

EVALUACIÓN A NIVEL FÍSICO DE LOS ESTÁNDARES DVB-T e ISDB-T.



**GINETH MAGALY CERÓN RÍOS
ERIKA MARIBEL SALAZAR MUÑOZ**

**Director: Pedro Vera Vera
Ingeniero Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, Mayo 2009**

*A Dios por ser mi guía en todo momento,
A mis padres y hermano por su apoyo incondicional,
por su amor y comprensión.*

Gineth Magaly Cerón Ríos

*A Dios por ser la fuerza de mi vida.
A mis padres y hermana por su amor y
por siempre creer en mí.*

Erika Maribel Salazar Muñoz

TABLA DE CONTENIDO

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Anexos.....	vi
ACRÓNIMOS.....	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ESTÁNDARES DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE DVB-T e ISDB-T.....	3
2.1. TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE	3
2.2. ESTÁNDAR DVB-T	4
2.2.1. Etapa de Transmisión.....	5
2.2.1.1. Fuente de codificación y multiplexación.....	5
2.2.1.2. Codificación y modulación del canal.....	8
2.2.2. Canal de Transmisión.....	19
2.2.3. Etapa de Recepción.....	19
2.3. ESTÁNDAR ISDB-T	21
2.3.1. Etapa de Transmisión.....	21
3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS A SIMULAR.....	25
3.1. ESCOGENCIA DE MATLAB COMO HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	25
3.2.1. Sistema Simulador del Estándar DVB-T	28
3.2.1.1. Flujo de transporte MPEG-2	28
3.2.1.2. Codificación y modulación del canal.....	35
3.2.1.3. Etapa de transmisión OFDM.....	40
3.2.1.4. Canal de transmisión	42
3.2.1.5. Etapa de Recepción OFDM.....	42
3.2.1.6. Decodificación y demodulación del Canal	44
3.2.2. Sistema Simulador del Estándar ISDB-T	50
3.2.2.1. Entrelazado de byte	56
3.2.2.2. Codificador interno	56
3.2.2.3. Modulación ISDB-T	57
3.2.2.4. Combinador (transmisión).....	58
3.2.2.5. Etapa de transmisión OFDM.....	58
3.2.2.6. Canal de transmisión	58
3.2.2.7. Etapa de recepción OFDM	59
3.2.2.8. Divisor jerárquico del receptor	59

3.2.2.9. Demodulador ISDB-T	59
3.2.2.10. Decodificador Viterbi	59
3.2.2.11. Desentrelazado de byte (Byte Deinterleave)	61
3.2.2.12. Combinador	61
3.2.2.13. Decodificador Reed Solomon	61
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1. INTRODUCCIÓN	62
4.2. SUBSISTEMA MPEG-2	62
4.3. SUBSISTEMA TRANSMISOR DEL ESTÁNDAR DE TELEVISIÓN DIGITAL DVB-T ..	62
4.3.1. Codificador Reed Solomon	62
4.3.2. Mapeo 64 QAM	63
4.3.3. Modulación OFDM	63
4.3.4. Canal de Transmisión	63
4.3.5. Variaciones de la SNR	63
4.3.6. Variaciones de la Eb/No	64
4.4. SUBSISTEMA RECEPTOR DEL ESTÁNDAR DVB-T	65
4.4.1. Variación en el Diagrama de Constelaciones y el Espectro	66
4.5. SUBSISTEMA TRANSMISOR DEL ESTÁNDAR DE TELEVISIÓN DIGITAL ISDB-T .	66
4.5.1. Mapeo 64 QAM	66
4.5.2. Modulación OFDM	67
4.6. CANAL DE TRANSMISIÓN	67
4.7. SUBSISTEMA RECEPTOR DEL ESTÁNDAR ISDB-T	69
4.7.1. Demodulación OFDM	70
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

Lista de Figuras

Figura 1. Componentes de la Transmisión de Televisión Digital	3
Figura 2. Diagrama en Bloques Transmisor DVB-T	5
Figura 3. Origen del Paquete MPEG-2 TS	6
Figura 4. Sintaxis del Paquete MPEG-2TS	6
Figura 5. Dispersión de Energía	7
Figura 6. Diagrama de Codificación y Modulación de Canal	9
Figura 7. Codificador Reed Solomon	9
Figura 8. Entrelazador y Desentrelazador Convolutacional Externo	11
Figura 9. Diagrama de Trellis	12
Figura 10. Entrelazado de Bits	13
Figura 11. Modulación OFDM	14
Figura 12. Diagrama de Constelación - 64QAM	16
Figura 13. Diagrama de Constelación sin/con Presencia de Ruido	17
Figura 14. Modulación OFDM	17
Figura 15. Espectro DVB-T	18
Figura 16. Diagrama en Bloques del Receptor DVB-T	19
Figura 17. Diagrama en Bloques Sistema Transmisor ISDB-T	21
Figura 18. Segmentos de Datos en ISDB-T	23
Figura 19. Segmentos de Datos intercalados	23
Figura 20. Ejemplo de Transmisión en Modo Jerárquico	23
Figura 21. Transmisión en Modo Parcial	24
Figura 22. Creación del Paquete MPEG-2 TS	28
Figura 23. Sistema Simulador DVB-T	29
Figura 24. Generación de Datos Aleatorios.	32
Figura 25. Aleatorización de datos.	33
Figura 26. Diagrama en Bloques Codificación y Modulación del Canal.....	35
Figura 27. Diagrama en Bloques Entrelazador Interno.....	38

Figura 28. Subsistema del Entrelazado de Símbolos	39
Figura 29 . Diagrama en Bloques Esquema de Transmisión OFDM	40
Figura 30. Diagrama en Bloques del Esquema de Recepción OFDM	42
Figura 31. Diagrama en Bloques Decodificación y Demodulación del Canal	45
Figura 32. Subsistema del Demodulación 64 QAM	45
Figura 33. Diagrama en Bloques Desentrelazador Interno	47
Figura 34. Subsistema del Desentrelazado de Simbolo	47
Figura 35. Subsistema del Decodificador Viterbi	48
Figura 36. Diagrama en Bloques ISDB-T	52
Figura 37. Diagrama en Bloques Transmisor ISDB-T	53
Figura 38. Diagrama en Bloques Receptor ISDB-T	54
Figura 39. Diagrama en Bloques Divisor Jerárquico	55
Figura 40. Diagrama en Bloques Codificador Interno	56
Figura 41. Diagrama en Bloques Modulación ISDB-T	57
Figura 42. Diagrama en bloques decodificador Viterbi	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros Subsistema Generador Flujo de Transporte MPEG-2	30
Tabla 2. Parámetros Subsistema Generador de Secuencia Seudoaleatoria	33
Tabla 3. Parámetros Codificador Externo Reed Solomon (204,188)	36
Tabla 4. Parámetros Entrelazador Externo	37
Tabla 5. Parámetros Codificador Interno	37
Tabla 6. Entrelazador de Bits	38
Tabla 7. Entrelazador de Símbolos	39
Tabla 8. Modulador 64-QAM	39
Tabla 9. Parámetros Etapa de Transmisión OFDM	41
Tabla 10. Parámetros Ruido Blanco Gaussiano (AWGN)	42
Tabla 11. Parámetros Etapa de Transmisión OFDM	43
Tabla 12. Parámetros Modulación 64 QAM	45
Tabla 13. Parámetros Desentrelazador Interno	48
Tabla 14. Parámetros decodificador interno	48
Tabla 15. Parámetros Desentrelazador Interno	49
Tabla 16. Parámetros Decodificador Reed Solomon	50
Tabla 17. Parámetros Codificador Interno	57
Tabla 18. Parámetros Combinador	58
Tabla 19. Patrón de perforación en el codificador Trellis	60
Tabla 20. Parámetros Decodificador Viterbi.....	60
Tabla 21. SNR Vs BER DVB-T.....	64
Tabla 22. Eb/No Vs BER DVB-T	65
Tabla 23. SNR Vs BER ISDB-T	68
Tabla 24. Eb/No Vs BER ISDB-T	69

Lista de Anexos

Anexo A. FIGURAS RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN

ACRÓNIMOS

ARIB: *Association of Radio Industries and Business.*

ATSC: *Advanced Television System Committee.*

CCIR: *Comité Consultatif International des Radiocommunications.*

DiBEG: *Digital Broadcasting Experts Group*

DVB: *Digital Video Broadcasting.*

DVB-C: *Digital Video Broadcasting – Cable.*

DVB-H: *Digital Video Broadcasting – Handheld.*

DVB-MC: *Digital Video Broadcasting – Microwave.*

DVB-S: *Digital Video Broadcasting – Satellite.*

DVB-T: *Digital Video Broadcasting – Terrestrial.*

ETSI: *European Telecommunications Standards Institute.*

FIFO: *First In, First Out.*

HDTV: *High Definition Television.*

IEC: *International Electrotechnical Commission.*

IFFT: *Inverse Discrete Fourier Transform.*

ISDB: *Integrated Digital Services Digital Broadcasting.*

ISDB-C: *Integrated Digital Services Digital Broadcasting – Cable.*

ISDB-S: *Integrated Digital Services Digital Broadcasting – Satellite.*

ISDB-T: *Integrated Digital Services Digital Broadcasting – Terrestrial.*

ISO: *International Organization for Standardization.*

ITU-R: *International Telecommunications Union – Radiocommunications.*

MPEG-2 *Moving Pictures Experts Group 2.*

NTSC *National Television System Committee.*

OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

PAL: *Phase Alternating Line.*

PES: *Packetised Elementary Stream.*

PID: *Packet Identifier.*

PRBS: *Pseudo Random Bit Sequence.*

PSK: *Phase Shift Keying.*

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation.*

QPSK: *Quadrature Phase-Shift Keying.*

RS: *Reed Solomon.*

SECAM: *Séquentiel Couleur à Mémoire.*

SDTV: *Standard Definition Television.*

SNR: *Signal to Noise Ratio.*

TPS: *Transmission Parameter Signalling*

TS: *Transport Stream.*

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los medios de comunicación más importante, conocido y de fácil acceso es la Televisión Digital Terrestre, ya que en algunos países solo se requiere del costo único del televisor para acceder a sus beneficios. Este servicio es cada vez más acogido en el mundo [1], lo que hace que la Televisión Digital Terrestre sea indispensable en la infraestructura de comunicaciones de cada país.

La adopción de la Televisión Digital Terrestre brinda muchas ventajas comunes tanto para los usuarios como para los proveedores, entre ellas: calidad de las señales de televisión, nuevos servicios, mayor número de canales, mayor eficiencia en la utilización del espectro, contenidos más atractivos, etc; lo que exige contar con una infraestructura acorde con la tecnología tanto para transmisores como para receptores y con un plan de migración de tecnología que incluya la implementación del estándar que brindará el mejor desempeño a los servicios que se van a ofrecer. [2]

Para la escogencia del estándar, algunos países han optado por realizar pruebas de transmisión de señales de Televisión Digital Terrestre utilizando estándares como: ATSC, ISDB-T y DVB-T. Por otro lado, algunos han adoptado el estándar que les ofrece la mejor propuesta económica, otros en cambio, esperan a que los países que pertenecen a su mismo bloque comercial adopten un estándar para luego ellos también hacerlo. [3]

El presente trabajo es pertinente, ya que brinda un punto de partida para futuros desarrollos en simulación de los diferentes estándares y servicios que soporta la Televisión Digital Terrestre, con lo que se aborda la necesidad que tienen varios sectores de la telecomunicaciones con respecto a este tema, además se aportará a la comunidad universitaria y al Grupo I+D de telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, un documento que contendrá la información detallada de los estándares, sus características y ventajas, y la implementación de un sistema de simulación para los estándares DVB-T e ISDB-T, que permitirá la evaluación del comportamiento a nivel físico de estos.

En el capítulo 1 del presente documento se realiza una introducción que incluye el planteamiento del problema y la importancia que tiene este documento para la comunidad universitaria, además, se describen las secciones que conforman el documento.

En el capítulo 2 se describen detalladamente los estándares para la transmisión de Televisión Digital Terrestre DVB-T e ISDB-T; este capítulo es muy importante ya que en él, están contenidos los fundamentos teóricos necesarios para realizar el diseño del sistema a simular para cada estándar.

En el capítulo 3 se desarrolla un estudio de las características técnicas de los estándares DVB-T e ISDB-T, que permite la construcción e implementación del sistema a simular para cada uno de ellos, como solución al primer objetivo específico.

En el capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados obtenidos y se realiza la evaluación a nivel físico de los estándares DVB-T e ISDB-T, cumpliendo de esta manera con el segundo objetivo específico.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de la experiencia adquirida al realizar el trabajo de grado y las recomendaciones para trabajos futuros.

CAPITULO 2. ESTÁNDARES DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE DVB-T e ISDB-T.

La realización del sistema en simulación a nivel físico de los estándares DVB-T e ISDB-T, requiere el conocimiento de los fundamentos teóricos más importantes de la Televisión Digital Terrestre y las características técnicas dichos estándares.

2.1. TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE

Es una forma de difusión de televisión digital, por la cual se pueden transmitir imagen, audio y servicios interactivos con gran calidad. La transmisión terrestre se hace por ondas electromagnéticas de la misma manera que la televisión analógica convencional, y se usan centros emisores y antenas similares para su recepción. En la Figura 1 se muestra un diagrama funcional para realizar una transmisión digital.

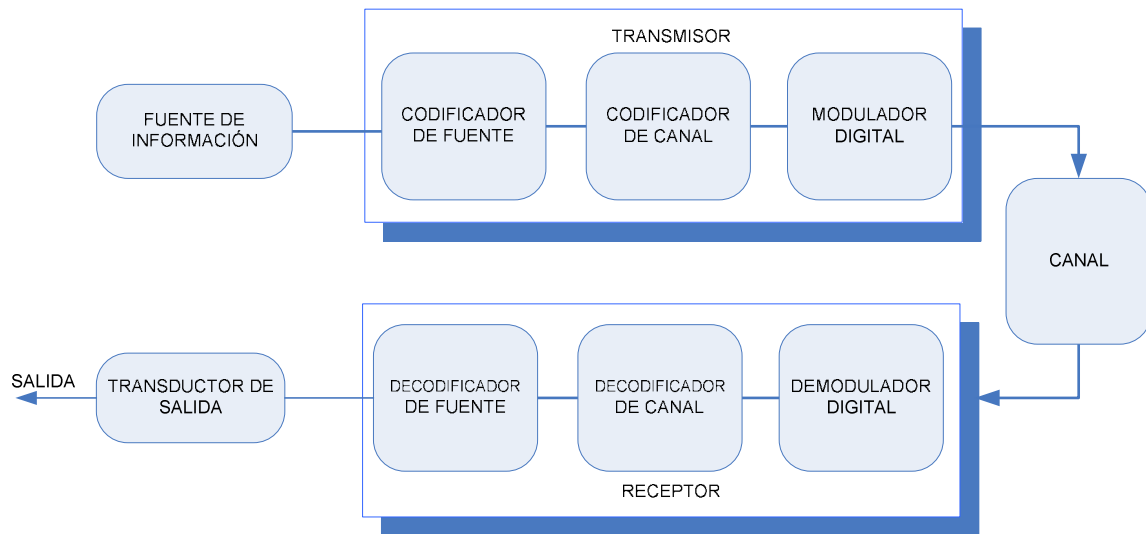


Figura 1. Componentes de la Transmisión de Televisión Digital [7]

La fuente de información, es la encargada de generar la señal de entrada al sistema, que posteriormente será convertida en una secuencia de dígitos binarios (bits), este proceso de conversión se le denomina codificación de fuente o compresión de datos, la secuencia de dígitos binarios ó secuencia de información, pasará al codificador de canal, que introducirá de manera controlada redundancia en la secuencia binaria para disminuir las imperfecciones del sistema, además de incrementar la fiabilidad de la señal recibida; el incremento de fiabilidad que introduce el codificador de canal se traduce en la práctica en una disminución de la probabilidad de realizar una transmisión errónea.

La secuencia binaria en la salida del codificador de canal pasa al modulador digital que sirve como interfaz al canal de transmisión, el primer objetivo de dicho modulador es mapear la secuencia de información en una forma de onda adecuada para la transmisión por el canal. El canal de comunicaciones es el medio que se utiliza para enviar la señal desde el transmisor hasta el receptor, la señal en este medio es deteriorada de manera aleatoria por factores como el ruido térmico generado por dispositivos electrónicos, el ruido generado por las descargas eléctricas o tormentas, entre otros.

En el receptor, el demodulador procesa la señal recibida y realiza una estimación del símbolo transmitido, esta secuencia, es el punto de partida para que el decodificador de canal reconstruya la secuencia de información original, a partir del conocimiento del código utilizado y de la redundancia contenida en los datos recibidos. Como se desea una señal analógica a la salida, el decodificador fuente acepta la señal de salida del decodificador de canal e intenta reconstruir la señal analógica original.

Debido a los errores en la decodificación de canal y a la posible distorsión introducida en el codificador y decodificador de fuente, la señal de salida es una aproximación de la señal original, lo que conlleva a que la diferencia entre la señal original y la reconstruida sea la medida de la distorsión introducida por el sistema de transmisión digital.

Actualmente existen a nivel mundial varios estándares para la transmisión digital de televisión, los más conocidos son [1]: ATSC, DVB-T e ISDB-T, el presente documento se centrará en el estudio de DVB-T e ISDB-T.

2.2. ESTÁNDAR DVB-T

A comienzos de los años 90 fue establecido el estándar DVB por el EBU/ETSI *Joint Technical Committee*, para la transmisión de audio y video usando la codificación MPEG-2.

El estándar DVB consta de las especificaciones técnicas necesarias para la señalización y transmisión de la Televisión Digital, y fue diseñado con el fin de contribuir a la distribución de estas señales por diferentes medios como: cable (DVB-C), terrestre (DVB-T), microondas (DVB-MS y DVB-MC), satelital (DVB-S) y móvil (DVB-H).[8]

Como el estándar DVB-T, es uno de los estándares objeto de estudio del presente trabajo, a continuación, se describen brevemente los aspectos técnicos más relevantes de este estándar y su aplicación a los sistemas de difusión de Televisión Digital Terrestre. Estos aspectos se pueden encontrar en profundidad en la norma publicada por ETSI EN 300 744 V1.5.1 [9].

2.2.1. Etapa de Transmisión

El estándar DVB-T es utilizado para la emisión de la señal de televisión a través de redes terrestres, como las usadas en la televisión analógica tradicional, lo que facilita la migración a la televisión digital.

En la Figura 2 se encuentran los bloques principales del transmisor DVB-T.

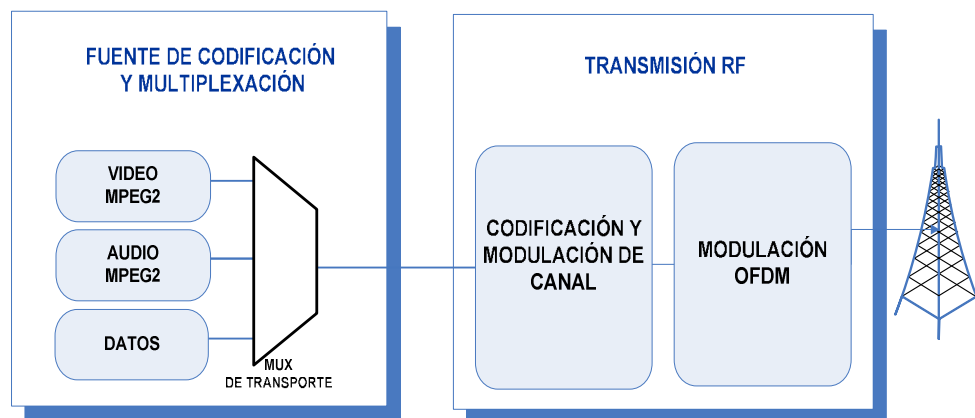


Figura 2. Diagrama en Bloques Transmisor DVB-T

2.2.1.1. Fuente de codificación y multiplexación

Las señales de video, audio y datos se comprimen según la norma MPEG-2, que cuenta con una sintaxis especializada para cumplir las características requeridas por el estándar DVB-T. Los requerimientos se pueden encontrar en la especificación de MPEG-2 [10] [11].

La señal MPEG-2 comprimida es enviada al siguiente bloque, donde será multiplexada para luego ser transportada por un único flujo de transporte MPEG-2.

