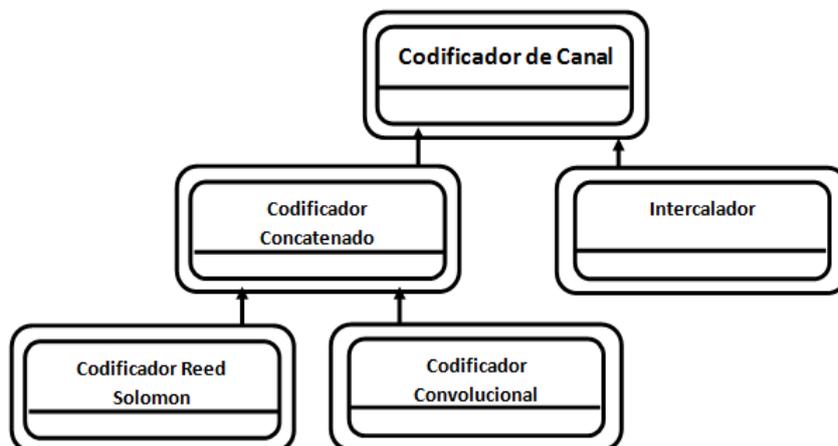


Figura 3.2. Estructura del Codificador de Canal.

c. Modulador Digital

Este módulo recibe los datos codificados que llegan como una secuencia de bits y los agrupa en 2, 4 o 6 bits dependiendo del esquema de modulación, ya sea QPSK, 16QAM o 64QAM, respectivamente. La estructura del modulador digital se indica en la figura 3.3.

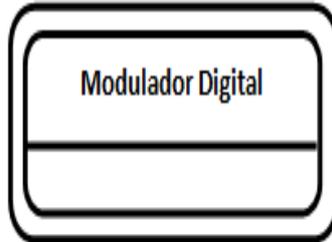


Figura 3.3. Modulador Digital.

d. Modulador OFDMA DVB-RCT

Este objeto se representa mediante una estructura Todo-Parte. Está compuesto por los siguientes objetos: estructura de ráfaga, asignación de subcanales, modulador multiportadora (IFFT), filtro rectangular y adición de prefijo cíclico. La estructura del modulador OFDMA DVB-RCT se indica en la figura 3.4

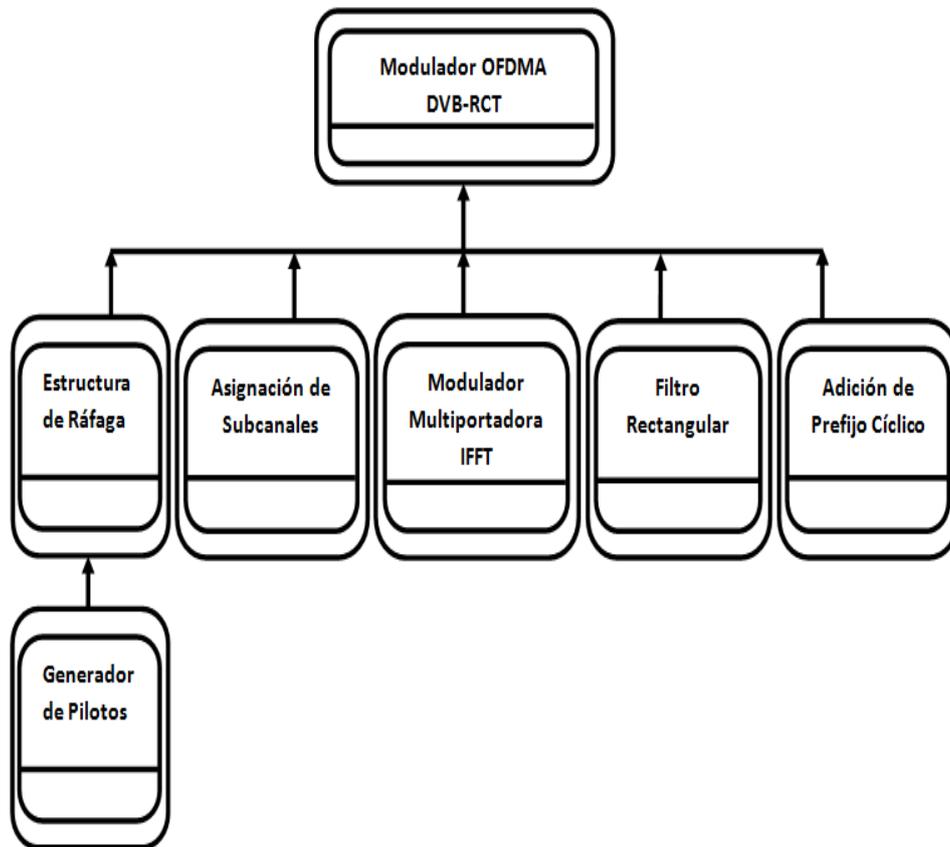


Figura 3.4. Estructura del Modulador OFDMA DVB-RCT.

e. Estructura de Ráfaga

Los símbolos piloto se insertan mediante una secuencia pseudoaleatoria dentro de los símbolos de datos modulados para establecer una estructura de ráfaga. Los símbolos piloto tienen diversas utilidades entre ellas, el facilitar la sincronización y estimación del canal, así como la detección de desplazamientos en fase y en frecuencia. La estructura del componente estructura de ráfaga se indica en la figura 3.5

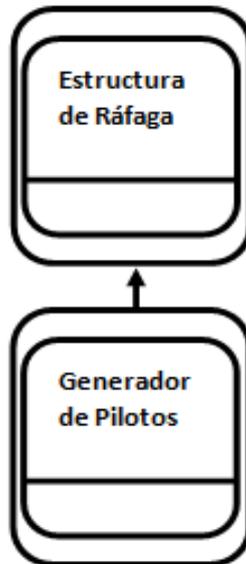


Figura 3.5. Estructura del Componente Estructura de Ráfaga.

3.2.1.3. Identificación de los Sujetos.

En el análisis orientado a objetos un sujeto es un concepto que representa el todo de un sistema desde una perspectiva alta. Para seleccionar un sujeto se remueve el nivel más alto de una estructura de tal manera que sea lo más independiente posible y tenga mínima interacción con otros sujetos.

En el transmisor se identifican cuatro sujetos: generador de datos, codificador de canal, modulador digital y modulador OFDMA DVB-RCT.

3.2.1.4. Identificación de los Atributos.

Teniendo en cuenta que cada objeto se considera de manera independiente se definen los atributos del generador de datos, codificador de canal, modulador digital y el modulador OFMDA DVB-RCT.

a. Identificación de los Atributos del Generador de Datos

Nombre: longitud.

Descripción: número de bits que se generan dependiendo del esquema de modulación y la tasa de codificación asignados.

Nombre: datos de carga útil.

Descripción: conjunto de datos binarios generados en la fuente.

b. Identificación de los Atributos del Codificador

Nombre: tasa de codificación.

Descripción: es la relación entre el número total de símbolos y los símbolos del mensaje original que se agrupan a la entrada del codificador. Puede tomar los valores $1/2$ y $3/4$.

c. Identificación de los Atributos del Modulador Digital

Nombre: esquema de modulación.

Descripción: es el tipo de modulación digital que se utiliza para el mapeo de la señal binaria. Los esquemas pueden ser QPSK, 16QAM y 64QAM.

d. Identificación de los Atributos del Modulador OFDMA DVB-RCT

Nombre: modo.

Descripción: número de portadoras utilizadas en el canal de radiofrecuencia, se usan los modos 1K o 2K, con 1024 y 2048 portadoras respectivamente.

Nombre: espaciamiento entre portadoras.

Descripción: distancia entre frecuencias portadoras ortogonales utilizadas para la transmisión de los datos. C1, C2 y CS3.

Nombre: ancho de banda DVB-T.

Descripción: este puede ser de 6MHz, 7MHz ó 8MHz. El ancho de banda ocupado en el enlace de subida para el estándar DVB-RCT, depende de las variaciones del modo y el espaciamiento entre portadoras.

Nombre: prefijo cíclico.

Descripción: intervalo de guarda entre símbolos OFDMA modulados. Toma valores de $1/4$, $1/8$, $1/16$ o $1/32$ de la duración útil de símbolo.

Nombre: número de subcanales.

Descripción: conjunto de portadoras que se asignan a una estructura de ráfaga para el envío de los datos.

3.2.1.5. Identificación de Servicios o Métodos.

A continuación se describen los servicios o métodos considerando a cada objeto de manera independiente.

a. Identificación de los Métodos para el Generador de Datos

Nombre: fijar longitud.

Descripción: establece la longitud de los datos de carga útil que van a ser generados. Invoca atributos del codificador y el modulador digital¹⁰.

Nombre: generar datos.

Descripción: genera secuencias finitas de bits.

Nombre: aleatorizar datos.

Descripción: distribuye aleatoriamente los datos generados mediante un proceso que incluye un polinomio PRBS.

b. Identificación de los Métodos para el Codificador de Canal

Nombre: fijar tasa de codificación.

Descripción: fija la tasa a la cual se va a codificar los datos. Puede tomar los valores 1/2 o 3/4.

Nombre: codificar.

Descripción: aplica la codificación de los datos de entrada, mediante el procesamiento de los bits en cada uno de los componentes del codificador de manera secuencial. Se añade redundancia mediante los procesos que se realizan en el codificador Reed-Solomon y en el codificador convolucional. En el primero se hace un procesamiento bloque a bloque, en el segundo bit a bit.

Nombre: codificar datos.

¹⁰ Longitud de la ráfaga de datos para la tasa de codificación total de 1/2 o 3/4 con esquema de modulación QPSK: 288 bits (144*2), 16QAM: 576 bits (144*4), 64QAM: 864 bits (144*6).

Descripción: se adicionan símbolos de paridad y de relleno.

Nombre: fijar vector de perforación.

Descripción: es un vector binario de longitud constante que introduce retardos en los bits a la entrada del codificador convolucional.

Nombre: intercalar.

Descripción: aplica un proceso de intercalado a los bits a la salida del codificador concatenado.

c. Modulador Digital

Nombre: modular.

Descripción: realiza la modulación de las portadoras con los bits de carga útil previamente codificados, en una matriz de números complejos de la forma $a+jb$, según el esquema de la modulación (QPSK, 16QAM, 64QAM).

d. Modulador OFDMA DVB-RCT

Nombre: generar portadoras piloto.

Descripción: crea portadoras piloto dispersas.

Nombre: mapeo de portadoras.

Descripción: mapea las portadoras de datos y piloto en una estructura de ráfaga.

Nombre: fijar subcanal.

Descripción: mapea las portadoras de datos de usuario provenientes de la estructura de ráfaga mediante un código de permutación cíclica, en portadoras distribuidas a lo largo del total de las usadas en la transmisión. Esto es, en las 1024 o 2048 portadoras.

Nombre: aplicar IFFT.

Descripción: convierte una señal del dominio de la de la frecuencia al dominio del tiempo, mediante una modulación de múltiples portadoras.

Nombre: adicionar prefijo cíclico.

Descripción: agrega una copia de la parte final del símbolo, al principio del mismo. La duración de la copia depende del intervalo de guarda aplicado al símbolo. Este intervalo puede ser de 1/4, 1/8, 1/16 ó 1/32.

Nombre: filtrar.

Descripción: se aplica un tipo de filtrado con una configuración rectangular, donde la salida unitaria depende de la duración del tiempo de símbolo incluyendo el prefijo cíclico.

Nombre: generar símbolo OFDMA.

Descripción: genera un símbolo OFDMA que contiene datos de usuario, según, el espacio entre portadoras, el modo de transmisión, el tipo de prefijo cíclico y ancho de banda del sistema.

3.2.2. Modelo del Canal.

3.2.2.1. Identificación de Clases y Objetos.

Para el modelo del canal se identifica como único objeto el canal de transmisión.

3.2.2.2. Identificación de las Estructuras.

a. Canal de Transmisión

El modelo de canal se compone de una estructura Gen-Spec, donde la clase denominada canal de transmisión, hereda las características al objeto canal AWGN. La estructura del canal de transmisión se indica en la figura 3.6.



Figura 3.6. Estructura del Canal de Transmisión.

3.2.2.3. Identificación de los Sujetos.

La estructura permite identificar el sujeto canal de transmisión.

3.2.2.4. Identificación de los Atributos.

a. Identificación de los Atributos del Canal de Transmisión

Nombre: SNR.

Descripción: relación que existe entre la potencia de la señal y la potencia de ruido.

3.2.2.5. Identificación de Servicios o Métodos.

a. Identificación de Métodos para el Canal de Transmisión

Nombre: fijar SNR.

Descripción: permite establecer el valor de SNR a partir del cual se determina el nivel de ruido que se le adicionará a la señal a través del canal, respecto al nivel de potencia de la señal.

3.2.3. Modelo del Receptor.

Para esta simulación se propone un modelo receptor con componente duales al transmisor que permitan recibir la señal afectada por las perturbaciones en el canal de transmisión.

3.2.3.1. Identificación de Clases y Objetos.

En el receptor se puede identificar como objetos el demodulador OFDMA DVB-RCT, demodulador digital, el decodificador de canal y el receptor de datos.

3.2.3.2. Identificación de las Estructuras.

a. Demodulador OFDMA DVB-RCT

El demodulador OFDMA DVB-RCT se define mediante la estructura Whole-Part, lo que significa que está constituido por los siguientes componentes: de-filtrado, remoción de prefijo cíclico, demodulador multiportadora FFT, identificación de subcanal y extracción de símbolos de ráfaga. La estructura del demodulador OFDMA DVB-RCT se indica en la figura 3.7.

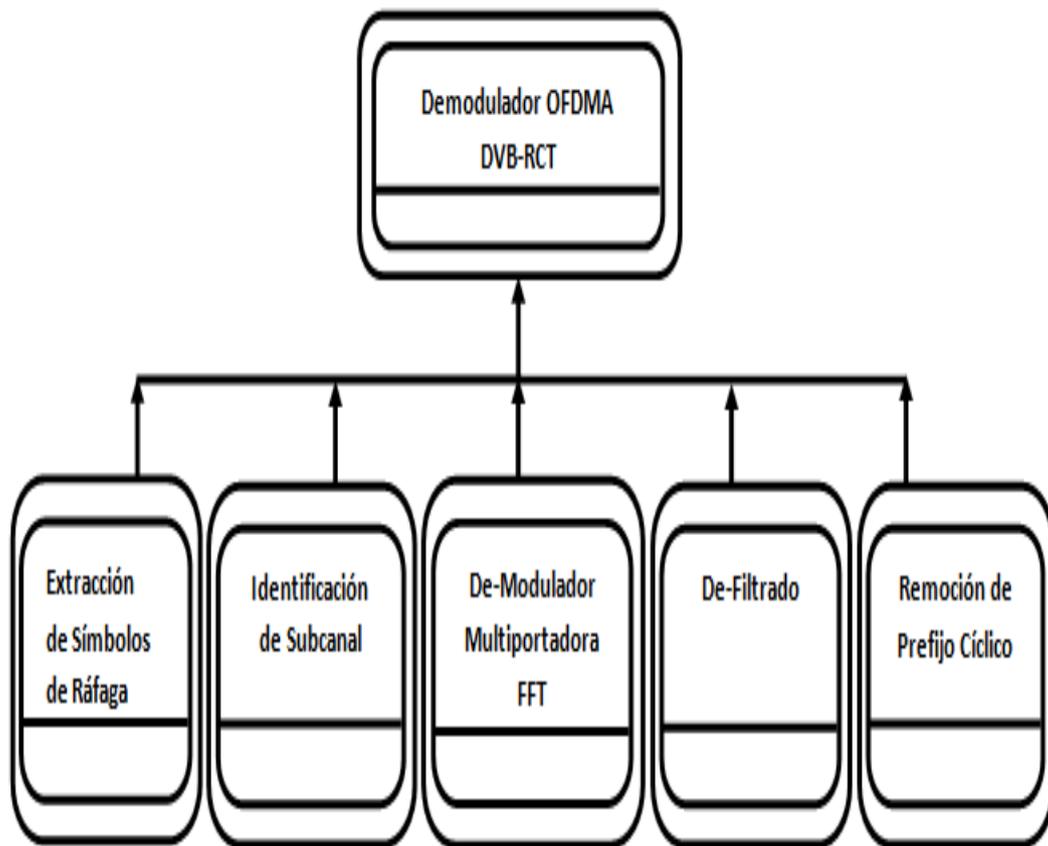


Figura 3.7. Estructura del Demodulador OFDMA DVB-RCT.

b. Demodulador Digital

La estructura del demodulador digital se indica en la figura 3.8.

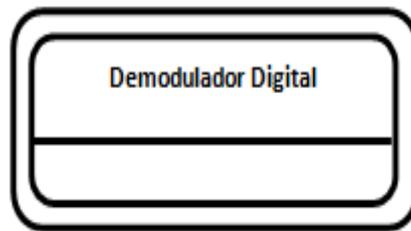


Figura 3.8. Estructura del Demodulador Digital.

c. Decodificador de Canal

El decodificador de canal presenta una estructura del tipo Whole-Part. Se establecen los componentes: decodificador concatenado y de-intercalador. La estructura del decodificador de canal se indica en la figura 3.9.

