

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTARIZADA, PARA SIMULAR ENSAYOS DE LABORATORIO EN LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN PARA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE, BAJO EL ESTÁNDAR ISDB-T

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. José D., Gil C.
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTARIZADA, PARA SIMULAR ENSAYOS DE LABORATORIO EN LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN PARA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE, BAJO EL ESTÁNDAR ISDB-T

TUTOR ACADÉMICO: Zeldivar Bruzual

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. José D., Gil C.
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2017

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 01 de noviembre de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller José D. Gil C... titulado:

“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTARIZADA, PARA SIMULAR ENSAYOS DE LABORATORIO EN LA MEDICIÓN DE PARAMETROS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN PARA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE, BAJO EL ESTANDAR ISDB-T”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Comunicaciones, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Luis Fernández
Jurado

Prof. Francisco Varela
Jurado

Prof. Zeldívar Bruzual
Prof. Guía

Jose D., Gil C.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTARIZADA, PARA SIMULAR ENSAYOS DE LABORATORIO EN LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN PARA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE, BAJO EL ESTÁNDAR ISDB-T

Tutor Académico: Zeldivar Bruzual. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Mención Comunicaciones. Año 2017, xvii, 113 pp.

Palabras Claves: Radiodifusión de Televisión Digital Terrestre, Transmisión, Recepción, ISDB-T, OFDM, BER, MER, Modulación, Codificación de Canal, Frecuencia, Potencia, ruido, CNR, FEC.

Resumen.-

En Venezuela se está implementando progresivamente la Televisión Digital Terrestre bajo el estándar ISDB-Tb, este sistema es más avanzado que el convencional, con capacidad para recibir sonidos, textos e imágenes a gran velocidad, comprimidos mediante el sistema digital, que tiene la virtud de ocupar muy poco espacio, permitiendo un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico.

La escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela no cuenta con laboratorios destinados al estudio de Televisión Digital, es por ello que en este trabajo se desarrolla una herramienta computarizada que permite simular ensayos de laboratorios en la medición de parámetros de transmisión y recepción de televisión digital terrestre bajo el estándar ISDB-T, representando un aporte en el estudio del comportamiento del sistema de televisión digital ante variaciones de sus parámetros de entrada, tales como modo, modulación, intervalo de guarda, prefijo cíclico, niveles de ruido, entre otros, a través de una interfaz gráfica de fácil entendimiento.

Para validar la herramienta computarizada se realizan simulaciones con canal AWGN y con canal Rice para comparar sus resultados con ensayos realizados en los laboratorios del Departamento de Electricidad del Instituto Universitario de Tecnología Dr Federico Rivero Palacio. Según las comparaciones realizadas la herramienta computarizada muestra resultados comparables con la realidad al utilizar un canal Rice.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XII
INTRODUCCIÓN	1
EL PROBLEMA Y SUS GENERALIDADES	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	3
1.3. Alcance	4
1.4. Antecedentes del estudio	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivos Específicos	5
MARCO TEÓRICO	7
2.1. La Televisión Digital	7
2.1.1. La Television Digital en Venezuela	7
2.2. Modelo de sistema de radiodifusión digital terrestre de la ITU	8
2.2.1. Codificación de fuente	8
2.2.2. Multiplexaje y transporte de Servicios	9
2.2.3. Sistema de Transmisión RF	9
2.2.4. Factores de Planificación y características del receptor	10
2.3. Descripción del proceso de Transmisión del estándar ISDB-T	10
2.3.1. Entrada	10

2.3.2.	Codificación de canal	13
2.3.3.	Modulación	18
2.3.4.	Radiofrecuencia	20
2.4.	Descripción del proceso de Recepción del estándar ISDB-T	21
2.5.	Modulación Multiportadora y OFDM	24
2.6.	Canales Utilizados	25
2.6.1.	Canal Gaussiano (AWGN)	26
2.6.2.	Canal Rice	27
2.7.	Métodos y procedimientos para medir parámetros de transmisión y recepción en ISDB-T	28
2.7.1.	Parámetros de Transmisión	28
2.7.2.	Parámetros de Recepción	36
MARCO METODOLÓGICO		54
3.1.	Tipo de Investigación	54
3.2.	Diseño de la Investigación	55
3.3.	Metodología	55
3.3.1.	Descripción del proceso de transmisión y recepción de la televisión digital, bajo el estándar ISDB-T e Identificación y caracterización de los métodos y procedimientos para medir parámetros de transmisión y recepción	56
3.3.2.	Desarrollo mediante el software de simulación los bloques e interfaces amigables y de fácil entendimiento para el usuario, usando la herramienta Matlab, o simulink, que permitan generar las perturbaciones y medir los parámetros	56
3.3.3.	Validación de la herramienta desarrollada	57
RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN		60
4.1.	Simulación con Canal AWGN	61
4.1.1.	BER Vs. SNR	62

4.1.2. MER Vs. Potencia recibida	63
4.2. Simulación con Canal Rice	66
4.3. Mediciones experimentales en campo y comparación	69
4.4. Análisis y Discusión de resultados	73
CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones	78
REFERENCIAS	79

LISTA DE FIGURAS

2.1. Modelo DTTB ITU	9
2.2. Sistema de Transmisión	10
2.3. Paquetes de Transporte TS y multiplexación MPEG-2	11
2.4. Estructura de los paquetes TSP a nivel de BTS	12
2.5. Codificación de canal	13
2.6. Generador de secuencia PRBS	15
2.7. Entrelazador de bytes para ISDB-T (A=17 y k=12)	16
2.8. Modulación	19
2.9. Esquemas de modulación utilizados por el estándar ISDB-T	20
2.10. Sistema de Recepción ISDB-T	21
2.11. Estructura de la señal demodulada por el receptor	22
2.12. Punzonado de los bits entregados por el codificador convolucional	22
2.13. (a) Técnica de Modulación multiportadoras convencional, y (b) técnica de Modulación multiportadoras ortogonales	25
2.14. Puntos de medición en estación transmisora	28
2.15. Medición de ancho de banda de la portadora	30
2.16. Máscara espectral definida por el estándar ISDB-T	31
2.17. Medición del nivel de señal	34
2.18. Puntos de medición en extremo receptor	36
2.19. Sistema de Recepción COFDM	37
2.20. Medición de BER	38
2.21. Medición de MER	39
2.22. Constelación	40
2.23. Respuesta en Frecuencia	42

2.24. Determinación de los productos de intermodulación por el método de dos tonos	44
2.25. Montaje de medición de Intermodulación	45
2.26. Medición de la BER en función de C/N	50
2.27. Medida del retardo de grupo utilizando el método de los dos tonos	52
2.28. Apertura de frecuencia	53
3.1. Simulación Base	59
4.1. Puntos de Medición para pruebas	60
4.2. Medidas realizadas con canal AWGN	61
4.3. BER en función de SNR	62
4.4. Variaciones de MER en función de la Potencia recibida	63
4.5. Constelación y Espectro para 4-QAM Y 16-QAM	64
4.6. Constelación 64-QAM y Respuesta en frecuencia	65
4.7. Medidas realizadas con canal Rice	66
4.8. Diagramas de Constelación con canal Rice	68
4.9. Constelación medida para el canal 24	69
4.10. Constelación y espectro canal rice (K=5)	70
4.11. Parámetros medidos del canal 24	70
4.12. Retardo por Multitrayectoria	71
4.13. Diagrama de Constelación del canal 24	72
4.14. Parámetros segmento B Canal 24	72

LISTA DE TABLAS

2.1. Distribución de Canales en Venezuela	8
2.2. Ajuste del retardo D_a en número de TSP	17
2.3. Modos de Transmisión ISDB-T	29
2.4. Especificación de Máscaras de Espectro de Transmisión	32
2.5. Potencia máxima de cada clase	32
2.6. Criterio para la aplicación de máscaras	33
4.1. Parámetros de entrada de la señal simulada	61
4.2. Parámetros de entrada para obtener BER Vs. SNR	62
4.3. Parámetros utilizados para obtener los diagramas de constelación	65
4.4. Parámetros de entrada de la señal simulada	66
4.5. Parámetros utilizados para obtener los diagramas de constelación	67
4.6. Parámetros de la señal simulada	70

LISTA DE ACRÓNIMOS

- ATSC:** Advanced Television System Committee
- BER:** Bit Error Rate
- CBER:** BER antes del decodificador Viterbi
- BST-OFDM:** Band Segmented Transmission- Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- BTS:** Broadcast Transport Stream
- CNR:** Carrier Noise Ratio
- COFDM:** Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- DTTB:** Digital terrestrial television broadcasting
- DVB-T:** Digital Video Broadcasting-Terrestrial
- ES:** Elemental Stream
- FDM:** Frequency Division Multiplexing
- FEC:** Forward error Correction
- IFFT:** Inverse fast Fourier transform
- ITU:** Unión Internacional de Telecomunicaciones
- ISDB-T:** Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial
- MER:** Modulation Error Rate
- MPEG:** Moving Picture Experts Group
- OFDM:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- PES:** Program Elementary Streams
- QAM:** Quadrature Amplitude Modulation
- TS:** Transport stream
- TSP:** Transport Stream Program
- VBER:** BER después del decodificador Viterbi

INTRODUCCIÓN

La Televisión Digital Terrestre consiste en la aplicación de un conjunto de tecnologías para la transmisión y recepción de imágenes, sonido y datos a través de ondas terrestres.