Flujo de transporte MPEG-2: de acuerdo con el estándar ISO/IEC 13818-1, el flujo binario de video y audio se comprimen independientemente formando los flujos elementales (*Elementary Stream*), que luego son estructurados en paquetes de longitud variable, denominados PES (*Packetized Elementary Stream*). Un paquete PES está formado por la cabecera y la carga útil (*payload*). Luego los paquetes PES se multiplexan en un único flujo de transporte denominado “Transport Streams” (TS), con una longitud de 188 bytes, conocidos como “MPEG-2/TS”. La formación del flujo de transporte MPEG-2 se puede observar en la Figura 3. [12]

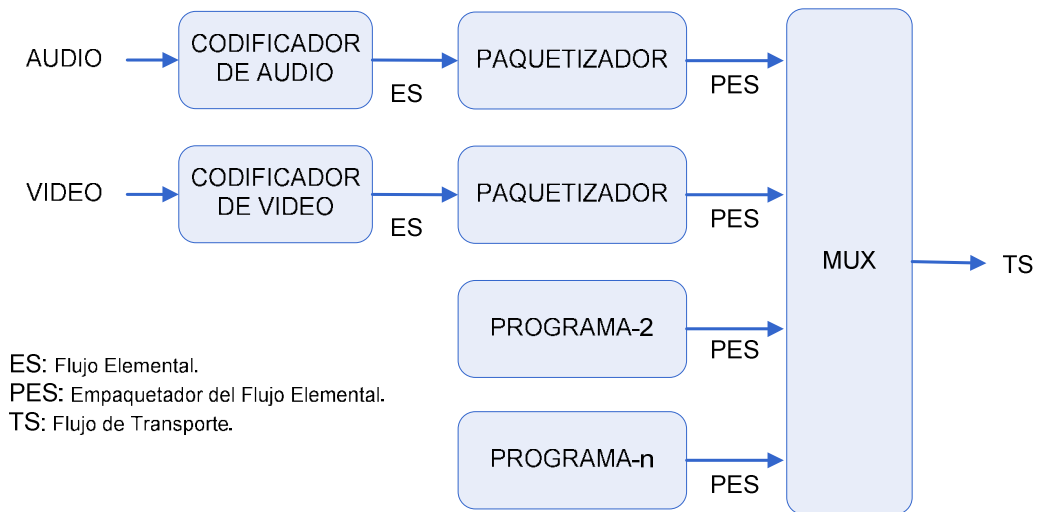


Figura 3. Origen del Paquete MPEG-2 TS [9]

En la Figura 4, se encuentra la sintaxis del paquete MPEG-2 TS.

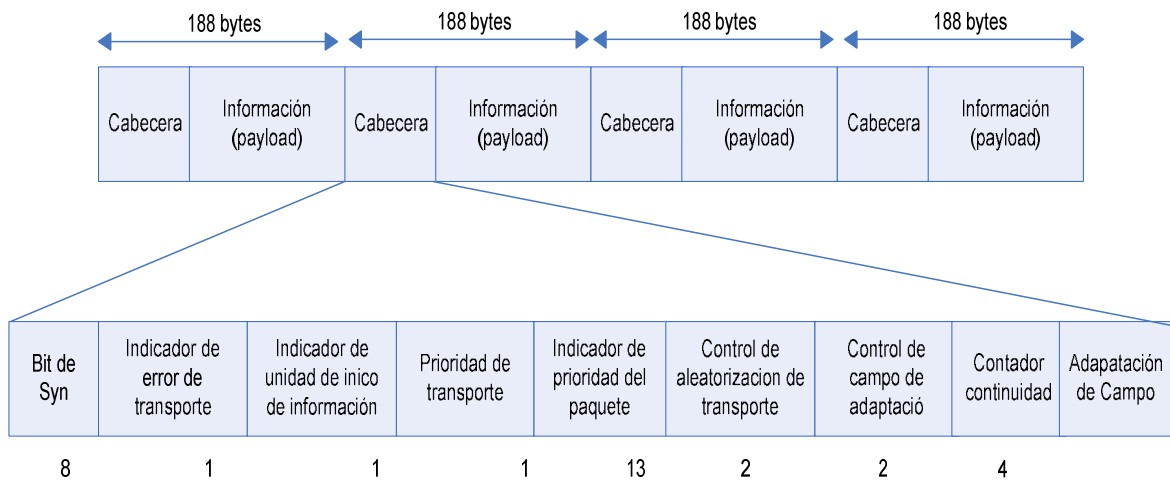


Figura 4. Sintaxis del Paquete MPEG-2TS [13]

Los campos más importantes de la cabecera son:

- Byte de sincronismo: permite que el decodificador se sincronice correctamente con los datos entrantes. Este valor de sincronización puede darse en cualquiera de los 187 bytes restantes, al contrario de los paquetes PES.
- Indicador de error de transmisión: se activa cuando se detecta un error en la transmisión.
- Indicador de comienzo de la carga útil: indica si en la cabecera de la carga útil hay un PES.
- Indicador de prioridad del paquete: permite la distinción de paquetes de diferentes flujos elementales.
- Control de aleatorización: indica si hay o no datos encriptados en la carga útil.
- Control del campo de adaptación: indica si la cabecera tiene campo de adaptación.
- Contador de continuidad: el codificador lo incrementa en 1 cada vez que envía un paquete de la misma fuente. Esto permite que el decodificador sea capaz de deducir si ha habido una pérdida (o ganancia incluso) de un paquete de transporte y evitar errores que no se podrían deducir de otra manera.
- Adaptación de campo: introduce bits de relleno al paquete.

Para evitar las largas series de unos y ceros, se hace necesario aleatorizar la señal de entrada del bloque de codificación, por medio del proceso conocido como dispersión de energía. En la Figura 5 se puede observar el esquema de dicho proceso.

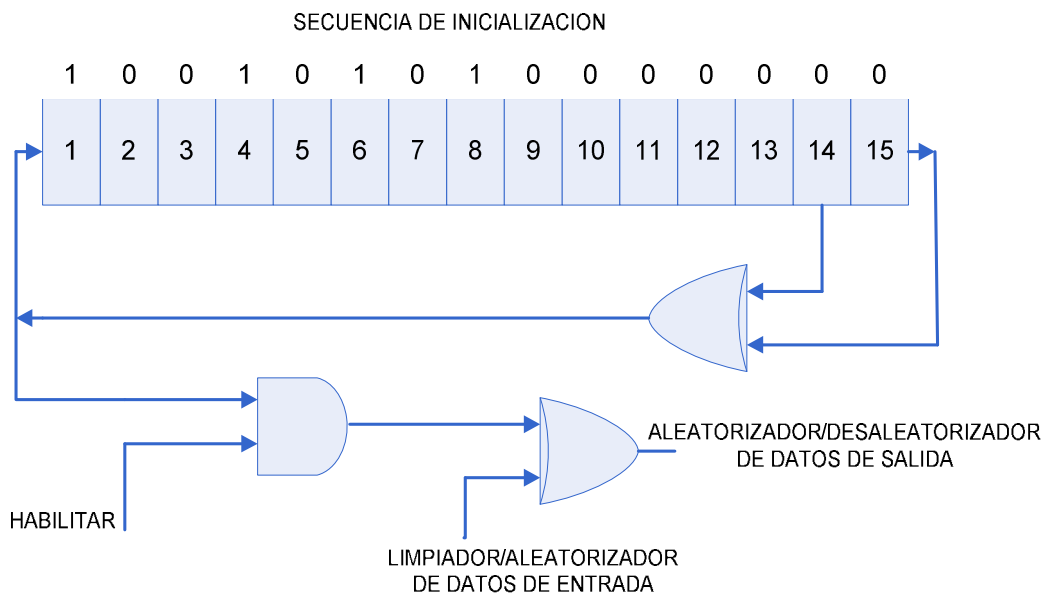


Figura 5. Dispersión de Energía [14]

Inicialmente se requiere la generación de una secuencia binaria pseudoaleatoria, conocida como PRBS, mediante el uso del polinomio:

$$1 + X^{14} + X^{15} \text{ Ec.1 [14]}$$

Los registros PRBS serán cargados con la secuencia "100101010000000", al inicio de cada ocho paquetes de transporte. La señal de inicialización para el desaleatorizador, es el octeto de sincronización MPEG-2, pero invertido, es decir que se tiene "01000111"(47HEX) y se invierte a "10111000"(B8HEX), este proceso se denomina adaptación del multiplexor de transporte. El primer bit presente a la salida del generador de PRBS se aplicará al primer bit, del primer octeto después del octeto de sincronización MPEG-2 invertido (esto es, B8HEX). Para facilitar otras funciones de sincronización, la generación de PRBS deberá continuar durante los octetos de sincronización MPEG-2 de los posteriores 7 paquetes de transporte, pero su fase de salida deberá inhabilitarse quedando estos octetos sin aleatorización. Por consiguiente, el período de la secuencia PRBS será de 1503 octetos. El proceso de aleatorización estará activado incluso cuando no está presente el flujo de bit en la fase de entrada, o cuando no cumple el formato de MPEG-2 TS (es decir, 1 octeto de sincronización + 187 octetos de paquete). El propósito de este proceso es evitar la emisión de una portadora no modulada desde el modulador.

2.2.1.2. Codificación y modulación del canal

Para una transmisión libre de errores e interferencias se requiere de los procesos de codificación y modulación del canal. En la Figura 6, se pueden observar los bloques que permiten la codificación y modulación: (bloques correspondientes a estos procesos) codificador externo Reed-Solomon (RS), entrelazador externo convolucional (*convolutional interleaving*), codificador interno (*punctured convolutional code*), entrelazador interno (*inner interleaving*) y mapeo (*mapping*).

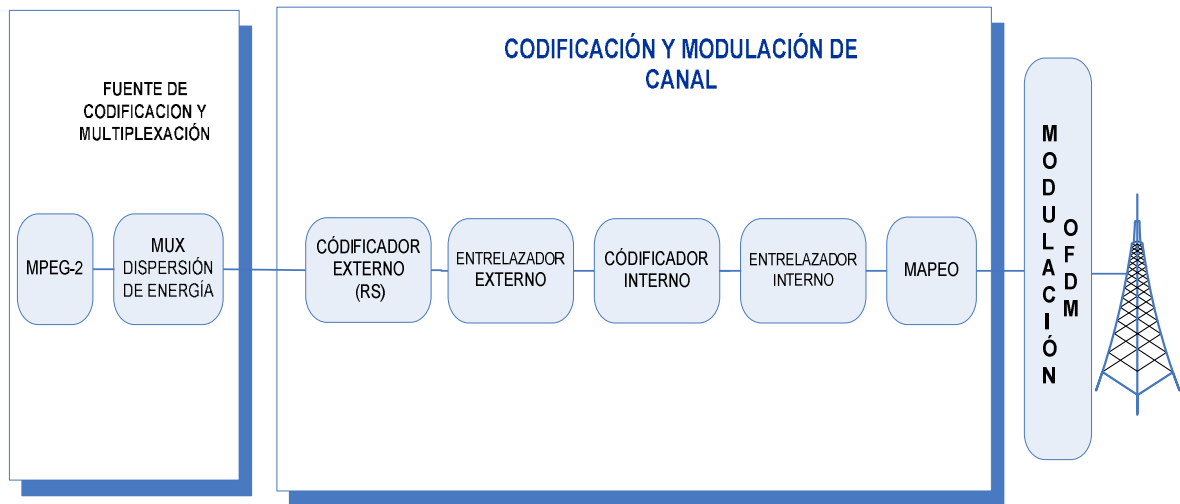


Figura 6. Diagrama de Codificación y Modulación de Canal [8]

A continuación se especifican brevemente las funciones que realiza cada uno de los bloques que conforman la codificación y modulación de canal.

Codificador externo (Reed- Solomon): El código de corrección RS es un código en bloque que combate errores aleatorios y en ráfagas, mediante el uso de bits de redundancia, es un código que tiene un buen desempeño ya que hace uso de algoritmos de decodificación muy eficientes, que permiten que el número de operaciones por bit de salida sean reducidas.

Un código Reed-Solomon (N, K) , es aquel que corrige t ráfagas de m bytes, transformando una palabra entrante de longitud K , en una palabra código de longitud N , como se puede observar en la Figura 7. Los parámetros que usa este codificador son:

- Bytes de redundancia $m = N - K$ Ec.2 [15]
-

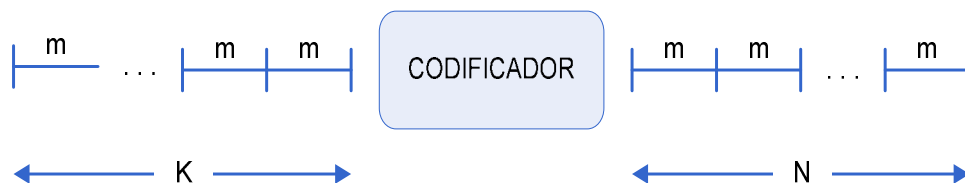


Figura 7. Codificador Reed Solomon [16]

En el caso del estándar DVB-T, la norma ETSI 300 744 especifica un código del tipo RS (204,188, t = 8) que es un código derivado del sistema original RS (255,239, t = 8), donde se añade a cada paquete de 188 bytes, 16 bytes de redundancia que forman el paquete de 204 bytes, como se puede observar en la Figura 9; con este mecanismo se corrigen hasta 8 bytes incorrectos y se detectan 16 bytes erróneos en el paquete de 204 bytes.[13]

- Bytes de redundancia $m = N - K = 204 - 188 = 16$

El codificador Reed-Solomon abreviado podrá implementarse añadiendo 51 octetos puestos a cero antes de los octetos de información en la fase de entrada de un codificador RS (255,239), después de la codificación RS se descartarán estos octetos nulos.

Entrelazador Externo: ordena los bytes facilitando la corrección de grandes ráfagas de error, esto se logra modificando el orden de los paquetes de transporte de tal manera que en recepción los errores se distribuyan aleatoriamente y afecten en forma mínima la transmisión de los datos.

Como se puede observar en la Figura 8, el entrelazador tiene 12 ramas conectadas a la los datos de entrada cíclicamente, formando así un registro de desplazamiento con profundidad de $j \times M$, donde $M=N/I$, $N=204$, $I=12$ y cada rama j constituye un registro de desplazamiento FIFO (Primero que entra es el primero que sale). Así se logra que los paquetes de transporte queden separados entre sí un número de posiciones y su valor está dado por $j \times M$, por lo tanto, el paquete original quedará dividido en dos paquetes, así se reducirán los errores que afectan los bytes consecutivos y disminuirán los errores de ráfaga que se generan en el canal de transmisión. [17]

Aunque con el uso del entrelazado convolucional externo se logra decodificar la señal a distancias mayores (donde la razón señal a ruido es débil), se sacrifica la tasa de datos ya que no todos los bits transmitidos transportan información.

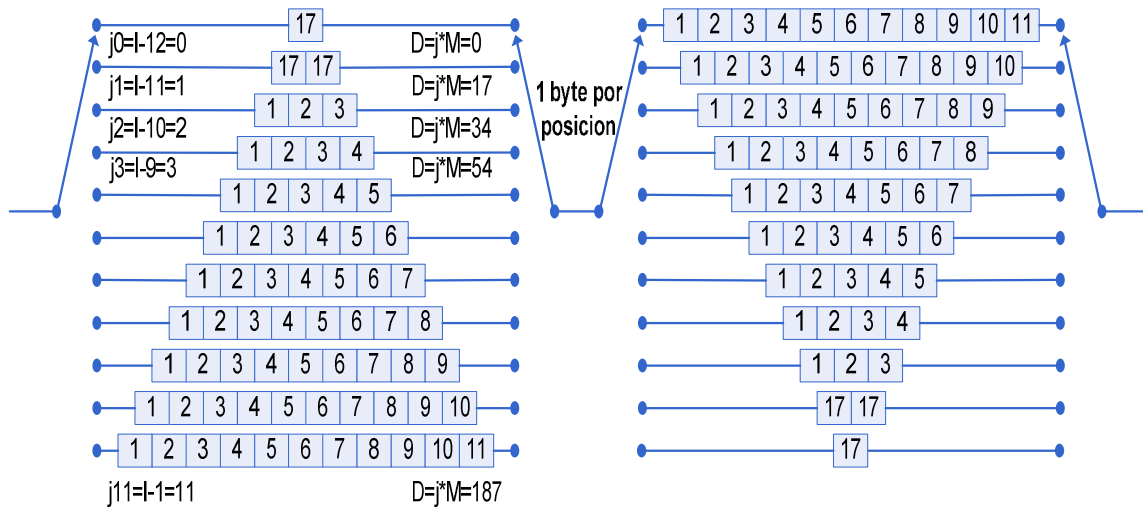


Figura 8. Entrelazador y Desentrelazador Convolucional Externo [17]

Codificador Interno: cuando se habla de perforado hay que tener claro que existen dos salidas X y Y, a cada una de ellas le corresponde un polinomio generador llamado G, para X es $G = 171$ representado en octal y para Y = 133 también en octal, los datos de entrada deben ser sumados a los de los polinomios generadores pero en binario, si el dato es 1, se usa, si es 0, no se usa, de esta manera se seleccionan algunos datos a la salida los cuales se convertirán en una secuencia en serie.

Las propiedades de un codificador convolucional pueden observarse gráficamente mediante formas como: árbol, trellis, o diagrama de estados, para este caso se usa el código trellis o también conocido como el diagrama de trellis, el cual permite que la decodificación sea sencilla, además permite maximizar la distancia mínima entre estados de transmisión desde el punto de vista geométrico.

El código Trellis, tiene forma de red como se puede observar en la Figura 9.

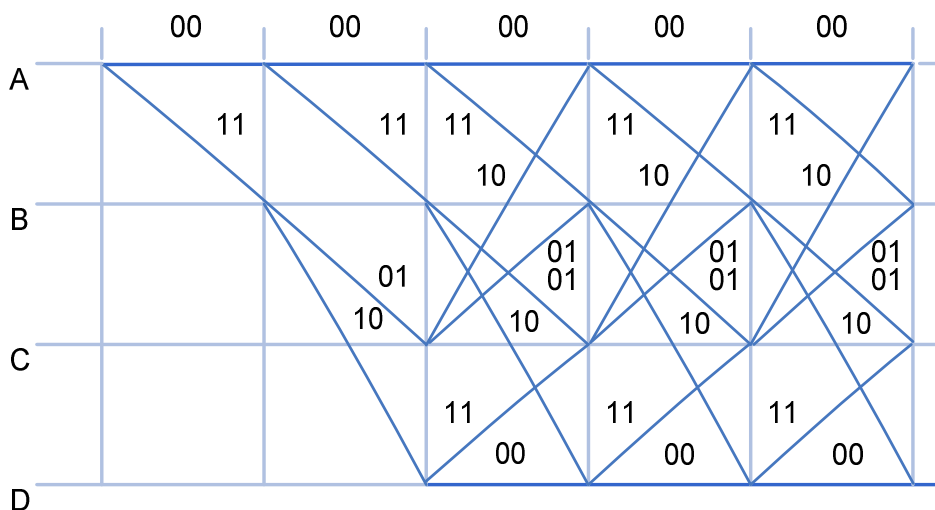


Figura 9. Diagrama de Trellis [18]

El diagrama consta de unas líneas horizontales y verticales, las primeras representan los estados del codificador y las segundas corresponden a los niveles del árbol del código.

Para realizar la red, se parte del estado inicial del codificador que está ubicado en el primer nivel del árbol, desde ahí se trazaran dos líneas una si la siguiente entrada es 0 y otra si es 1, estas líneas seguirán hasta el siguiente nivel del árbol es decir hasta el estado en el que queda el codificador después de codificar las entradas y arriba de las líneas se escribe la salida del codificador para esa codificación, esto se repite para cada nivel del árbol en cada uno de los estados.

Entrelazador Interno: se encarga de organizar la información en forma aleatoria, para protegerla frente a los errores de ráfaga, existen dos tipos de entrelazado, uno relativo al bit y el otro al símbolo (grupo de bits).