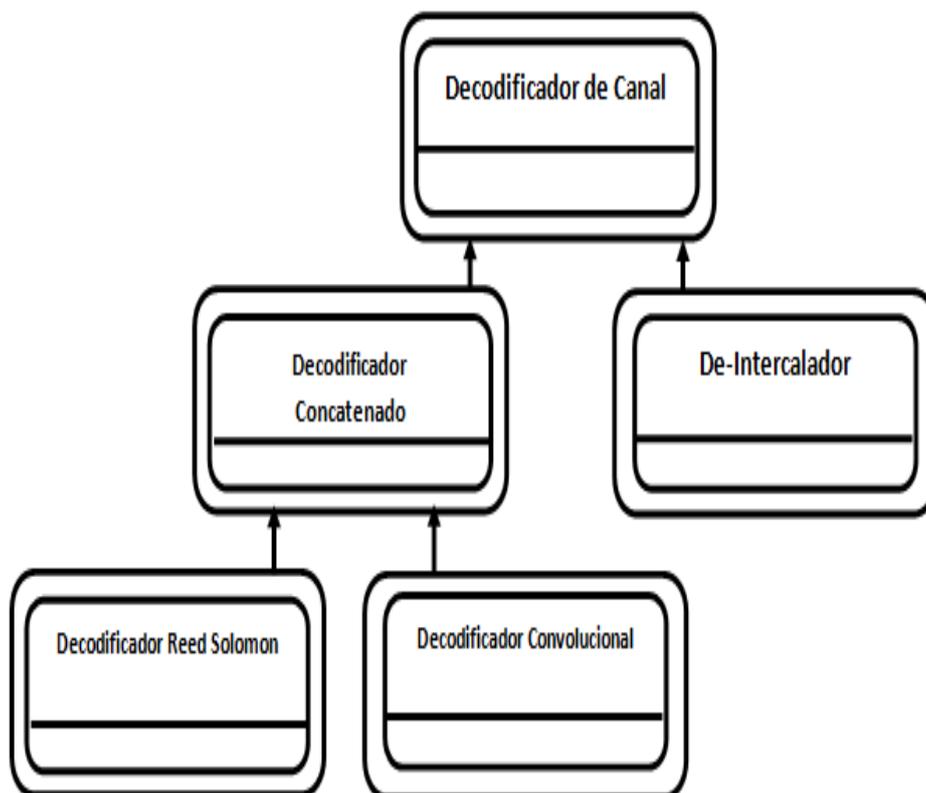


Figura 3.9. Estructura del Decodificador de Canal.

d. Receptor de Datos

Este objeto permite confrontar la señal a la salida del receptor con la señal generada en el transmisor para obtener las variaciones y errores introducidos en el canal. La estructura del receptor de datos se indica en la figura 3.10.

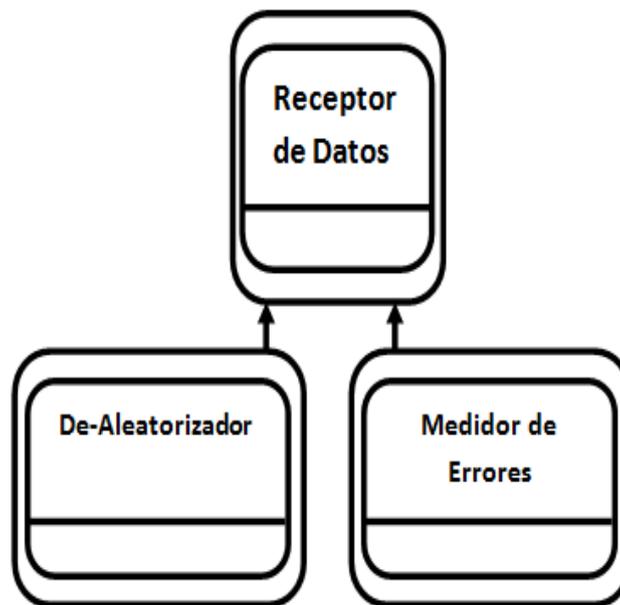


Figura 3.10. Estructura del Receptor de Datos.

3.2.3.3. Identificación de los Sujetos.

La estructura permite identificar los sujetos demodulador OFDMA DVB-RCT, demodulador digital, decodificador de canal y receptor de datos.

3.2.3.4. Identificación de los Atributos

a. Identificación de los Atributos del Demodulador OFDMA DVB-RCT

Nombre: modo.

Descripción: número de portadoras utilizadas en el canal, se usan los modos 1K o 2K, con 1024 y 2048 portadoras respectivamente.

Nombre: espaciamiento entre portadoras.

Descripción: distancia entre frecuencias portadoras ortogonales utilizadas para la transmisión de los datos.

Nombre: ancho de banda DVB-T.

Descripción: el ancho de banda DVB-T puede tomar los valores 6 MHz, 7 MHz ó 8 MHz El canal asignado al enlace de subida depende de las variaciones del modo y el espaciamiento entre portadoras.

Nombre: prefijo cíclico.

Descripción: intervalo de guarda entre símbolos OFDMA modulados. Toma valores de 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32 de la duración útil de símbolo.

Nombre: número de subcanales.

Descripción: conjunto de portadoras que se asignan a una estructura de ráfaga para el envío de los datos.

b. Identificación de los Atributos del Demodulador Digital

Nombre: esquema de modulación.

Descripción: es el tipo de modulación digital que se utiliza para el de-mapeo de la señal. Los esquemas pueden ser QPSK, 16QAM y 64QAM.

c. Identificación de los Atributos del Decodificador de Canal

Nombre: tasa de codificación.

Descripción: es la relación entre el número total de símbolos a la salida del codificador de canal y los símbolos del mensaje original, que se agrupan a la entrada del decodificador. Puede tomar los valores 1/2 y 3/4.

d. Identificación de los Atributos Receptor de Datos

Nombre: tipo de gráfico.

Descripción: conjunto de gráficas que se pueden obtener mediante la evaluación de los parámetros.

3.2.3.5. Identificación de Servicios o Métodos

a. Identificación de los Métodos del Demodulador OFDMA DVB-RCT

Nombre: detectar símbolo OFDMA.

Descripción: detecta un símbolo OFDMA afectado por las perturbaciones del canal.

Nombre: de-filtrar.

Descripción: se aplica un tipo de filtrado inverso con una configuración rectangular, donde la salida unitaria depende de la duración del tiempo de símbolo incluyendo el prefijo cíclico.

Nombre: remoción prefijo cíclico.

Descripción: remueve el intervalo de guarda aplicado al inicio del símbolo OFDMA. Este intervalo puede tomar valores desde 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32.

Nombre: aplicar FFT.

Descripción: convierte una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Nombre: identificar subcanal.

Descripción: identifica las portadoras de datos de usuario provenientes del componente IFFT y reasigna las portadoras a una estructura de ráfaga.

Nombre: de-mapeo de portadoras.

Descripción: recibe la señal en el dominio de la frecuencia entregada por la FFT y recupera los datos de un usuario específico según las especificaciones asignadas, retirando las portadoras que no se utilizaron en el ancho de banda del sistema.

Nombre: detectar portadoras piloto.

Descripción: detecta las portadoras piloto dispersas que están ubicadas en una estructura de ráfaga.

b. Identificación de los Métodos del Demodulador Digital

Nombre: demodular.

Descripción: recibe los 144 símbolos de datos de la estructura BS3 y recupera los bits de datos de cada portadora, mediante uno de los tres esquemas QPSK, 16QAM ó 64QAM, para entregarlos al decodificador de canal.

c. Identificación de los Métodos del Decodificador de Canal

Nombre: decodificar.

Descripción: se realiza el proceso de decodificación los cuales se encargan de detectar y corregir los errores introducidos en el canal.

d. Identificación de los Métodos del Receptor de Datos

Nombre: fijar tipo de gráfica.

Descripción: permite establecer la configuración para un gráfico determinado.

Nombre: de-aleatorizar.

Descripción: redistribuye la energía de la secuencia de bits eliminando las transiciones insertadas en la etapa de transmisión.

Nombre: medir errores.

Descripción: compara los datos de carga útil recibidos con los datos de carga útil transmitidos para obtener el número de errores totales.

3.3. MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo propuesto es una combinación de objetos instanciados a partir de las clases y estructuras descritas, siguiendo un flujo de datos secuencial, donde a partir de una carga de datos se realiza el proceso de transmisión en banda base.

El sistema total se dividió en tres subsistemas mediante una abstracción que permite abordar el problema inicial con mayor claridad así mismo reduciendo su complejidad. De esta manera se facilita la recolección de datos para la descripción de los atributos y métodos los cuales son factores determinantes en el correcto comportamiento de simulador. Los subsistemas que hacen parte del modelo de simulación son transmisor, canal y receptor. La estructura del modelo de simulación se indica en la figura 3.11.

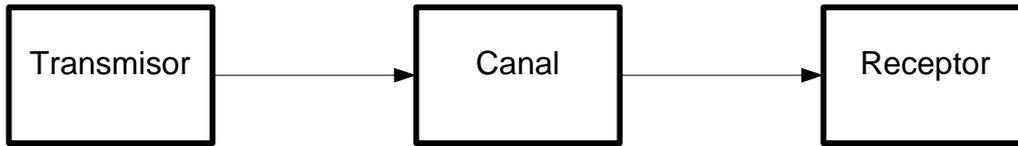


Figura 3.11. Estructura del Modelo de Simulación.

El desarrollo de cada subsistema se presenta a continuación.

3.3.1. Modelo de Simulación del Transmisor.

La estructura del transmisor se indica en la figura 3.12.

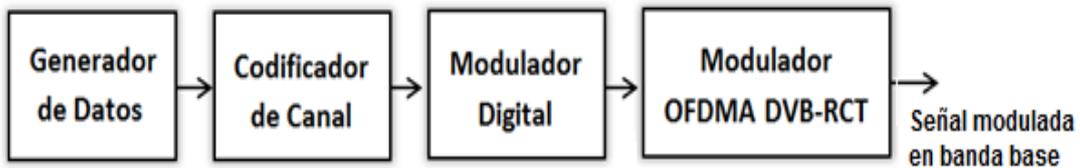


Figura 3.12. Estructura del Transmisor

3.3.1.1. Estructura Interna y Caracterización del Generador de Datos

El generador de datos es el objeto encargado de definir la palabra mensaje que corresponde a la fuente de los datos de usuario del transmisor. La estructura del mismo se indica en la figura 3.13.

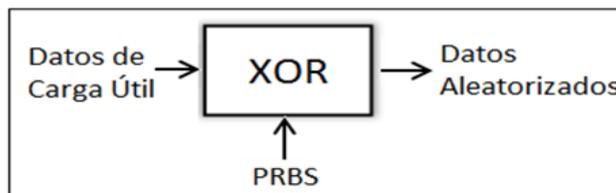


Figura 3.13. Estructura Interna del Generador de Datos.

Señales de Entrada: ninguna.

Señales de Salida: datos de carga útil.

Variables de Entrada: corresponden a la especificación de las características del generador de datos, estas son:

- Longitud.
- Datos de carga útil.

Variable de Salida: corresponden a la caracterización de los datos de usuario generados, estas son:

- Longitud de los datos aleatorizados.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: al interior del generador de datos se distingue un componente que corresponde al aleatorizador. Sus respectivas señales y variables de describen a continuación.

✓ Aleatorizador

Señales de Entrada: se encuentran dos señales a la entrada del aleatorizador. Los datos de carga útil y el polinomio PRBS $1+x^{14}+x^{15}$.

Señales de Salida: datos de usuario aleatorizados.

Descripción: obtiene los datos de carga útil aleatorizados como resultado de la aplicación de una compuerta lógica XOR entre los datos de carga útil y el polinomio PRBS.

3.3.1.2. Estructura Interna y Caracterización del Codificador de Canal.

La estructura del codificador de canal se indica en la figura 3.14

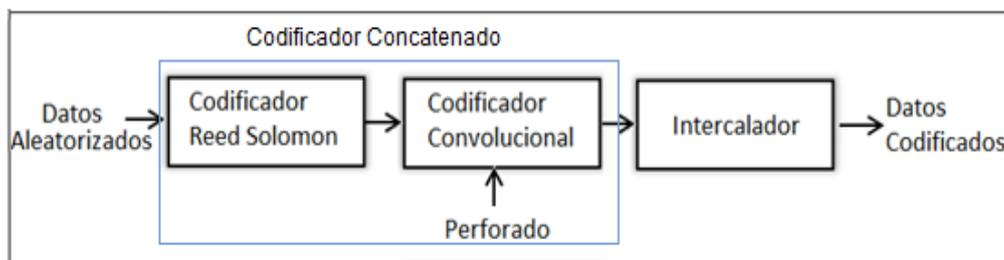


Figura 3.14. Estructura Interna del Codificador de Canal.

Señales de Entrada: datos de carga útil aleatorizados que se desean codificar.

Señales de Salida: datos de carga útil codificados.

Variables de Entrada: corresponde a la especificación de las características del codificador de canal, esta es:

- Tasa de codificación.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: el codificador está compuesto por dos elementos, cada uno desarrolla procesos internos específicos. Sus respectivas señales se describen a continuación.

✓ Codificador Concatenado

I. Codificador Reed-Solomon.

Señales de Entrada: datos de carga útil aleatorizados.

Señales de Salida: datos codificados provenientes del procesamiento de la señal en el codificador Reed-Solomon.

Descripción: obtiene los datos de carga útil codificados según la tasa de codificación que se aplique. A la entrada el codificador reorganiza los datos de carga útil en palabras de seis bits, formando un símbolo. El codificador Reed-Solomon adiciona símbolos de paridad.

II. Codificador Convolutivo

Señales de Entrada: se encuentran dos señales a la entrada del codificador convolutivo. Los datos de carga útil codificados en el codificador Reed-Solomon y un vector de perforación.

Señales de Salida: datos codificados provenientes del procesamiento de la señal en el codificador convolutivo.

Descripción: obtiene los datos de carga útil provenientes del codificador Reed-Solomon y aplica un procesamiento de codificación en el que se adiciona redundancia. Este componente utiliza códigos convolutivos y mediante un vector de perforación específico el cual depende de la tasa de codificación local que puede ser 2/3 o 5/6, se selecciona el código de corrección de error más adecuado eliminando algunos bits de redundancia.

✓ Intercalador

Señales de Entrada: se encuentran dos señales a la entrada del intercalador. Los datos de carga útil con redundancia que fueron codificados y un polinomio PRBS $1+x^3+x^{10}$.

Señales de Salida: datos de carga útil intercalados.

Descripción: consiste en un conjunto de registros de corrimiento que desplaza cada bit de la ráfaga de datos un determinado paso. Esto evita enviar ráfagas de errores consecutivos.

3.3.1.3. Estructura Interna y Caracterización del Modulador Digital

La estructura del modulador digital se indica en la figura 3.15.



Figura 3.15. Estructura Interna del Modulador Digital.

Señales de Entrada: datos codificados, los bits de entrada son agrupados en 2, 4 o 6, bits dependiendo del tipo de modulación.

Señales de Salida: la señal de salida, es un flujo constante de 144 símbolos complejos modulados en fase y/o en amplitud.

Variables de Entrada: corresponde a la especificación de las características del modulador digital, este es:

- Esquema de modulación.

3.3.1.4. Estructura Interna y Caracterización del Modulador OFDMA DVB-RCT.

La estructura del modulador OFDMA DVB-RCT se indica en la figura 3.16.

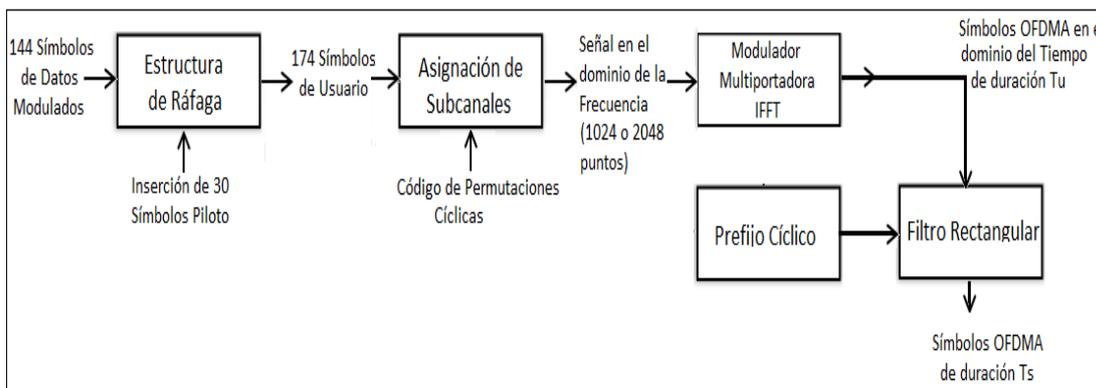


Figura 3.16. Estructura Interna del Modulador OFDMA DVB-RCT.