Existen diferentes estándares de televisión digital, tales como: (DVB-T) Digital Video Broadcasting-Terrestrial utilizado en Europa, el Advanced Television System Committee (ATSC) utilizado en Estados Unidos, y el Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial (ISDB-T) que fue desarrollado en Japón para la transmisión y recepción de señales de televisión.

La Televisión Digital permite un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, ya que a diferencia de la tecnología analógica con ésta se puede transmitir varias señales digitales por un mismo canal.

En Venezuela se está implementando progresivamente la Televisión Digital bajo el estándar ISDB-Tb, que es una variante del estándar creado en Japón con mejoras en la compresión de video realizadas por el grupo MPEG y aplicadas por Brasil.

Como en todo sistema, en la Televisión Digital Terrestre también es necesario realizar el monitoreo del funcionamiento para saber el estado de la señal transmitida en diferentes puntos de la red, desde la transmisión hasta la recepción. Es por ello que existen procesos y técnicas de medición que permiten verificar que las señales transmitidas están siendo recibidas de acuerdo a las especificaciones, y en buena calidad.

Con este trabajo se busca realizar una herramienta computarizada que permita

simular los procesos y técnicas para la medición de parámetros de transmisión y recepción de señales de televisión digital bajo el estándar ISDB-T.

El siguiente trabajo esta estructurado como sigue:

El capitulo 1 define el planteamiento del problema y los objetivos trazados para su solución.

En el Capitulo 2 se desarrollan las bases teóricas necesarias para una mejor comprensión del tema en estudio.

El capitulo 3 integra todos los medios y estrategias que se consideran pertinentes para contribuir con el cumplimiento y desarrollo de la investigación.

El capitulo 4 presenta los resultados obtenidos luego de realizar las pruebas establecidas y por último se presenta las conclusiones y recomendaciones en el Capitulo 5.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA Y SUS GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

En vista de la migración de la Televisión analógica hacia la televisión digital en Venezuela es necesario estudiar los parámetros de transmisión y recepción de la televisión digital terrestre, bajo el estándar ISDB-T, para verificar los niveles de calidad de las señales digitales transmitidas. En la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela no se cuenta con laboratorios destinados para tal fin, es por ello que se pretende desarrollar un simulador para ejemplificar la medición de estos parámetros.

1.2. Justificación

Dado que la Televisión digital terrestre está siendo progresivamente implementada en Venezuela, se hace necesario el estudio de sus parámetros de transmisión y recepción para validar si la plataforma satisface los niveles de calidad requeridos.

Con el desarrollo de la herramienta computarizada para medir parámetros de transmisión de televisión digital terrestre, se contribuye con la implementación de prácticas de Televisión Digital en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, proporcionando conocimientos guía en relación al tema o con aportes que también favorezcan a la formación de nuevos profesionales, abriendo el camino para una posible implementación de un laboratorio en esta área y así generar

una especie de retroalimentación en donde tanto los estudiantes como el recinto universitario, se ven beneficiados de la información que se va recolectando.

Es una forma económica de implementar prácticas de medición de parámetros de Televisión Digital, ya que al ser una herramienta computarizada no es necesaria la inversión en costosos equipos de medición.

1.3. Alcance

El propósito del tema en estudio es desarrollar las simulaciones necesarias para medir los parámetros de Transmisión (Frecuencia transmitida, Desviación en frecuencia, Ancho de banda ocupado, Máscara Espectral, Espurias, Potencia transmitida, Frecuencia de muestreo IFFT) y parámetros de Recepción (Respuesta de amplitud en frecuencias, Tasa de bit errados (BER), Tasa de error de modulación (MER), Diagrama de constelación, Multitrayecto, Intermodulación, Ruido de fase, BER vs. Portadora, MER vs. Portadora, BER vs. CNR final, Ruido marginal, Ruido Gaussiano vs. BER, Característica de retardo de grupo, Característica de retardo), con el fin de diseñar una herramienta computacional.

1.4. Antecedentes del estudio

1. Simulación de estándar de televisión digital ISDB-Tb basado en un esquema de modulación/demodulación OFDM implementado en Matlab/Simulink realizado por Luigi Renato Cantos, en la Facultad de Ingeniería en electricidad y computación, Escuela superior politécnica del litoral, Guayaquil-Ecuador. En este trabajo se apreciara el espectro de transmisión y recepción del estándar ISDB-Tb; curvas de BER vs SNR, sobre el entorno MATLAB/SIMULINK.
2. Simulador de un Sistema de Transmisión, Recepción y ecualización de DVB-

T en Simulink realizado por Isaac Castro Mateos, bajo la tutoría de José Ramón Cerquides Bueno. España. En este trabajo el autor realiza un estudio del sistema de transmisión y recepción DVB-T con bloques de simulink para distintas perturbaciones.

3. Evaluación de prestaciones (rendimiento e interferencias) del estándar de Televisión Digital Terrestre ISDB-Tb, mediante simulaciones y mediciones. Realizado por Manuel Fuentes Muela, en la Universidad Politécnica de Valencia. España. En este trabajo el autor hace una descripción del estándar ISDB-Tb y realiza evaluaciones del estándar para determinadas modulaciones y tasas binarias, estudiando la potencia necesaria para demodular la señal y su relación señal a ruido.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta computarizada, para simular ensayos de laboratorio en la medición de parámetros de transmisión y recepción para televisión digital terrestre, bajo el estándar ISDB-T.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Describir el proceso de transmisión y recepción de la televisión digital, bajo el estándar ISDB-T.
2. Identificar y caracterizar los métodos y procedimientos para medir parámetros de Transmisión, tales como: Frecuencia transmitida, Desviación en frecuencia, Ancho de banda ocupado, Máscara Espectral, Espurias, Potencia transmitida, Frecuencia de muestreo IFFT, así como parámetros de recep-

ción tales como: Respuesta de amplitud en frecuencias, Tasa de bit errados (BER), Tasa de error de modulación (MER), Diagrama de constelación, Multitrayecto, Intermodulación, Ruido de fase, BER vs. Portadora, MER vs. Portadora, BER vs. CNR, Ruido marginal, Ruido Gaussiano vs. BER, Característica de retardo de grupo, Característica de retardo.

3. Desarrollar mediante el software de simulación los bloques e interfaces amigables y de fácil entendimiento para el usuario, usando la herramienta Matlab, o simulink, que permitan generar las perturbaciones y medir los parámetros.
4. Validar la herramienta desarrollada comparando los valores de Potencia, MER, BER, y Ruido Marginal obtenidos en las simulaciones con los valores medidos experimentalmente.
5. Elaborar un manual de procedimientos para desarrollar los ensayos en el laboratorio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. La Televisión Digital

“La Televisión Digital es un sistema de televisión mucho mas avanzado que el convencional, con capacidad para recibir sonidos, textos e imágenes a gran velocidad, comprimidos mediante el sistema digital, que tiene la virtud de ocupar muy poco espacio...” [1]

2.1.1. La Television Digital en Venezuela

En Venezuela se está implementando progresivamente la televisión digital bajo el estándar ISDB-Tb, que es una variante del estándar creado en Japón con mejoras en la compresión de video realizadas por el grupo MPEG y aplicadas por Brasil. Este estándar de Televisión Digital permite la segmentación del ancho de banda, por lo que en un mismo canal de 6 MHz se pueden transmitir hasta 5 subcanales con definición estándar y un canal para dispositivos móviles.

Esta técnica de segmentación se conoce como BST-OFDM y permite asignar los segmentos según sea la resolución de video a transmitir. En la Tabla 2.1 se muestra la distribución de los subcanales dentro de los canales destinados para la televisión digital hasta la fecha en Venezuela.

Tabla 2.1: Distribución de Canales en Venezuela

Canal y Frecuencia	Subcanal	Nombre
22 (521 MHz)	1	VTV
	2	123TV
	3	Colombeia
	4	Venevisión
	5	Alba TV
	6	VTV Móvil
23 (527 MHz)	1	ViVe
	2	Telesur
	3	Meridiano Televisión
	4	Televen
	5	ConCiencia
	6	Telesur Móvil
24 (533 MHz)	1	TVes
	2	ANTV
	3	Corazón Llanero TV
	4	TVes Móvil
25 (539 MHz)	1	FANBTV
	2	CCTV
	3	ÁVILA TV
	4	PDVSA TV
	5	Ávila TV movil
	6	Russia Today

2.2. Modelo de sistema de radiodifusión digital terrestre de la ITU

En la figura 2.1 se muestra el modelo de radiodifusión digital definido por Union Internacional de Telecomunicaciones (ITU). Esta establece cuatro etapas que se describen a continuación.