- *Entrelazador de bits:* se busca, que los bits que forman un símbolo no sean bits consecutivos de la entrada. Los bits que provienen del bloque anterior se agrupan de 126 en 126 y cada grupo se introduce en los registros de cada una de las ramas que conforman el entrelazador. El número de ramas depende de la modulación empleada, así, para QPSK y 16-QAM son cuatro ramas y para 64-QAM son seis ramas. Una vez que tenemos cada registro lleno con los 126 bits, se les aplica una rotación que depende de la rama con la que se esté trabajando. Después de aplicar dicha rotación los bits de cada rama pasan a alimentar la

entrada del entrelazador de símbolo. En la Figura 10 se puede observar el diagrama entrelazador interno. [18]

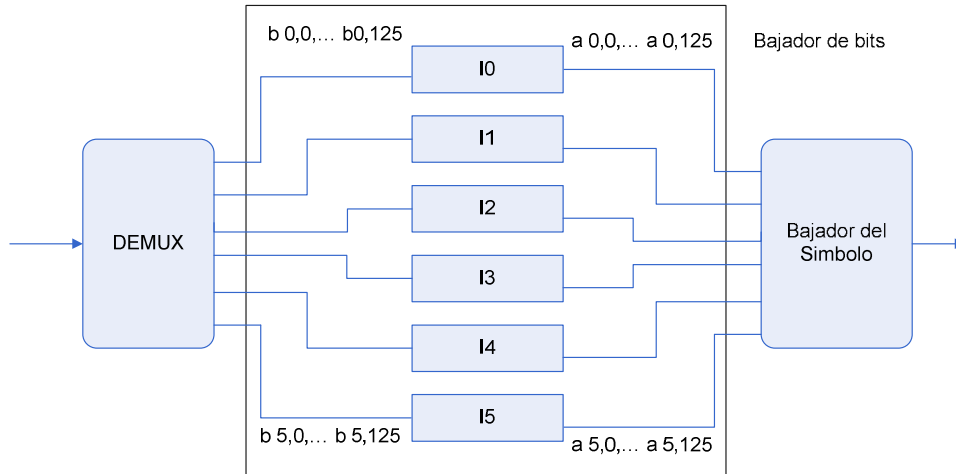


Figura 10. Entrelazado de Bits [18]

- *Entrelazador de símbolo:* éste bloque recibe los datos que provienen del entrelazador de bits, como los bits se agruparon de 4 en 4 (QPSK, 16-QAM) ó de 6 en 6 (64-QAM), se forman entonces los símbolos tomando un bit de cada rama; por ejemplo, para el caso de la modulación 64-QAM, los símbolos estarán formados por 6 bits. Una vez los símbolos están formados, el entrelazador se encarga de desordenarlos y se ejecutara dependiendo del modo de transmisión, como en el entrelazado de bits se crean 126 grupos, para cubrir las 1512 posiciones del modo de transmisión 2K, hacen falta 12 ejecuciones; mientras que para cubrir las 6048 posiciones del modo 8K hacen falta 12 ejecuciones. De este modo, una portadora atenuada puede ser recuperada en recepción, a partir de la correlación que existe con otras portadoras que no han sido atenuadas.[18]

Modulación OFDM: DVB-T utiliza un esquema denominado multiplexaje por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) que se caracteriza por la existencia de símbolos distribuidos en un gran número de portadoras. De esta manera, cada portadora transporta una tasa de bits moderada. Este esquema trabaja en dos modos denominados “2k” y “8k”, según el número de sub-portadoras utilizadas (1705 y 6817, respectivamente). De esas sub-portadoras deben reservarse algunas para transmitir

parámetros de codificación, modulación y tonos pilotos necesarios para sincronización y estimación del canal, permitiendo que el usuario pueda configurar su transmisión libremente en cada momento según el contenido televisivo y que cada receptor se ajuste automáticamente a ella, la cantidad de sub-portadoras asignadas para el modo 2k son 1512, y para el modo 8k son 6048.

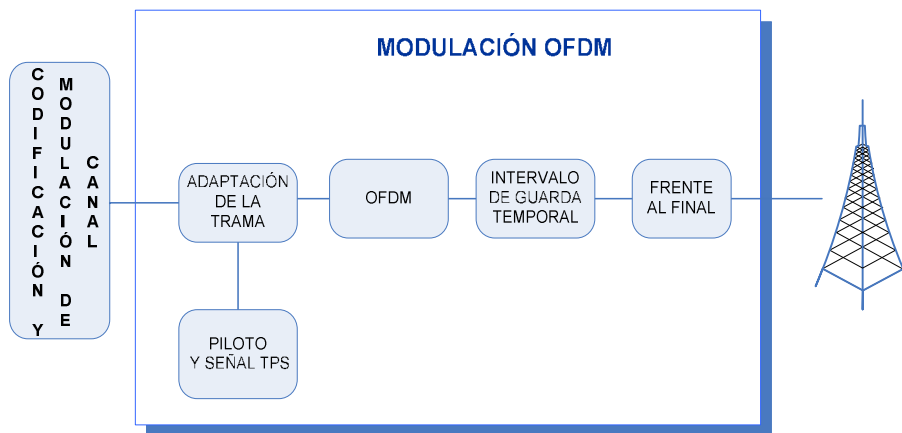


Figura 11. Modulación OFDM [15].

El modo de sub-portadoras utilizado no tiene incidencia sobre la tasa de datos. En efecto, dado el ancho de banda de la transmisión (por ejemplo, 6 MHz u 8 MHz), la duración de los símbolos OFDM en el modo 8k es el doble que los símbolos en el modo 4k, que a su vez tienen el doble de tiempo de duración que en el modo 2k. Así, cuatro símbolos OFDM en el modo 2k requieren del mismo tiempo de transmisión y portan igual cantidad de información que un símbolo 8k. No obstante, el modo 2k es más adecuado para recepción en terminales móviles, puesto que la duración menor de cada símbolo OFDM permite velocidades del móvil mayores (variaciones del canal más rápidas), precisamente hasta 4 veces superiores que en el modo 8k. En cambio, la desventaja de usar el modo 2k es que está limitado a canales 4 veces menos dispersivos que el modo 8k, lo que se traduce en celdas cuyo radio de cobertura es 4 veces menor que para el caso 8k, y por ende, cuya área de cobertura es 16 veces menor. Esto encarece significativamente el costo de implementación. El modo 4k fue introducido como un compromiso intermedio entre costo y movilidad.

Modulación de Sub-Portadoras: Las sub-portadoras pueden ser moduladas con constelaciones QPSK, 4-QAM, 16-QAM o 64-QAM. Estas constelaciones son uniformes (símbolos equidistantes) en el caso de transmisión de un flujo de transporte único, mientras que

se utiliza un formato no-uniforme (símbolos equidistantes dentro de cada cuadrante, pero con separación mayor entre cuadrantes) al combinar flujos jerarquizados AP (alta prioridad) y BP (baja prioridad).

En DVB-T, cada símbolo OFDM se combina en una trama de transmisión compuesta por 68 símbolos consecutivos y cada símbolo OFDM transporta un bit de TPS, usados para señalar parámetros relacionados con el esquema de transmisión como el canal de codificación y la modulación. Las señales TPS son transmitidas en paralelo sobre 17 portadoras TPS para el modo 2k y sobre 68 portadoras para el modo 8k. Cada portadora TPS en el mismo símbolo transporta el bit de información de codificación.

Cada bloque TPS contiene 68 bits, definidos así [19]:

- 1 bit de inicialización;
- 16 bits de sincronización;
- 37 bits de información;
- 14 bits de redundancia para protección de errores.

De los 37 bits de información, 23 son usados actualmente, los 14 bits restantes se llenan de ceros, reservándolos para emplearlos cuando sea necesario.

El inicio de cada símbolo OFDM es precedido por “intervalo de guarda” cuyo propósito es incrementar la inmunidad de la señal frente a ecos y reflexiones, protegiendo la transmisión y proveyendo inmunidad a la dispersión de canal, separando los símbolos OFDM consecutivos y rellenando la brecha resultante (intervalo de guarda) con datos redundantes. El intervalo de guarda consiste en una continuación cíclica de la parte útil del símbolo. Su longitud respecto a la longitud de esta parte del símbolo (denominada “tiempo útil”, TU) puede tomar cuatro valores diferentes: 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32, su elección depende principalmente de la geografía del entorno de transmisión, lo que determina la dispersión del canal correspondiente. [19]

Constelación y Espectro de la Señal en DVB-T: Como se menciono anteriormente las modulaciones más usadas para la transmisión de Televisión Digital terrestre son QPSK, 16QAM y 64QAM; la modulación QPSK siempre tendrá un mayor rango y una mayor área de cobertura que otras modulaciones. De igual forma, el área de cobertura de 16-QAM siempre será mayor que la de 64-QAM. Para la escogencia de la modulación a usar, se hace necesario el sacrificio

entre cobertura y capacidad. Si lo que se requiere es tener un máximo rendimiento de velocidad de datos y más eficiencia del ancho de banda, el mejor de los tres modos de modulación es 64-QAM. [20]

Teniendo en cuenta que el principal beneficio ofrecido por la Televisión Digital Terrestre, es la eficiencia del ancho de banda, se hace necesario sacrificar la cobertura que ofrecen modulaciones como QPSK y 16-QAM, por el rendimiento y la eficiencia de ancho de banda, brindado por la modulación 64-QAM.

La modulación 64-QAM, tiene 64 estados como lo muestra la Figura 12, cada uno representa 1 símbolo (6 bits); esta modulación usa la codificación cíclica para distribuir los códigos a cada fase; de tal forma que un error de fase introduce en las fases más cercanas solo un error de bit.

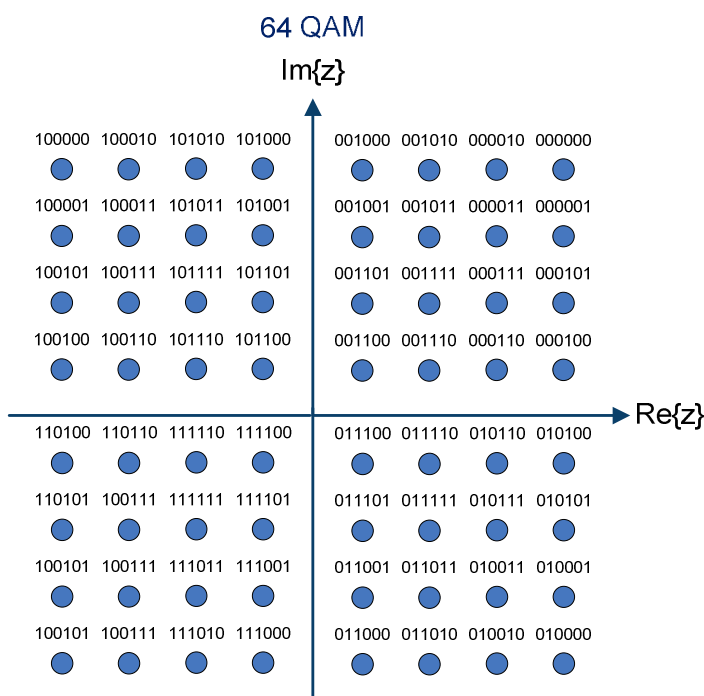


Figura 12. Diagrama de Constelación - 64QAM [14]

La Figura 13 ilustra el diagrama de constelaciones que entrega la modulación 64-QAM para el estándar DVB-T sin ruido y frente al ruido, se puede observar, como el ruido altera el diagrama de las constelaciones, formando una "nube" en cada uno de los estados.

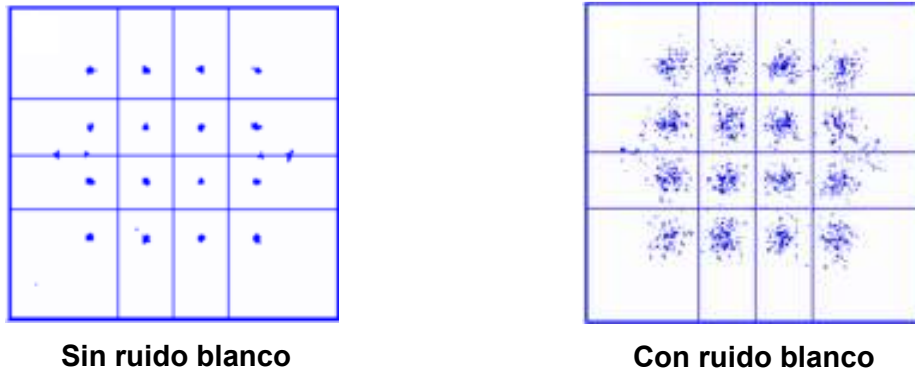


Figura 13. Diagrama de Constelación sin/con Presencia de Ruido [16]

Las características espectrales de una transmisión OFDM se basan en el principio de dicha modulación que consiste en distribuir el flujo binario de información entre un gran número de portadoras de forma que cada una maneje una velocidad de datos reducida con respecto a la del flujo total. Por otra parte la separación en frecuencia entre las portadoras se hace igual al inverso de tiempo de los símbolos, con lo que la posición de las portadoras en el espectro de frecuencias (ver Figura 14) coincide con los nulos del espectro de las portadoras adyacentes (condición de portadoras ortogonales). En estas condiciones se consigue mínima interferencia intersímbolos. Para obtener el espectro final de todas las portadoras es necesario realizar la suma de los espectros particulares de cada una de ellas.

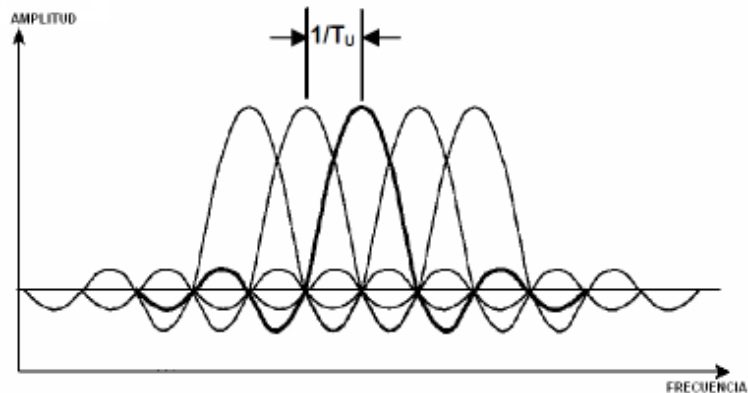


Figura 14. Modulación OFDM [12]

En la Figura 15 se muestra el espectro final teórico para el estándar DVB-T en los modos 2k y 8k en canales de 8MHz de ancho de banda.

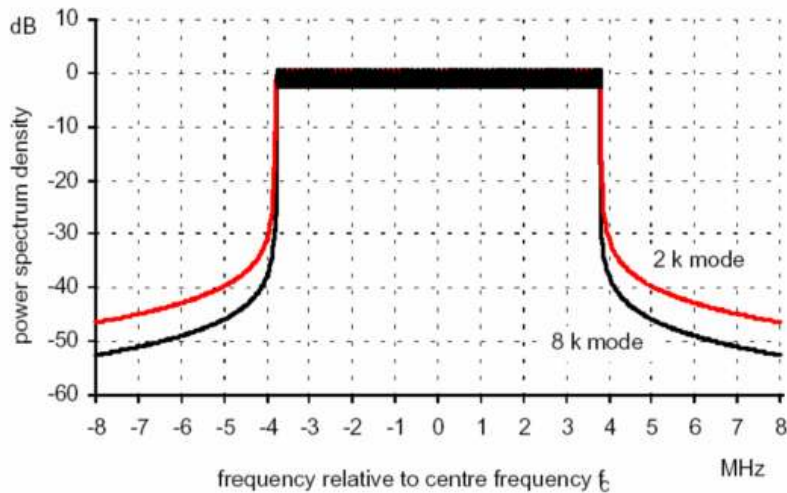


Figura 15. Espectro DVB-T [12]

La forma del espectro se debe a la inserción del intervalo de guarda, ya que la duración del símbolo es mayor que el inverso de la separación entre portadoras, por lo que el lóbulo principal del espectro de cada portadora es más estrecho que el doble de la separación entre ellas, dando lugar a una densidad espectral no constante dentro de la anchura de banda nominal asignada a la transmisión.

Al pasar la señal OFDM a través del amplificador de potencia del transmisor, se generan productos de intermodulación por ser un dispositivo con distorsión de tipo no lineal, que extienden el espectro radiado a ambos lados del canal dando lugar a las llamadas hombreras (*shoulders*), cuyo nivel dependerá de la mayor o menor linealidad de los pasos amplificadores de potencia, además pueden provocar perturbaciones en los canales adyacentes al transmitido, y como las emisiones son en la banda UHF para Televisión, no solo se tendrá una transmisión digital sino también se va a tener una transmisión analógica o tradicional, lo cual conlleva a que en la transmisión digital hayan perturbaciones generadas por los canales adyacentes que probablemente sean los provenientes de las transmisiones analógica. Debido a ello es preciso limitar el nivel de las hombreras que invaden dichos canales adyacentes a unos valores que dependerán del tipo de servicio incorporado en ellos, siendo esta, la limitación más exigente para los servicios que presta la Televisión Digital, frente a los ofrecidos por la Televisión Analógica.

2.2.2. Canal de Transmisión

Es el medio de transmisión por el que viajan las señales portadoras de la información, todo canal de transmisión en las telecomunicaciones introduce atenuación y cambio de fase en las señales, esto debido a las reflexiones generadas por los diferentes medios como son: la atmosfera, cable, fibra óptica, etc., también se tienen algunas interferencias ocasionadas por diversas fuentes (dispositivos o canales adyacentes), lo que lleva a pensar que el ruido producido en el canal esta variando constantemente a causa de los dispositivos o características del medio, generando el desvanecimiento de la señal en frecuencia.

2.2.3. Etapa de Recepción

El documento ETSI EN 300.744 especifica el tratamiento de la señal en el transmisor, “mientras que el tratamiento de la señal en el receptor se deja abierto para implementar diferentes soluciones”. [9]

En la Figura 16 se encuentra el diagrama en bloques del receptor propuesto, en el presente trabajo de grado.



Figura 16. Diagrama en Bloques del Receptor DVB-T

A continuación se describen brevemente los bloques que hacen parte del receptor DVB-T, en la mayoría de ellos se realiza el proceso inverso al ya explicado en la sección 2.2.1:

Receptor OFDM: El receptor realiza la operación inversa del transmisor, se usa la Transformada rápida de Fourier (FFT) para analizar la señal en el dominio de la frecuencia. La amplitud y la fase de las subportadoras se convertirán en datos digitales. Para que las portadoras mantengan su ortogonalidad, se deben manejar en la entrada de la FFT del receptor la misma longitud de datos, que se tienen en la salida de la IFFT del transmisor. [20]

Demodulador: la señal recibida se demodula primero a RF para recuperar la señal compuesta en banda base y luego se filtra para separar las señales moduladas individuales. A continuación, cada una de estas señales se demodula individualmente utilizando subportadoras generadas localmente en el receptor, para extraer las señales originales en banda base.

Desentrelazador Interno: realiza exactamente el proceso inverso del Entrelazador Interno.

Decodificador Interno: realiza la detección por máxima similitud, para esto utiliza las propiedades del trellis, el algoritmo intenta reducir la complejidad del cálculo evitando tener en cuenta la totalidad de secuencias posibles, el procedimiento que realiza consiste en calcular la distancia entre la señal recibida en un instante y los caminos o ramas del trellis en ese instante, se evalúa la secuencia que tiene la menor distancia respecto a la señal recibida, de forma que la secuencia de máxima similitud finalmente aparece. [24]

Desentrelazador Externo: realiza exactamente el proceso inverso del Entrelazador Externo.

Decodificador Externo: la palabra código recibida se compone de la palabra código original con los errores adicionales, para evaluar la palabra código, el decodificador produce un vector nulo en caso de no haber error en la transmisión y un vector S (síndrome) que permite conocer los símbolos con error. Una vez se conoce que la palabra código recibida tiene errores, se procede a localizar los bytes erróneos, por medio del algoritmo de Chien, finalmente el decodificador realiza la adición modulo 2 (XOR) entre el dato de entrada que fue recibido por el decodificador y el error generado, con lo que se obtiene el código recuperado. [25]

2.3. ESTÁNDAR ISDB-T

El estándar ISDB fue establecido por la Asociación ARIB de Japón, que congrega varias empresas japonesas y extranjeras para producir, financiar, importar y exportar productos de radiodifusión.

Hasta el momento se han desarrollado tres normas: ISDB-T (Televisión Digital Terrestre), ISDB-S (Televisión Digital Satelital), ISDB-C (Televisión Digital por cable). [21]

El estándar ISDB-T, es uno de los estándares objeto de estudio del presente trabajo, a continuación, se describen algunas propiedades de la capa física para la transmisión de televisión digital terrestre, que se encuentran especificadas en el documento ARIB STD-B31.

La norma ISDB-T difundida a nivel mundial por el grupo DiBEG, ha estado operando en Japón desde Diciembre de 2003, fue adoptada por Brasil en Diciembre de 2007 y por Perú en abril de 2009 [1].

2.3.1. Etapa de Transmisión

La norma ARIB STD-B31 especifica las propiedades de la capa física para el sistema de transmisión ISDB-T.

En la Figura 17 se ilustra el diagrama en bloques para el sistema de transmisión ISDB-T.