Señales de Entrada: señal de 144 símbolos complejos modulados.

Señales de Salida: señal OFDMA en banda base.

Variables de Entrada: corresponden a la especificación de las características del modulador OFDMA DVB-RCT, estas son:

- Modo

- Espaciamiento entre portadoras.
- Número de subcanales.
- Ancho de banda DVB-T
- Prefijo cíclico.

Variables de Salida:

- Tiempo.
- Frecuencia.
- Espectro de la señal.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: el modulador OFDMA DVB-RCT está compuesto por cuatro componentes.

✓ **Estructura de Ráfaga**

Señales de Entrada: 144 símbolos de datos modulados y 30 símbolos piloto.

Señales de Salida: datos de usuario, mapeados en una matriz de 29 filas por 6 columnas, lo que constituye una estructura de ráfaga.

Descripción: se mapean los 144 símbolos de datos modulados en una estructura de ráfaga o *slot* junto con los símbolos piloto generados a partir de un polinomio PRBS $x^{11}+x^2+1$. La tasa de distribución en la estructura de ráfaga es de un símbolo de portadora piloto por cada seis símbolos de portadoras da datos aproximadamente. El *slot* es una matriz que tiene 29 filas por 6 columnas con símbolos de usuario. Las filas se definen como portadoras en el dominio de la frecuencia y las columnas como símbolos en el dominio del tiempo.

✓ **Asignación de Subcanales**

Señales de Entrada: *slot* de datos de usuario y código de permutación cíclica.

Señales de Salida: señal en el dominio de la frecuencia.

Descripción: el *slot* de datos de usuario es mapeado haciendo un recorrido por filas a un valor de portadora generado por el código de permutación cíclica hasta completar las 29 filas de la matriz. Para cada *slot* de entrada se realiza una permutación donde se escogen los primeros 29 valores de la serie. Tal como se explica en el inciso 2.2.8.2, del capítulo 2. Las portadoras entonces

son mapeadas en el vector de puntos de la IFFT que corresponden a 1024 o 2048 puntos.

✓ **Modulador Multiportadora (IFFT)**

Señales de Entrada: señal en el dominio de la frecuencia.

Señales de Salida: señal en el dominio del tiempo, correspondiente al flujo de símbolos OFDMA.

Descripción: realiza una transformación de los datos de usuario modulados con entradas de 1024 o 2048 puntos del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

✓ **Filtro Rectangular**

Señales de Entrada: símbolos OFDMA.

Señales de Salida: señal OFDMA modulada en banda base.

Descripción: cada símbolo a la entrada del filtro es multiplicado por una función rectangular de amplitud unitaria, para cada símbolo con duración T_s . Luego se realiza la adición de un prefijo cíclico.

3.3.2. Modelo de Simulación del Canal.

La estructura del canal se indica en la figura 3.17.



Figura 3.17. Estructura del Canal.

3.3.2.1. Estructura Interna y Caracterización del Canal de Transmisión.

La estructura interna del canal de transmisión se indica en la figura 3.18.

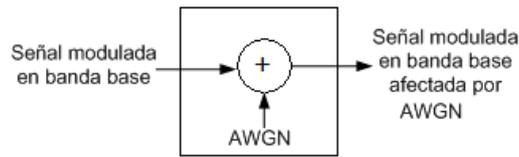


Figura 3.18. Estructura Interna del Canal de Transmisión.

Señales de Entrada: señal OFDMA modulada en banda base proveniente del transmisor.

Señales de Salida: señal modulada en banda base afectada por AWGN.

Variables de Entrada: corresponden a la especificación de las características del canal, estas son:

- SNR.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: ninguna.

3.3.3. Modelo de Simulación del Receptor.

La estructura interna del modelo de simulación del receptor se indica en la figura 3.19.

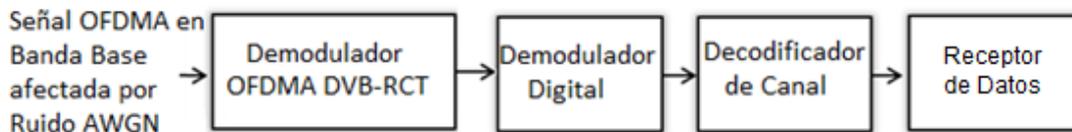


Figura 3.19. Estructura Interna del Receptor.

3.3.3.1. Estructura Interna y Caracterización del Demodulador OFDMA DVB-RCT.

La estructura interna del demodulador OFDMA DVB-RCT se indica en la figura 3.20.

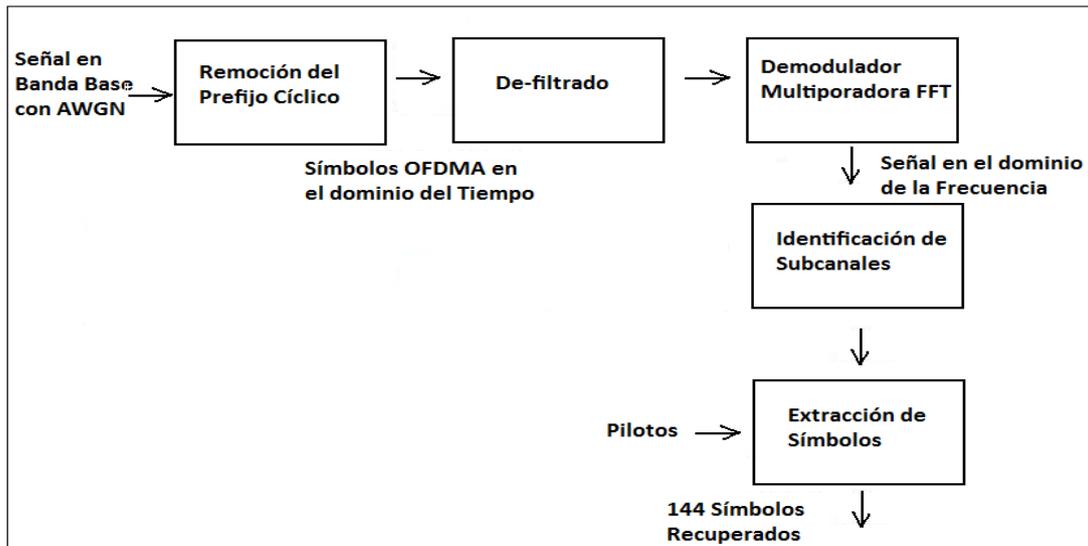


Figura 3.20. Estructura Interna del Demodulador OFDMA DVB-RCT.

Señales de Entrada: señal OFDMA en banda base afectada por AWGN.

Señales de Salida: señal con 144 símbolos complejos.

Variables de Entrada: corresponden a la especificación de las características del modulador OFDMA DVB-RCT, estas son:

- Modo.
- Espaciamiento entre portadoras.
- Número de subcanales.
- Ancho de banda DVB-T.
- Prefijo cíclico.

Variables de Salida:

- Tiempo.
- Frecuencia.
- Espectro de la señal.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: el demodulador OFDMA DVB-RCT está compuesto por cuatro componentes.

✓ **De-filtrado Rectangular**

Señales de Entrada: señal OFDMA modulada en banda base.

Señales de Salida: símbolos OFDMA sin intervalo de guarda.

Descripción: se realiza la remoción del prefijo cíclico. Cada símbolo a la entrada del de-filtrado es multiplicado por una función rectangular inversa de amplitud unitaria.

✓ **Demodulador Multiportadora (FFT)**

Señales de Entrada: símbolos OFDMA. Señal en el dominio del tiempo.

Señales de Salida: señal en el dominio de la frecuencia.

Descripción: realiza una transformación de los símbolos OFDMA modulados del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

✓ **Identificación de Subcanales**

Señales de Entrada: señal en el dominio de la frecuencia.

Señales de Salida: slot con 174 símbolos de usuario.

Descripción: se realiza la extracción del *slot* de datos de usuario para cada subcanal que se haya asignado.

✓ **Extracción de Símbolos**

Señales de Entrada: *slot* de datos de usuario.

Señales de Salida: 144 símbolos de datos complejos.

Descripción: se realiza el de-mapeo del *slot* que contiene 174 símbolos de usuario. Teniendo en cuenta los símbolos piloto conocidos se compara con los símbolos recibidos lo que permite hacer una estimación del canal. Los 144 símbolos de datos complejos se reagrupan para su posterior procesamiento.

3.3.3.2. Estructura Interna y Caracterización del Demodulador Digital.

La estructura interna del demodulador digital se indica en la figura 3.21.

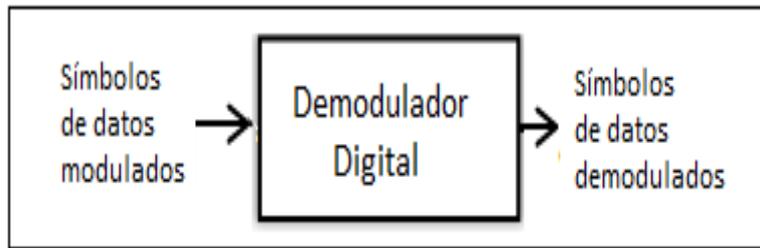


Figura 3.21. Estructura Interna del Demodulador Digital.

Señales de Entrada: símbolos de datos modulados.

Señales de Salida: símbolos de datos demodulados.

Variables de Entrada: corresponden a la especificación de las características del demodulador digital, esta es:

- **Esquema de Modulación.**

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: ninguna.

3.3.3.3. Estructura Interna y Caracterización del Decodificador de Canal.

La estructura interna del decodificador de canal se indica en la figura 3.22

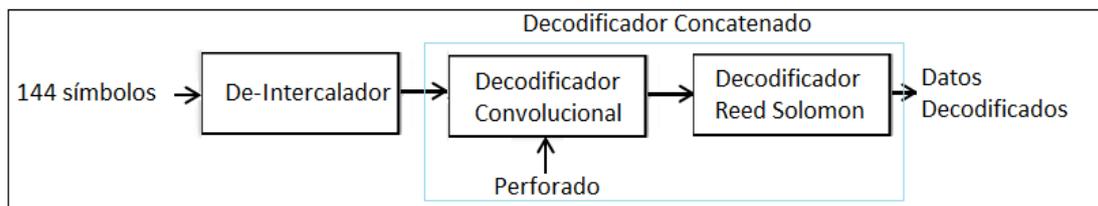


Figura 3.22. Estructura Interna del Decodificador de Canal

Señales de Entrada: símbolos de datos demodulados.

Señales de Salida: datos de carga útil decodificados.

Variables de Entrada: corresponde a la especificación de las características del de-codificador de canal, esta es:

- **Tasa de Codificación**

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: el decodificador está compuesto por dos elementos, cada uno desarrolla procesos internos específicos. Sus respectivas señales se describen a continuación.

- ✓ **De-Intercalador**

Señales de Entrada: símbolos de datos demodulados.

Señales de Salida: datos de carga útil de-intercalados. Arreglo de bits con errores dispersos.

Descripción: consiste en un conjunto de registros de corrimiento que reordena cada bit para dispersar los errores que hayan sido introducidos en la ráfaga de datos.

- ✓ **Decodificador Concatenado**

- I. **Decodificador Convolutivo**

Señales de Entrada: datos de carga útil de-intercalados.

Señales de Salida: datos decodificados provenientes del procesamiento de la señal en el decodificador convolutivo de Viterbi.

Descripción: se realiza la decodificación convolutiva de Viterbi utilizando el mismo vector de perforación del transmisor para corregir los errores producidos por el desvanecimiento de la señal en el canal.

- II. **Decodificador Reed-Solomon.**

Señales de Entrada: datos decodificados provenientes del procesamiento de la señal en el decodificador convolutivo de Viterbi.

Señales de Salida: datos decodificados.

Descripción: obtiene los datos de carga útil decodificados. Identifica la magnitud y la posición de hasta t errores y corrige mediante el algoritmo Reed-Solomon.

Variables de Salida: corresponden a la caracterización de la palabra mensaje generada, estas son:

- Longitud de la palabra mensaje.
- Longitud del símbolo de mensaje.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: ninguna.

3.3.3.4. Estructura Interna y Caracterización del Receptor de Datos.

Señales de Entrada: datos decodificados.

Señales de Salida: datos de recepción.

Variables de Entrada: corresponden a la especificación de las características del receptor de datos, estas son:

- Tipo de gráfica.

Variables de Salida:

- Número de errores.
- Tasa de error de bit.
- Gráfica simulada.

Señales y Variables Propias de Procesos Internos: el receptor de datos se compone de un de-aleatorizador y un medidor de errores. Sus respectivas señales se describen a continuación.

✓ **De-aleatorizador**

Señales de Entrada: datos decodificados.

Señales de Salida: datos recibidos

Descripción: se usa el mismo polinomio generador del transmisor para reordenar el vector de bits.

✓ **Medidor de Errores**

Señales de Entrada: datos recibidos y datos de carga útil que corresponden a los datos transmitidos.

Señales de Salida: datos recibidos

Descripción: se hace una comparación entre la cadena de bits transmitida y la cadena de bits recibida, se determina el número de coincidencias, para inferir el número de errores introducidos por en el canal.

3.4. FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Teniendo en cuenta el sistema completo, formado por el transmisor, el canal y el receptor, explicado anteriormente, se muestra el modelo de simulación que representa el enlace de subida a nivel físico del sistema DVB-RCT en la figura 3.23. A partir de este modelo se realiza la simulación correspondiente para evaluar y analizar el desempeño del estándar.

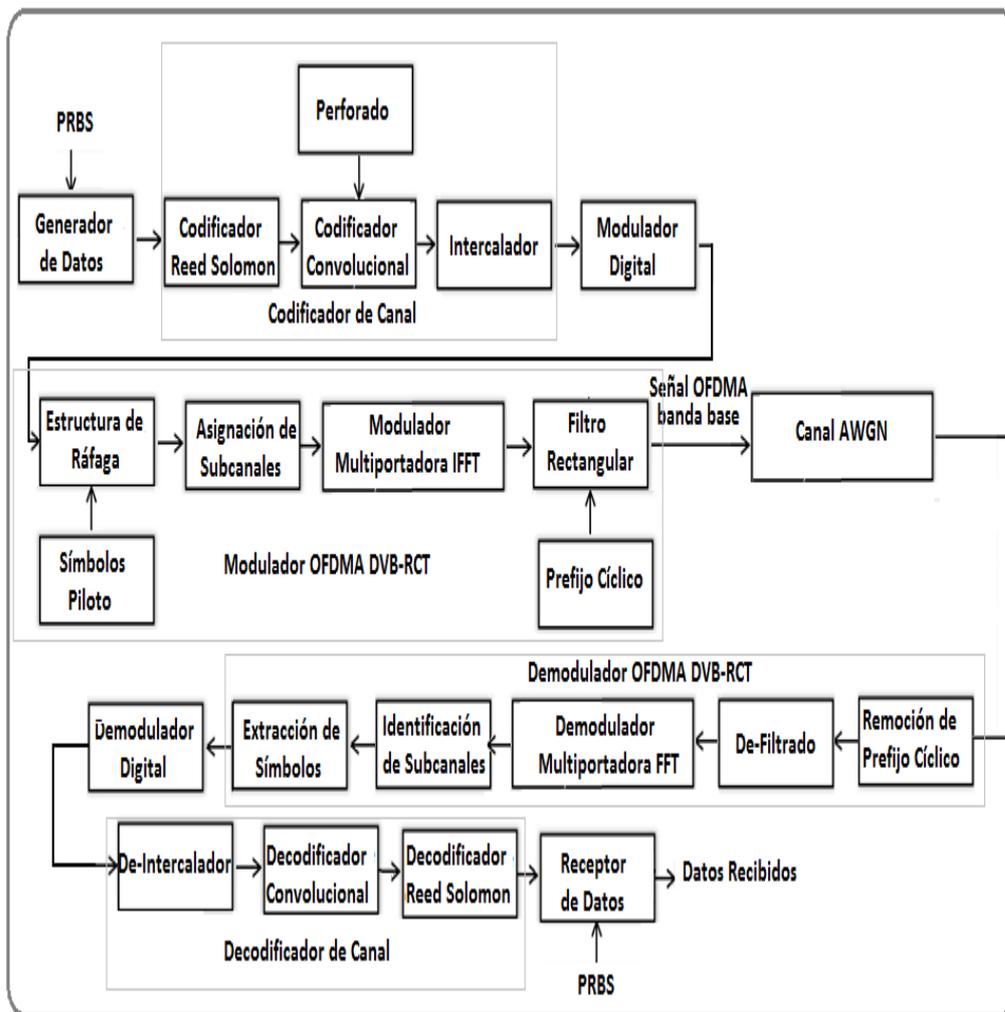


Figura 3.23. Modelo de Simulación del Estándar DVB-RCT.