2.2.1. Codificación de fuente

Se refiere a los métodos de compresión de datos y protección contra errores, estas técnicas son necesarias para la aplicación a los flujos de datos digitales de video, audio y auxiliares. Este bloque tiene como objetivo reducir la cantidad de bits

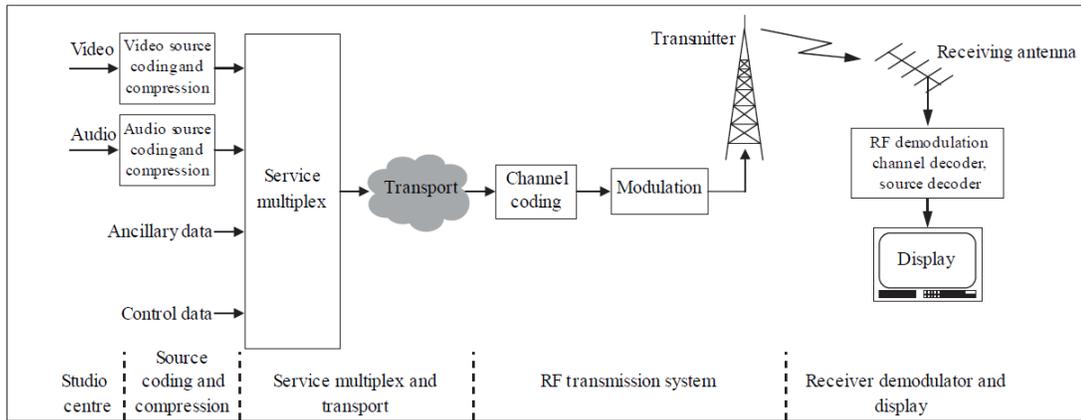


Figura 2.1: Modelo DTTB ITU

Fuente: [2]

necesarios para representar de forma aceptable los servicios de televisión.

2.2.2. Multiplexaje y transporte de Servicios

Se encarga de dividir y multiplexar los flujos de video, audio y datos auxiliares en paquetes de información con identificadores únicos, para obtener a la salida un flujo de datos digitales únicos. Este mecanismo debe garantizar interoperabilidad entre los medios digitales tales como la Radiodifusión, distribución por cable, distribución por satélite, y almacenamiento.

2.2.3. Sistema de Transmisión RF

Se refiere a la etapa de codificación de canal y al proceso de modulación. En el proceso de codificación de canal se toma el flujo de datos digitales y se le agrega información en redundancia para que el receptor pueda reconstruir la señal a pesar de las perturbaciones ocasionadas por el canal de comunicaciones. En la etapa de modulación o capa física se adapta el flujo de datos para su transmisión eficiente a través del canal de comunicación, es decir se ajusta la potencia necesaria para cubrir una zona específica, entre otros parámetros para la transmisión.

2.2.4. Factores de Planificación y características del receptor

Se refiere a las estrategias necesarias para la implementación de los servicios de televisión Digital Terrestre, tomando en cuenta la infraestructura de los servicios existentes de radiodifusión de televisión analógica, la interferencia entre los servicios de telecomunicaciones dentro de la misma banda y demás limitaciones que se presenten en el extremo receptor.

2.3. Descripción del proceso de Transmisión del estándar ISDB-T

En esta parte se analizará en detalle los bloques que integran el sistema de transmisión del estándar ISDB-T.

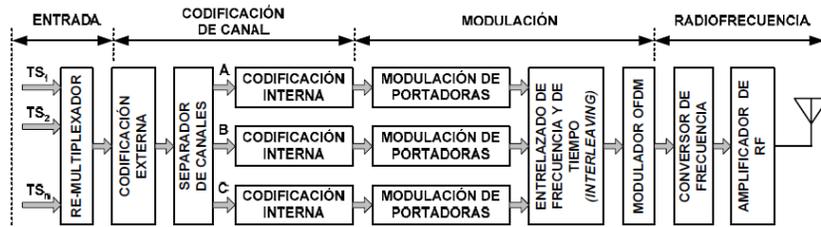


Figura 2.2: Sistema de Transmisión

Fuente: [3]

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques del sistema de transmisión utilizado por el estándar ISDB-T, donde se puede distinguir claramente las siguientes cuatro secciones:

2.3.1. Entrada

En esta sección se forma el paquete que será transmitido, este paquete es formado por el flujo de transporte de distintas fuentes que luego son multiplexadas para continuar a la siguiente sección como un paquete único. En esta etapa se aplican

métodos de compresión de datos, aprovechando la redundancia espacial de una imagen, la correlación entre puntos cercanos, así como también la redundancia temporal entre imágenes sucesivas.

Flujo de Transporte (TS) MPEG-2

En la figura 2.3 se muestra el proceso de formación de un flujo de transporte para ISDB-T, la señal de video es codificada y comprimida, al igual que la señal de audio, luego del proceso de codificación y compresión se forma el flujo elemental (ES), el cual en la siguiente etapa es segmentado en paquetes de longitud variable dando origen al flujo elemental de programa (PES), hasta esta etapa los paquetes de video, audio y datos se encuentran separados en flujos elementales de programa distintos, es por ello que se procesa por un multiplexor para así formar el flujo de transporte (TS). Este mismo procedimiento se realiza para formar la trama (TS) de diferentes programas y luego ser remultiplexadas para formar una trama TS única que pasara a la siguiente sección.

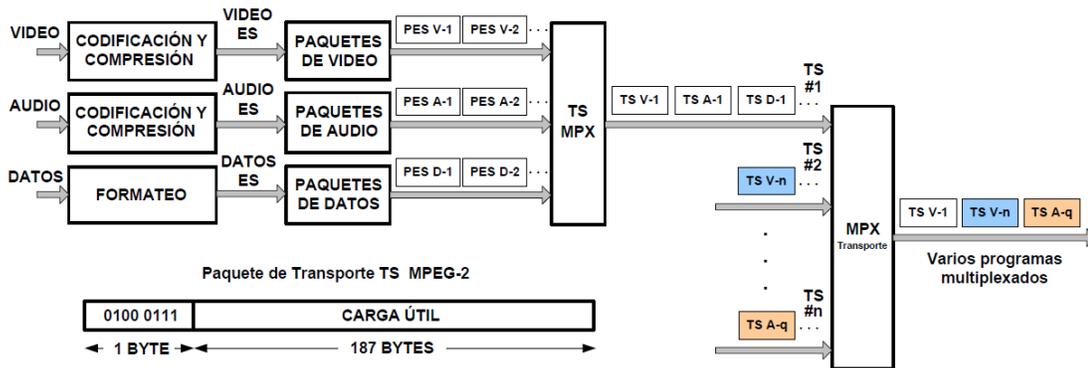


Figura 2.3: Paquetes de Transporte TS y multiplexación MPEG-2

Fuente: [3]

Re-multiplexador

El re-multiplexador combina los TS de entrada entregando a la salida un flujo binario único llamado BTS, el cual cumple con las siguientes características:

- Agrega 16 bytes nulos a los paquetes TS
- Forma nuevos paquetes llamados TSP, de longitud 204 bytes
- El flujo es sincrónico y tiene una tasa constante de 32,5079 Mbps
- Posiciona y dispone los paquetes TSP posibilitando la transmisión jerárquica y la recepción parcial
- Inserta una determinada cantidad de TSP nulos para poder mantener la velocidad binaria constante.

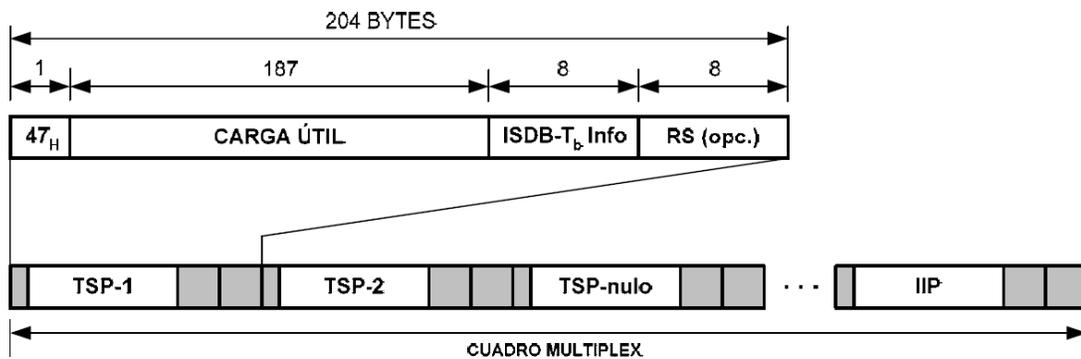


Figura 2.4: Estructura de los paquetes TSP a nivel de BTS

Fuente: [3]

En la figura 2.4 se muestra la estructura del paquete BTS, los espacios en grises resultan de la asignación de la información necesaria por parte del re-multiplexador para la posterior separación en canales de los distintos paquetes TSP.

2.3.2. Codificación de canal

En la Transmisión digital un bit errado puede tergiversar dramáticamente el contenido, de ahí la importancia de recurrir a métodos capaces de detectar y corregir estos errores. Los errores suelen ocurrir de dos formas: en bits aislados o en bits contiguos, mejor conocidos como en ráfagas. Los primeros son los más fáciles de corregir, mientras que los errores en ráfagas pueden evitarse barajando los bits antes de su transmisión, transformándose estos errores en aislados [4].

Los bloques de esta etapa son los encargados de agregar protección a los datos que serán transmitidos posteriormente, es por esta razón, que en algunos casos se le llama modulación COFDM (OFDM codificado), también cumple funciones como ajuste de retardo y dispersión de energía. Con la codificación de canal, agregamos de forma controlada bits a las palabras de información, con el fin de utilizar la redundancia para detectar y corregir errores de transmisión. Estas medidas, se conocen como *Forward Error Correction* (FEC) y constituyen la esencia de la codificación de canal.

En la figura 2.5 se observa el esquema de bloques completo de la etapa de codificación de canal.