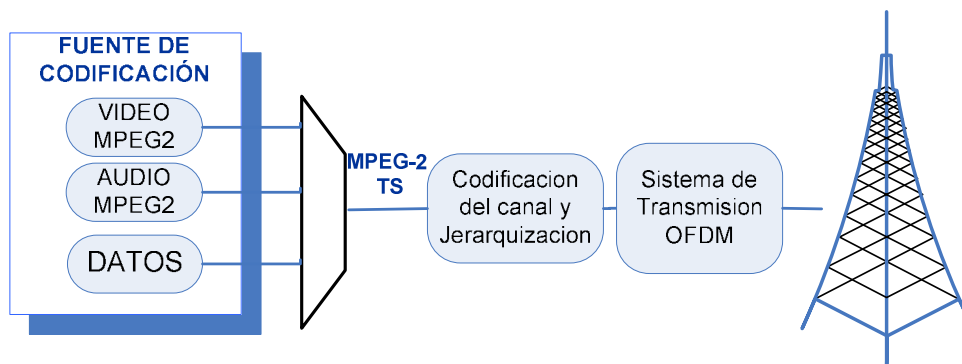


Figura 17. Diagrama en Bloques Sistema Transmisor ISDB-T [23]

ISDB-T es muy similar a DVB-T en términos de señales y modulación ya que ambos estándares coinciden en los siguientes aspectos [8]:

- Ambas normas están basadas en codificación MPEG-2 de audio y video
- Ambas normas utilizan aleatorizador, codificador Reed-Solomon, codificador interno, entrelazador interno y externo idénticos.
- Ambas normas utilizan el sistema de transmisión OFDM con modos 2k y 8k, y modulación QAM de las sub-portadoras

Por lo tanto, los bloques que hacen parte del sistema de transmisión DVB-T, constituyen una parte de los bloques necesarios para la transmisión ISDB-T, lo mismo sucede con los bloques de recepción, por esta razón estos bloques no serán descritos en esta sección, ya que sus especificaciones se encuentran en la sección 2.2.

A continuación se describen las diferentes formas de transmisión del estándar ISDB-T, que lo diferencian del estándar DVB-T

Dichas formas de transmisión son [23]:

- *Transmisión Segmentada:* El flujo de transporte, es remultiplexado y agrupado en segmentos de datos. En total, el espectro de transmisión se compone de 13 segmentos, siendo esta cantidad la misma para un canal de 6,7 y 8 Mhz de ancho de banda. Lo que varía en cada uno de los espectros es el tiempo de duración de cada segmento. Se efectúan dos tipos de intercalaciones de datos. La primera de ella se denomina inter segmentos y consiste en una aleatorización entre segmentos. El segundo tipo de intercalación se denomina, intra segmentos y consiste en intercalar los datos dentro del mismo segmento. En la Figura 18 se muestra el espectro de los 13 segmentos en transmisión y en la Figura 19 se ilustra el mismo espectro de la figura anterior, pero con los segmentos intercalados.



Figura 18. Segmentos de Datos en ISDB-T [23]



Figura 19. Segmentos de Datos intercalados [23]

- *Transmisión en modo jerárquico*: la banda de transmisión es dividida en segmentos, que pueden ser asignados libremente a un máximo de 3 capas jerárquicas. A cada capa se le realiza por separado la codificación, entrelazado y mapeo, para preparar los datos que serán modulados posteriormente y enviados por el canal de transmisión. La agrupación puede ser de cualquier manera, dependiendo de la aplicación y del ancho de banda requerido, en la Figura 20 se muestra un ejemplo en el que se transmiten solo por 2 capas 2 grupos de segmentos.

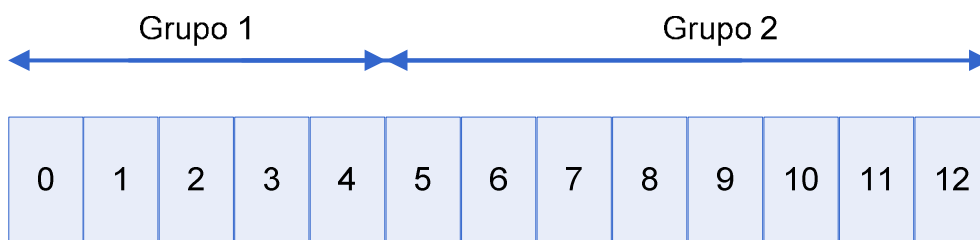


Figura 20. Ejemplo de Transmisión en Modo Jerárquico [23]

- *Transmisión en modo parcial*: es utilizada solo para recepción portable y móvil. Su característica principal es la transmisión de un segmento parcial ubicado en la parte central de la banda de los 13 segmentos. En este segmento solo se transmite audio y datos, que pueden ser recibidos por un receptor portátil de banda angosta. En la Figura 21 se muestra el caso de

la transmisión parcial, los segmentos han sido intercalados, menos el número cero que se encuentra en el centro de la banda y es el que transporta la señal.

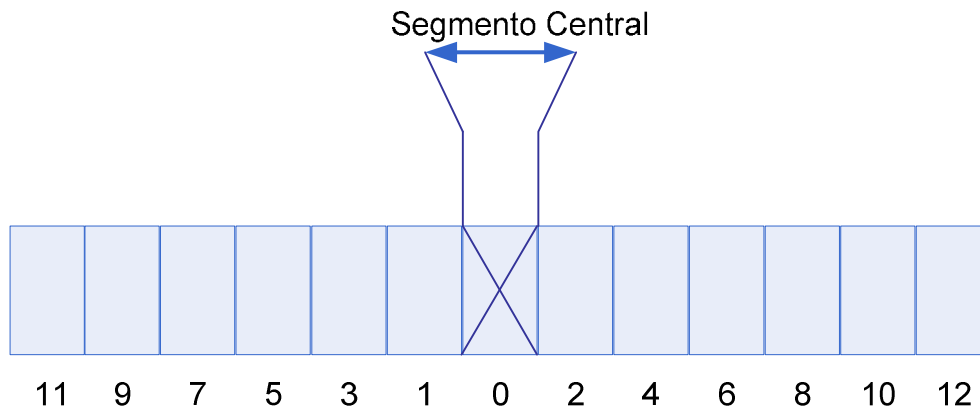


Figura 21. Transmisión en Modo Parcial [23]

ISDB-T es comparable con la transmisión DVB-T no jerárquica, cuando en los 13 segmentos de ISDB-T se utiliza la misma tasa de codificación convolucional y modulación QAM. Las tasas correspondientes son ligeramente diferentes a las de DVB-T debido a que hay diferencias entre la cantidad de sub-portadoras moduladas. [8]

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS A SIMULAR.

En el ámbito de la ingeniería, las simulaciones son de gran utilidad para recrear un modelo de un sistema real, ya que se pueden observar sus características, propiedades y su comportamiento con el uso de variables que hacen que el sistema sea lo más fiable y real posible; todo esto utilizando una herramienta de simulación.

La rápida evolución en el área de las telecomunicaciones, ha incrementado la necesidad de disponer de herramientas de simulación potentes que permitan el diseño y análisis de sistemas innovadores, como por ejemplo sistemas de televisión digital terrestre.

3.1. ESCOGENCIA DE MATLAB COMO HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

MATLAB es un entorno interactivo de computación, basado en vectores y matrices donde se pueden desarrollar aplicaciones que integran el análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de la señal y visualización gráfica, sin necesidad de usar la programación tradicional. [26]

MATLAB dispone de una colección de funciones especializadas llamadas *ToolBoxes*, que sirven para resolver problemas específicos de la mayoría de áreas principales de la ingeniería como son: [27]

- Procesamiento de señales
- Sistemas de control
- Redes neuronales
- Lógica difusa
- Wavelets
- Simulación

MATLAB está conformado por: [27]

- **Entorno de Desarrollo:** conjunto de herramientas, módulos e interfaces gráficas que ayudan al usuario de MATLAB en el uso de las funciones incluidas en el sistema. Hacen parte de este entorno: el escritorio de MATLAB, la ventana de comandos, el historial de comandos,

un editor y un depurador, los navegadores para revisión de la ayuda, el espacio de trabajo y los archivos.

- **Librería de funciones matemáticas:** colección de algoritmos y funciones aritméticas elementales y complejas.
- **Lenguaje MATLAB:** es un lenguaje de alto nivel para matrices con sentencias de control de flujo, creación de funciones y estructuras de datos, funciones de entrada/salida y algunas características de programación orientada a objetos. Este lenguaje permite tanto la programación a pequeña escala para la creación rápida de programas, como programación a larga escala para la realización de aplicaciones complejas.
- **Gráficas:** permite la visualización de vectores y matrices en forma grafica. Además incluye funciones de alto nivel para la visualización de datos en dos ó tres dimensiones, y funciones de bajo nivel que permiten personalizar completamente la apariencia de los gráficos y construir interfaces graficas de usuario.
- **Interfaces Externas:** conjunto de librerías que permiten programar en lenguajes como C y FORTRAN para que interactúen con MATLAB.

Simulink es un paquete software que funciona sobre MATLAB, que permite realizar la simulación y análisis de sistemas continuos ó discretos en el tiempo, ó de sistemas híbridos, mediante una interfaz gráfica de usuario.

El proceso de simulación en Simulink, se resume en dos pasos [28]:

- Creación del modelo a partir de los bloques incluidos en Simulink, teniendo en cuenta las especificaciones que deben tener los datos de entrada y salida del modelo.
- Realización de la simulación del modelo creado, para posteriormente realizar el análisis de los resultados obtenidos, ya sea mediante la toma de mediciones a los datos de entrada o salida, ó mediante el uso de graficas.

Ventajas

- Posee un entorno gráfico agradable al usuario, que incorpora la posibilidad de modelar, simular y analizar sistemas de forma sencilla.
- Admite la modificación de datos y variables de los sistemas incluidos como demos en el paquete de MATLAB/Simulink.
- Adiciona facilidad al diseño de sistemas en MATLAB, pues Simulink incluye muchas funcionalidades en sus bloques, que pueden ser agregados al sistema deseado desde la librería de bloques de Simulink con solo arrastrarlos y si es el caso configurando algunos de sus datos y variables.
- Mientras se está ejecutando una simulación en Simulink, siempre estará disponible la potencia que brinda el ambiente MATLAB.
- Permite la creación y personalización de bloques para ser usados en el sistema.
- Realiza potentes cálculos matemáticos.
- Incluye varias funcionalidades que son necesarias para el tratamiento de señales en el tema particular de televisión digital terrestre, e incluidas en las especificaciones de cada estándar (ISDB-T, DVB-T), como lo son: codificadores/decodificadores Reed Solomon, entrelazado convolucional, moduladores/demoduladores como 64QAM, monitorizadores de la señal, inserción de ruido (AWNG), dispersión de energía (aleatorización de datos) y multiplexores.

Por lo tanto, la herramienta MATLAB/Simulink, no muestra desventajas que impidan el desarrollo y realización del sistema de evaluación de los estándares de Televisión Digital Terrestre, DVB-T e ISDB-T, al contrario, el soporte que brinda MathWorks con su documentación, soporte en línea y bloques ya desarrollados en Simulink hacen que esta herramienta permita brindar solución a las simulaciones en el área de televisión digital terrestre, ya que soporta las especificaciones de la norma ETSI EN 300 744[9].

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS A SIMULAR

Teniendo en cuenta la descripción del nivel físico de los estándares DVB-T e ISDB-T, Se plantea una propuesta para su evaluación. Se realiza este proceso en el entorno MATLAB/Simulink, mediante etapas, las cuales permiten una descripción detallada de los bloques necesarios para cada estándar.

3.2.1. Sistema Simulador del Estándar DVB-T

Para simular el estándar DVB-T, se usaron las características técnicas más relevantes especificadas en la norma ETSI EN 300 744 [5] presentadas en el apartado 2.2.

El diagrama en bloques del sistema a simular para DVB-T se ilustra en la Figura 23. Se puede observar que para dar inicio al proceso de simulación de este estándar, se implementa el Flujo de transporte MPEG-2 TS, sin realizar el proceso de conversión analógico a digital de la señal, si se incluyera toda la cadena de procesos desde la conversión A/D hasta la conversión D/A de la señal, se debería también incluir el muestreo analógico que incrementaría el tiempo de simulación a un valor inviable, lo que no sucede si el tratamiento de la señal se hace a nivel digital.

3.2.1.1. Flujo de transporte MPEG-2

En la Figura 22 se muestra el proceso de creación en Simulink del Flujo de Transporte MPEG-2, conformado por los 4 bytes que hacen parte de la cabecera y los 184 bytes que pertenecen a la carga útil, como se menciona en la sección 2.2 y como se ilustra en la Figura 3 del presente documento.

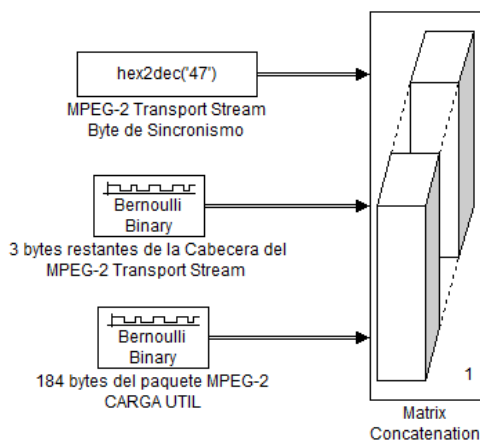


Figura 22. Creación del Paquete MPEG-2 TS.

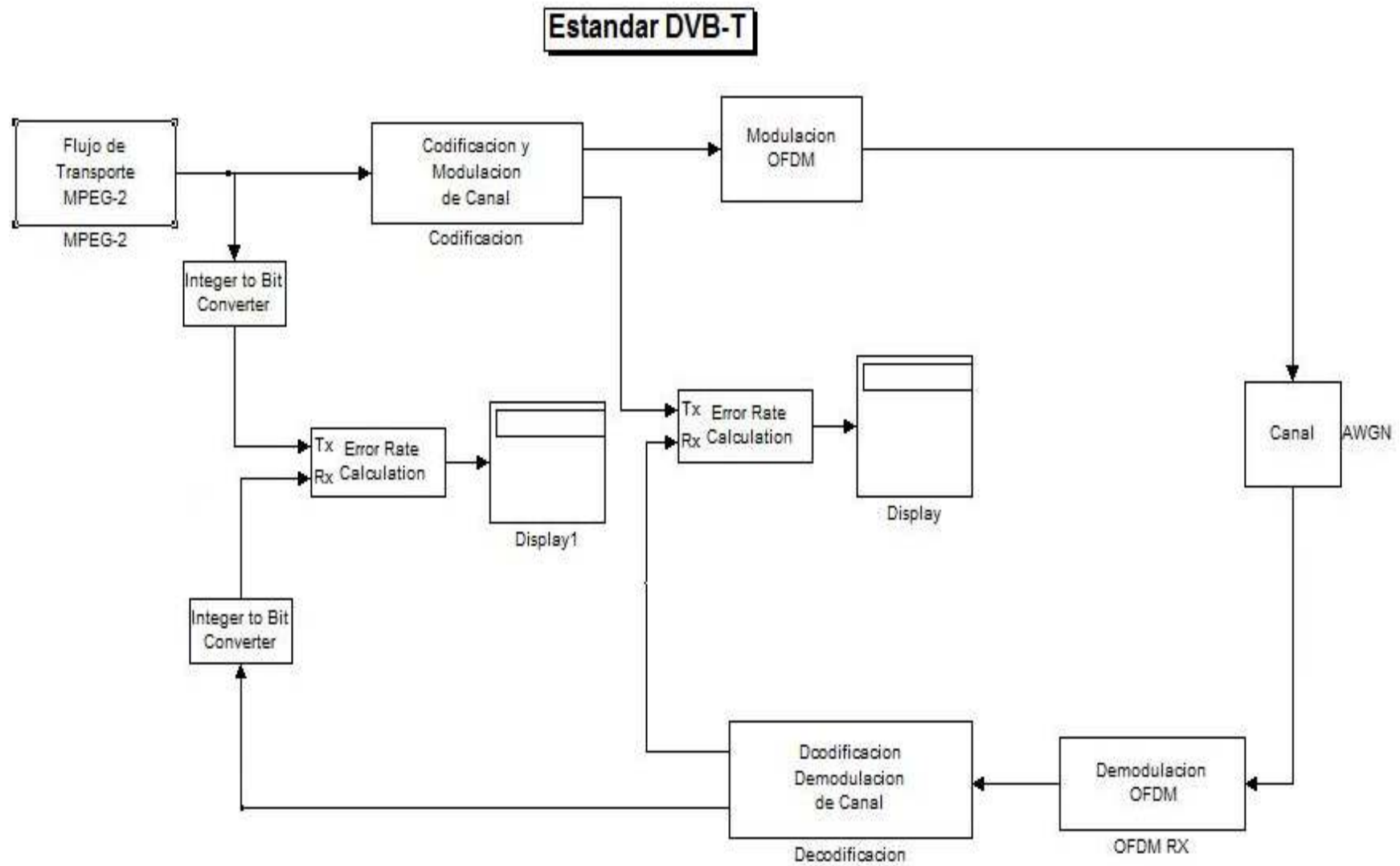


Figura 23. Sistema Simulador DVB-T

En la Tabla 1 se encuentran los parámetros requeridos por los bloques que hacen parte del subsistema generador del paquete MPEG-2, que se describen a continuación:

Generación de la cabecera del paquete MPEG-2 TS: para crear el byte de sincronismo se utiliza el bloque *DSP Constant*, del conjunto de bloques de fuentes de datos aleatorios del *Blockset* de Comunicaciones; este bloque requiere los parámetros de entrada mencionados en la Tabla 1. Los 3 bytes restantes de la cabecera, son creados utilizando la Distribucion Bernoulli, que permite generar señales digitales. El bloque *Bernoulli Binary* del conjunto de bloques de fuentes de datos aleatorios se encuentra en el *Blockset* de Comunicaciones.

Generación de la carga útil del paquete MPEG-2 TS: para realizar este proceso se utiliza el bloque *Bernoulli Binary* del conjunto de bloques de fuentes de datos aleatorios del *Blockset* de Comunicaciones. Donde se distribuyen aleatoriamente números binarios, obteniendo bits con valores entre cero (0) y uno (1), de manera que estos bits, luego se agrupan en octetos ó bytes, para obtener como resultado la fuente aleatoria de datos de 184 bytes.

Creación del paquete MPEG-2 TS: para realizar este proceso se utiliza el bloque para concatenar matrices, *Matriz Concatenate* del conjunto de bloques de operaciones matemáticas del *Blockset* de Simulink. Los datos de entrada a este bloque son los generados para la cabecera y los de la carga útil de este paquete, formando el paquete MPEG-2 TS.

Tabla 1. Parámetros Subsistema Generador Flujo de Transporte MPEG-2

Bloque	Parámetros
DSP Constant	<ul style="list-style-type: none"> - Valor (<i>Constant value</i>): La norma ETSI EN 300 744 [9] especifica el valor 0x47 para el byte de sincronismo, se utiliza la función <i>hex2dec</i>, que realiza la conversión del hexadecimal (47) al decimal (71). - Periodo de la Trama (<i>Frame period</i>): [28] $\text{Longitud.del.paquete.MPEG} - 2 / \text{Tasa.de.datos.MPEG} - 2$
Bernoulli Binary	<ul style="list-style-type: none"> - Probabilidad de un cero (<i>Probability of a zero</i>) : su valor es 0,5 , para generar el mismo número de 0 y 1. - Tiempo de Muestra (<i>Sample Time</i>): [28]

	$\frac{\text{Longitud.del.paquete.MPEG} - 2 / \text{Tasa.de.datos.MPEG} - 2}{\text{Longitud.carga.util.del.paquete.MPEG} - 2.}$ <ul style="list-style-type: none"> - Muestras por trama (<i>Samples per frame</i>): $\text{Bits.por.byte} \times \text{Longitud.carga.util.del.paquete.MPEG} - 2.$
<p><i>Matriz Concatenate</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Número de entradas (<i>Number of inputs</i>): Este bloque tiene 2 entradas: La carga útil y los 4 bytes que corresponden a la cabecera del paquete MPEG-2 TS. - Modo Multidimensional (<i>Modo Multidimensional array</i>): En este modo se especifican la dimensión de los datos de salida luego de haber sido concatenadas las entradas. En este caso se requiere que la salida sea el paquete MPEG-2 TS, por lo tanto el valor de la dimensión de la concatenación es 1

Dispersión de energía: Se requiere la generación de una secuencia binaria pseudoaleatoria PRBS, para combinarla con la información contenida en los paquetes MPEG-2 TS, de este modo los datos son aleatorizados como se ilustró en la Figura 5 de la sección 2.2.

En la Tabla 2 se encuentran los parámetros requeridos por los bloques que hacen parte del subsistema de dispersión de energía, que se describen a continuación:

Para realizar la generación de los datos aleatorios se usa el bloque Generador de Secuencia, *Sequence Generator* del conjunto de bloques de generadores de secuencia del *Blockset* de Comunicaciones, que genera una secuencia de números binarios pseudoaleatorios utilizando una retroalimentación lineal-registro de desplazamiento para generar secuencias (LFSR). El LFSR se aplica mediante un simple cambio de configuración del registro generador (SSRG, o Fibonacci). En la Figura 24, se ilustra este proceso.