4. CAPÍTULO ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el capítulo anterior se obtuvo el modelo de simulación ilustrado en la figura 3.23 a partir de la aplicación y adaptación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones con la finalidad de hacer un análisis cualitativo y cuantitativo del estándar ETSI 301 958. Una vez obtenido el modelo, se procede a desarrollar la simulación cuyo manual de uso se encuentra en el Anexo B. Por este motivo, se ha establecido la siguiente metodología de simulación:

- Análisis de los datos y parámetros que maneja el estándar: inicialmente se identifican y analizan los datos de entrada y salida en cada bloque del modelo de simulación, así como los parámetros de transmisión. De esta manera se tiene claro cómo se puede implementar el modelo de simulación.
- Elección de la herramienta de simulación: una vez analizados los datos de entrada y salida, así como los bloques digitales que procesan la señal, se procede a elegir el software *MATLAB R2009b*, debido a su gran capacidad de procesamiento de señales de comunicaciones digitales en banda base. Esta herramienta permite llevar a cabo la simulación ya sea mediante la programación en su lenguaje propio y/o haciendo uso de Simulink, el cual es un entorno de desarrollo mediante diagramas de bloques modificables diseñados para una simulación basada en un modelo secuencial. Si bien Simulink es muy utilizado en la simulación de sistemas de telecomunicaciones, fue descartado para los propósitos de este trabajo de grado debido a que el estándar incluye variables que debían ser programadas mediante el uso de código.
- Establecimiento de los escenarios de simulación: es importante comprender que el estándar DVB-RCT es muy extenso e incluye distintos parámetros, por esta razón se realizaron diversas simulaciones haciendo una variación de los mismos para identificar las combinaciones que podrían entregar un desempeño apropiado ante un determinado canal con ruido. Por esta razón se definieron unos escenarios con el objetivo de evaluar y analizar el desempeño a nivel físico en banda base del enlace de subida en el sistema TDT definido por el estándar. Inicialmente, se fijó una configuración general de parámetros considerando que su elección no afectaría los propósitos del análisis del

enlace de subida, tales como el ancho de banda, el espaciamiento entre las portadoras, el intervalo de guarda y el número de tramas. Por otra parte, se definieron los escenarios a partir del efecto de la variación de la tasa de codificación, esquema de modulación, número de portadoras y número de subcanales que permiten obtener valores de SNR críticos en la estimación de canal de transmisión mediante la aplicación de la técnica de modulación adaptativa que define el estándar. Se experimentó variando uno de los parámetros mientras los otros se dejaban constantes.

- Obtención de resultados: se ejecuta el programa para obtener los valores de BER vs SNR teniendo en cuenta las posibles variaciones de los parámetros mostrados en la interfaz gráfica del simulador. Se tabulan y grafican esos resultados.
- Análisis de resultados: se procede a observar el comportamiento de las curvas y se realiza el análisis del desempeño del enlace de subida para cada uno de los escenarios establecidos.

Los 3 escenarios mencionados se describen en la tabla 4.1.

Escenarios	Descripción
Escenario 1	Considera los diferentes tipos de tasas de codificación y esquemas de modulación
Escenario 2	Considera diferentes números de subcanales
Escenario 3	Considera diferentes modos (1K ó 2K).

Tabla 4.1. Escenarios de Estudio.

Para los escenarios propuestos se configuró algunos parámetros comunes presentados en la tabla 4.2. El número de tramas se estableció en 10, dado que es un valor suficiente para obtener valores adecuados de BER.

Parámetros Generales de Configuración	
Ancho de Banda DVB-T	8 MHz
Espaciamiento entre Portadoras	CS1 (1 KHz)
Intervalo de Guarda	1/4
Número de Tramas	10

Tabla 4.2. Parámetros Generales de Configuración

A continuación se analizan los escenarios seleccionados. Para cada uno se establecen los parámetros principales de configuración, el propósito y los resultados obtenidos. Para el análisis de resultados se establece una BER objetivo de $1E-03$, además se consideran valores BER objetivo típicos para sistemas de comunicaciones de 1 y 10 % para los diferentes escenarios.

Escenario 1

Análisis del desempeño de los esquemas de modulación QPSK, 16QAM Y 64QAM, 1024 portadoras (modo 1K) y 29 subcanales, donde se varía la tasa de codificación. Se analizan los efectos del canal AWGN y se obtienen valores de SNR críticos para la estimación del canal de transmisión. Los parámetros del escenario 1 se muestran en la tabla 4.3.

Parámetro	Configuración
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM
Tasa de Codificación	1/2, 3/4
Número de Portadoras	1024
Número de Subcanales	29

Tabla 4.3. Parámetros de Configuración para el Escenario 1

El propósito de este escenario fue obtener los valores de SNR que permitan hacer un cambio en la asignación de tamaños de carga útil mediante la técnica de modulación adaptativa, para los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM y las tasas de codificación 1/2 y 3/4. En el análisis de este escenario se tendrán en cuenta casos específicos fijando modulación y variando codificación y viceversa.

En la tabla 4.4 se presentan los tamaños de carga útil soportados en un *slot* BS3 para el escenario 1. Estas corresponden a todos los posibles valores que se especifican en la norma ETSI EN 301 958.

Modulación	QPSK		16QAM		64QAM	
Codificación	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4
Carga Útil (bytes)	18	27	36	54	54	81

Tabla 4.4. Carga Útil para Modulación y Codificación en el Escenario 1

En la tabla 4.5 se presentan los resultados de las simulaciones en términos de BER para distintos valores de SNR en los esquemas de modulación QPSK, 16QAM Y 64QAM, variando las tasas de codificación en 1/2 y 3/4.

Modulación	QPSK		16QAM		64QAM	
SNR (dB)	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4
	BER					
0	4,66E-01	4,83E-01	4,94E-01	4,97E-01	5,01E-01	5,01E-01
1	4,40E-01	4,85E-01	4,94E-01	4,98E-01	5,00E-01	5,00E-01
2	3,78E-01	4,70E-01	4,96E-01	4,99E-01	4,97E-01	4,98E-01
3	2,72E-01	4,43E-01	4,94E-01	4,97E-01	4,99E-01	4,99E-01
4	1,61E-01	3,97E-01	4,88E-01	4,96E-01	5,00E-01	5,00E-01
5	8,01E-02	3,06E-01	4,85E-01	4,91E-01	4,99E-01	4,98E-01
6	2,08E-02	1,85E-01	4,71E-01	4,90E-01	4,96E-01	4,99E-01
7	4,01E-03	8,68E-02	4,51E-01	4,89E-01	4,96E-01	4,97E-01
8	3,29E-04	3,84E-02	3,94E-01	4,83E-01	4,94E-01	4,99E-01
9	3,95E-05	9,62E-03	3,12E-01	4,68E-01	4,92E-01	4,95E-01
10	0	3,95E-03	1,94E-01	4,37E-01	4,83E-01	4,99E-01
11	0	8,78E-04	1,03E-01	3,63E-01	4,72E-01	4,94E-01
12	0	1,14E-04	4,02E-02	2,53E-01	4,47E-01	4,94E-01
13	0	0	1,11E-02	1,46E-01	4,03E-01	4,86E-01
14	0	0	1,86E-03	7,23E-02	3,31E-01	4,77E-01
15	0	0	3,74E-04	2,82E-02	2,33E-01	4,59E-01
16	0	0	5,83E-05	8,01E-03	1,46E-01	4,14E-01
17	0	0	0	2,25E-03	7,48E-02	3,35E-01
18	0	0	0	3,89E-04	3,13E-02	2,20E-01
19	0	0	0	3,23E-05	8,62E-03	1,22E-01
20	0	0	0	0	1,41E-03	6,54E-02
21	0	0	0	0	2,00E-04	2,59E-02
22	0	0	0	0	2,23E-05	1,10E-02
23	0	0	0	0	0	3,01E-03
24	0	0	0	0	0	7,45E-04
25	0	0	0	0	0	1,80E-04
26	0	0	0	0	0	3,88E-05

Tabla 4.5. Valores de BER vs SNR Simulados para el Escenario 1.

Caso 1: Modulación fija.

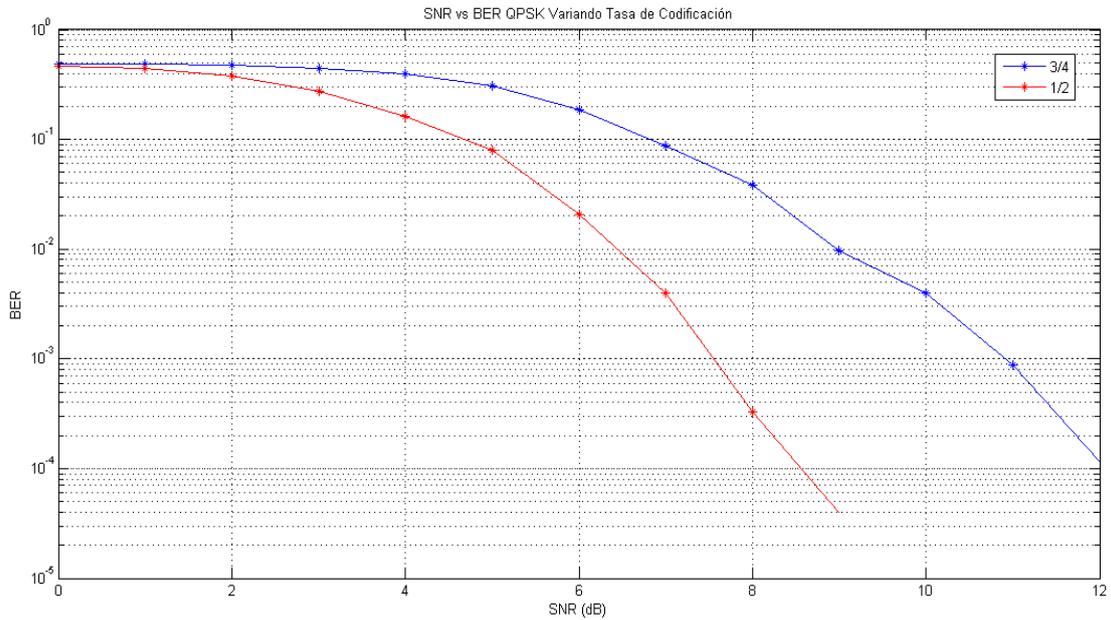


Figura 4.1. Desempeño de QPSK con Diferentes Tasas de Codificación

Codificación	1/2	3/4
BER	SNR(dB)	
0,1	4,7	6,8
0,01	6,3	8,9
1E-03	7,5	10,9

Tabla 4.6. SNR para diferentes objetivos de BER con QPSK en el Escenario 1.

La figura 4.1 y las tablas 4.5 y 4.6 muestran el desempeño en términos de BER para las diferentes tasas de codificación con modulación QPSK. Se caracteriza el comportamiento para diferentes valores de SNR con BER objetivo 1E-03 así:

- Para valores de SNR menores a 7,5 dB no se alcanza a cumplir el objetivo de BER 1E-03 con ninguna de las tasas de codificación.
- Para valores de SNR entre 7,5 dB y 10,9 dB se cumple el objetivo BER 1E-03 con tasa de codificación 1/2.

De la figura 4.1 y las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 se deduce que con una estimación de canal para valores de SNR que estén entre 7,5 dB y 10,9 dB se asignará una tasa de codificación 1/2 para transportar una carga útil de 18 bytes. Además se deberá superar el umbral de 10,9 dB de SNR para que se asigne una carga útil de 27 bytes con tasa de codificación 3/4.

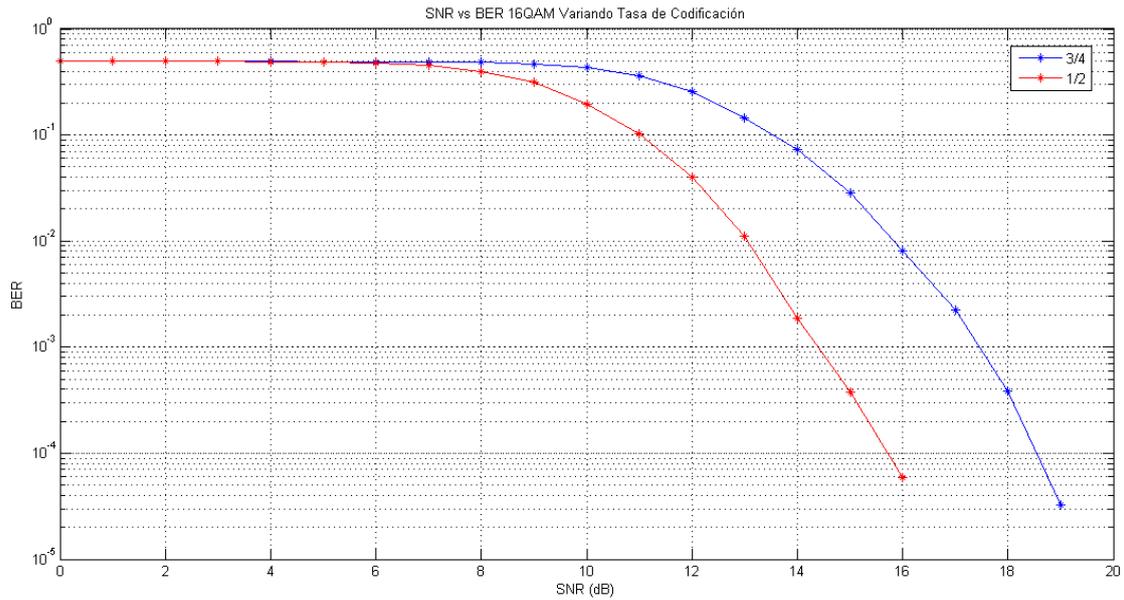


Figura 4.2. Desempeño de 16QAM con Diferentes Tasas de Codificación.

Codificación	1/2	3/4
BER	SNR (dB)	
0,1	10,9	13,4
0,01	13,1	15,8
1E-03	14,3	17,4

Tabla 4.7. SNR para diferentes objetivos de BER con 16QAM en el Escenario 1.

La figura 4.2 y las tablas 4.5 y 4.7 muestran el desempeño en términos de BER para las tasa de codificación con modulación 16QAM. Se caracteriza el comportamiento para diferentes valores de SNR así:

- Para valores de SNR menores a 14,3 dB no se alcanza a cumplir el objetivo de BER 1E-03 con ninguna de las tasas de codificación
- Para valores de SNR entre 14,3 dB y 17,4 dB se cumple el objetivo BER 1E-03 con tasa de codificación 1/2.

De la figura figura 4.2 y las tablas 4.4, 4.5 y 4.7 se deduce que con una estimación de canal para valores de SNR que estén en entre 14,3 dB y 17,4 dB se asignará una tasa de codificación de 1/2 para transportar una carga útil de 36 bytes. Además se deberá superar el umbral de 17.4 dB para que se asigne una carga útil de 54 bytes.

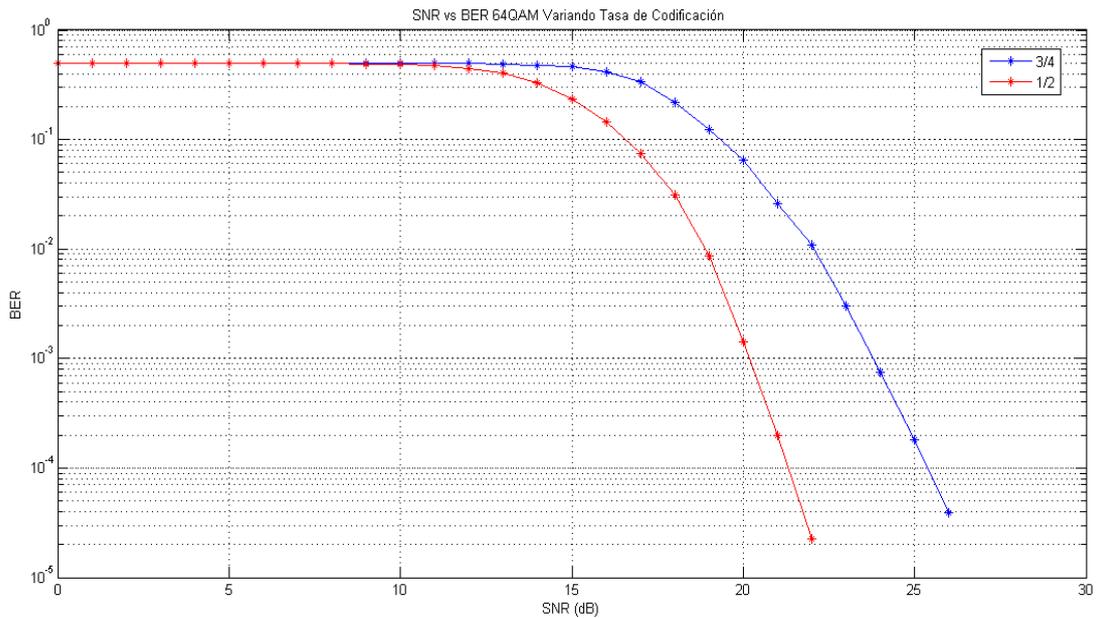


Figura 4.3. Desempeño de 64QAM con Diferentes Tasas de Codificación

Codificación	1/2	3/4
BER	SNR(dB)	
0,1	17,5	19,2
0,01	18,9	22,1
1E-03	20,2	23,8

Tabla 4.8. SNR para diferentes objetivos de BER con 64QAM en el Escenario 1.