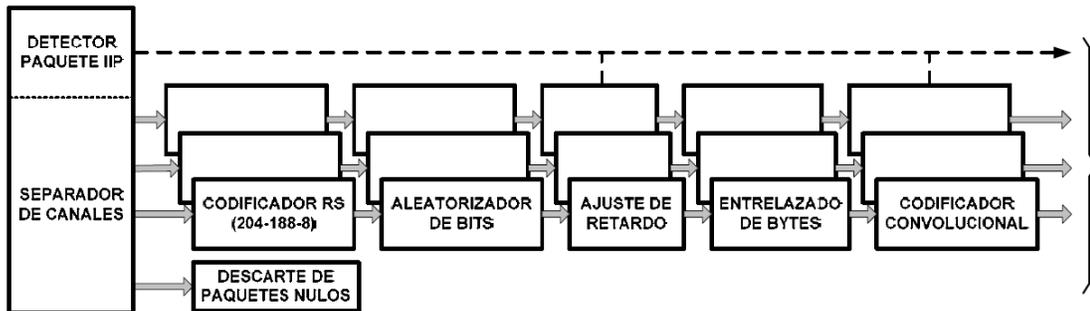


Figura 2.5: Codificación de canal

Fuente: [3]

Separador de canales

En base a la información suministrada por el campo ISDB-T info del paquete BTS, el separador de canales procede a asignar cada paquete TSP a la capa jerárquica correspondiente.

Codificador Reed-Solomon

Para poder corregir la mayor parte de los errores introducidos por el canal de transmisión, luego que los paquetes TSP son separados y asignados a la capa jerárquica correspondiente, la información contenida en los 16 Bytes que agregó el re-multiplexador no es necesaria, entonces estos 16 bytes son sustituidos por 16 nuevos bytes que contienen información de paridad reed-solomon.

El Codificador reed-solomon toma los 188 bytes de datos del paquete TSP y los manipula matemáticamente como un bloque, creando así una “etiqueta de identificación digital” del contenido del bloque. Esta etiqueta tiene un tamaño de 16 Bytes que el codificador agrega al paquete TSP al final. A estos bytes se les conoce como **“bytes de paridad reed-solomon”**.

El receptor una vez recibido los 188 bytes de datos del paquete TSP, los compara con la etiqueta de identificación digital, para verificar la validez de los datos recibidos. Si se detectan errores, el receptor determina que la etiqueta no concuerda y genera otro paquete con mayor probabilidad.

Aleatorizador de bits

Este bloque se encarga de transformar la señal de entrada en una secuencia cuasi-aleatoria, para evitar largas secuencias de ceros o de unos, y así asegurar la dispersión de energía del espectro radiado, para que el canal radioeléctrico

sea utilizado con la máxima eficiencia posible. De lo contrario si existe un flujo repetitivo de ceros o de unos, se concentra la energía en ciertos puntos del espectro, siendo estos los puntos con mayor probabilidad de intermodulación.

En la figura 2.6 se muestra el esquema correspondiente al circuito utilizado para obtener una secuencia binaria pseudo-aleatoria (PRBS), que se forma a partir de la operación lógica OR exclusiva entre el bit de entrada y el polinomio:

$$G(x) = x^{15} + x^{14} + 1$$

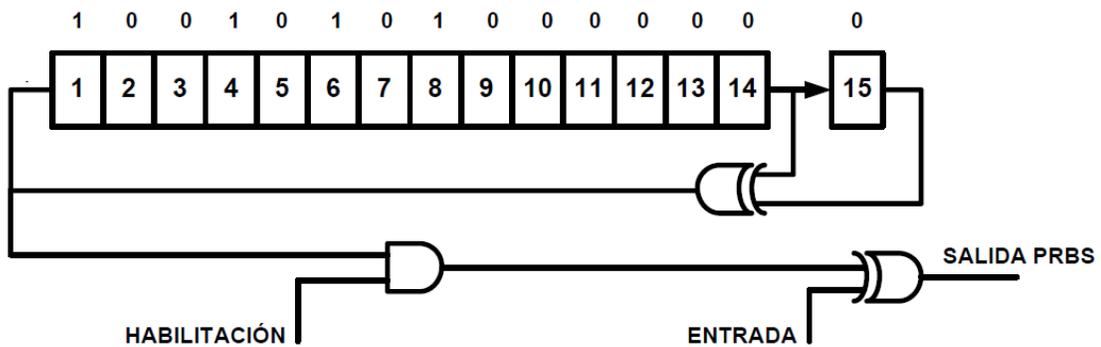


Figura 2.6: Generador de secuencia PRBS

Fuente: [3]

Este circuito se utiliza tanto para aleatorizar la secuencia de entrada como para recuperar el orden de la secuencia en el receptor.

Entrelazado de bytes

El entrelazado o barajado es una técnica que consiste en convertir los errores agrupados en aislados.

Este bloque se utiliza para dispersar los errores de ráfagas. Mediante esta técnica se permuta la secuencia de bytes de entrada antes de ser transmitida por un canal propenso a errores. De esta forma los errores en ráfaga que ocurran, una

vez desentrelazado serán distribuidos en el tiempo, no perdiendo así toda la información del bloque.

En ISDB-T se aplica el entrelazado de bytes en cada capa jerárquica, con el fin de incrementar la eficiencia de la codificación Reed-Solomon frente a los errores en ráfagas, distribuyéndolos en el tiempo de forma casi aleatoria. El entrelazador utilizado bajo este estándar se muestra en la figura 2.7.

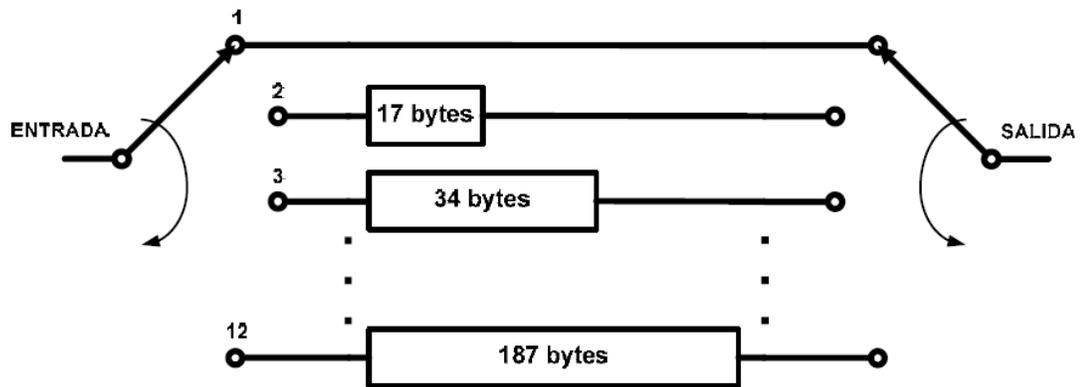


Figura 2.7: Entrelazador de bytes para ISDB-T ($A=17$ y $k=12$)

Fuente: [3]

El entrelazador tiene k líneas paralelas, las cuales son seleccionadas mediante dos llaves selectoras que operan sincrónicamente. Cada una de las líneas contiene A celdas de almacenamiento, excepto la primera que es simplemente una conexión directa entre la entrada y la salida. El tamaño de cada celda es de un byte, entonces la primera línea contiene A celdas, la segunda línea $2A$ celdas, y así sucesivamente hasta $(k-1)A$ celdas. La llave de salida extrae un byte por vez, cada vez que entra uno en la entrada, y cambian sincrónicamente hacia la próxima línea.

Ajuste de Retardo

El ajuste de retardo permite la ecualización de los tiempos de tránsito binario de cada capa jerárquica. La ecualización necesaria se ajusta únicamente del lado del

transmisor y debe tener un valor adecuado para las configuraciones adoptadas, de tal forma que todos los retardos, incluyendo el introducido por el entrelazador de bytes, se corresponda con un múltiplo entero de duración de un cuadro OFDM. El ajuste de retardo es el tiempo requerido para el procesamiento de las señales de las distintas capas.

Tabla 2.2: Ajuste del retardo D_A en número de TSP

Modulación	K_I	Ajuste de retardo D_A		
		Modo 1	Modo 2	Modo 3
QPSK/DQPSK ($b_p=2$)	1/2	$12 \times N_C - 11$	$24 \times N_C - 11$	$48 \times N_C - 11$
	2/3	$16 \times N_C - 11$	$32 \times N_C - 11$	$64 \times N_C - 11$
	3/4	$18 \times N_C - 11$	$36 \times N_C - 11$	$72 \times N_C - 11$
	5/6	$20 \times N_C - 11$	$40 \times N_C - 11$	$80 \times N_C - 11$
	7/8	$21 \times N_C - 11$	$42 \times N_C - 11$	$84 \times N_C - 11$
16-QAM ($b_p=4$)	1/2	$24 \times N_C - 11$	$48 \times N_C - 11$	$96 \times N_C - 11$
	2/3	$32 \times N_C - 11$	$64 \times N_C - 11$	$128 \times N_C - 11$
	3/4	$36 \times N_C - 11$	$72 \times N_C - 11$	$144 \times N_C - 11$
	5/6	$40 \times N_C - 11$	$80 \times N_C - 11$	$160 \times N_C - 11$
	7/8	$42 \times N_C - 11$	$84 \times N_C - 11$	$168 \times N_C - 11$
64-QAM ($b_p=6$)	1/2	$36 \times N_C - 11$	$72 \times N_C - 11$	$144 \times N_C - 11$
	2/3	$48 \times N_C - 11$	$96 \times N_C - 11$	$192 \times N_C - 11$
	3/4	$54 \times N_C - 11$	$108 \times N_C - 11$	$216 \times N_C - 11$
	5/6	$60 \times N_C - 11$	$120 \times N_C - 11$	$240 \times N_C - 11$
	7/8	$63 \times N_C - 11$	$126 \times N_C - 11$	$252 \times N_C - 11$

Donde N_C corresponde con el número de segmentos por capa y K_I es la tasa de código.