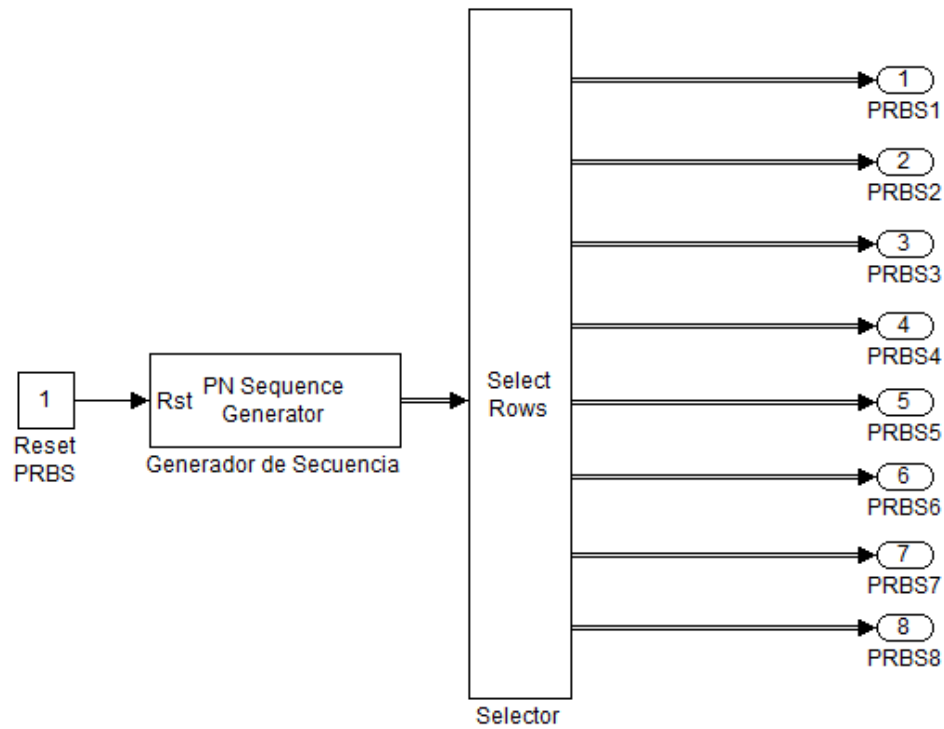


Figura 24. Generación de Datos Aleatorios.

Una vez se ha generada la secuencia pseudoaleatoria, se procede a combinar los datos del paquete MPEG-2 TS con los datos generados por dicha secuencia, como se ilustra en la Figura 25.

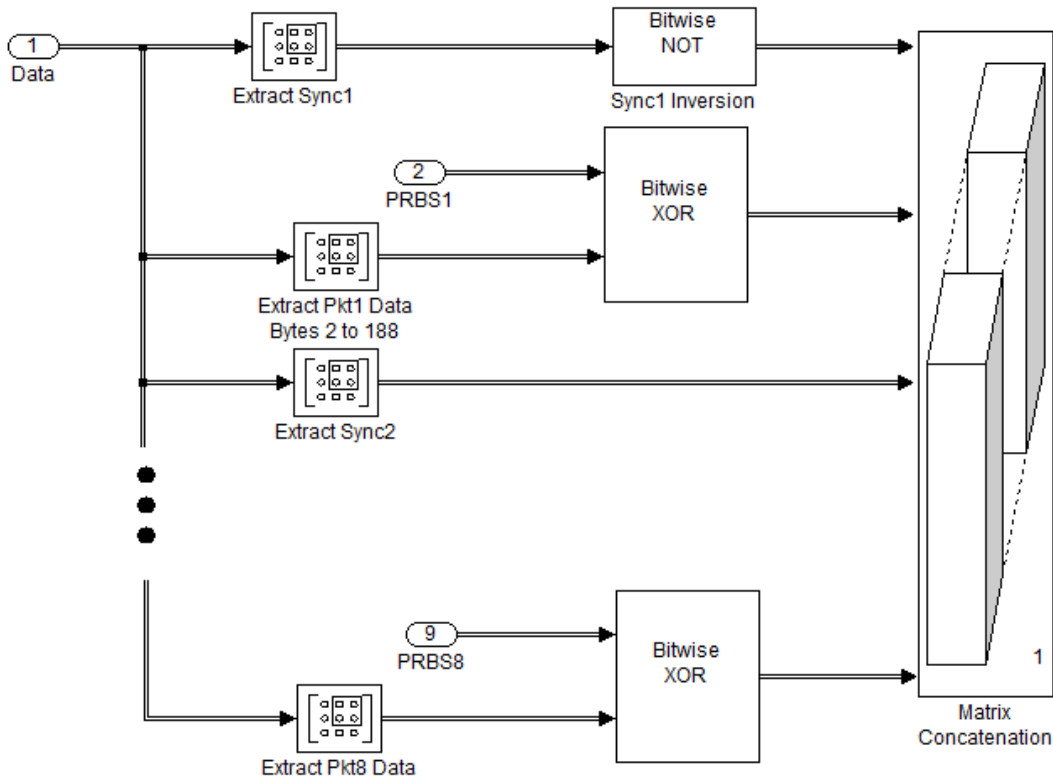


Figura 25. Aleatorización de datos.

Tabla 2. Parámetros Subsistema Generador de Secuencia Seudoaleatoria

Bloque	Parámetros
Generador de Secuencia	<ul style="list-style-type: none"> - Polinomio generador (<i>Generator de polynomial</i>): Polinomio que determina el cambio del registro de retroalimentación. En teoría el polinomio para generar la secuencia pseudoaleatoria para este caso se usa el polinomio de la Ec 1 [15 14 0]. - Estados iniciales (<i>Initial states</i>): Vector de los estados iniciales de los registros de cambio, que será la secuencia para generar los PBRs, según la norma del estándar DVB-T la secuencia a usar será [1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0], mostrada en la Figura 5. - Periodo de muestra (<i>Sample time</i>): Período de cada uno de los elementos de la señal de salida, se usa el mismo que se utiliza en el generador <i>bernoulli binary</i>.

	<ul style="list-style-type: none"> - Muestras por trama (<i>Sample time</i>): al igual que el parámetro anterior se usa el mismo valor que el del generador bernoulli binary. - Numero de bits por paquete (<i>Number of packeted bits</i>): indica cuantos bits se empaquetan en los datos de salida. Para este caso se han tomado 8 bits por byte. <p>Reset: para restablecer el generador de secuencia. se usa el bloque <i>Constant</i></p>
Selector de Filas y Columnas	<ul style="list-style-type: none"> - Selector (<i>Select</i>): es el parámetro que permite escoger entre el selector de columnas o de filas. - Índices de Salida (<i>Indices to output</i>): este parámetro sirve para especificar el modo en que serán propagados los datos a través de las k salidas de este bloque, el número de datos especificados tiene que coincidir con el número de las salidas. El período de la secuencia PRBS será de 1503 octetos - Señal Invalida (<i>Invalid index</i>): es un parámetro que sirve como referencia en el momento en que no exista un valor de entrada valido para la columna, seleccionando la opción <i>Clip Index</i>, cuando hay un valor de entrada invalido, toma el valor valido más cercano sin producir ninguna alarma.
Matriz	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño de la Fila (<i>Row span</i>): Su valor será 1, ya que cada fila corresponderá a 1 byte de sincronismo. - Fila (<i>Row</i>): Corresponde a la ubicación del byte de sincronismo, para el primer paquete será 1, en el segundo paquete el byte de sincronismo se encuentra 188 bytes después, y en el octavo paquete $8 \cdot 188$ bytes después.
Compuerta Logica	<ul style="list-style-type: none"> - Operador (<i>Operator</i>): El operador requerido para invertir la señal de entrada es la compuerta NOT.
Concatenación de datos	<ul style="list-style-type: none"> - Número de entradas (<i>Number of inputs</i>): Este bloque tiene 16 entradas.

	<p>- Modo Multidimensional (<i>Modo Multidimensional array</i>): En este modo se especifican la dimensión de los datos de salida luego de haber sido concatenadas las entradas. En este caso se requiere que la salida sea la señal MPEG-2 TS, por lo tanto el valor de la dimensión de la concatenación es 1.</p>
--	--

3.2.1.2. Codificación y modulación del canal

En la Figura 26 se ilustra la cadena de bloques que hacen parte del proceso de codificación y modulación del canal.

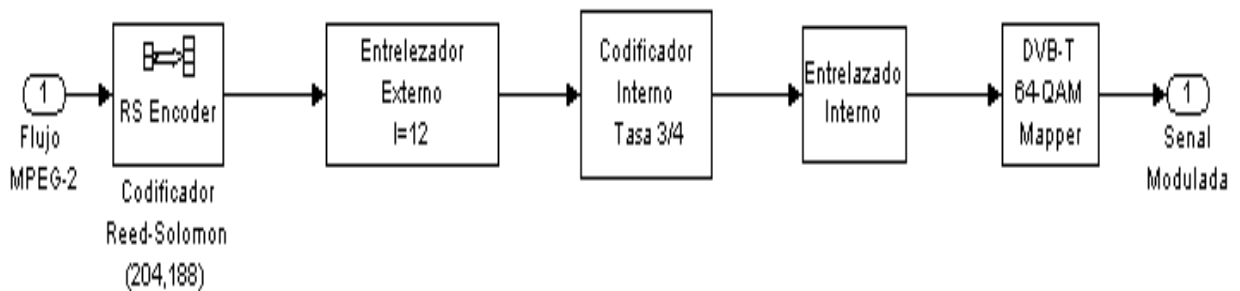


Figura 26. Diagrama en Bloques Codificación y Modulación del Canal.

Codificador Externo: para cumplir con los requerimientos de este tipo de codificación expuestos en la sección 2.2 se hace uso del bloque codificador Reed Solomon(N,K) del conjunto de bloques de corrección y detección de errores del *Blockset* de Comunicaciones. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros Codificador Externo Reed Solomon (204,188)

Bloque	Parámetros
Reed Solomon (204,188)	<p>- Longitud palabra código N (<i>Codeword length</i>) y longitud palabra entrante K (<i>Message length</i>); la norma ETSI EN 300 744 [5] especifica las características del codificador Reed Solomon(N,K) usado por el estándar DVB-T, del tipo RS (204,188).</p> <p>- Polinomio Primitivo: aunque se usa el codificador Reed Solomon acortado RS(204,188), se debe definir el polinomio primitivo para el código sin recortar, es decir, para el sistema RS(255,239), por lo tanto el polinomio primitivo según la norma ETSI EN 300 744 [5] es:</p> $ \begin{array}{cccccccc} X^8 & X^7 & X^6 & X^5 & X^4 & X^3 & X^2 & X^1 & X^0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} $ <p>- Generador polinomial: Se utiliza la función <i>rsgenpoly(n,k,prim_poly)</i>, para generar el polinomio del codificador RS(N,K). El valor de N será 255 y el de K será 239, ya que se define el polinomio primitivo para el codificador sin recortar RS(255,239), por lo tanto, el valor del prim_poly ó polinomio primitivo es el valor de la conversión a decimal del polinomio primitivo 100011101, es decir, $2^8 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^0 = 285$</p> $ \begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2^8 & - & - & - & 2^4 & 2^3 & 2^2 & - & 2^0 \end{array} $

Entrelazador Externo: se hace uso del bloque Entrelazador Convolutacional, del conjunto de bloques de corrección y detección de errores del *Blockset* de Comunicaciones, para cubrir las especificaciones técnicas dadas por la norma, que se encuentran en la sección 2.2. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros Entrelazador Externo

Bloque	Parámetros
Entrelazador Externo	<p>- Número de Registros I (<i>Rows of shift registers</i>) y Longitud del Registro M (<i>Register length step</i>): la norma ETSI EN 300 744 [5] especifica $I = 12$ y $M = N/I = 204/12 = 17$ símbolos. El retardo total, desde la entrada hasta a la salida del entrelazado es $I(I - 1)M$ símbolos.</p>

Codificador Interno: en la sección 2.2 se encuentran los requisitos que la norma ETSI EN 300.744 especifica para este codificador, se hace uso del Codificador Convolutivo del conjunto de bloques de corrección y detección de errores del *Blockset* de Comunicaciones. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros Codificador Interno

Bloque	Parámetros
<i>Convolutional Encoder</i>	<p>- Estructura del Trellis (<i>Trellis structure</i>): se utiliza la función $poly2trellis(ConstraintLength, CodeGenerator)$. La norma ETSI EN 300 744 [5] restringe a 7, el número de registros de memoria incluyendo el bit entrante. Para no limitar la capacidad del canal, el sistema permite seleccionar para la transmisión solo algunos datos obtenidos en las salidas X y Y, los valores especificados son $G_1 = 171_{OCT}$ para X y $G_2 = 133_{OCT}$ para Y.</p> <p>- Vector de Perforado (<i>Puncture vector</i>): para una tasa de código de 3/4, es decir, por cada 3 bits de entrada el código genera 4 bits de salida; el vector de perforado optimo es [1 1 0 1 1 0], lo que significa que los bits en las posiciones 1,2,4 y 5 son transmitidos mientras los que están en la posición 3 y 6 son removidos.</p>

Entrelazador Interno: como se menciona en la sección 2.2, el entrelazado interno incluye dos procesos el entrelazado de bits y entrelazado de símbolos como se muestra en la Figura 27.

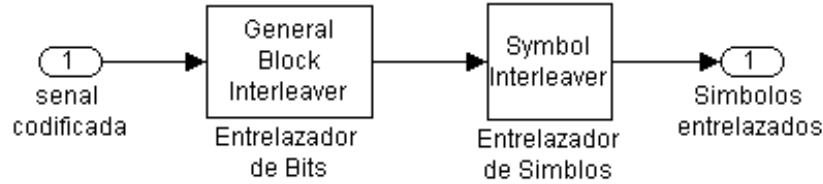


Figura 27. Diagrama en Bloques Entrelazador Interno.

Para realizar el entrelazado de bits, se hace uso del bloque entrelazador de bits, del *Blockset* de Comunicaciones, cumpliendo con las especificaciones técnicas que se encuentran en la sección 2.2. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Entrelazador de Bits

Bloque	Parámetros
<i>Bit interleaver</i>	- Elementos: se usa un vector con valores desde 0 a 126 bits, que es el tamaño del entrelazado según la norma ETSI EN 300 744 [5], aunque la secuencia de entrelazado es diferente de uno a otro, el tamaño citado de 126 es el mismo. Por lo tanto, los elementos son un vector de tamaño de 0 a 125 por cada bloque.

Por otra parte, para realizar el entrelazado de símbolos, especificado en la sección 2.2, se alterna entre los bits impares y pares, formándose símbolos de 6 bits, logrando la aleatorización de los símbolos, como se muestra en la Figura 28. Los parámetros de entrada requeridos por los bloques que hacen parte de este subsistema se encuentran en la Tabla 7.

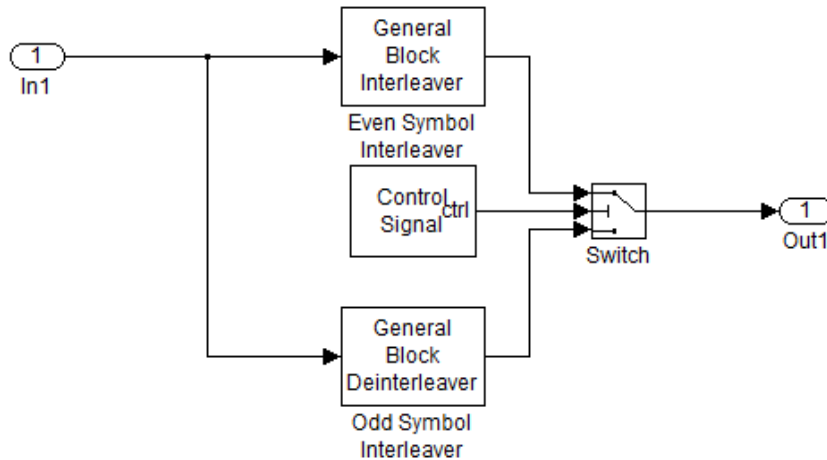


Figura 28. Subsistema del Entrelazado de Símbolos

Tabla 7. Entrelazador de Símbolos

Bloque	Parámetros
Entrelazador de simbolos	- Elementos (<i>Elements</i>): También se usa un vector de tamaño de 1512, para formar cada símbolo y luego ya agrupados se intercalarán los 6 símbolos que se generan de los datos, de manera que se eviten los errores de ráfaga.

Modulación 64-QAM: para realizar la modulación QAM usada por el estándar DVB-T mencionada en la sección 2.2, se utiliza el Modulador QAM del conjunto de bloques de modulación digital del del *Blockset* de Comunicaciones. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8. Modulador 64-QAM

Bloque	Parámetros
<i>Signal Constellation</i>	Es la matrix QAM con los valores complejos dados en la norma ETSI EN 300 744 [9] para el diagrama de constelaciones de alfa igual a 1, se tiene: 64-QAM (con $\alpha = 1$)[9] $n \in \{-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7\}$, $m \in \{-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7\}$

3.2.1.3. Etapa de transmisión OFDM

En la Figura 29 se ilustra la cadena de bloques que hacen parte del Esquema de Transmisión OFDM mencionado en la sección 2.2.

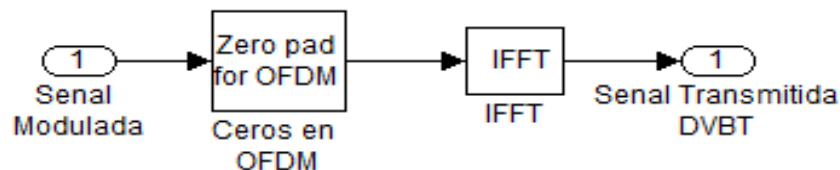


Figura 29 . Diagrama en Bloques Esquema de Transmisión OFDM.

Se requiere la adición de ceros al inicio y final de la trama de bits recibida del bloque modulación 64 QAM, para obtener una longitud de trama múltiplo de una potencia de 2, posteriormente se realiza la transformada de Fourier que permite la conversión de los datos en el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, para que la transmisión de la señal de televisión digital sea posible, tal como se ilustró en la Figura 15 de la sección 2.2.

En la Tabla 9 se encuentran los parámetros requeridos por los bloques que hacen parte del esquema de transmisión OFDM.

Para realizar la adición de los ceros, se usa el bloque, *Zero pad* del conjunto de bloques de generadores de secuencia del *Blockset* de Comunicaciones, que extiende la dimensión de la entrada al tamaño especificado en los parámetros de la Tabla 9, posteriormente se usa el bloque Selector, que es el encargado de reordena los elementos del vector de entrada lo que permite ubicar los ceros al inicio y al final de dicho vector. Por otra parte el bloque IFFT del *Blockset* de Comunicaciones calcula la transformada inversa de Fourier, y pasa los datos de entrada del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

Tabla 9. Parámetros Etapa de Transmisión OFDM

Bloque	Parámetros
Zero pad	<ul style="list-style-type: none"> - Pad over: Se especifica la dimensión de la entrada a rellenar/truncar, ya sean las filas y/o columnas; como la entrada es un vector fila entonces se rellenará una a una las posiciones del vector. - Tamaño columna (column size): Se especifica la longitud de la columna de la salida. Se mapearan en 2048 subportadoras, siendo una longitud potencia de 2 especificada en la norma ETSI EN 300 744 [9].
Selector	<ul style="list-style-type: none"> - Número de dimensiones de la señal de entrada (<i>Number of input dimensions</i>): selecciona el inicio de índice de dialogo por esto se ingresa el numero 2. - Modo del índice (<i>Index mode</i>): se selecciona one-based, si el índice es 1, indica el primer elemento, si es 2 el segundo elemento de la entrada y así sucesivamente. - Opción del index (<i>Index option</i>): Puede seleccionarse cualquiera de las siguiente opciones seleccionar todo (Select all), este es el valor por defecto, todos los elementos se seleccionan, otra opción es vector índice (<i>Index vector (dialog)</i>) que es el que se usa en la simulación, ya que es necesario tomar el vector columna que entra y cambiar de posición de algunos datos, los cuales se modificarán de la siguiente manera [1:756 1513:2048 757:1512].
<i>Transformada inversa de Fourier</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo del factor (<i>Factor computation</i>): Especifica el método para calcular la expresión de la muestra. La opción <i>table lookup</i> permite almacenar los valores del seno y del coseno antes de iniciar la simulación. - Optimización (<i>Optimize table for</i>): La opción <i>speed</i> sirve para optimizar la velocidad de almacenamiento de la tabla trigonométrica del seno y el coseno variando.

3.2.1.4. Canal de transmisión

El canal se simulará en presencia de ruido blanco gaussiano aditivo como se menciona en las especificaciones técnicas que se encuentran en la sección 2.2, para ello se hace uso del bloque AWGN del conjunto de bloques de canales, del *Blockset* de Comunicaciones. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros Ruido Blanco Gaussiano (AWGN)

Bloque	Parámetros
AWGN	<ul style="list-style-type: none"> - Inicializador (<i>Initial seed</i>): se inicializa el generador de ruido de Gauss con el valor aleatorio 54321. - Modo (<i>Mode</i>): Especifica la diferencia entre la señal de ruido y la entrada, puede ser relación señal a ruido (E_b / N_0), de señal a ruido (E_s / n), relación señal / ruido (SNR). - SNR (dB): Relación de señal a ruido en decibelios. - Potencia señal de entrada (<i>watts</i>): Es la media de potencia de los símbolos de entrada, el modo escogido puede ser E_b / N_0 ó E_s / N, ó SNR. Su valor está ligado a las 2048 subportadoras OFDM que se reciben.