La figura 4.3 y las tablas 4.5 y 4.8 muestran el desempeño en términos de BER para las tasa de codificación con modulación 64QAM. Se caracteriza el comportamiento para diferentes valores de SNR así:

- Para valores de SNR menores a 20,2 dB no se alcanza a cumplir el objetivo de BER 1E-03 con ninguna de las tasas de codificación
- Para valores de SNR entre 20,2 dB y 23,8 dB se cumple el objetivo BER con tasa de codificación 1/2.

De la figura 4.3 y las tablas 4.4, 4.5 y 4.8 se deduce que con una estimación de canal para valores de SNR que estén 20,2 dB y 23,8 dB se asignará una tasa de codificación 1/2 para transportar una carga útil de 54 bytes. Además se deberá superar el umbral de 20,2 dB para que se asigne una carga útil de 81 bytes.

Caso 2: Codificación fija

A continuación se presentan los valores de carga útil soportados por cada esquema de modulación.

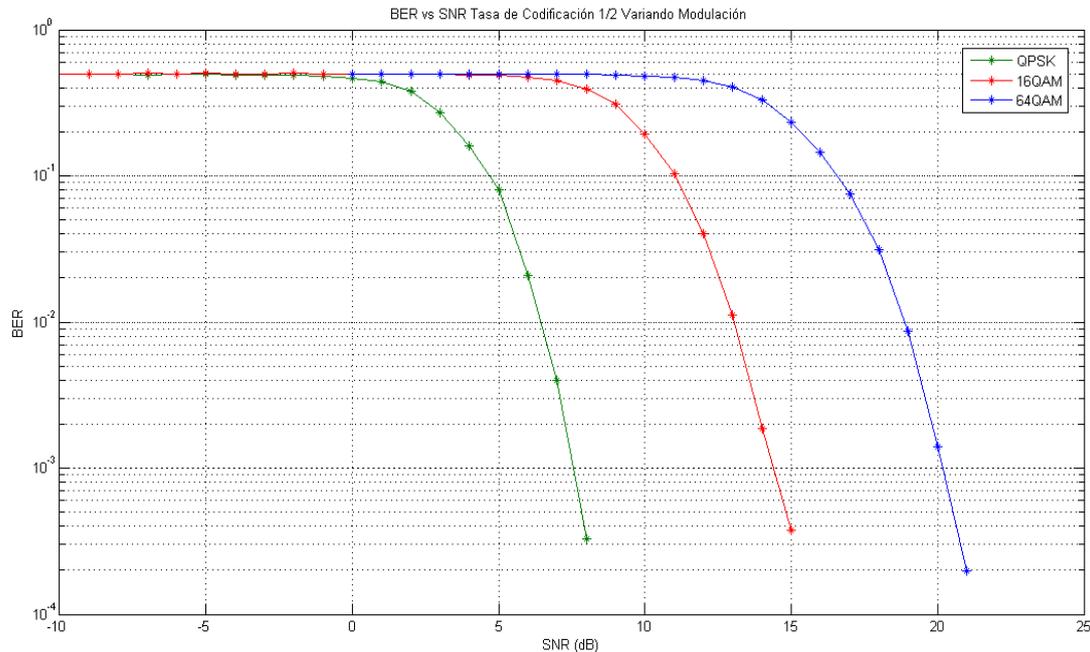


Figura 4.4. Desempeño con Tasa de Codificación 1/2 Variando Modulación

Modulación	QPSK	16QAM	64QAM
BER	SNR (dB)		
0,1	4,7	10,9	17,5
0,01	6,3	13,1	18,9
1E-03	7,5	14,3	20,2

Tabla 4.9. SNR para diferentes objetivos de BER con Tasa de Codificación 1/2 en el Escenario 1.

La figura 4.4 y las tablas 4.5 y 4.9 muestran el desempeño en términos de BER para los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM con tasa de codificación 1/2. Se caracteriza el comportamiento para diferentes valores de SNR así:

- Para valores de SNR menores a 7,5 dB no se alcanza a cumplir el objetivo de BER 1E-03 con ninguno de los esquemas de modulación.
- Para valores de SNR entre 7,5 dB y 14,8 dB se cumple el objetivo BER implementando el esquema de modulación QPSK.

- Para valores de SNR entre 14,3 dB y 20,2 dB se cumple el objetivo BER implementando el esquema de modulación 16QAM.
- Para valores de SNR mayores a 20,2 dB se cumple cabalmente el objetivo de BER 1E-03 empleando el esquema de modulación 64QAM.

De la figura 4.4 y las tablas 4.4, 4.5 y 4.9 se deduce que con una estimación de canal para valores de SNR que estén entre 7,5 dB y 14 dB se asignará un esquema de modulación QPSK el cual permite transportar 18 bytes de carga útil, en el intervalo de valores SNR entre 14,3 dB y 20,2 dB se asignara un esquema de modulación 16QAM que soporta un tamaño de carga útil de 36 bytes. Del mismo modo con SNR superiores a los 20,2 dB se asignará un tamaño de carga útil de 54 bytes.

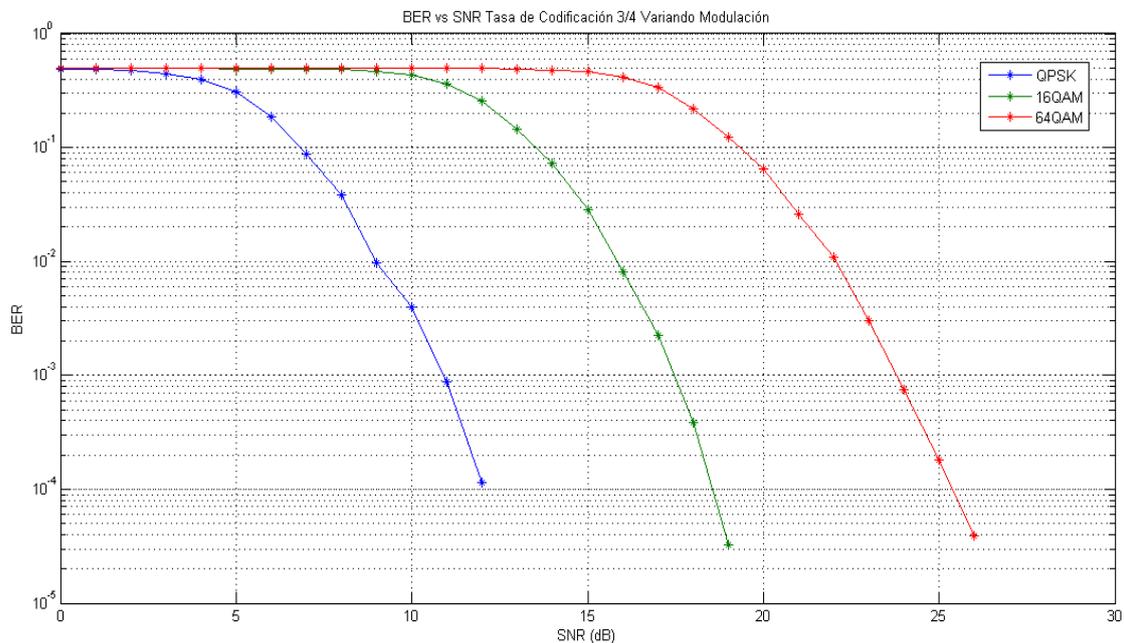


Figura 4.5. Desempeño con Tasa de Codificación 3/4 Variando Modulación.

Modulación	QPSK	16QAM	64QAM
BER	SNR(dB)		
0,1	6,8	13,4	19,2
0,01	8,9	15,8	22,1
1E-03	10,9	17,4	23,8

Tabla 4.10. SNR para diferentes objetivos de BER con Tasa de Codificación 3/4 en el Escenario 1.

La figura 4.5 y las tabla 4.5 y 4.10 muestran el desempeño en términos de BER para los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM con tasa de codificación 3/4. Se caracteriza el comportamiento para diferentes valores de SNR así:

- Para valores de SNR menores a 10,9 dB no se alcanza a cumplir el objetivo de BER 1E-03 con ninguno de los esquemas de modulación.
- Para valores de SNR entre 10,9 dB y 17,4 dB se cumple el objetivo BER 1E-03 implementando el esquema de modulación QPSK.
- Para valores de SNR entre 17,4 dB y 23,8 dB se cumple el objetivo BER 1E-03 implementando el esquema de modulación 16QAM.
- Para valores de SNR mayores a 23,8 dB se cumple cabalmente el objetivo de BER 1E-03 empleando el esquema de modulación 64QAM.

De la figura 4.5 y las tablas 4.4, 4.6 y 4.10 se deduce que con una estimación de canal para valores SNR entre 10,9 dB y 17,4 dB se asignará un esquema de modulación QPSK el cual permite transportar 27 bytes de carga útil, en el intervalo SNR entre 17,4 dB y 23,8 dB se asignará un esquema de modulación 16QAM con tamaño de carga útil de 54 bytes. Del mismo modo con SNR superiores a los 20,2 dB se asignará un esquema de modulación 64QAM que permite tamaño de carga útil de 81 bytes.

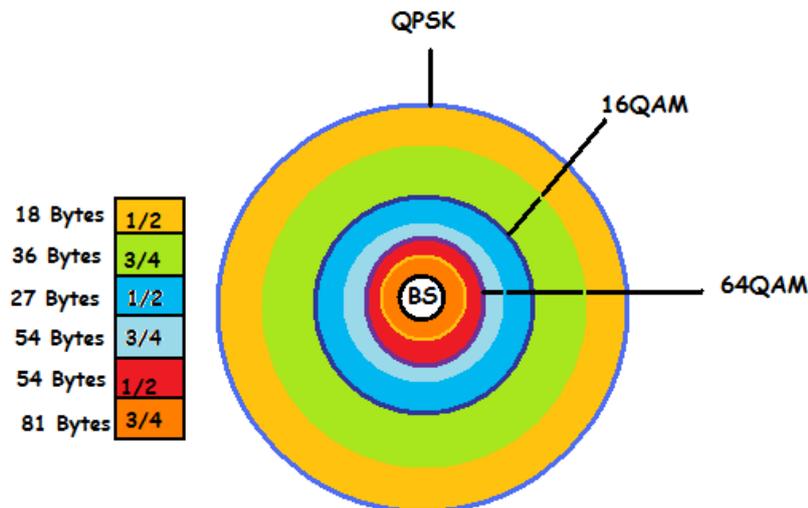


Figura 4.6. Cobertura con Modulación Adaptativa

La Figura 4.6 muestra las zonas de cobertura con las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM y las tasas de codificación 1/2 y 3/4.

Del análisis de los casos 1 (modulación fija) y 2 (codificación fija) expuestos anteriormente en el escenario 1 y de la figura 4.6 se concluye que para la configuración QPSK-1/2 se obtienen los valores más bajos de SNR como

estimación de canal, debido a su robustez pues los puntos en la constelación QPSK están más separados, esto hace que la incidencia del ruido sea mínima. Además permite el radio de cobertura más amplio y de esta manera se asigna el menor tamaño de carga útil; mientras con la configuración 64QAM-3/4 se obtuvieron los mayores valores de SNR de estimación de canal, que se traduce en altos niveles de potencia de transmisión, así mismo permitiendo el tamaño de carga útil más amplio sacrificando el radio de cobertura.

Escenario 2

Análisis del desempeño de las configuraciones modulación-tasa de codificación QPSK-1/2 y 64QAM-3/4, variando el número de subcanales, 1024 portadoras. Se analizan los efectos del canal AWGN en las dos configuraciones modulación-codificación más críticos definidos en el estándar DVB-RCT. Los parámetros del escenario 2 se muestran en la tabla 4.11.

Parámetro	Configuración
Modulación-Tasa de Codificación	QPSK-1/2, 64QAM-3/4
Número de Portadoras	1024
Número de Subcanales	1,5,9,13,17,21,29

Tabla 4.11. Parámetros de Configuración para el Escenario 2

El propósito de este escenario fue observar el impacto del número de subcanales empleados sobre el desempeño de los esquemas de modulación QPSK y 64QAM, con las tasas de codificación 1/2 y 3/4 respectivamente.

En la tabla 4.12 se presentan los resultados de las simulaciones en términos de BER para distintos valores de SNR para la configuración QPSK-1/2, variando el número de subcanales utilizados.

	Número de Subcanales Utilizados							
	1	5	9	13	17	21	25	29
SNR(dB)	BER							
-15	4,68E-01	4,97E-01	4,95E-01	4,99E-01	4,92E-01	4,99E-01	4,98E-01	4,94E-01
-14	4,59E-01	4,85E-01	5,04E-01	4,95E-01	4,89E-01	5,02E-01	4,95E-01	5,04E-01
-13	4,12E-01	4,90E-01	5,00E-01	4,99E-01	4,99E-01	4,98E-01	5,00E-01	4,95E-01
-12	3,39E-01	4,79E-01	4,92E-01	5,01E-01	4,95E-01	5,01E-01	4,99E-01	5,03E-01
-11	1,96E-01	4,96E-01	5,03E-01	4,95E-01	4,96E-01	5,06E-01	5,02E-01	4,93E-01
-10	9,50E-02	4,85E-01	4,89E-01	4,95E-01	5,01E-01	4,98E-01	5,00E-01	5,00E-01
-9	3,67E-02	4,88E-01	4,92E-01	4,95E-01	4,91E-01	4,94E-01	4,98E-01	4,95E-01
-8	5,30E-03	4,67E-01	4,88E-01	4,93E-01	4,96E-01	4,91E-01	4,99E-01	4,95E-01
-7	5,21E-04	4,34E-01	4,86E-01	4,93E-01	4,87E-01	4,91E-01	4,98E-01	4,90E-01
-6	0	3,90E-01	4,76E-01	4,90E-01	4,90E-01	4,89E-01	4,94E-01	4,93E-01
-5	0	3,03E-01	4,70E-01	4,90E-01	4,94E-01	4,88E-01	4,92E-01	4,95E-01
-4	0	2,05E-01	4,38E-01	4,72E-01	4,84E-01	4,84E-01	4,94E-01	4,90E-01
-3	0	1,02E-01	3,60E-01	4,53E-01	4,74E-01	4,84E-01	4,88E-01	4,91E-01
-2	0	3,16E-02	2,65E-01	4,17E-01	4,54E-01	4,72E-01	4,78E-01	4,85E-01
-1	0	8,61E-03	1,51E-01	3,31E-01	4,24E-01	4,56E-01	4,65E-01	4,80E-01
0	0	3,13E-04	6,08E-02	2,11E-01	3,34E-01	4,20E-01	4,59E-01	4,66E-01
1	0	0	2,19E-02	1,00E-01	2,38E-01	3,34E-01	4,10E-01	4,40E-01
2	0	0	6,85E-03	3,93E-02	1,23E-01	2,17E-01	3,11E-01	3,78E-01
3	0	0	3,86E-04	8,15E-03	5,00E-02	1,11E-01	1,96E-01	2,72E-01
4	0	0	0	1,00E-03	1,28E-02	4,77E-02	9,74E-02	1,61E-01
5	0	0	0	7,79E-05	1,89E-03	1,15E-02	2,88E-02	8,01E-02
6	0	0	0	0	1,23E-04	2,19E-03	6,70E-03	2,08E-02
7	0	0	0	0	0,00E+00	3,10E-05	3,13E-04	4,01E-03
8	0	0	0	0	0	0	5,79E-05	3,29E-04
9	0	0	0	0	0	0	0	1,20E-05

Tabla 4.12. BER vs SNR Simulados para QPSK-1/2 Variando el Número de Subcanales

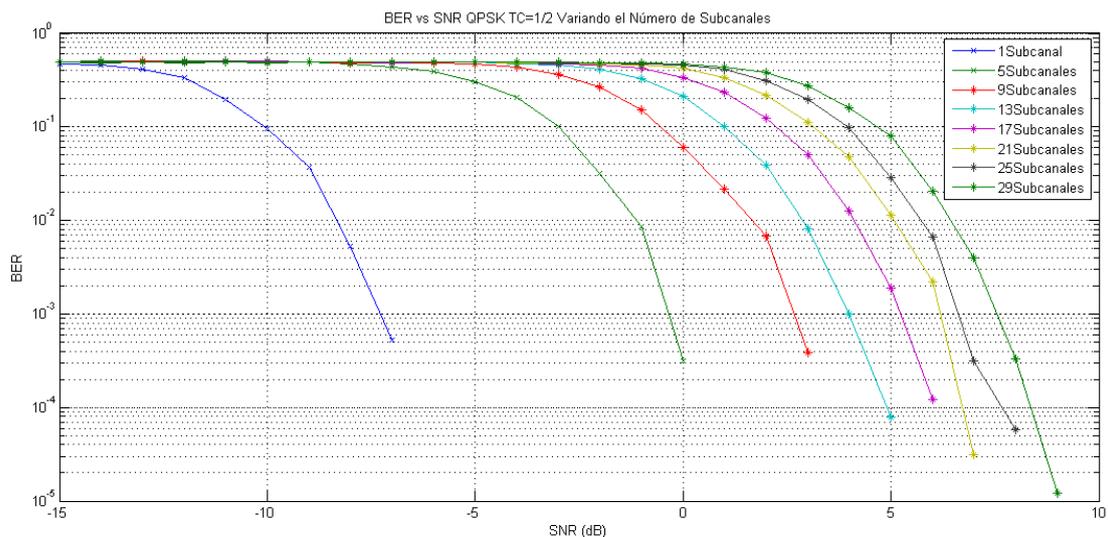


Figura 4.7. Desempeño de QPSK-1/2 Variando el Número de Subcanales

En la figura 4.7 se presentan las curvas de desempeño de la configuración QPSK-1/2 haciendo una variación equidistante entre el número de subcanales utilizados (1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 y 29). Para efectos de esta simulación se utilizó una diferencia de 4 subcanales entre cada uno a los que se graficó su desempeño. Se observa que la SNR aumenta cada que se aumenta al número de subcanales. Los objetivos de BER se alcanzan más rápidamente cuando se tiene un subcanal, pues los valores SNR obtenidos son muy pequeños. La variación más lenta se presenta cuando se utilizan 29 subcanales. En la tabla 4.13 se consignan los valores de SNR para una BER objetivo de 0,1, 0,01 y 1E-03.