Codificador Convolutional

Los códigos convolucionales no son códigos de bloque, puesto que no estructuran las palabras codificadas en bloques de bits, sino que actúan de manera continua sobre el flujo de bits de información de entrada.

La diferencia substancial respecto a los códigos bloque es el método de codificación de secuencias continuas en lugar de bloques. Existen varios métodos de codificación de los códigos convolucionales, aunque una de las más usuales es la basada en registros de desplazamiento conectados con sumadores base 2 en los que se realiza la codificación. Por cada bit que entra en el codificador se obtienen n bits codificados.

La decodificación de un código convolutional consiste en escoger la secuencia más probable entre todas las posibles. Existen diversos algoritmos que permiten la decodificación de este tipo de códigos; la decodificación óptima se realiza mediante el algoritmo de Viterbi.

2.3.3. Modulación

Una vez efectuadas todas las operaciones que constituyen la codificación de fuente y la codificación de canal, se tiene un flujo de datos listo para que module a una portadora y se transmita hacia los usuarios. La etapa de Modulación para la transmisión de televisión digital bajo el estándar ISDB-T está basado en OFDM, el cual permite un sistema eficiente y robusto para el transporte de las señales digitales, así como también una mejor utilización del espacio radioeléctrico. El esquema completo de Modulación se muestra en la figura 2.8.

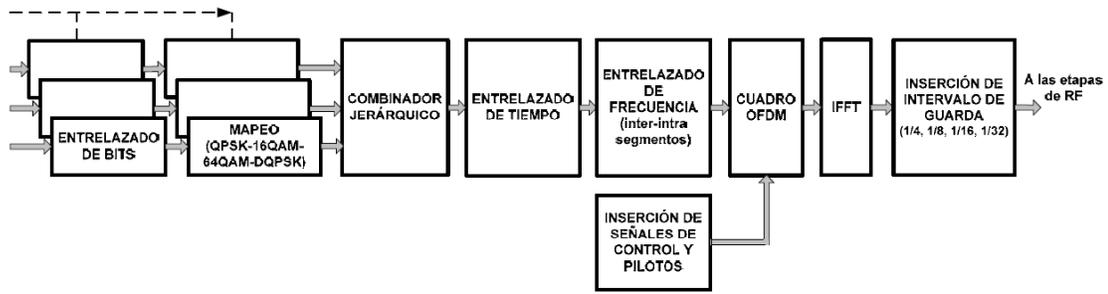


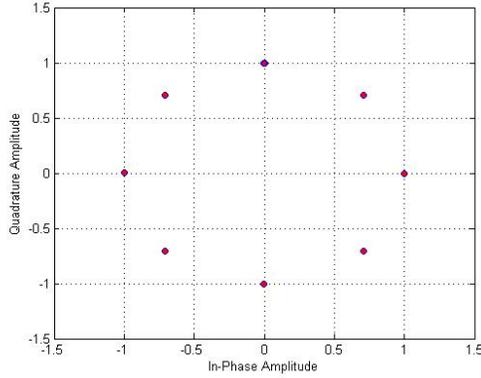
Figura 2.8: Modulación

Fuente: [3]

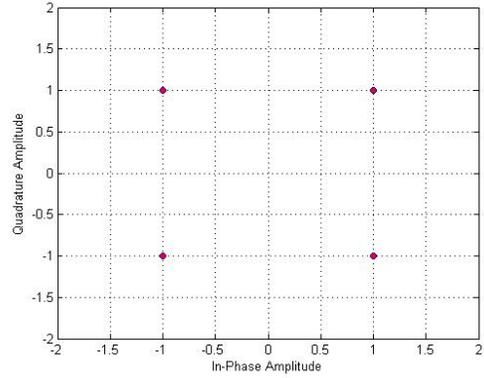
Entrelazado de Bit y Mapeo

Para la modulación de portadoras se debe llevar a cabo primeramente un proceso de entrelazado de bits y mapeo de la señal de entrada, según el esquema de modulación digital especificado para cada capa jerárquica.

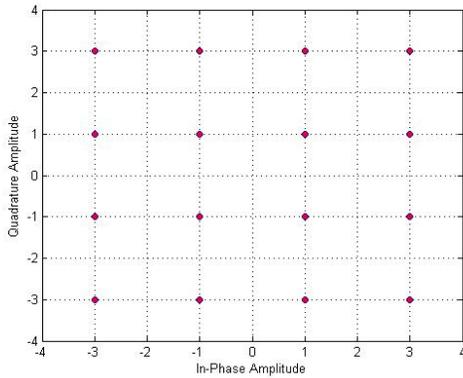
Cada portadora utilizara entre dos y seis bits, según sea el tipo de modulación especificado, en un intervalo de tiempo. El sistema Japonés ISDB-T utiliza diferentes tipos de modulaciones según sea el entrelazado y el mapeo, entonces según sea el número de bits empleados se tiene las modulaciones: QPSK, DQPSK, 16-QAM, y 64-QAM.



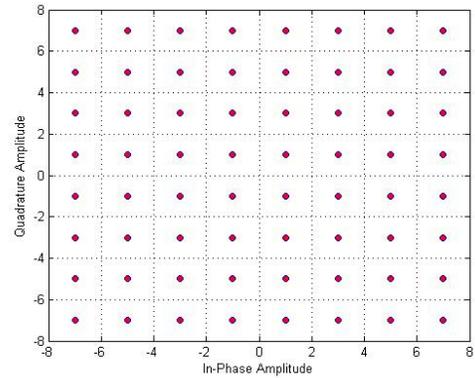
(a) DQPSK



(b) QPSK



(c) 16-QAM



(d) 64-QAM

Figura 2.9: Esquemas de modulación utilizados por el estándar ISDB-T

Fuente: Propia

2.3.4. Radiofrecuencia

Esta etapa se refiere a los Factores de Planificación y características del receptor, según el Modelo DTTB ITU que se muestra en la figura 2.1, establece las estrategias necesarias para la implementación de los servicios de Televisión Digital Terrestre, tomando en cuenta la infraestructura de los servicios existentes de radiodifusión de televisión analógica, la interferencia entre los servicios de telecomunicaciones dentro de la misma banda y demás limitaciones que se presenten en el extremo receptor.

Conversor de Frecuencia

Este bloque se encarga de ajustar la frecuencia de la señal a la asignada por el ente regulador de las Telecomunicaciones, en este caso la Comisión Nacional de Telecomunicaciones (Conatel).

Amplificador de RF

Este bloque se encarga de ajustar el nivel de potencia de la señal de salida, este va a depender del área que se desea cubrir, es decir, mientras mayor sea el nivel de potencia mayor será el área cubierta.

2.4. Descripción del proceso de Recepción del estándar ISDB-T

En la figura 2.10 se observa el diagrama de bloques del sistema de recepción ISDB-T, a continuación se explica brevemente el proceso que sigue la señal recibida para lograr ser decodificada correctamente.

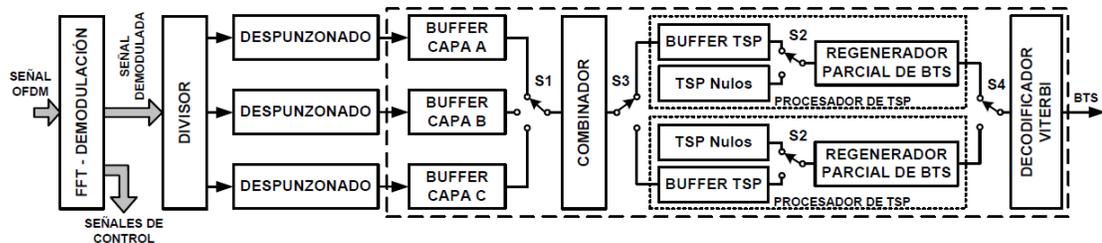


Figura 2.10: Sistema de Recepción ISDB-T

Fuente: [5]

En la Figura 2.11 se muestra la estructura de la señal demodulada correspondiente a un símbolo OFDM. Esta señal ingresa al divisor jerárquico y a partir del conocimiento de la configuración de capas y de un sencillo proceso de conteo de muestras, el divisor es capaz de encaminar los datos hacia las vías correspondientes.