3.2.1.5. Etapa de Recepción OFDM

Los bloques que hacen parte del esquema de recepción OFDM mencionados en la sección 2.2, se ilustra en la Figura 30.

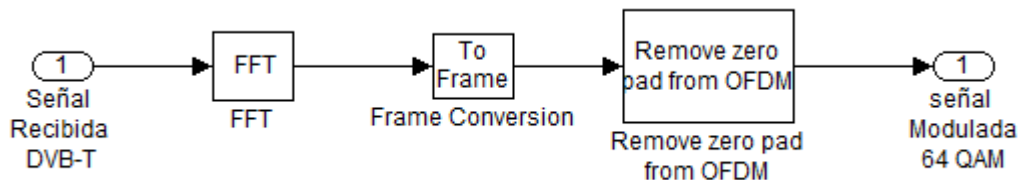


Figura 30. Diagrama en Bloques del Esquema de Recepción OFDM

Se realiza el proceso inverso al realizado en el transmisor, primero se realiza la conversión del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, para lo cual se hace uso de la transformada de Fourier, y posteriormente se identifican y se remueven los ceros adicionados al inicio y final de la trama de bits recibida.

En la Tabla 11 se encuentran los parámetros requeridos por los bloques que hacen parte del esquema de recepción OFDM:

Para realizar la conversión de los datos recibidos en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se hace uso del bloque FFT del *Blockset* de Comunicaciones, encargado de realizar la transformada de Fourier.

Por otra parte los ceros que se adicionaron para completar la longitud de trama a una longitud potencia de 2, son identificados y removidos con el bloque, *Remove zero pad* del conjunto de bloques de Comunicaciones de Simulink.

Tabla 11. Parámetros Etapa de Transmisión OFDM

Bloque	Parámetros
<i>Remove zero pad</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Número de dimensiones de la señal de entrada (<i>Number of input dimensions</i>): selecciona el inicio de índice de dialogo por esto se ingresa el numero 2. - Modo del índice (<i>Index mode</i>): selecciona el elemento que se desee. Para este caso se selecciona one-based, si el índice es 1, indica el primer elemento, si es 2 el segundo elemento de la entrada y así sucesivamente. - Opción del index (<i>Index option</i>): vector índice (<i>Index vector (dialog)</i>) se usa en la simulación, para identificar la posición de los ceros a remover, se usa el siguiente vector [1:756 1513:2048 757:1512].
Conversión de bits a trama	<ul style="list-style-type: none"> - Modo de la muestra de salida (<i>Sampling mode of output signal</i>): se usará <i>frame-based</i>.
Transformada inversa de Fourier	<ul style="list-style-type: none"> - Factor de cálculo (<i>Factor computation</i>): Especifica el método para calcular la expresión de la muestra. La

	<p>opción <i>table lookup</i> permite almacenar los valores del seno y del coseno.</p> <p>Para la ventana de punto fijo (<i>fixed point</i>):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modo de redondeo (<i>Rounding mode</i>): Selecciona el modo fijo de redondeo en operaciones. La tabla del seno no obedece a este parámetro, ella siempre redondea a más cercano valor. - Modo de desbordamiento (<i>Overflow mode</i>): Selecciona el modo fijo de desbordamiento de operaciones. El seno siempre se satura por eso no obedece a este parámetro - Tabla del seno (<i>Sine table</i>): Se especifica la longitud de la palabra de los valores de la tabla del seno. La fracción de la longitud de la palabra de la tabla del seno siempre es igual a la longitud de la palabra menos 1. - Producto de salida (<i>Product output</i>): Se usa para especificar como desea diseñar el producto de salida y la longitud de la fracción, se usará la misma de la entrada - Acumulador (<i>Accumulator</i>): se usa para especificar el diseño del acumulador de la palabra y la longitud de la fracción, se usará en la simulación la misma del producto de salida. - Salida (<i>Output</i>): especifica la longitud de la salida y la longitud de la fracción. Para la simulación es la misma de la entrada.
--	---

3.2.1.6. Decodificación y demodulación del Canal

En la Figura 31 se ilustra la cadena de bloques que hacen parte del proceso de decodificación y demodulación del canal.

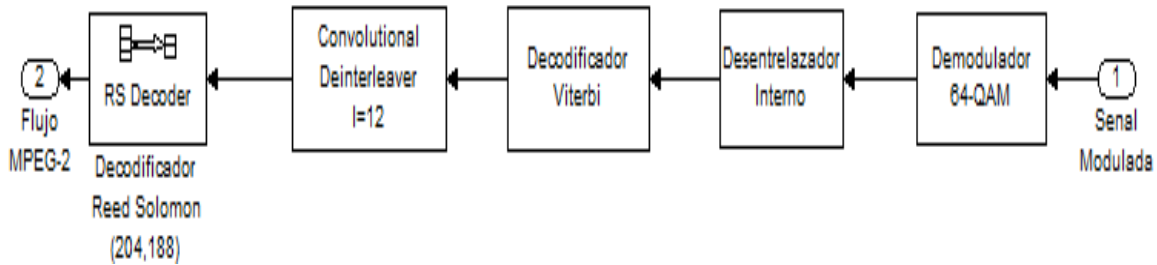


Figura 31. Diagrama en Bloques Decodificación y Demodulación del Canal.

Demodulador 64 QAM: para cumplir con los requerimientos del decodificador expuesto en la sección 2.2, se implemento el subsistema ilustrado en la Figura 32. Cada una de estas señales se demodula individualmente utilizando subportadoras generadas localmente en el receptor, para extraer las señales originales en banda base.

Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 3.

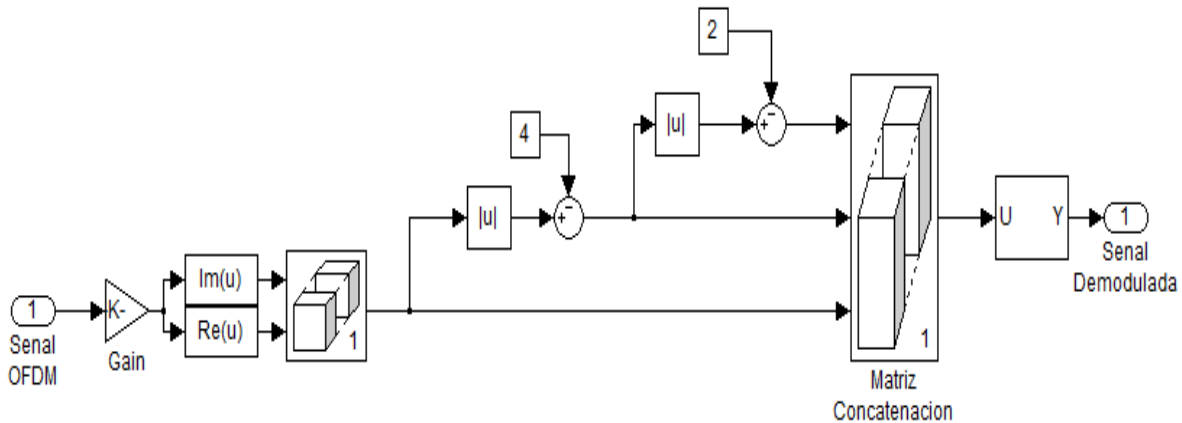


Figura 32. Subsistema del Demodulación 64 QAM

Tabla 12. Parámetros Modulación 64 QAM

Bloque	Parámetros
Ganancia	<ul style="list-style-type: none"> - Ganancia (<i>Gain</i>): Especifica el valor por el que se multiplicara la entrada. - Multiplicación (<i>Multiplication</i>): especifica el modo de multiplicación a usar, como se requiere que cada elemento sea amplificado se elegirá la opción elemento-wise ($K \cdot u$).

Matriz de concatenación	<ul style="list-style-type: none"> - Número de entradas (<i>Number of input</i>): las entradas son 2, una que pertenece a los datos reales y otra a los reales de la señal. - Modo (<i>Mode</i>): la opción es seleccionada <i>multidimensional array</i>, ya que se forma un vector de dimensión 1Xn, donde n es la longitud de todos los datos imaginarios y reales que entran al bloque
ABS o valor absoluto de la entrada	<p>Toma el vector compuesto por las partes imaginarias y reales de la señal de OFDM, para cambiar los valores negativos a positivos, para luego ser restados con un valor constante. Toma valor -1 para heredar los atributos de la entrada.</p>
Selector	<ul style="list-style-type: none"> - Numero de dimensiones de entrada (<i>Number of input dimensions</i>): como la entrada a este bloque es un vector el valor será 2. - Modo de índice (<i>Index mode</i>): la opción one-based permite identificar en la posición 1 el primer número que entra del vector. - En opciones de índice (<i>index option</i>), con la opción <i>Index vector (dialog)</i> se reorganiza el vector y se cambia la posición de algunos datos, y pueden ingresar las posiciones de los datos que se desean modificar. - Muestra de tiempo (<i>Simple time -1 for inherit</i>): hereda la muestra que trae la entrada.

Desentrelazador interno: como se menciona en la sección 2.2, este subsistema realiza las operaciones inversas del entrelazador interno. El desentrelazador interno incluye dos procesos el desentrelazador de bits y desentrelazador de símbolos como se muestra en la Figura 33.

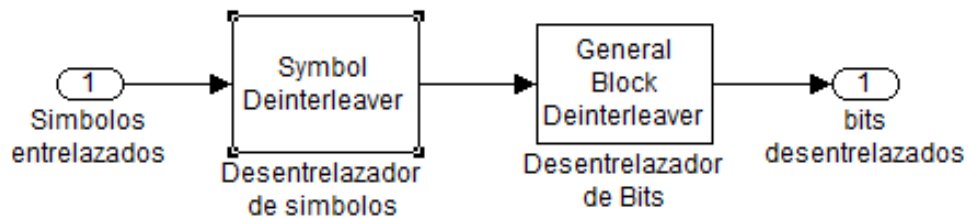


Figura 33. Diagrama en Bloques Desentrelazador Interno

El desentrelazador de símbolo, es el encargado de reordenar los símbolos, para llevar a cabo este proceso se implemento el subsistema ilustrado la Figura 34, cumpliendo con las especificaciones técnicas dadas por la norma de la sección 2.2. Los parámetros de entrada requeridos por este subsistema se encuentran en la Tabla 13.

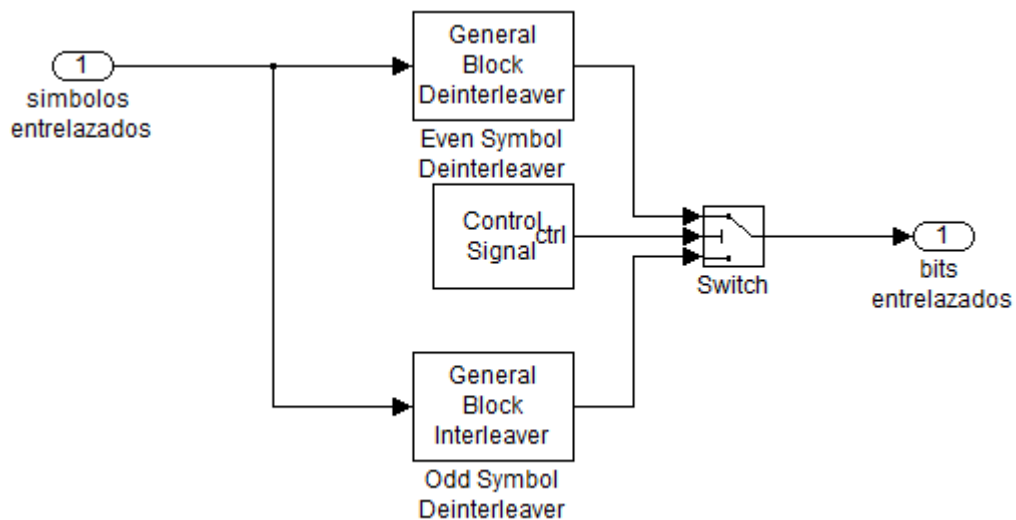


Figura 34. Subsistema del Desentrelazado de Simbolo

El bloque desentrelazador de símbolos se encuentra en el Blockset de comunicaciones, y es el encargado de reordenar los símbolos de entrada, sin repetir ni omitir ningún de ellos. Adicionalmente se genera una señal de control que alterna entre +1 y -1 cada trama, para ello toma un generador de pulsos que entrega unos o ceros para obtener a la salida una secuencia de unos positivos (+1) y unos negativos (-1).

Tabla 13. Parámetros Desentrelazador Interno

Bloque	Parámetros
Desentrelazador	- Elementos (<i>Elements</i>): este parámetro debe cumplir con las mismas condiciones que el entrelazador del transmisor, por eso los elementos de entrada para este caso sigue siendo el mismo vector de la entrada del entrelazado interno del transmisor.

Decodificador Viterbi: decodifica los datos de entrada para producir datos binarios a la salida, puede procesar varios datos a la vez para un rendimiento más rápido, se encarga de corregir errores, de esta manera se cubre con las especificaciones técnicas dadas por la norma que se encuentran en la sección 2.2, los datos de entrada se especifican en la Tabla 14.

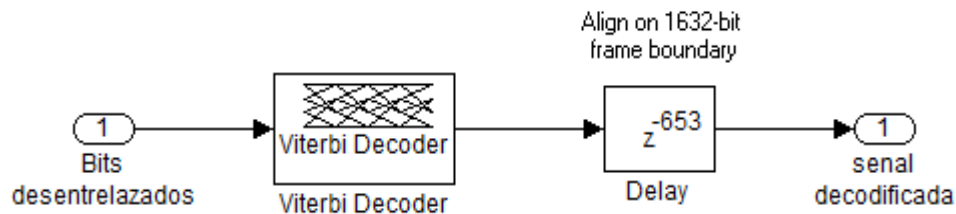


Figura 35. Subsistema del Decodificador Viterbi

Inicialmente, el decodificar interno o también llamado Viterbi, se encarga y realizar el proceso inverso al del codificador interno, identificando la ruta de menor distancia de esta manera reducir el número de errores en el receptor, posteriormente se hace necesario introducir un retardo en la señal, para alinear la trama sobre 1632 bits, el valor del retraso debe ser un valor mayor a cero.

Tabla 14. Parámetros decodificador interno

Bloque	Parámetros
Decodificador	- Estructura de enrejado (<i>trellis structure</i>): Se utiliza el mismo valor que se uso en el transmisor, la longitud está restringida a 7 y el vector indica la función generadora en base octal correspondiente a los datos especificado en el estándar. - Vector perforado (<i>Punctured vector</i>): vector utilizado en el transmisor (codificador). Este vector es un

	<p>patrón de unos y ceros, donde los ceros indican los bits perforados.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Decisión de tipo (<i>Decision type</i>): la opción Unquantized (no cuantificado), permite la entrada de números reales pudiendo usar números positivos o negativos. - Profundidad (<i>Traceback depth</i>): Especifica el retardo de decodificación, es decir, el número de ceros que precederán el primer bit decodificado de salida, se usará 136. - Modo de funcionamiento (<i>Operation mode</i>): Método para la transición entre fotogramas sucesivos de entrada, será continuo y las tramas se tratan de forma independiente.
Retardo	<p>Unidades de retardo (<i>Delay units</i>): debido al ruido blanco gaussiano incorporado en el canal es necesario retrasar su entrada por un número determinado de muestras o tramas.</p>

Desentrelazador Interno: se usa el bloque desentrelazador convolucional del blockset de comunicaciones de simulink, el encargado de reordenar los bytes, para que cada paquete nuevo de 204 bytes se divida en $M = 17$ grupos de $I = 12$ datos, cumpliendo con las especificaciones técnicas descritas en la sesión 2.2. En la Tabla 15 se especifican los parámetros de entrada para este bloque.

Tabla 15. Parámetros Desentrelazador Interno

Bloque	Parámetros
Desentrelazador	<ul style="list-style-type: none"> - Registro de filas (<i>Rows of shift registers</i>): La norma del estándar DVB-T especifica $I=12$. - Longitud del registro (<i>Register length step</i>): se toma el valor de $M=17$, especificado en la sección 2.2. - Condición inicial (<i>Initial condition</i>): se toma valores positivos por eso se inicia en 0.

Decodificador Reed Solomon: este bloque se encuentra en el Blockset de comunicaciones y se encarga de recuperar el mensaje de vectores del código Reed-Solomon de transmisión. Para la correcta decodificación, los valores de los parámetros de este bloque deben coincidir con los de la correspondiente entrada del Codificador RS del transmisor, por eso los parámetros especificados son idénticos a las especificados para el transmisor, ya que la longitud de palabra que es requerida al final de la transmisión debe coincidir con la del inicio de la transmisión ver Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros Decodificador Reed Solomon

Bloque	Parámetros
Reed Solomon (204,188)	<ul style="list-style-type: none"> - Longitud palabra código N (<i>Codeword length</i>) y longitud palabra entrante K (<i>Message length</i>); la norma ETSI EN 300 744 [5] especifica las características del codificador Reed Solomon (N,K) usado por el estándar DVB-T, del tipo RS (204,188). - Polinomio Primitivo: según la norma ETSI EN 300 744 [5] es: $\begin{matrix} X^8 & X^7 & X^6 & X^5 & X^4 & X^3 & X^2 & X^1 & X^0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{matrix}$ - Generador polinomial: Se utiliza la función <i>rsgenpoly(n,k,prim_poly)</i>, para generar el polinomio del codificador RS(N,K). El valor de N será 255 y el de K será 239.

3.2.2. Sistema Simulador del Estándar ISDB-T

El sistema ISDB-T a simular se basa en las especificaciones técnicas especificadas por la norma ARIB, STD-B31 [23] presentadas en el apartado 2.3 de este trabajo. El diagrama en bloques descrito por el estándar para el transmisor ISDB-T se puede observar en la Figura 17.

El diagrama en bloques para el sistema ISDB-T implementado, se muestra en la Figura 36. Se puede observar que para dar inicio al proceso de simulación de este estándar, se implementa

el Flujo de transporte MPEG-2 TS, el cual fue especificado en la sesión 2.2. al igual que para el estándar DVB-T.

La Figura 37 ilustra el diagrama en bloques del transmisor ISDB-T, para realizar la simulación de este sistema se hace uso de algunos bloques descritos en la sesión 3.2.1.1 que corresponden al sistema simulador del estándar DVB-T, como son los bloques de compresión MPEG-2 y codificación Reed Solomon (204,188), los datos que se encuentra a la salida del codificador Reed Solomon (204,188), son divididos en segmentos, los cuales son enviados por diferentes capas jerárquicas cuyo número no puede ser mayor a tres, posteriormente se les realiza un proceso de entrelazado, codificación y mapeo de los datos, cumpliendo con las características técnicas especificadas por la norma ARIB STD B31, descritas en la sesión 2.3. En la Figura 38 se observa el diagrama en bloques del receptor ISDB-T, en cada uno de sus bloques realiza el proceso inverso al proceso realizado en el transmisor, este receptor cuenta con la etapa de recepción OFDM, multiplexor jerárquico, demodulador QAM, decodificador, desentrelazador, combinador y el Reed Solomon.