BER	Número de Subcanales Utilizados							
	1	5	9	13	17	21	25	29
	SNR (dB)							
0,1	-10	-3	0,7	1	2,2	3,1	4	4,7
0,01	-8,4	-1,2	1,7	2,9	4,1	5,1	5,7	6,3
1E-03	-7,3	-0,4	2,6	4	5,2	6,3	6,6	7,5

Tabla 4.13. SNR para diferentes objetivos de BER variando el Número de Subcanales en QPSK-1/2

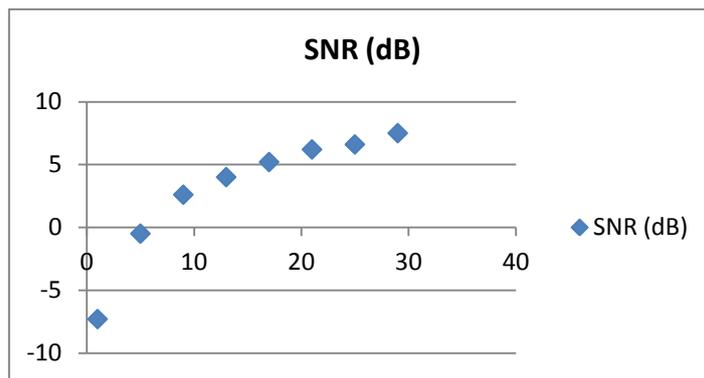


Figura 4.8. SNR vs Número de Subcanales para QPSK-1/2

De las figuras 4.7 y 4.8 y la tabla 4.13 se obtienen los siguientes resultados para BER objetivo 1E-03:

- El valor de SNR cuando se utiliza un subcanal es de -7,3 dB
- El valor de SNR máximo corresponde a un número de subcanales igual a 29, este es 7,5 dB.

De las figuras 4.7, 4.8 y las tablas 4.12 y 4.13 se deduce que existen valores de SNR que permiten aprovechar mejor los recursos de subcanalización con un número de subcanales determinado. En la tabla 4.14 se consignan los subcanales para cada SNR que permite cumplir con el objetivo BER 1E-03 para la configuración QPSK-1/2.

SNR(dB)	-7,3	0,4	2,6	4	5,2	6,3	6,6	7,5
BER 1E-03								
Subcanal	1	5	9	13	17	21	25	29
		2	6	10	14	18	22	26
		3	7	11	15	19	23	27
		4	8	12	16	20	24	28

Tabla 4.14. Subcanales utilizables para valores de SNR con QPSK-1/2

De las figuras 4.7, 4.8 y las tablas 4.12, 4.13 y 4.14 se concluye que el codificador de canal con tasa de codificación 1/2 es capaz de corregir errores incluso con SNR muy bajas debido a que los algoritmos implementados mediante los codificadores Reed-Solomon y convolucional. Además la modulación QPSK al ofrecer un alto grado de robustez permite aprovechar los recursos de subcanalización obteniendo un mayor radio de cobertura, a pesar que los valores de SNR detectados sean muy pequeños y se tengan límites en la cantidad de información transmitida.

En la tabla 4.15 se presentan los resultados de las simulaciones en términos de BER para distintos valores de SNR para la configuración 16QAM-3/4, variando el número de subcanales utilizados.

SNR(dB)	Esquema de Modulación 64QAM y Tasa de Codificación 3/4							
	Número de Subcanales Utilizados							
	1	5	9	13	17	21	25	29
	BER							
-5	4,94E-01	5,00E-01	4,97E-01	4,97E-01	5,00E-01	5,00E-01	4,96E-01	5,01E-01
-4	4,97E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,97E-01	5,00E-01	5,01E-01
-3	4,96E-01	5,02E-01	4,90E-01	4,98E-01	4,98E-01	4,98E-01	4,98E-01	4,97E-01
-2	4,91E-01	4,90E-01	4,98E-01	5,00E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,98E-01	4,98E-01
-1	4,82E-01	5,01E-01	5,00E-01	4,98E-01	5,00E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,98E-01
0	4,65E-01	4,98E-01	5,00E-01	5,57E-01	5,01E-01	5,00E-01	4,99E-01	5,01E-01
1	4,32E-01	5,01E-01	4,98E-01	4,98E-01	5,00E-01	4,99E-01	4,98E-01	5,00E-01
2	3,69E-01	4,92E-01	4,99E-01	4,90E-01	4,97E-01	4,99E-01	4,98E-01	4,98E-01
3	2,62E-01	4,95E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,99E-01	4,97E-01	5,00E-01	4,99E-01
4	1,59E-01	4,94E-01	4,91E-01	4,99E-01	4,97E-01	4,98E-01	4,98E-01	5,00E-01
5	8,30E-02	4,88E-01	4,93E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,98E-01	4,99E-01	4,98E-01
6	4,09E-02	4,81E-01	4,93E-01	4,99E-01	4,97E-01	4,98E-01	4,96E-01	4,99E-01
7	1,72E-02	4,72E-01	4,88E-01	4,95E-01	4,98E-01	4,97E-01	4,97E-01	4,97E-01
8	3,97E-03	4,36E-01	4,91E-01	4,90E-01	4,94E-01	4,98E-01	4,97E-01	4,99E-01
9	1,58E-03	3,66E-01	4,85E-01	4,95E-01	4,91E-01	4,94E-01	4,96E-01	4,95E-01
10	4,44E-04	2,73E-01	4,54E-01	4,80E-01	4,92E-01	4,91E-01	4,94E-01	4,99E-01
11	0	1,55E-01	4,11E-01	4,75E-01	4,86E-01	4,93E-01	4,92E-01	4,94E-01
12	0	7,08E-02	3,41E-01	4,45E-01	4,74E-01	4,85E-01	4,89E-01	4,94E-01
13	0	3,15E-02	2,19E-01	3,79E-01	4,43E-01	4,69E-01	4,84E-01	4,86E-01
14	0	1,57E-02	1,22E-01	2,72E-01	3,87E-01	4,45E-01	4,66E-01	4,77E-01
15	0	3,36E-03	4,78E-02	1,70E-01	3,09E-01	3,83E-01	4,36E-01	4,59E-01
16	0	9,65E-04	2,28E-02	9,39E-02	1,89E-01	2,96E-01	3,71E-01	4,14E-01
17	0	3,59E-04	8,44E-03	4,08E-02	1,03E-01	1,91E-01	2,72E-01	3,35E-01
18	0	0	2,64E-03	1,76E-02	4,58E-02	9,30E-02	1,55E-01	2,20E-01
19	0	0	3,22E-04	6,48E-03	2,12E-02	4,61E-02	8,20E-02	1,22E-01
20	0	0	0	2,33E-03	6,59E-03	1,90E-02	3,41E-02	6,54E-02
21	0	0	0	1,48E-04	1,60E-03	6,56E-03	1,46E-02	2,59E-02
22	0	0	0	0	9,08E-05	2,12E-03	4,34E-03	1,10E-02
23	0	0	0	0	0	2,11E-04	1,03E-03	3,01E-03
24	0	0	0	0	0	0	4,01E-04	7,45E-04
25	0	0	0	0	0	0	7,72E-05	1,80E-04
26	0	0	0	0	0	0	0	3,90E-05

Tabla 4.15. BER vs SNR Simulados para 16QAM-3/4 Variando el Número de Subcanales

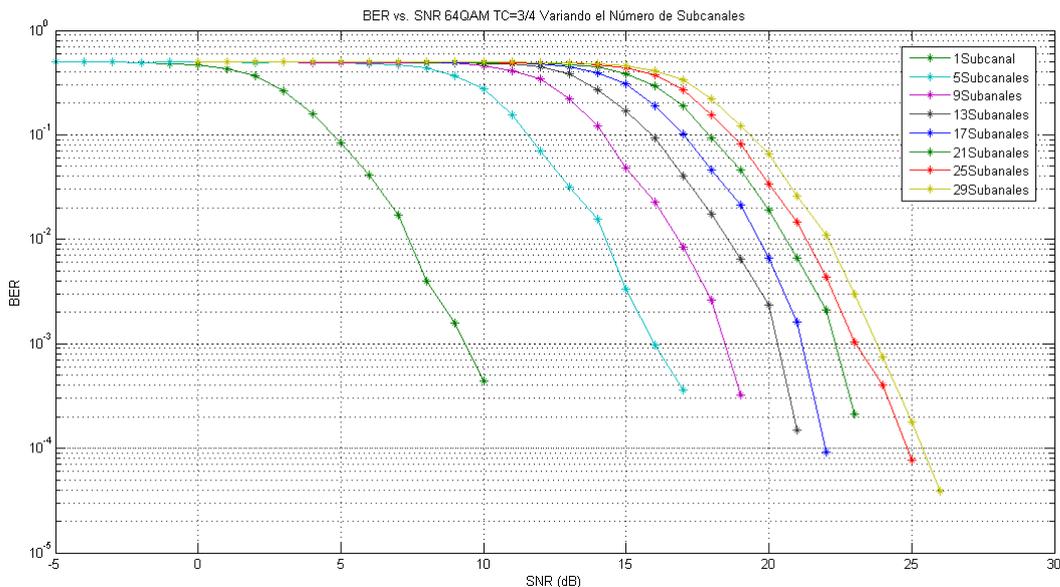


Figura 4.9. Desempeño de 64QAM-3/4 Variando el Número de Subcanales.

BER 1E-03	Número de Subcanales Utilizados							
	1	5	9	13	17	21	25	29
	SNR (dB)							
0,1	4,9	11,4	14,1	15,9	17	17,9	18,7	19,2
0,01	6,3	14,2	16,8	18,5	19,6	20,6	21,3	22,1
1E-03	9,3	16	18,4	20,4	21,2	22,3	23,1	23,8

Tabla 4.16. SNR para diferentes objetivos de BER Variando el Número de Subcanales en 16QAM-3/4

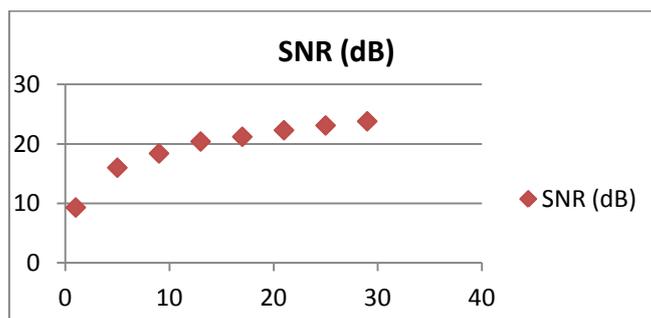


Figura 4.10. SNR vs Número de Subcanales para 64QAM-3/4

De las figuras 4.9 y 4.10 y las tablas 4.15 y 4.16 se obtienen los siguientes resultados:

- El valor de SNR para un (1) subcanal es de 9,3 dB, que corresponde al menor valor de SNR en la configuración 64QAM-3/4.

- El valor de SNR máximo corresponde a un número de subcanales igual a 29, este es 23,8 dB.

De las figuras 4.9, 4.10 y las tablas 4.15 y 4.16 se deduce que existen valores de SNR que permiten aprovechar mejor los recursos de subcanalización con un número de subcanales determinado. En la tabla 4.17 se consignan los subcanales para cada SNR que permite cumplir con el objetivo BER 1E-03 para la configuración 64QAM-3/4.

SNR(dB)	9,3	16	18,4	20,4	21,2	22,3	23,1	23,8
BER 1E-03								
Subcanal	1	5	9	13	17	21	25	29
		2	6	10	14	18	22	26
		3	7	11	15	19	23	27
		4	8	12	16	20	24	28

Tabla 4.17. Subcanales utilizables para valores de SNR con 64QAM-3/4

De las figuras 4.9 y 4.10 y las tablas 4.15, 4.16 y 4.17 se concluye que la configuración 64QAM-3/4 permite transmitir tamaños de carga útil más grandes, aprovechando de una manera más eficiente los recursos mediante la subcanalización. De esta manera los valores SNR de estimación de canal representan información determinante al momento de ajustar niveles de potencia adecuados.

Escenario 3

Análisis del desempeño de las configuraciones modulación-tasa de codificación QPSK-1/2 y 64QAM-3/4 en el que se varia el número de portadoras totales, con los modos 1K(1024) o 2K(2048). Se analizan los efectos del canal AWGN en las dos configuraciones. Los parámetros del escenario 2 se muestran en la tabla 4.18.

Parámetro	Configuración
Modulación-Tasa de Codificación	QPSK-1/2, 64QAM-3/4
Número de Portadoras	1024,2048
Número de Subcanales	29

Tabla 4.18. Parámetros de Configuración para el Escenario 3.

El propósito de este escenario fue observar el impacto del número de portadoras totales utilizadas sobre el desempeño de los esquemas de modulación QPSK y 64QAM, con las tasas de codificación 1/2 y 3/4 respectivamente.

SNR(dB)	Esquema de Modulación QPSK y Tasa de Codificación 1/2		
	Modo		
	1K(29)	2K(29)	2K(59)
	BER		
-5	4,98E-01	4,85E-01	4,99E-01
-4	4,90E-01	4,81E-01	4,90E-01
-3	4,85E-01	4,63E-01	4,85E-01
-2	4,81E-01	4,48E-01	4,81E-01
-1	4,63E-01	3,80E-01	4,71E-01
0	4,66E-01	2,87E-01	4,65E-01
1	4,40E-01	1,55E-01	4,44E-01
2	3,78E-01	7,50E-02	3,87E-01
3	2,72E-01	2,48E-02	2,94E-01
4	1,61E-01	3,29E-03	1,62E-01
5	8,01E-02	3,59E-04	7,62E-02
6	2,08E-02	1,46E-05	2,61E-02
7	4,01E-03	0	3,44E-03
8	3,29E-04	0	5,30E-04
9	1,20E-05	0	1,47E-05

Tabla 4.19. BER vs SNR Simulados para 16QAM-3/4 Modo (1K, 2K)

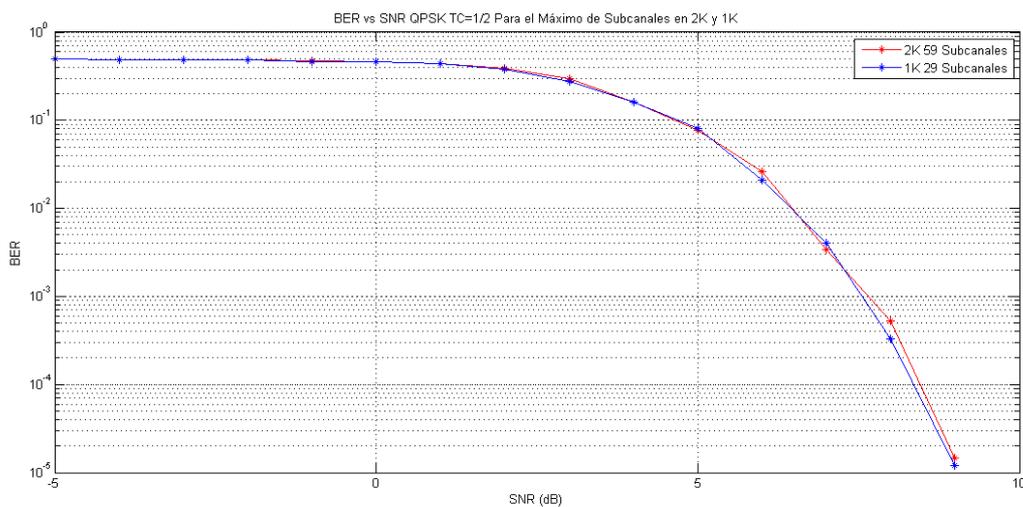


Figura 4.11. Desempeño de la Configuración QPSK-1/2 para los Modos 1K y 2K con Número Máximo de Subcanales

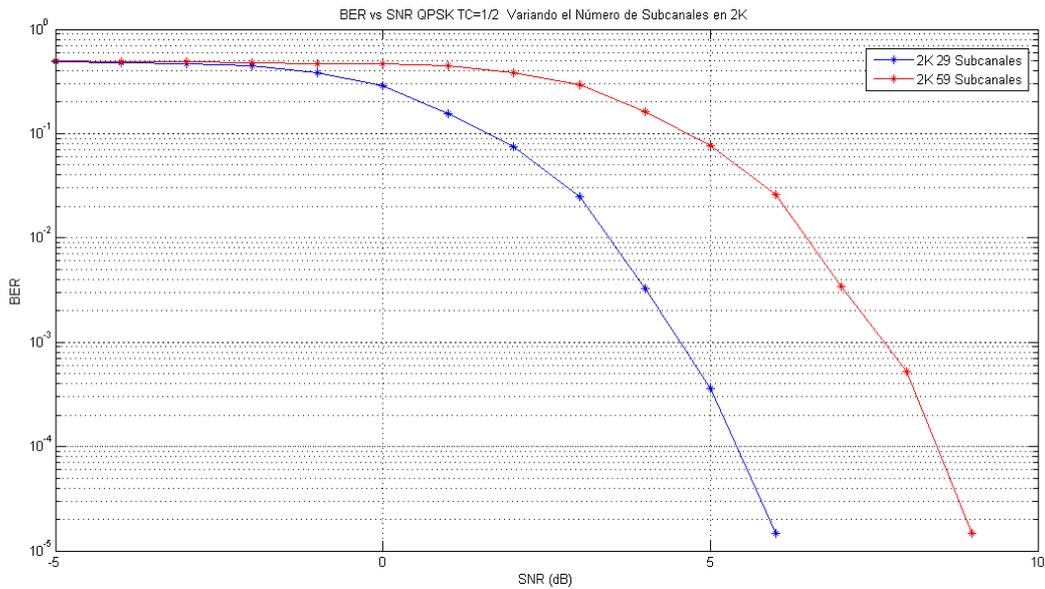


Figura 4.12. Desempeño QPSK-1/2 para el Modo 2K con 29 y 59 Subcanales

BER	Ancho de Banda DVB-RCT(MHz)		
	0,940	1,911	1,911
	1K(29)	2K(29)	2K(59)
0,1	4,6	2,4	4,6
0,01	6,3	3,4	6,3
1E-03	7,5	4,5	7,6

Tabla 4.20. SNR para QPSK-1/2 en los Modos 1K y 2K.