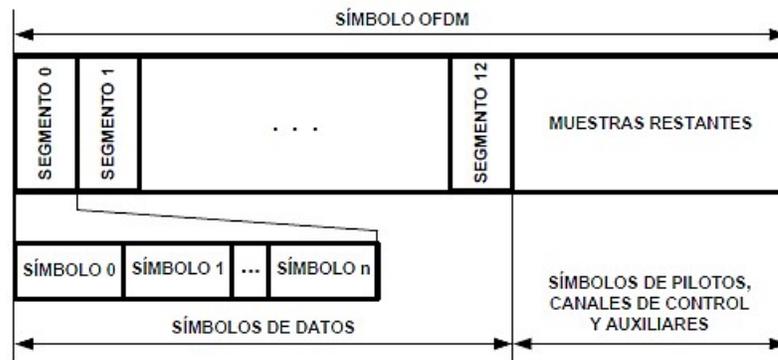


Figura 2.11: Estructura de la señal demodulada por el receptor

Fuente: [5]

Una vez que los bits de datos son encaminados por el divisor, las secuencias son sometidas al despunzonado, donde se revierte el proceso realizado en el transmisor (punzonado).

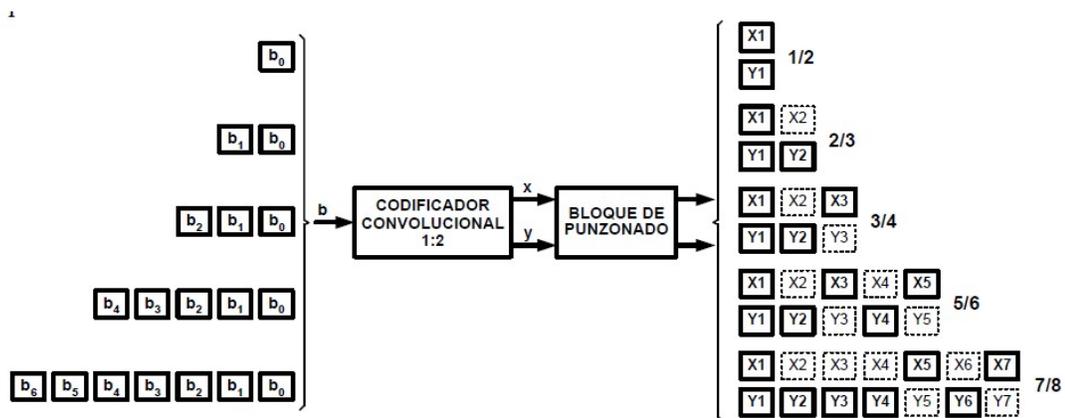


Figura 2.12: Punzonado de los bits entregados por el codificador convolucional

Fuente: [5]

La Figura 2.12 ayuda a comprender el concepto de punzonado: el codificador convolucional genera en su salida dos bits codificados por cada bit de datos que ingresa, es decir una relación fija 1 a 2. Sin embargo, para poder tener cierto margen de control sobre la tasa de transmisión de datos, el bloque de punzonado permite modificar dicha relación, eliminando entre uno y seis de los bits generados

por el codificador.

Durante el proceso de despunzonado se completan las secuencias binarias, rellenando los espacios correspondientes a los bits que fueron eliminados en la transmisión. Por lo tanto, al retornar a la relación original $\frac{1}{2}$, se deduce que si un TSP sin codificar contiene 1632 bits, luego de la codificación convolucional un TSP codificado tendrá 3264 bits.

Mientras se realiza el proceso de despunzonado, los bits son almacenados en un buffer por cada capa jerárquica hasta que alguno de estos alcance los 3264 bits, momento en que la llave S1 selecciona el buffer jerárquico que alcanzó su capacidad, y estos bits son transferidos de manera instantánea, a través de la llave S3, al buffer de TSP.

El regenerador parcial de BTS comprueba la existencia de datos en el buffer de TSP. Si encuentra almacenado un paquete de datos, la llave S2 selecciona el buffer y encamina el TSP hacia el regenerador parcial de BTS. En caso de no encontrar información almacenada o bien si esta aún no alcanzó los 3264 bits, el regenerador conmuta S2 a la posición de paquete nulo, creándose de este modo una sucesión de paquetes consecutivos en donde no existirán intervalos de tiempo vacíos.

La llave S3 se utiliza para seleccionar alternativamente cada una de las unidades regeneradoras de TSP, introduciendo la señal entregada por el combinador y, finalmente la llave S4 permite encaminar los flujos regenerados hacia el decodificador Viterbi, donde los paquetes recuperan la carga binaria original de 1632 bits, luego de realizada la corrección de errores, lo que permite reconstruir correctamente el flujo recibido.

2.5. Modulación Multiportadora y OFDM

En un sistema clásico de datos en paralelo, la banda de frecuencia de señal total se divide en N subcanales de frecuencia no superpuestos. Cada subcanal se modula con un Símbolo separado, y luego los N subcanales son multiplexados en frecuencia. Con esto se garantiza que el desvanecimiento selectivo de frecuencia no afecte a la totalidad de la información ya que esta distribuida en varias subportadoras.

En principio parece conveniente evitar la superposición espectral de canales para eliminar la interferencia entre canales. Sin embargo, esto conduce a un uso ineficiente del espectro disponible. En vista de lo antes mencionado las ideas propuestas a mediados de la década de 1960 fueron el uso de transmisión de datos en paralelo y la multiplexación por división en frecuencia (FDM) con subcanales superpuestos.

Al utilizar la técnica de superposición de múltiples portadoras, se logra ahorrar un 50 % de ancho de banda, sin embargo, para realizar esta técnica es necesario reducir la separación entre portadoras, haciéndose más complejo la recepción de la señal.

En un sistema FDM normal, muchas portadoras están espaciadas de tal manera que las señales pueden ser recibidas usando Filtros convencionales y demoduladores. En tales receptores, bandas de guarda se introducen entre las diferentes portadoras y en el dominio de la frecuencia, lo que resulta en una disminución de la eficiencia del espectro.

Sin embargo, es posible disponer las portadoras en una señal de modo que las bandas laterales de las portadoras individuales se solapen y las señales se sigan recibiendo sin interferencia adyacente de la portadora contigua. Para ello las portadoras deben ser matemáticamente ortogonales entre sí. Esto es lo que se conoce como Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).

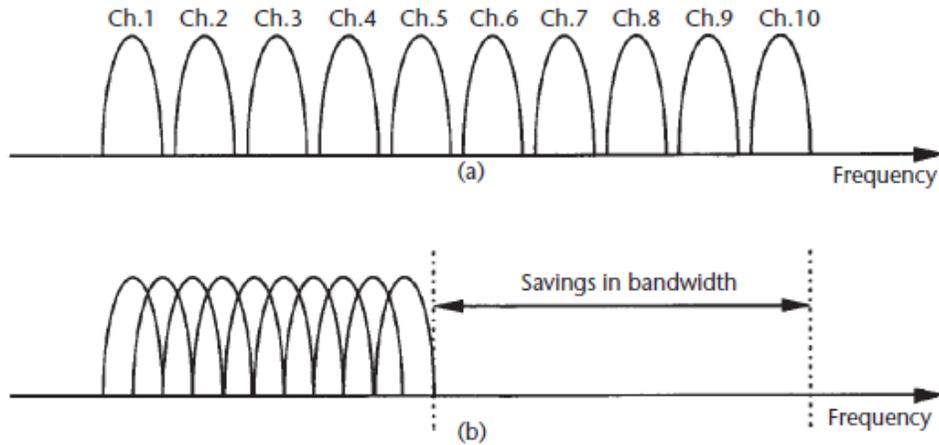


Figura 2.13: (a) Técnica de Modulación multiportadoras convencional, y (b) técnica de Modulación multiportadoras ortogonales

Fuente: [6]

Para lograr que las portadoras sean linealmente independientes (es decir, ortogonales) la separación entre portadoras debe ser un múltiplo del inverso de la duración de un símbolo OFDM es decir $\frac{1}{T}$.

OFDM es un caso especial de transmisión multiportadora, en el que un flujo de datos se transmite a través de varias subportadoras superpuestas. Una de las principales razones por la cuales OFDM se ha venido utilizando cada vez más es su robustez contra el desvanecimiento selectivo en frecuencia o interferencia de banda estrecha.

2.6. Canales Utilizados

En esta sección se explican los canales que serán utilizados posteriormente para la simulación.

Se comenzará hablando del modelo de canal Gaussiano, modelo que únicamente añade ruido por el hecho de atravesar un medio radioeléctrico. Se continuará con el modelo Rice, modelo característico de entornos rurales y espacios abiertos donde

en todo momento existe visión directa entre transmisor y receptor.

2.6.1. Canal Gaussiano (AWGN)

El canal Gaussiano o *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) es un modelo de canal, incluido en las librerías de Simulink, que añade a la comunicación únicamente ruido blanco con una distribución de probabilidad de Gauss. Este modelo no toma en cuenta el desvanecimiento, la selectividad en frecuencia, la interferencia o la dispersión no lineal. Sin embargo, produce modelos matemáticos simples y manejables que son útiles para comprender el comportamiento del sistema. A pesar de ser simplificado es muy útil, debido a que el ruido es la mayor fuente de inconvenientes en los sistemas de comunicaciones.

Este bloque permite ajustar los siguientes parámetros:

Initial seed: El número inicial aleatorio para iniciar el generador de ruido gaussiano complejo.

Mode: El modo en que se especifica la varianza del ruido.

E_b/N_0 (dB): La proporción de la energía de bit por símbolo por densidad espectral de potencia de ruido.

E_s/N_0 (dB): La proporción de la energía de señal por símbolo por densidad espectral de potencia de ruido.

SNR (dB): La proporción de potencia de señal sobre potencia de ruido.

Input signal power: La potencia media cuadrada de la entrada de símbolos o muestras, en watts.