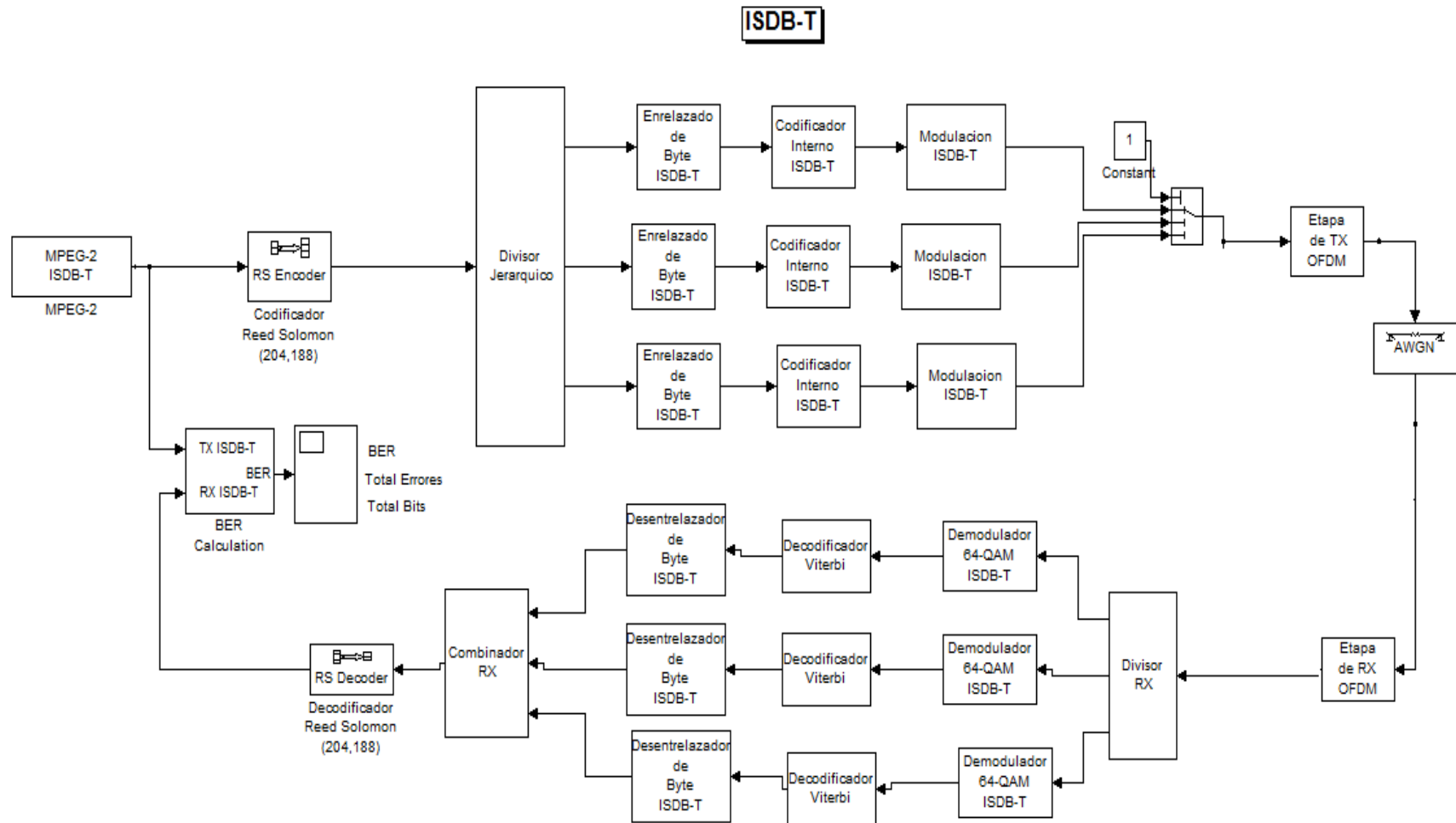


Figura 36. Diagrama en Bloques ISDB-T

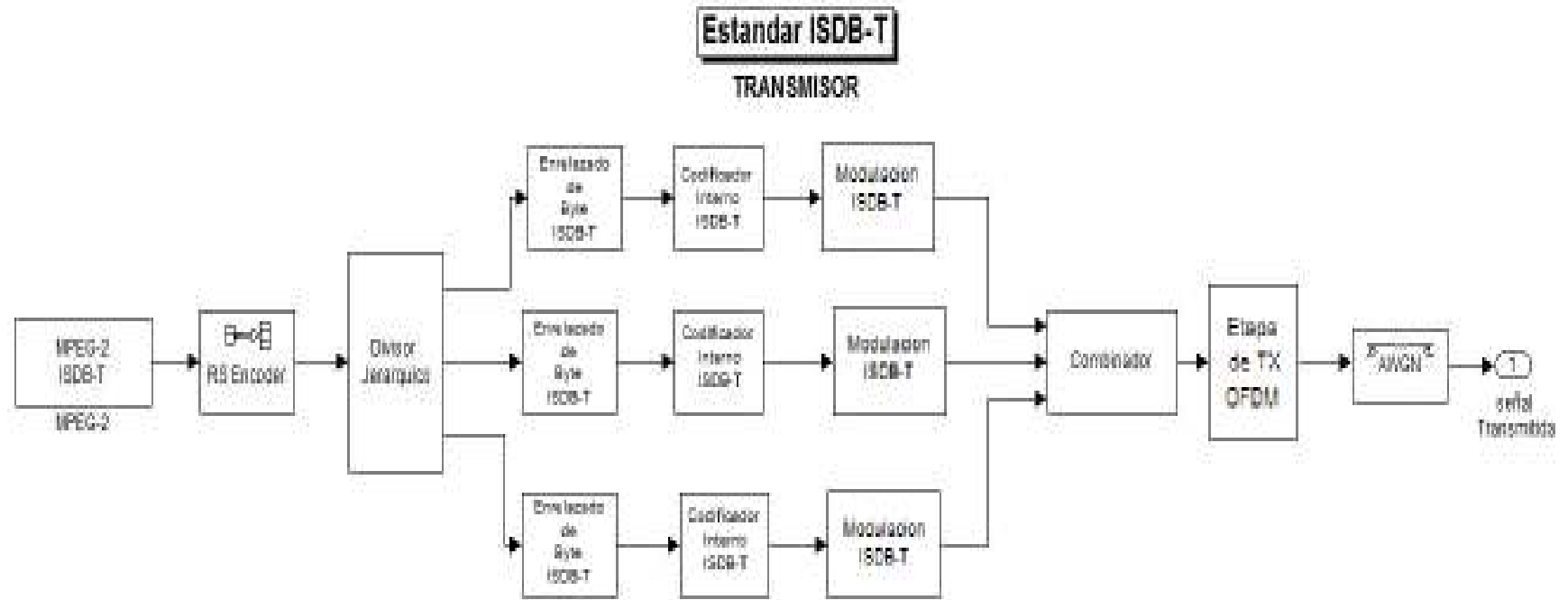


Figura 37. Diagrama en Bloques Transmisor ISDB-T

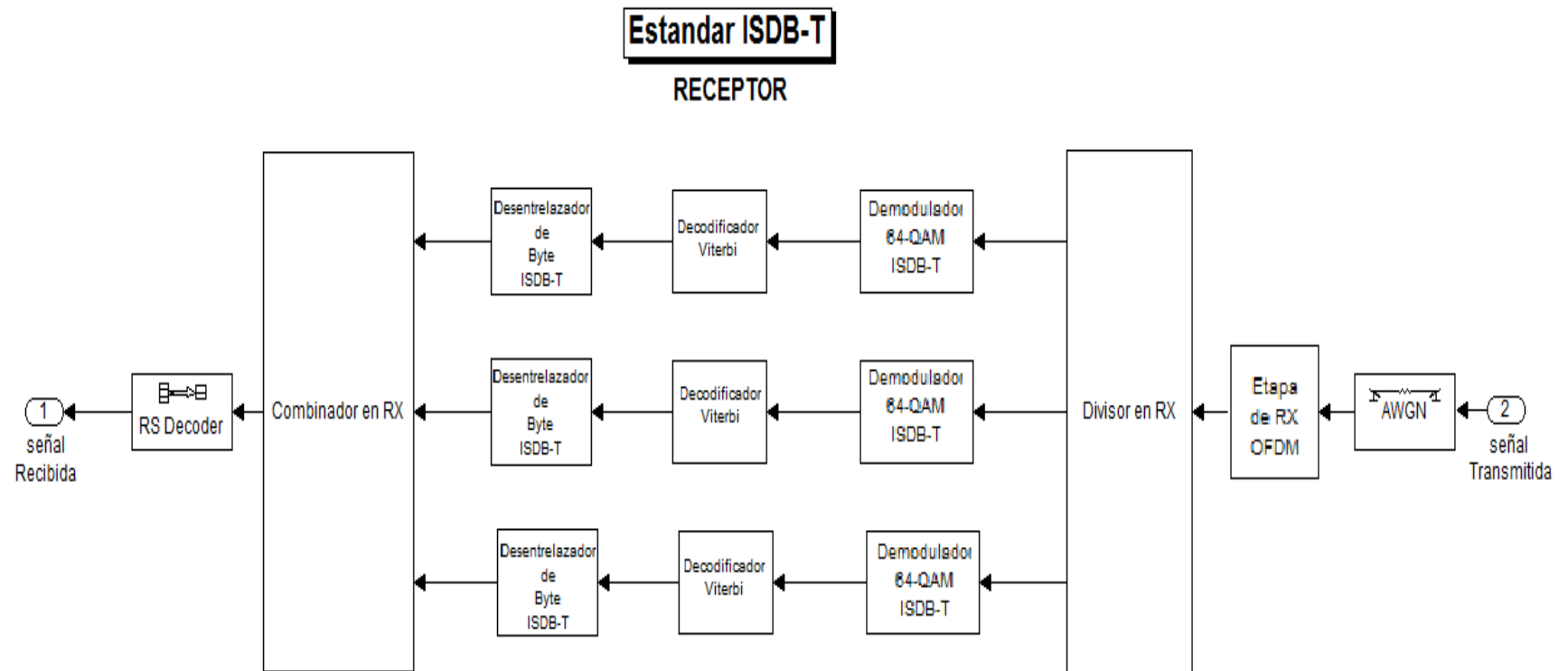


Figura 38. Diagrama en Bloques Receptor ISDB-T

Divisor jerárquico: permite distribuir la señal de entrada en tres señales que representan la jerarquización ISDB-T. Para realizar la jerarquización de los datos se hace uso de un indicador de nivel, que se encarga de seleccionar los segmentos a enviar por cada una de las capas jerárquicas, enviando la información necesaria a los conmutadores de cada una de ellas, los cuales seden el paso solo a los segmentos seleccionados por el indicador, posteriormente los datos son codificados, entrelazados y modulados en cada una de las capa. En la Figura 38 se ilustra el diagrama en bloques del divisor jerárquico.

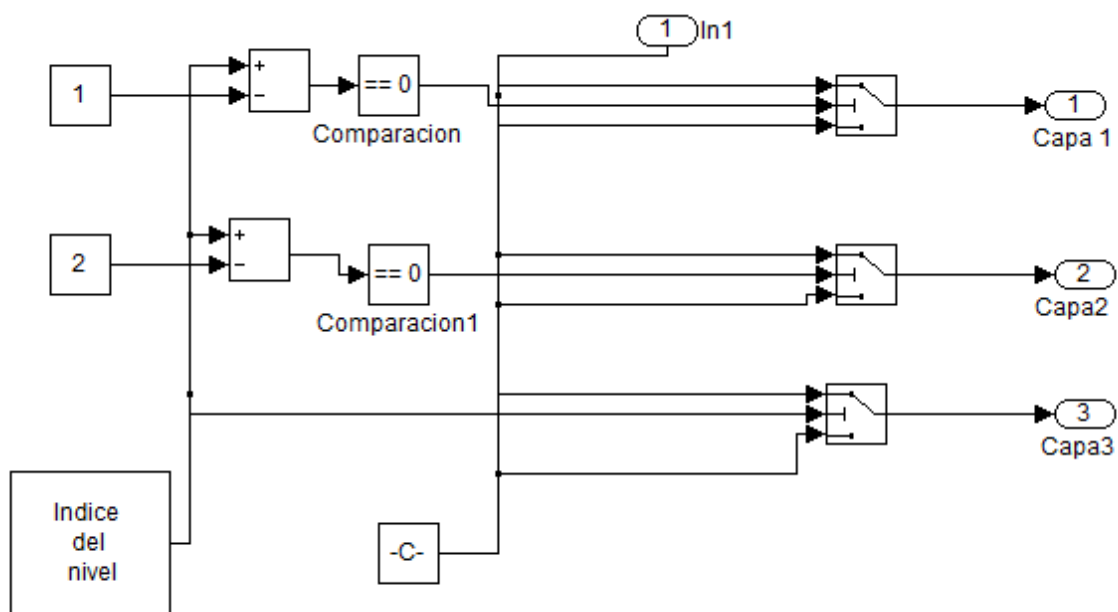


Figura 39. Diagrama en Bloques Divisor Jerárquico

Índice del nivel: contabiliza el periodo de cada segmento, dependiendo del ancho de banda, se distribuye la señal en 13 segmentos, este bloque se encarga de enviar la información de el inicio y el fin de los segmentos a los conmutadores, indicando cual es la capa que le corresponde a cada uno de ellos, de manera que cada conmutador solo deje pasar los segmentos correspondientes a su capa.

3.2.2.1. Entrelazado de byte

Se hace uso de del bloque Entrelazador Convolutacional, del conjunto de bloques de corrección y detección de errores del *Blockset* de Comunicaciones, para cubrir las especificaciones técnicas dadas por la norma y que se encuentran en la sección 2.3. Los parámetros de entrada requeridos por este bloque se encuentran en la Tabla 4, ya que los parámetros de entrada son iguales a los del entrelazador externo de DVB-T.

3.2.2.2. Codificador interno

En la Figura 39 se ilustra el proceso de este subsistema, este bloque contiene un retardo, que será el encargado de igualar los tiempos de los segmentos de cada capa, de manera que se logre tener antes del combinador tramas sincronizadas, seguido de este retardo se realiza la codificación interna realizada por el codificador Trellis. Los parámetros de este bloque se pueden observar en la Tabla 17.

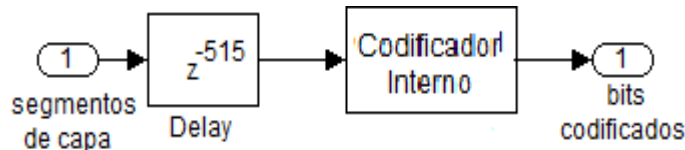


Figura 40. Diagrama en Bloques Codificador Interno

Tabla 17. Parámetros Codificador Interno

Bloque	Parámetros
<i>Convolutional Encoder</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura del Trellis (<i>Trellis structure</i>): según la norma ARIB STD B31, los valores especificados son $G_1 = 171_{OCT}$ para X y $G_2 = 133_{OCT}$ para Y. - Continuo (<i>Continuous</i>): este parámetro se utiliza para conservar los estados del codificador al final de cada trama para ser usados por la siguiente trama. - Vector de Perforado (<i>Puncture vector</i>): para una tasa de código de 3/4, es decir, por cada 3 bits de entrada el código genera 4 bits de salida; el vector de perforado optimo es [1 1 0 1 1 0], lo que significa que los bits en las posiciones 1,2,4 y 5 son transmitidos mientras los que están en la posición 3 y 6 son removidos.
<i>Retardo</i>	<p>Unidades de retardo (<i>Delay units</i>): se selecciona ya que debido al ruido blanco gaussiano incorporado en el canal es necesario retrasar su entrada por un número determinado de muestras o tramas, este parámetro fue obtenido a prueba y error (-515).</p>

3.2.2.3. Modulación ISDB-T

En la Figura 40 se ilustra el subsistema para realizar el proceso de la modulación para el estándar iSDB-T, este subsistema se compone de un entrelazado interno y la modulación 64 QAM, para realizar este subsistema se hace uso del bloque de entrelazado de bits y el modulador 64 QAM descrito en la sesión 3.2.1.2, cumpliendo con las especificaciones técnicas descritas en la sesión 2.3.

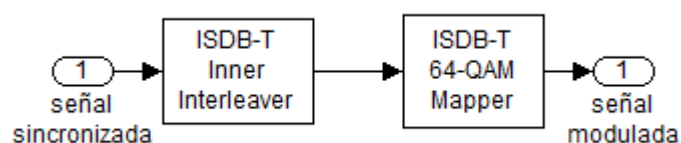


Figura 41. Diagrama en Bloques Modulación ISDB-T

3.2.2.4. Combinador (transmisión)

Este subsistema se encarga de concatenar los datos que han sido enviados por las tres capas jerárquicas, de manera que se formara un solo vector a la salida, cumpliendo con las características técnicas descritas en la sesión 2.3, para realizar este subsistema se hace uso del bloque de matriz concatenada del *Blockset* de Simulink y los parámetros se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros Combinador

Bloque	Parámetros
Matriz de concatenación	<ul style="list-style-type: none"> - Número de entradas (<i>Number of input</i>): las entradas son 3, una entrada para cada una de las capas jerárquicas. - Modo (<i>Mode</i>): seleccionamos <i>multidimensional array</i>, se forma un vector de dimensión 1Xn, donde n es la longitud de todos los datos imaginarios y reales que entran al bloque.

3.2.2.5. Etapa de transmisión OFDM

El estándar ISDB-T requiere el sistema modulador OFDM descrito en la sección 3.2.1.3 para el estándar DVB-T.

3.2.2.6. Canal de transmisión

El Canal a simular es el mismo que se usa en el estándar DVB-T descrito en la sesión 3.2.1.4; ya que para realizar la comparación entre los dos estándares, se hace necesario que las condiciones exteriores a ellos sean exactamente iguales, de manera que los sistemas se afecten de igual forma, logrando obtener resultados que nos indican cual estándar se comporta mejor frente a esta característica de ruido en el canal. Los parámetros se encuentran en la Tabla 10, cubriendo las especificaciones descritas en la sesión 2.3.

3.2.2.7. Etapa de recepción OFDM

Se hace uso del bloque descrito en la sesión 3.2.1.5, cumpliendo con las características técnicas descritas en la sesión 2.3, este bloque se encarga de tomar la señal que viene del canal AWGN y cambia la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, los parámetros a usar se ven en la Tabla 11.

3.2.2.8. Divisor jerárquico del receptor

El proceso de este bloque es el mismo al del divisor jerárquico del transmisor, descrito en la sesión 3.2.2.1, ya que se necesitan los mismos segmentos procesados en el transmisor, para que cada bloque en el receptor pueda operar de la forma inversa y de esta manera recuperar la señal inicial. Ya que su funcionamiento es similar al del divisor jerárquico del transmisor, lo que diferencia a este bloque del anterior es el tipo de datos que entran, ya que en el transmisor venían del Reed Solomon y en este caso viene del bloque OFDM, pero el proceso es el mismo.

3.2.2.9. Demodulador ISDB-T

Este subsistema se compone de otros subsistemas como lo menciona la norma ARIB STD B31, se compone de dos bloques el demodulador 64-QAM y el desentrelazador interno.

El desentrelazador es un bloque que reordena los bits que del mapeo de esta manera se impiden unos y ceros consecutivos, evitando los errores de ráfaga y protegiendo los datos. El proceso de este bloque consiste en desentrelazar cada bit con el bloque de desentrelazado del *Blockset* de Simulink y los parámetros de la sesión 3.2.2.2, se obtienen los datos aproximados a los de la etapa del transmisor antes de ser entrelazados internamente. Por otra parte la demodulación 64-QAM, el proceso que se realiza es el mismo del estándar DVB-T, por lo tanto el bloque a usar será el mismo, llamado demodulador 64 QAM. En cuanto a los parámetros cabe anotar que son iguales a los del estándar DVB-T descrito en la sesión 3.2.1.6.

3.2.2.10. Decodificador Viterbi

Este subsistema se compone de dos bloques el decodificador Viterbi y un retardo, este retardo es necesario debido al ruido introducido en el canal, los bloques se pueden observar en la Figura 42:

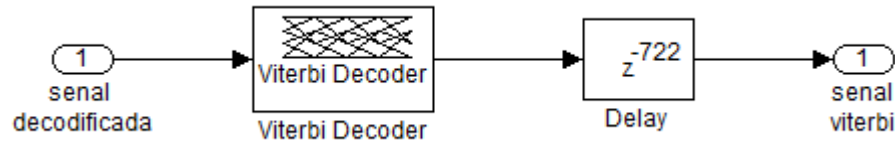


Figura 42. Diagrama en bloques decodificador Viterbi

Decodificador Viterbi: Este bloque realiza la tarea de decodificar los datos de entrada según el patrón usado en la codificación de la señal, la cual será decodificada usando los parámetros que se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19. Patrón de perforación en el codificador Trellis

Coding rate	Puncturing pattern	Transmission-signal sequence
1/2	X: 1 Y: 1	X1, Y1
2/3	X: 10 Y: 11	X1, Y1, Y2
3/4	X: 101 Y: 110	X1, Y1, Y2, X3
5/6	X: 10101 Y: 11010	X1, Y1, Y2, X3 Y4, X5
7/8	X: 1000101 Y: 1111010	X1, Y1, Y2, Y3, Y4, X5, Y6, X7

Posteriormente, se genera un retardo similar al que se produce en la simulación del canal por medio del ruido blanco gaussino, así los datos recibidos se entregan al usuario con la mejor calidad posible. Para alinear la trama sobre 1632 bits, se requiere un retardo con un valor mayor o igual a cero, los parámetros se especifican en la Tabla 20.

Tabla 20. Parámetros Decodificador Viterbi

Bloque	Parámetros
Retardo	<ul style="list-style-type: none"> - Unidades de retardo (<i>Delay units</i>): simple, se toma porque lo que se requiere es una serie de muestras. - Retardo de muestras (<i>Delay samples</i>): 584 + 49 - Las condiciones iniciales (<i>initial conditions</i>): se tiene igual a 0, para solo tomar los valores positivos ya que desde ahí se tomara la muestra.