De las figuras 4.11 y 4.12 y las tablas 4.19 y 4.20 se obtienen los siguientes resultados considerando BER objetivo de 1E-03.

El desempeño para los modos 1K y 2K cuando se considera todos los subcanales (número máximo de portadoras usadas) es el mismo. Es decir tienen igual comportamiento, se obtiene una SNR de 7,5 dB para el modo 1K y 7,6 dB para el modo 2K.

Cuando se considera el modo 2K con 29 subcanales se obtiene una reducción de SNR siendo de 4,5 dB, menor al presentado con 59 subcanales. Esto es porque a pesar que el tiempo de símbolo útil es el mismo para los dos modos (1K y 2K) el ancho de banda disponible para el modo 2K es el doble del que se tiene disponible en el modo 1K.

SNR(dB)	Esquema de Modulación 64QAM y Tasa de Codificación 3/4		
	Modo		
	1K(29)	2K(29)	2K(59)
	BER		
5	4,98E-01	4,94E-01	4,98E-01
6	4,98E-01	4,91E-01	5,00E-01
7	4,95E-01	4,93E-01	4,97E-01
8	5,00E-01	4,95E-01	4,99E-01
9	4,93E-01	4,91E-01	4,95E-01
10	4,99E-01	4,93E-01	4,99E-01
11	4,94E-01	4,78E-01	4,94E-01
12	4,94E-01	4,59E-01	4,94E-01
13	4,86E-01	4,12E-01	4,86E-01
14	4,78E-01	3,29E-01	4,78E-01
15	4,59E-01	2,23E-01	4,59E-01
16	4,13E-01	1,21E-01	4,14E-01
17	3,35E-01	6,25E-02	3,37E-01
18	2,33E-01	2,66E-02	2,38E-01
19	1,21E-01	9,89E-03	1,27E-01
20	6,52E-02	3,68E-03	6,23E-02
21	2,59E-02	6,92E-04	2,91E-02
22	1,07E-02	6,65E-05	1,14E-02
23	2,95E-03	0	3,24E-03
24	7,52E-04	0	8,20E-04
25	1,82E-04	0	1,33E-04
26	4,42E-05	0	5,11E-05

Tabla 4.21. BER vs SNR Simulados para 16QAM-3/4 modo (1K, 2K)

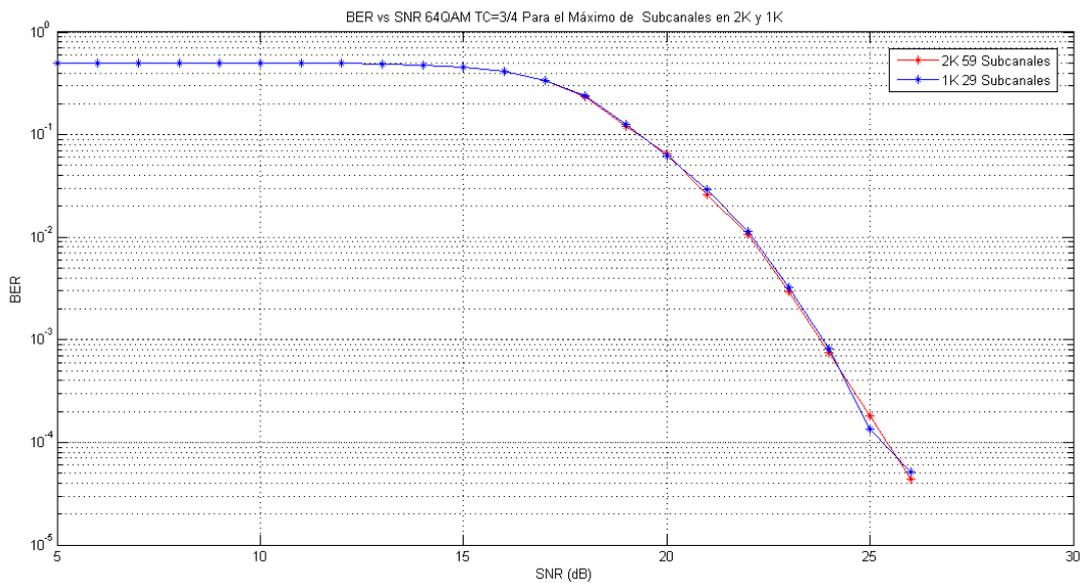


Figura 4.13. Desempeño 64QAM-3/4 para el Modo 2K y 1K con Número Máximo de Subcanales

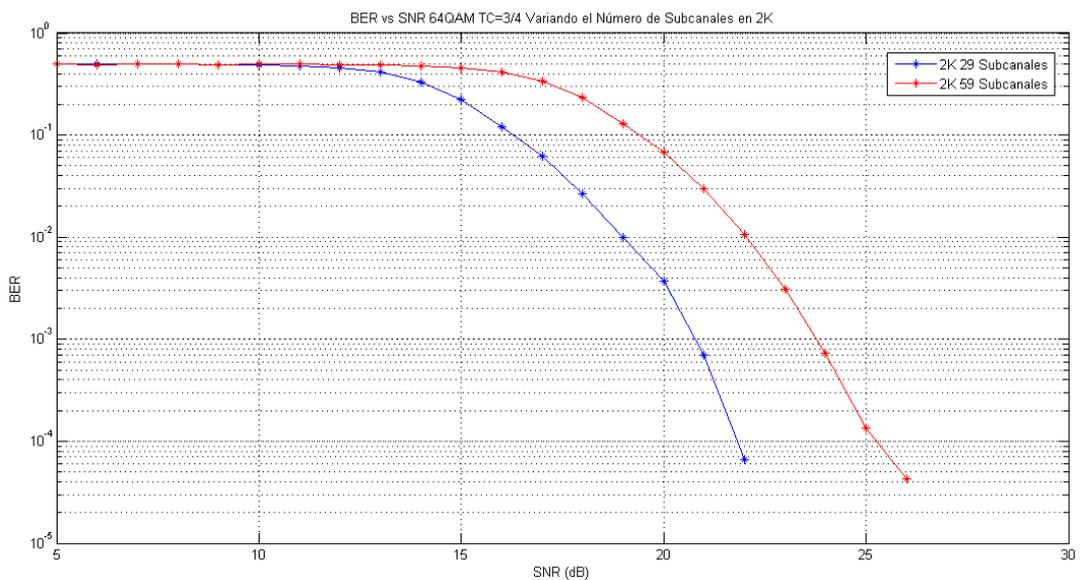


Figura 4.14. Desempeño de 64QAM-3/4 para el Modo 2K con 29 y 59 Subcanales Utilizados.

BER	Ancho de Banda DVB-RCT(MHz)		
	0,940 1K(29)	1,911 2K(29)	1,911 2K(59)
0,1	19,2	2,4	19,2
0,01	22,1	3,4	22,1
1E-03	23,8	20,8	23,8

Tabla 4.22. SNR para 64QAM-3/4 en los Modos 1K y 2K.

De las figuras 4.13, 4.14 y las tablas 4.21 y 4.22 se obtienen los siguientes resultados considerando BER objetivo de $1E-03$.

El desempeño para los modos 1K y 2K cuando se considera todos los subcanales (número máximo de portadoras usadas) es el mismo. Al igual que en la configuración QPSK-1/2 presentan un comportamiento similar. Con BER de $1E-3$ se obtienen una SNR de 23,8 dB para el modo 1K y 23,8 dB para el modo 2K.

Cuando se considera el modo 2K con 29 subcanales se obtiene una SNR de 20,8 dB, respecto al valor que se requiere con 59 subcanales, esta SNR es menor. Teniendo en cuenta que el tiempo de símbolo útil es el mismo para los dos modos (1K y 2K) el ancho de banda disponible para el modo 2K es el doble del que se tiene disponible en el modo 1K.

A continuación se muestran los diagramas de constelación y los diagramas de ojo para cada tipo de modulación utilizada en este escenario para el modo 1K.

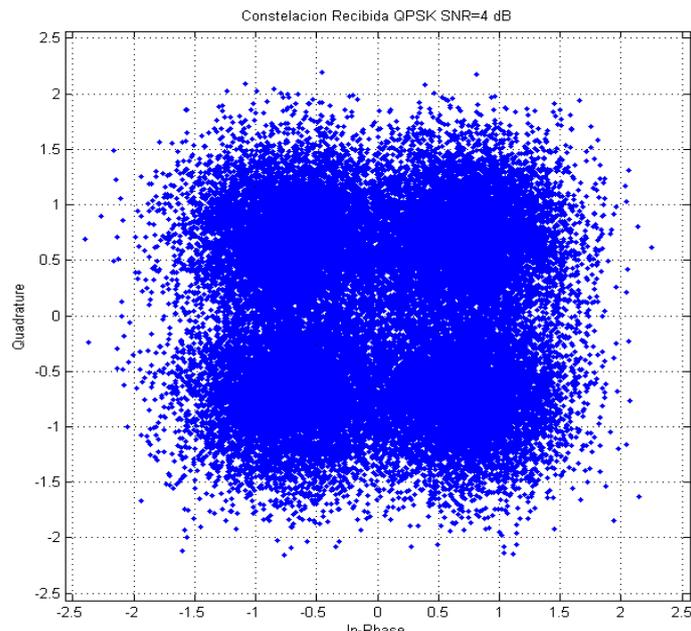


Figura 4.15. Constelación para un Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=4 dB.

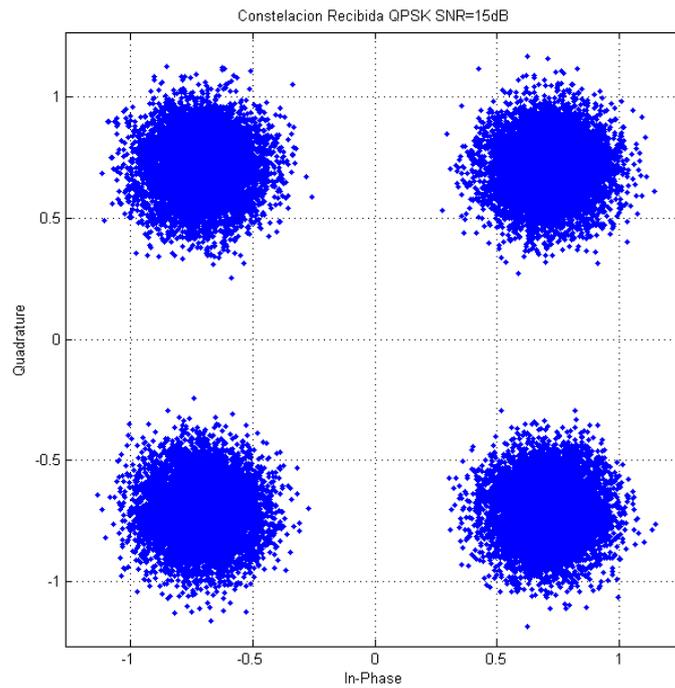


Figura 4.16. Constelación para un Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=15 dB.

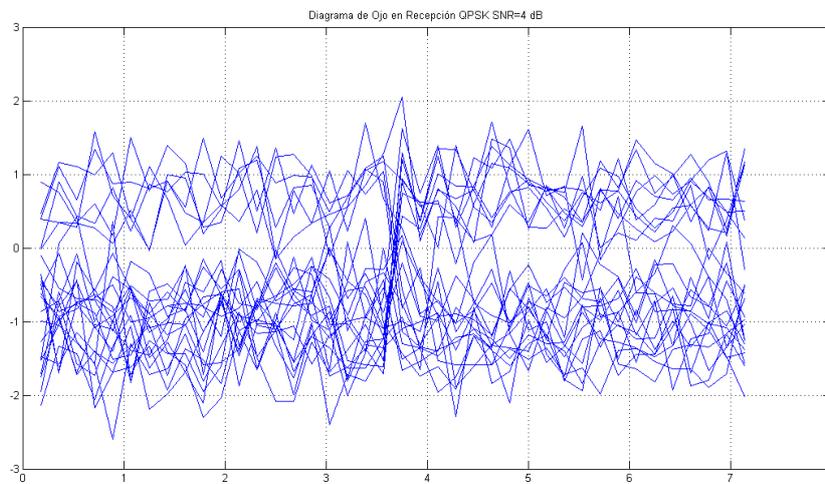


Figura 4.17. Diagrama de ojo para un Canal AWGN Modulación QPSK con un valor SNR=4 dB.

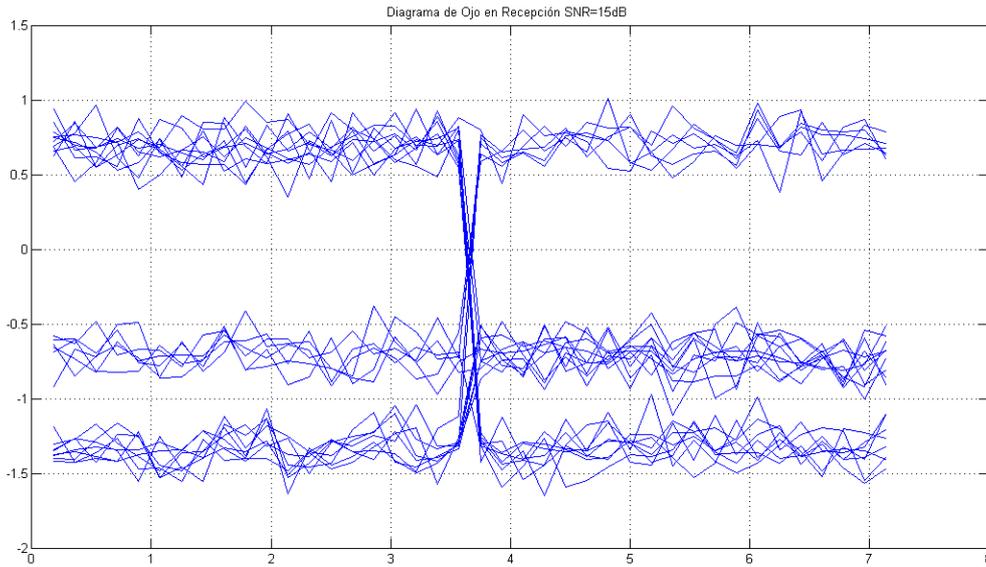


Figura 4.18. Diagrama de ojo del Canal AWGN Modulación QPSK con SNR=15 dB.