Symbol period (s): La duración de símbolos en el canal.

2.6.2. Canal Rice

Es un modelo de canal que también está incluido en las librerías de Simulink. Éste toma en cuenta la interferencia multicamino, generando la cancelación parcial de una señal de radio por sí misma.

El desvanecimiento ocurre cuando uno de los caminos, típicamente una señal con visión directa, es mucho más fuerte que el resto. En este tipo de canal, la ganancia en amplitud se caracteriza por una distribución Rice.

La distribución Rice es la siguiente:

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + K^2}{2\sigma^2}\right\} I_0\left\{\frac{rK}{\sigma^2}\right\} \quad (2.1)$$

I_0 : función modificada de Bessel de primera clase y orden 0.

K : relación entre la potencia del camino directo y la potencia del resto de los caminos. Para un canal Rician corresponden valores entre 1 y 10. Para un valor de cero corresponden a un canal Rayleigh y para valores de K muy grandes se asemeja a un canal AWGN.

2.7. Métodos y procedimientos para medir parámetros de transmisión y recepción en ISDB-T

2.7.1. Parámetros de Transmisión

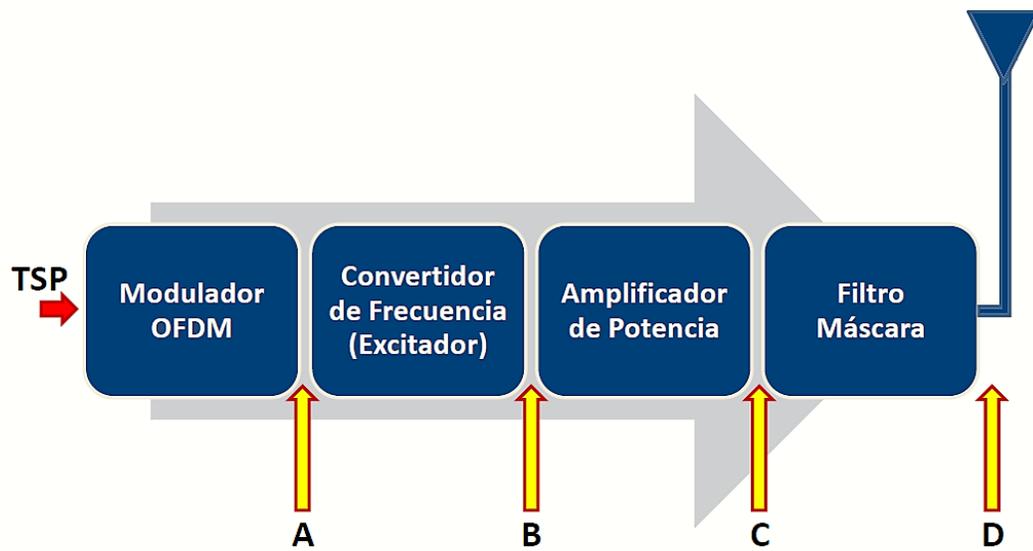


Figura 2.14: Puntos de medición en estación transmisora

Frecuencia Transmitida

Ref: [7]

Como ya se mencionó en la sección 2.3.3 el estándar ISDB-T utiliza la modulación OFDM para hacer un mejor uso del espectro utilizado. En OFDM la frecuencia transmitida esta representada por la frecuencia de la portadora central del total de las portadoras.

Para realizar la medición de este parámetro se utiliza un analizador de espectro que tenga un contador integrado y al menos un filtro de resolución de 300 Hz, en donde según sea el modo de transmisión 1, 2 o 3, se ubica el número de la portadora central para así medir la frecuencia de ésta, la cual va a corresponder

con la frecuencia OFDM transmitida. Esta medición se realiza en el punto D según la figura 2.14.

El número de portadora por cada uno de los modos se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Modos de Transmisión ISDB-T

Modo	Número de portadora central	Número de Portadoras
1 (2k)	702	1405
2 (4k)	1404	2809
3 (8k)	2808	5617

Desviación en Frecuencia

Ref: [7]

La desviación en frecuencia se calcula indirectamente a partir de la medición de la frecuencia transmitida, como se mencionó en la sección anterior. La ecuación que describe la desviación en frecuencia viene dada por 2.2:

$$Desv. Frecuencia = Frecuencia Medida - Frecuencia Específica \quad (2.2)$$

Ancho de banda

Ref: [7]

El sistema OFDM requiere múltiples portadoras, poco espacio entre las portadoras y una gran longitud de símbolos efectiva para mejorar su capacidad. En esta medición se seleccionará cuidadosamente la anchura de banda de resolución y la anchura de banda de la señal vídeo. La configuración de prueba se muestra en la figura 2.15.

El procedimiento de medición es el siguiente:

- Configurar el equipo de medición de acuerdo con la figura 2.15.
- Fijar el esquema PN($2^{23} - 1$) del generador de pseudoruido dentro del modulador OFDM.
- Fijar el nivel de señal y la frecuencia del convertidor ascendente.
- Confirmar que todos los niveles de las señales de entrada y de salida son apropiados.
- Medir la anchura de banda de la portadora OFDM con el analizador de espectro.

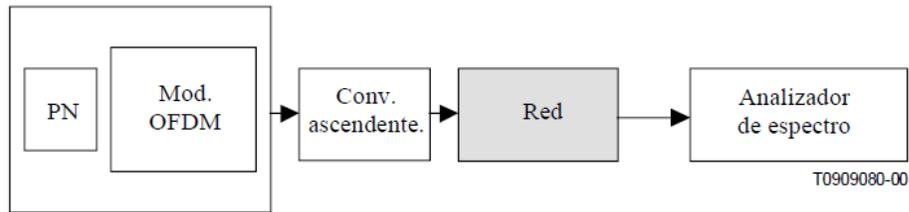


Figura 2.15: Medición de ancho de banda de la portadora

El ancho de banda de la señal OFDM viene dado por la diferencia entre las frecuencias de sus portadoras mas externas, según se muestra en la ecuación 2.3. Esta medición se realiza en el punto D según la figura 2.14.

$$AB = F_H - F_L \quad (2.3)$$

F_H : Frecuencia limite superior de la señal

F_L : Frecuencia limite inferior de la señal

Máscara Espectral

Ref: [8]

El nivel del espectro fuera de la banda asignada para la transmisión de la señal de televisión, debe ser obligatoriamente reducido aplicando el filtrado adecuado.

La Figura 2.16 y la Tabla 2.4 indican las atenuaciones mínimas de las emisiones en relación con la potencia media del transmisor, especificadas en función del alejamiento en frecuencia con la portadora central de la señal digital.

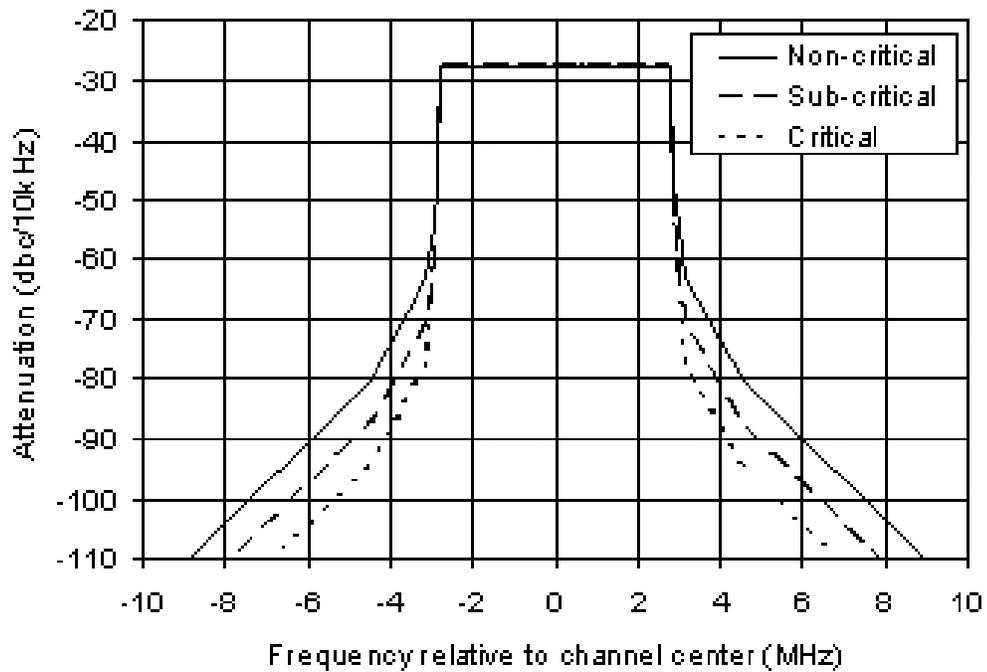


Figura 2.16: Máscara espectral definida por el estándar ISDB-T

Tabla 2.4: Especificación de Máscaras de Espectro de Transmisión

Separación de la Portadora Central MHz	Atenuación mínima en relación a la potencia media		
	Máscara No-crítica dB	Máscara Subcrítica dB	Máscara Crítica dB
-15	83,0	90,0	97,0
-9	83,0	90,0	97,0
-4,5	53,0	60,0	67,0
-3,15	36,0	43,0	50,0
-3,00	27,0	34,0	34,0
-2,86	20,0	20,0	20,0
-2,79	0,0	0,0	0,0
2,79	0,0	0,0	0,0
2,86	20,0	20,0	20,0
3,00	27,0	34,0	34,0
3,15	36,0	43,0	50,0
4,5	53,0	60,0	67,0
9	83,0	90,0	97,0
15	83,0	90,0	97,0

La aplicación de máscaras debe ser obligatoria en consideración a la clase y sub-clase de la estación. Según ABNT 15601 [8] las estaciones digitales son clasificadas en clase especial, clase A, clase B y clase C.