3.2.2.11. Desentrelazado de byte (Byte Deinterleave)

Se hace uso del bloque del *Blockset* de Simulink descrito en la sesión 3.2.1.6. los parámetros se necesario se muestran en la Tabla 5, se procede a ejecutar la tarea del desentrelazado convolucional, reordenando los bytes de manera inversa al proceso realizado por el transmisor, se toman los paquetes de 204 datos y se dividen en registros $M=17$, este proceso se repite $I=12$ veces, según lo describe la norma publicada por ARIB STD B31.

3.2.2.12. Combinador

Este demultiplexor realiza una tarea similar al combinador del transmisor (sesión 3.2.2.5).

3.2.2.13. Decodificador Reed Solomon

Realiza la correcta decodificación de los datos provenientes del combinador, de manera que coincidan con los datos iniciales del transmisor. los parámetros de este bloque son los mismos asignados en la entrada del Codificador Reed Solomon del transmisor. Se tiene entonces, una longitud de palabra de 204 bytes datos a la entrada y una longitud del mensaje de 188 bytes que son los requeridos por el codificador fuente para MPEG-2.

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Se presentan los resultados obtenidos y el análisis de la implementación en simulación del capítulo anterior, lo que permitirá la evaluación a nivel físico del desempeño de los estándares DVB-T e ISDB-T, teniendo en cuenta aspectos como: diferencias entre la señal MPEG-2 de entrada y la señal de salida, el espectro de la señal analizada, la tasa de errores de bit (BER) al realizar variaciones en el canal de ruido y el diagrama de constelación que presenta cada estándar según las variaciones realizadas; además se incluye una breve comparación de los resultados obtenidos de los dos estándares evaluados DVB-T e ISDB-T.

4.2. SUBSISTEMA MPEG-2

Teniendo en cuenta que la señal de entrada de la Televisión Digital Terrestre, es el paquete MPEG-2 formado por video, audio y datos codificados, y que estos datos no serán siempre los mismos, se comprobó los cambios de la señal, mostrando la flexibilidad del sistema diseñado.

Después de transcurridas 34 tramas en simulación, se obtuvo la señal de la Figura A.1, para demostrar que los datos generados son aleatorios, se ejecutó por segunda vez la simulación, obteniendo el mismo número de tramas en simulación del caso anterior. En la Figura A.1 y la Figura A.2, se muestran las graficas obtenidas en simulación, demostrando que los datos de entrada son aleatorios, por lo tanto, el sistema se comporta igual para cualquier señal digital de entrada.

4.3. SUBSISTEMA TRANSMISOR DEL ESTÁNDAR DE TELEVISIÓN DIGITAL DVB-T

4.3.1. Codificador Reed Solomon

A la salida del bloque del codificador *Reed Solomon*, se deben tener 204 bytes, ya que N y K se especificaron apropiadamente con los valores 204 y 188, para obtener un código acortado como se menciona en la sección 3.2.1.3. La verificación de los 204 bytes a la salida se observan en la Figura A.2.1.

4.3.2. Mapeo 64 QAM

El proceso de modulación 64 QAM, se evaluó por medio de los diagramas de constelaciones que permiten ver los 64 estados correspondientes a las fases de la modulación.

Al simular se observa el diagrama de constelaciones y la asignación de bits para la modulación 64 QAM, la señal tiene la componente en fase I y en cuadratura Q, desfasadas 90 grados como se muestra en la Figura A.2.2., los 2 ejes representan las 2 componentes I y Q. Como se puede observar, se obtienen 64 estados, que son los esperados para la modulación 64-QAM según la norma [9] como se muestra en la Figura 13.

4.3.3. Modulación OFDM

El espectro de la señal entregada por este bloque se puede observar en la Figura A.5. Este espectro fue modificado por el ruido *AWGN* introducido en el canal, que es lo que varia la magnitud relativa en dB.

4.3.4. Canal de Transmisión

El canal entrega una señal en presencia de ruido, este ruido será modificado variando algunos parámetros en él, como son la SNR y E_b/N_0 , con el fin de llegar a una $BER=2 \times 10^{-4}$, especificada en la norma de DVB-T [9] para una C/N de 18 dB. Las variaciones de la SNR, se realizaron manualmente modificando su valor en el bloque *AWGN*.

4.3.5. Variaciones de la SNR

En la Tabla 21, se ilustran los valores que toma la BER frente a los cambios realizados a la SNR, al graficar estos valores se obtiene la Figura A.7a.

Tabla 21. SNR Vs BER DVB-T

SNR	BER
0	0,5026
5	0,4931
10	0,4472
15	0,048
16	7,80E-05
17	0,000055
18	0,000031

En la Figura A.7b se observa la grafica teórica de la relación entre la BER y la SNR, al comparar esta grafica con la obtenida en simulación (Figura A.7a), se observa que las graficas obtenidas con el sistema DVB-T en simulación son aproximadas a las teóricas, demostrando que el comportamiento del sistema cumple con las características técnicas descritas por la norma EN 300 744 V1.5.1[9].

4.3.6. Variaciones de la Eb/No

Haciendo uso de la función *BERTool* de MATLAB, se obtiene la grafica de la Figura A.8a. En la Tabla 22 se encuentran los valores obtenidos en simulación.

Tabla 22. Eb/No Vs BER DVB-T

Eb/No	BER
9	0.3981
9.5	0.3603
10	0.3228
10.5	0.2699
11	0.2097
11.5	0.1211
12	0.06848
12.5	0.0564
13	0.0354
13.5	0.01982
14	0.006228
14.5	0.0013
15	0.000788
15.5	0.0005923
16	7.822E-05
17	5.5 E-05
18	3.1 E-05

Se puede concluir que los valores obtenidos en simulación son aproximados a los valores dados por la EN 300 744 V1.5.1 [9], en el caso de la SNR se obtuvo un valor de umbral para la BER de $2,2 \times 10^{-4}$ con la SNR de 18dB, para un valor de Eb/No entre 16 dB y 15dB se obtiene un valor de 5×10^{-4} , demostrando que el comportamiento del sistema es aproximado al comportamiento teórico esperado.

4.4. SUBSISTEMA RECEPTOR DEL ESTÁNDAR DVB-T

Se hicieron una serie de variaciones en los parámetros del canal para realizar el análisis de la BER (Bit Error Rate) entre la señal de entrada y la recibida después de ser procesada por el receptor, también se visualizaron los cambios producidos en las constelaciones y el espectro de la señal debido al deterioro que le produce el ruido.

4.4.1. Variación en el Diagrama de Constelaciones y el Espectro

En el canal de ruido blanco gaussiano se modificaron los parámetros SNR y E_b/N_0 , obteniendo distintas graficas del espectro y de las constelaciones; de esta manera se comprobó que la señal recibida es la esperada según la norma ETSI EN 300 744 [5].

Variando la E_b/N_0 en el canal de transmisión se obtienen los siguientes resultados del espectro y las constelaciones para cada variación, depositadas en las Figuras A.9, A.10, A.11 y A.12.

Se puede observar en el espectro de las Figuras A.9, A.10, A.11 y A.12., que cuando se aumenta la E_b/N_0 , la BER disminuye y mejora la calidad de la señal recibida, también se observa que cuando la E_b/N_0 es menor, en el espectro la amplitud de las sub-portadoras que se encuentran entre las frecuencias de corte y que están separadas de las frecuencias adyacentes que producen interferencia, disminuye. Con lo que se concluye que el ruido blanco gaussiano presente en la simulación, produce una interferencia considerable en las frecuencias adyacentes que interfieren con la señal transmitida obteniendo en la recepción una señal deteriorada.

Por otra parte, en las Figuras A.9, A.10, A.11 y A.12. se muestran los diagramas de las constelaciones para determinado valor de la E_b/N_0 , los símbolos recibidos son de diferente magnitud y cuando se tiene una E_b/N_0 pequeña (como de 9 dB), se observa que los símbolos están perdidos en medio de una serie de interferencia que se genera por el ruido y no se identifica con claridad un punto discreto, pero a medida que aumenta la E_b/N_0 se obtienen símbolos discretos, que además conservan su posición de acuerdo a los 64 posibles valores de fase que pueden tomar; es así como se comprueba que el efecto de la degradación de canal es compensando por el bloque OFDM, ya que los valores obtenidos de la BER se aproximan a los esperados, como se menciona en la norma [9].

4.5. SUBSISTEMA TRANSMISOR DEL ESTÁNDAR DE TELEVISIÓN DIGITAL ISDB-T

4.5.1. Mapeo 64 QAM

El diagrama de constelaciones que entrega el sistema en transmisión y en recepción consta de 64 estados según la norma ARIB, STD-B31 [23] Comprobando así, que los datos en simulación

se aproximan a los datos teóricos. En la Figura A.13, se muestra el diagrama de constelaciones sin ruido, posteriormente a medida que se varia la SNR o la E_b/N_0 , los diagramas de constelaciones de la señal se muestran con mayor inmunidad frente al ruido.

4.5.2. Modulación OFDM

El espectro que entrega la señal antes de incorporarle al canal el Ruido Blanco Gaussiano (AWGN), coincide con el espectro al que hace referencia la norma ARIB [23]. Ver Figura A.14.

4.6. CANAL DE TRANSMISIÓN

El canal entrega una señal nueva con ruido, este ruido será modificado variando algunos parámetros en él, como son la SNR y E_b/N_0 , con el fin de llegar a una $BER=2 \times 10^{-4}$, como lo especifica la norma para una C/N de 18 dB, además obtener con estas variaciones manuales los valores de la BER para cada caso y de esta manera graficar los valores obtenidos y comparar con los valores teóricos.

En la Tabla 23 se encuentran los valores obtenidos en simulación de las variaciones realizadas en la SNR del bloque AWGN, los cuales fueron graficados obteniendo la Figura A.15a, siendo aproximada a la grafica teórica de la Figura A.7a.

Tabla 23. SNR Vs BER ISDB-T

SNR	BER
9	0.49
9.5	0.479
10	0.46
10.5	0.42
11	0.41
11.5	0.34
12	0.272
12.5	0.253
13	0.18
13.5	0.16
14	0.102
14.5	0.09
15	0.05
15.5	0.02
16	0.009
17	0.001
18	0.0005
19	0.00018

En la Tabla 24, se muestran los valores de la BER entregados en la simulación, con respecto a los cambios de la E_b/N_0 , graficando estos datos se obtuvo la Figura A.16. Comparando las graficas teóricas con las de simulación se observa que el sistema está entregando los valores aproximados a los teóricos, como se esperaba en el diseño, demostrando que el sistema diseñado cumple con las características técnicas descritas en la sesión 2.3 dadas por la norma ARIB STD B31.

Tabla 24. Eb/No Vs BER ISDB-T

Eb/No	BER
9	0.41
9.5	0.391
10	0.29
10.5	0.24
11	0.161
11.5	0.1443
12	0.088
12.5	0.056
13	0.046
13.5	0.011
14	0.0053
14.5	0.0013
15	0.00066
15.5	0.00044
16	7.70E-05
17	0.000049

Lo deseado era encontrar un valor de BER que se aproximará a los datos teóricos de de la norma del estándar ISDB-T[23]. Con los datos obtenidos, se pudo concluir que la BER más cercana a la esperada teóricamente está relacionada con una Eb/No igual a 15.5dB, tomando como referencia estudios realizados por otras universidades que muestran una diferencia entre la Eb/No y la C/N de 1dB; por lo tanto se puede concluir que los datos obtenidos de la BER se acercan a los esperados teóricamente que son una del orden de $10e-4$ ya que la BER medida en simulacion es $4,4 \times 10e-4$.

4.7. SUBSISTEMA RECEPTOR DEL ESTÁNDAR ISDB-T

Para realizar una relación entre la SNR o la Eb/No con la BER (Bit Error Rate), se hizo necesario la variación de estos 2 primeros parametros en el bloque AWGN, simulando una señal en presencia de ruido a la salida en el canal, una vez se tenía esta señal procesada en el

receptor, se realizó la comparación con la señal inicial, para obtener un valor de BER, posteriormente se observaron cambios producidos en las constelaciones y el espectro de la señal debido al deterioro que produce el ruido en el Canal de transmisión.

4.7.1. Demodulación OFDM

Al tener ruido en la señal recibida en el receptor, el espectro y el diagrama de constelaciones cambiaron de manera notoria como se observa en la Figura A.17. En esta Figura, se puede observar que la amplitud del espectro es mucho menor a la que se tenía en el transmisor antes de sufrir deterioro por ruido, además las constelaciones no están definidas, no se pueden identificar claramente los 64 estados o puntos en este caso como en el diagrama obtenido en el mapeo del transmisor. A medida que se hicieron variaciones con la SNR y la E_b/N_0 , como lo ilustran las Figuras A.18 y A.19, se verifica la proporcionalidad directa de estos dos parámetros con la amplitud de la señal que muestra el espectro, como ocurre de la misma manera con la calidad de la señal, ya que a medida que se incrementa su valor, la calidad de la señal recibida en el receptor es mucho mejor, además, con E_b/N_0 menor en el espectro disminuye la amplitud de las sub-portadoras que se encuentran entre las frecuencias de corte y que están separadas de las frecuencias adyacentes que producen interferencia. Lo que nos lleva a pensar que el ruido blanco gaussiano producido en simulación es un factor que se encarga de generar mayor amplitud en las frecuencias adyacentes a la señal generada por el transmisor obteniendo en el receptor una señal deteriorada, con respecto a la calidad de la señal, hay de destacar que para obtener mejor definición de los 64 símbolos en la modulación 64QAM se hace necesario una SNR o E_b/N_0 entre los valores de 19dB y 15dB respectivamente, teniendo en cuenta el nivel de ruido que soporta la señal ISDB-T como se menciona en la norma ARIB STD-B31[23].

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La simulación es un método ideal para realizar estudio, análisis y pruebas con gran flexibilidad a sistemas de telecomunicaciones, disminuyendo los costos que se tendrían si se realizaran pruebas en equipos reales para dichos sistemas.
- La herramienta Simulink de MATLAB, permite la realización de un modelo basado en bloques funcionales, que se ajusta a las características de un sistema real, disminuyendo la complejidad que tendría éste sistema.
- Los sistemas simulados permiten un acercamiento al funcionamiento de los sistemas avanzados como lo son los estándares DVB-T e ISDB-T.
- La simulación de los sistemas DVB-T e ISDB-T, facilito el estudio y análisis del comportamiento de la señal bajo las especificaciones de dichos estándares.
- En las pruebas realizadas se pudo observar que los sistemas simulado son robusto y estable bajo condiciones de variaciones de E_b/N_0 y SNR, debido a los procesos de codificación, modulación y multiplexación usados por los estándares DVB-T y ISDB-T, es así como se logra obtener un valor de la BER aproximado al valor teórico dado por la norma de cada uno de los estándares.
- Al hacer variaciones de los parámetros del bloque que simula el canal de ruido blanco gaussiano se puede observar que los resultados obtenidos de la BER son inversamente proporcional a la E_b/N_0 y SNR, ya que a medida que se aumentan estas, la BER disminuye obteniendo una señal casi perfecta.
- Al incrementarse el valor de la BER, la calidad de la señal disminuye lo cual se ve reflejado en la amplitud del espectro OFDM, y en las constelaciones de cada sistema a simular. Por otra parte cuan se realiza un aumento en la amplitud se dificulta identificar las frecuencias de corte en el espectro, observándose una señal recta con ruido y en cuanto a las constelaciones se observa que en el transmisor son punto discretos en el eje I y Q según la posición de cada símbolo, pero en el receptor a cuando el valor de la BER incrementa, se visualiza una nube de puntos que impide distinguir la ubicación exacta de cada símbolo, sin

embargo la señal recibida por cada sistema es codificada corrigiendo así la mayor cantidad de errores posibles, obteniendo una señal aproximada a la transitada.

- Las graficas de la EB/No o SNR con respecto a la BER, obtenidas con los datos recibidos de la simulación y las variaciones de los parámetros del bloque AWGN, son graficas exponenciales y logarítmicas con lo cual demuestra que los datos obtenidos son coherentes con las bases teóricas que se tiene de ello.
- El desarrollo de este tipo de simulaciones, permiten la aplicación de conocimientos adquiridos en materias como sistemas de telecomunicaciones, teoría de las telecomunicaciones I y II; incluidas en el programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
- El desarrollo de las simulaciones de los dos estándares DVB-T e ISDB-T, permiten en primer lugar dar a conocer los sistemas de codificación y modulación usados para el desarrollo de cada tecnología, y por otra parte permiten despertar el interés investigativo de los alumnos y profesores del Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, en temas de actualidad como lo es la Televisión Digital Terrestre.
- Se sugiere buscar alianzas con organizaciones que provean herramientas de simulación (ADS- Advanced Design System, OPNET, etc) bajo licencias académicas de bajo costo o donativos.
- Para futuros trabajos de grado se recomienda: Realizar el análisis del desempeño del estándar ATSC a nivel físico, teniendo en cuenta que es requerido el desarrollo del bloque de modulación 8-VSB.
- Implementar servicios a nivel de aplicación para la televisión digital soportados por los estándares DVB-T, ISDB-T Y ATSC.
- Utilizar la simulación desarrollada en este trabajo de grado, como base para realizar una comparación de los estándares más utilizados para televisión digital como son el DVB-T,

ISDB-T Y ATSC, permitiendo así, escoger el estándar que mejor desempeño tiene a nivel físico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paradiso Design, "ATSC, DVB-T e ISDB-T".
http://www.paradiso-design.net/ATSC_DVB-T_ISDB-T_es.html
- [2] D. Russo, C. Delpiazzo "Televisión digital: elementos para la toma de decisiones", Universidad de la Republica Unidad Multidisciplinaria de apoyo a la gestión universitaria en la Comisión Nacional de Televisión digital Terrestre Abierta, Diciembre 2006.
- [3] M. Cruz, P. Rupin, A. Valdivia, "Situación de la Televisión Digital e el mundo e implicancia en Chile", Departamento de Estudios del Consejo Nacional de Television, Santiago de Chile, Junio 2006.
- [4] H. Galperin, "Comunicación e integración en la era digital: un balance de la transición hacia la televisión digital en Brasil y Argentina", Universidad de Guadalajara, Santiago de Chile, Enero-Junio 2004.
- [5] A. Reyes, "Visión Técnica de la DTV", Colombia, Abril 2007.
- [6] S. Echeverry, "Desafíos Regulatorios para la Adopción de la Televisión Digital Terrestre en Chile", Documento elaborado para el Consejo Nacional de Televisión de Chile, Santiago de Chile, Noviembre 2005.
- [7] J. Payan, "Modelo de un sistema de comunicación digital transmisor y receptor óptimo", 2005.
- [8] V. Marianov, C. Oberli, M. Ríos, "Análisis de los estándares de transmisión de televisión digital terrestre y su aplicabilidad al medio Nacional", Pontificia Universidad Católica de Chile, Octubre 2006.
- [9] ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", EN 300 744 V1.5.1, 2004.
- [10] ISO/IEC CD 13818-4, MPEG Committee Draft (1994): "MPEG-2 Compliance".
- [11] ISO/IEC IS 13818-1:2000 (E), International Standard, Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems.
- [12] A. Delgado, "Flujos de Programa y de transporte MPEG-2 aplicación a DVB", Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [13] DVBC, "Sistemas de Acceso Ópticos: Norma DVB-C".
- [14] UNAS, J. Laura, "Control de errores de datos".
- [15] J. Navalpotro, "Difusión Digital de TV – Parte III: Sistemas de Transmisión Digital DVB", Mayo, 2003.

- [16] Wikipedia, "Conversión analógica-digital",
<http://es.wikipedia.org/wiki/Digitalizaci%C3%B3n>
- [17] Códigos de codificación del canal.
<http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/teoria4.html>
- [18] A. Gutiérrez, J. Sánchez, L. Gutiérrez, C. Valdez, "Diversidad Espacial y Entrelazado de Bit en Comunicaciones Móviles Multitasa con Desvanecimientos de Plazo Corto, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones", Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- [19] J. Biró , E. Borbély, "DVB-T OFDM Modulation System ",Budapest Tech , 2004.
- [20] E. Philip, "Adaptive techniques for Multiuser OFDM", James Cook University, Diciembre, 2001.
- [21] DiBEG "Introduction of ISDB-T"
<http://www.dibeg.org/>
- [22] J. Simonetta , "Televisión Digital Avanzada", Handbook.
- [23] ARIB STD-B31, "Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting", V 1.6, 2005.
- [24] L. Arnone, C. Gayoso, C. González, J. García, J. Castiñeira, "Diseño de un decodificador Viterbi para ser utilizado en enlaces. Infrarrojos.", Universidad Nacional de Mar de Plata.
- [25] C. Sandoval, A. Fedón, "Diseño de un codificador y decodificador digital Reed-Solomon usando programación en VHDL", Universidad de Carabobo, Noviembre, 2006.
- [26] MathWorks, "MATLAB, The Language of Technical Computing", Guia de Introducción a Matlab, version 7, 2006.
- [27] MathWorks, "Documentation, Simulink"
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/simulink.html?BB=1>
- [28] MathWork, "Help Documentation", MATLAB R2008a.