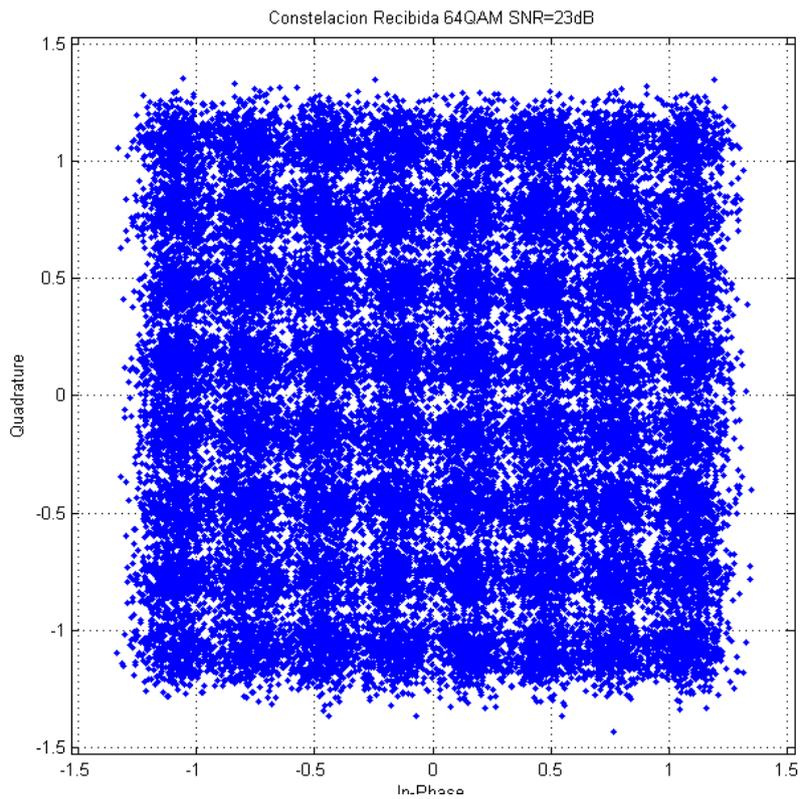


Figura 4.19. Constelación para un Canal AWGN Modulación 64QAM con un valor SNR=18 dB.

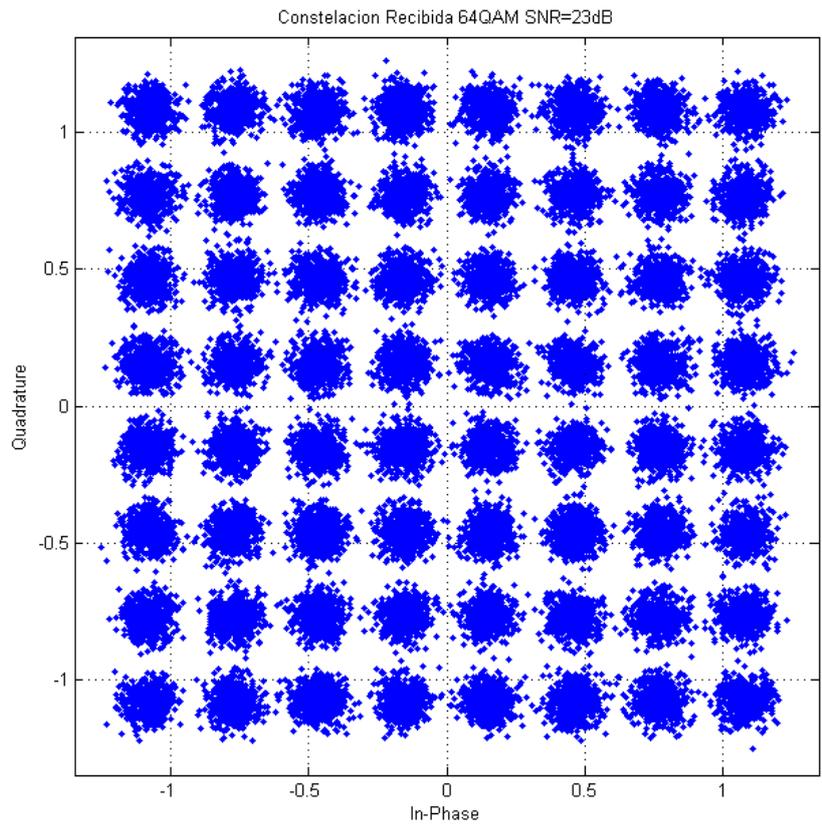


Figura 4.20. Constelación para un Canal AWGN Modulación 64QAM con un valor SNR=23 dB.

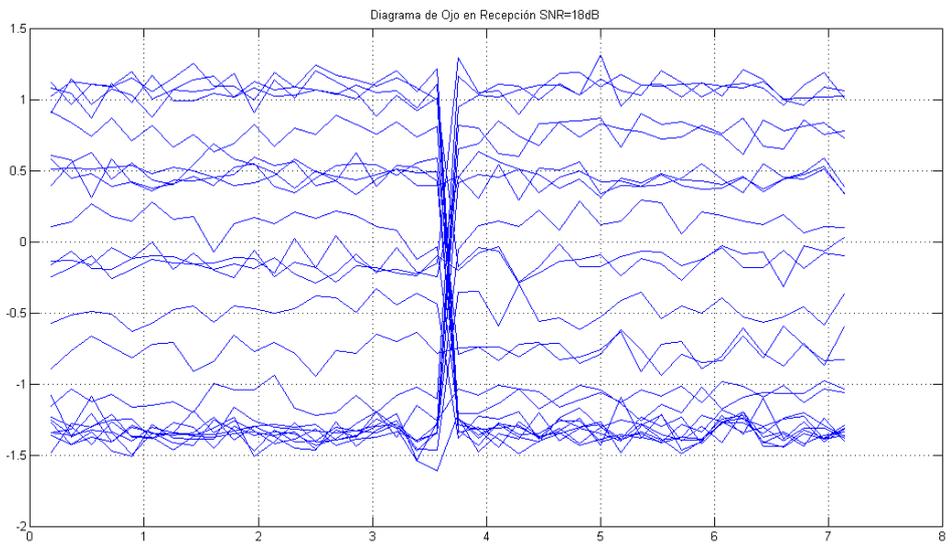


Figura 4.21. Diagrama de ojo del Canal AWGN Modulación 64QAM con un valor SNR=18 dB.

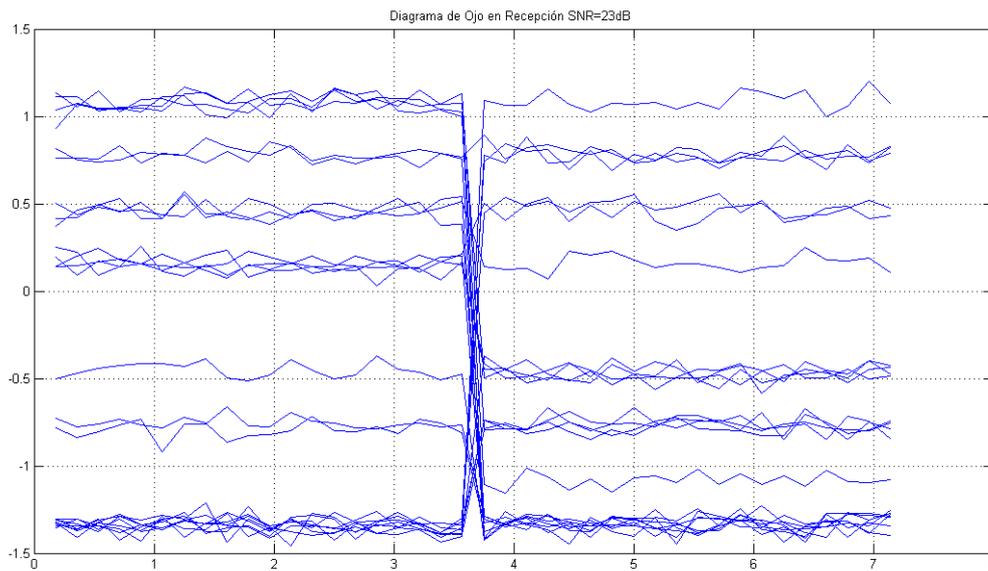


Figura 4.22. Diagrama de ojo para un Canal AWGN Modulación 64QAM con un valor SNR=23 dB.

De las figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ,4.19, 4,20, 4.21 y 4.22 se observa que:

- La SNR es un parámetro determinante que permite medir las variaciones que experimenta la señal al ser transmitida. Para bajos niveles de SNR las gráficas de constelaciones de símbolos muestran una mayor dispersión de los puntos. Es evidente que cuando en la constelación QPSK se incrementa la SNR de 4 dB a 15 dB los puntos tienden a los puntos de referencia de la constelación, una variación similar se observa en el esquema de modulación 64QAM, incrementos en el valor de SNR de 18 dB a 23 dB, hacen que los puntos logren ubicarse dentro de una región más cercana a los puntos de referencia de la constelación.
- Para la constelación de orden superior 64QAM el ruido afecta con mayor severidad a los símbolos que son transmitidos, esto es porque los puntos de referencia se encuentran a menor distancia entre sí. De esta manera el diagrama de constelación se vuelve más complejo siendo capaz de transmitir más datos que la constelación QPSK.
- En los diagramas de ojo se observa que las variaciones de SNR determinan el nivel de amplitud de los pulsos que llegan al receptor, para bajos valores de SNR los pulsos se afectan con menor severidad, como es el caso de la modulación QPSK, mientras que para la modulación 64QAM pequeñas variaciones en el nivel de SNR degradan en gran medida el nivel de la señal.

5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La adaptación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, permitió obtener el modelo de simulación del enlace de subida del estándar DVB-RCT, mediante la definición de forma clara de los objetivos, fases y actividades, facilitando la implementación y el análisis del modelo de simulación y sus resultados haciendo uso de la herramienta *MATLAB R2009b*.
- Las simulaciones son una alternativa económicamente viable para el análisis de estándares como lo es DVB-RCT, ante la imposibilidad de adquirir *hardware* de simulación especializado o realizar una implementación real.
- El análisis comparativo entre las diferentes tasas de codificación (1/2, 3/4) demostró que con la tasa de codificación 1/2, se asignan los menores tamaños de carga útil porque se tienen menores valores de SNR para una BER objetivo, en comparación a la tasa de codificación 3/4.
- El análisis comparativo entre los diferentes esquemas de modulación demostró que a la modulación 64QAM, se asignan mayores tamaños de carga útil para las tasas de codificación 1/2 y 3/4, porque se tienen mayores valores de SNR para una BER objetivo, en comparación a las modulaciones QPSK y 16QAM.
- En el análisis comparativo con variación en el número de subcanales utilizados se observó que existen valores SNR que permiten asignar grupos de subcanales dependiendo de las condiciones del canal de transmisión.
- En el análisis comparativo con variación en el número de portadoras usadas (modo 1K y 2K) se observó que el desempeño de las duplas QPSK-1/2 y 64QAM-3/4 depende del número de portadoras usadas.
- El análisis de comparativo mediante diagramas de ojo y diagramas de constelación demostró que el ruido afecta la amplitud de la señal

transmitida y que la modulación 64QAM es más sensible al ruido que la modulación QPSK.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

La implementación de servicios de interactividad con canal de subida en la TDT puede ser una realidad siempre y cuando se manifieste interés por parte entes públicos y/o privados que permitan la participación en tiempo real de las personas con los programas de televisión. Motivo por el cual, se plantea seguir realizando estudios que permitan validar la importancia del estándar DVB RCT, ya que son muchas sus variables y distintos trabajos de investigación pueden surgir a partir del estándar, así como del trabajo de grado presente como se dice a continuación:

- Realizar un análisis del desempeño del estándar mediante una comparación cualitativa y cuantitativa del impacto que tienen las distintas estructuras de ráfaga (BS1, BS2 y BS3) y determinar de esta manera cómo influye la duración de la ráfaga y/o la diversidad de frecuencia.
- Incluir en la simulación los efectos adicionales que puede causar un modelo de canal con distribución Rayleigh en el estándar DVB-RCT, para lo cual debe tenerse en cuenta la ecualización de canal con filtros adaptativos en los sistemas transmisión y recepción que permitan compensar las perturbaciones ocasionadas por el multitrayecto.
- Analizar la capacidad de la red de transmisión (*throughput*), mediante comparaciones técnicas que incluye la norma ETSI EN 301 958 de acuerdo con los modos de transmisión, es decir, variando el número de portadoras (1 K y 2 K), el espaciamiento entre las mismas (CS1, CS2 y CS3) y los esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM para las dos tasas de codificación (1/2 y 3/4).

- Analizar la influencia del codificador de canal en el desempeño del enlace de subida mediante una comparación de la codificación turbo y la concatenada Reed-Solomon. Teóricamente la codificación turbo puede brindar una ganancia de 5 dB con respecto a Reed-Solomon, sin embargo hay que tener en cuenta la complejidad de su implementación.

REFERENCIAS.

[1] DVB World Wide. DTT Deployment Map and Deployment Data. [En línea]: http://www.dvb.org/about_dvb/. [Consultado: Febrero de 2013].

[2] Ventajas de la TDT frente a la Televisión Analógica. Televisión Digital Terrestre, Gobierno de Canarias-España. [En línea]: http://www.canariastdt.es/index.php?option=com_content&view=article&id=21&temid=15 [Consultado: Junio de 2012].

[3] Escenarios de Uso de la Interactividad. Gobierno de España, Ministerio de Industria, Energía y Turismo. [En línea]. <http://www.televisiodigital.es/tecnologiasrelacionadas/interactividad/informacion/paginas/informaciongeneral.aspx>. [Consultado: Junio de 2012].

[4] ETSI EN 301 958 V1.1.1. Digital Video Broadcasting (DVB). Interaction Channel for Digital Terrestrial Television (RCT) incorporating Multiple Access OFDM. Marzo de 2002. [En línea]. <http://www.dvb.org/technology/standards/#interactivity>. [Consultado: Junio de 2012].

[5] Recomendación UIT-R BT.1667 de 2003. “Canal de retorno terrenal para los servicios de radiodifusión interactivos que funcionan en las bandas de radiodifusión de ondas métricas y decimétricas de conformidad con lo dispuesto en la Recomendación UIT-R BT.1306”. Unión Internacional de Telecomunicaciones. [En línea]. <http://www.itu.int/rec/R-REC-BT.1667-0-200312-l/en>. [Consultado: Junio de 2012].

[6] A. Martins, D. Guimarães. “Interactivity in Terrestrial DTV Systems: the DVB-RCT Standard”. Publicación para el Instituto Nacional de Telecomunicaciones-Inatel, Brasil [En línea]. http://www3.inatel.br/docentes/dayan/Publications/Inatel_08.pdf. [Consultado: Noviembre de 2012].

[7] Douglas Prendergast, Bernard Caron, and Yiyan Wu. “The Implementation of a Return Channel for ATSC-DTV”. IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 53, No. 2, Junio 2007. [En línea]: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4215119&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4215119

[8] C. Muñoz, J. Muñoz “Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones”. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Popayán, 1995.

[9] ETSI EN 300 744 V1.6.1. Digital Video Broadcasting (DVB). Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. [En línea]. http://pda.etsi.org/pda/home.asp?wki_id=w4.NnqGVa3BDJJCEVtn.e.

[10] H. Yaghoobi. Intel Communications Group, Intel Corporation. “Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 Wireless MAN”. Intel Technology Journal, Volume 8, Issue 3, 2004. [En línea]. http://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art03_scalableofdma/vol8_art03.pdf

[11] S. Srikanth, V. Kumaran, C. Manikandan, C. Murugesapandian. “Orthogonal GFrequency Division Multiple Access: Is it the Multiple Access System of the Future?.” Publicación de AU-KBC Research Center, Anna University, Chennai, India. [En línea]. http://comm.au-kbc.org/Docs/Tutorials/OFDMA_BCW_cv6.pdf

[12] R. Escamilla. “Códigos para la Detección y Corrección de Errores en Comunicaciones Digitales”. Publicación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Octubre-Diciembre de 2004, Vol. VII, No 25, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Méjico. [En línea http://ingenierias.uanl.mx/25/25_codigos.pdf.

[13] A. Romero. “Estudio Teórico de la Arquitectura de Turbo-códigos para aplicaciones de Telefonía Celular de 3G”. Tesis de pregrado del Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica de la Universidad de las Américas, Puebla, Méjico. 2007. [En línea]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/francos_r_a/ [Consultado: Diciembre de 2011].

[14] L. Martinez, P. Sevilla. “Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Punto a Punto Vía Radio que Utiliza Codificación Reed-Solomon”. Tesis de Pregrado. Facultad de Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Popayán, 2012.

[15] Description of the Algorithms. Performing Viterbi Decoding. [En línea]. <http://home.netcom.com/~chip.f/viterbi/alqrthms2.html>

[16] S. Omar. “Análisis y Simulación de la Capa Física del Estándar DVB-T2”. Proyecto Final de Carrera. Ingeniería de telecomunicación. Universidad Carlos III de Madrid. Julio de 2009. [En línea].

<http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/5869/1/PFC%20DVB-T2.pdf>).

[17] J. Martínez, J. Covaleda, “Análisis de Desempeño al Nivel Físico del Enlace de Subida de LTE,” tesis de pregrado, Ingeniería electrónica y telecomunicaciones, universidad del Cauca, Colombia, 2012.