Tabla 2.5: Potencia máxima de cada clase

Clases	Maxima Potencia (kW)	
	VHF alto	UHF
Especial	16	80
A	1,6	8
B	0,16	0,8
C	0,016	0,08

Los criterios para implementar la máscara no crítica, subcrítica y crítica se especifican en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Criterio para la aplicación de máscaras

Clase de estación digital	A,B o C				Especial		
Distancia de la estación de canal adyacente instalado en la misma localidad	< 400 m		> 400 m		Ausencia de canal adyacente previsto o instalado en la misma localidad	Existencia de canal adyacente previsto o instalado en la misma localidad	Ausencia de canal adyacente previsto o instalado en la misma localidad
Tipo de modulación de canal adyacente previsto o instalado en la misma localidad	Analógica	Digital	Analógica	Digital			
$P_{digital} < P_{adyacente} + 3 \text{ dB}$	Critica	Subcritica	Critica		No Critica	Critica	
$P_{digital} > P_{adyacente} + 3 \text{ dB}$		Critica					

La medida de la máscara debe realizarse a la salida del transmisor (punto D. Figura 2.14) para garantizar que la señal este dentro del rango de frecuencia correspondiente, para no causar interferencias con canales adyacentes.

Espurias

Las emisiones espurias se encuentran fuera del ancho de banda de señal permitido. Son causadas por armónicos, por emisiones interferentes, por Intermodulación o por la presencia de productos mixtos tras una conversión de frecuencia.

Estas emisiones reducen el rendimiento del sistema y pueden interferir en otros módulos del mismo sistema o superponerse a las señales enviadas por transmisores que funcionen en otras bandas de frecuencias.

La medición de espurias se realiza con un analizador de espectros para asegurarse que las mismas se encuentren dentro de los limites permitidos.

El punto de medición de este parámetro es a la salida del filtro de máscara (punto D. Figura 2.14) del sistema de transmisión. Se debe ajustar el ancho de banda de resolución (RBW) del analizador de espectro lo suficientemente bajo para detectar picos fuera de la banda de espectro. Seguidamente se comparan estos picos con el

nivel de ruido del canal para determinar si se trata de una emisión espuria o una componente del ruido. Si se trata de una emisión espuria se expresa en niveles de potencia, en conjunto con la frecuencia en la que se encuentra.

Potencia transmitida

Ref: [7]

OFDM es un sistema de multiportadoras en el cual cada portadora es modulada independientemente. Por tanto, en la medición de la potencia de la señal con un analizador de espectro, se debe seleccionar cuidadosamente su anchura de banda de resolución.

La potencia transmitida viene dada por la potencia media de la señal OFDM integrada en el ancho de banda correspondiente. Esta medición se realiza en el punto D según la figura 2.14.

La configuración de la prueba se muestra en la figura 2.17.

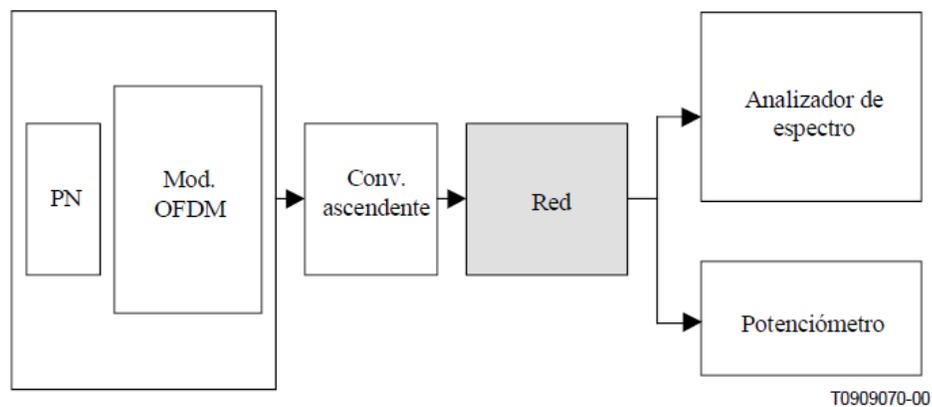


Figura 2.17: Medición del nivel de señal

El procedimiento de medición es el siguiente:

- Configurar el equipo de medición de acuerdo con la figura.
- Fijar el esquema PN($2^{23} - 1$) del generador de pseudoruido dentro del modulador OFDM.
- Fijar el nivel de señal y la frecuencia del convertidor ascendente.
- Confirmar que todos los niveles de las señales de entrada y de salida son apropiados.
- Medir el nivel de la señal OFDM con el analizador de espectro y el potenciómetro.

Frecuencia de Muestreo IFFT

El intervalo de separación entre portadoras es determinado por la frecuencia de muestreo de IFFT, esta a su vez se puede calcular como se muestra en la ecuación 2.4.

$$Frecuencia\ de\ Muestreo\ IFFT\ (F_s) = \frac{Número\ de\ Muestras\ IFFT}{Duración\ del\ símbolo\ útil} \quad (2.4)$$

Esta medición se realiza en el punto A según la figura 2.14.

2.7.2. Parámetros de Recepción

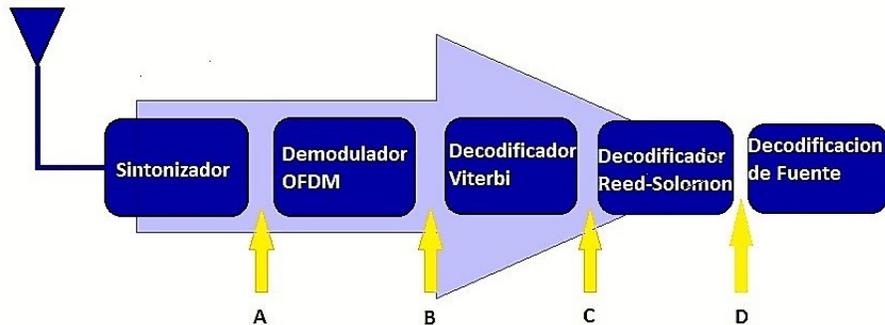


Figura 2.18: Puntos de medición en extremo receptor

Respuesta de Amplitud en Frecuencia

Ref: [7]

El método descrito se aplica a la medición de la respuesta en amplitud de sistemas de distribución en la gama de frecuencias de un canal entre dos puntos específicos dentro del sistema. No obstante, cuando las señales de entrada al sistema son demoduladas en banda de base y posteriormente moduladas en las frecuencias de la portadora del sistema, no se incluirá la respuesta de ningún demodulador ni modulador. Si es necesario incluir las características de estos elementos, se realizará una evaluación separada utilizando las técnicas de prueba aplicables a cada equipo.

Si el sistema contiene un equipo con frecuencias variables entre la entrada de la antena y la salida del sistema en el que se van a realizar las pruebas, la calibración de ese equipo se efectuará en las frecuencias de salida, una vez que se haya verificado que la salida del generador de frecuencias también es uniforme en el canal de entrada. Similar a las señales moduladas analógicas, el método de medición se basa en la utilización de un generador de barrido. Esta medición se realiza en el punto A según la figura 2.18.

Tasa de error de Bits (BER)

Ref: [7] [9]

La BER es el parámetro primario que describe la calidad de la transmisión digital. Se define como la tasa entre los bits con errores y el número total de bits recibidos.

En un sistema de recepción de señal digital terrestre, tras el decodificador de señal COFDM se aplican dos métodos de corrección de errores. Obviamente, cada vez que se aplica un corrector de errores sobre la señal digital, la tasa de error cambia, por lo que si se mide la tasa de error a la salida del demodulador de COFDM, después de Viterbi y a la salida del decodificador de Reed-Solomon se obtienen tasas de error distintas.

Las mediciones de la BER fuera de servicio (CBER) se efectúan antes del decodificador FEC (punto B. Figura 2.18) y miden el número total de errores recibidos.

Es posible efectuar mediciones en servicio con datos reales utilizando las capacidades de detección de errores de la parte corrección de errores de Viterbi y de R-S del decodificador FEC.

Las mediciones del BER después de la corrección de errores de Viterbi se conocen como VBER y se realizan después del decodificador Viterbi, según la figura 2.19.

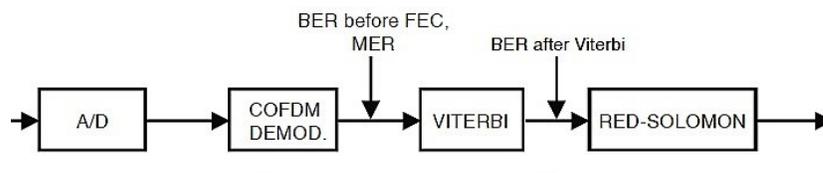


Figura 2.19: Sistema de Recepción COFDM

Fuente: [9]

La medición se efectúa aplicando una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS, pseudo random binary sequence) al modulador en el extremo de entrada.

Este método proporciona una medida estadística de la calidad de funcionamiento

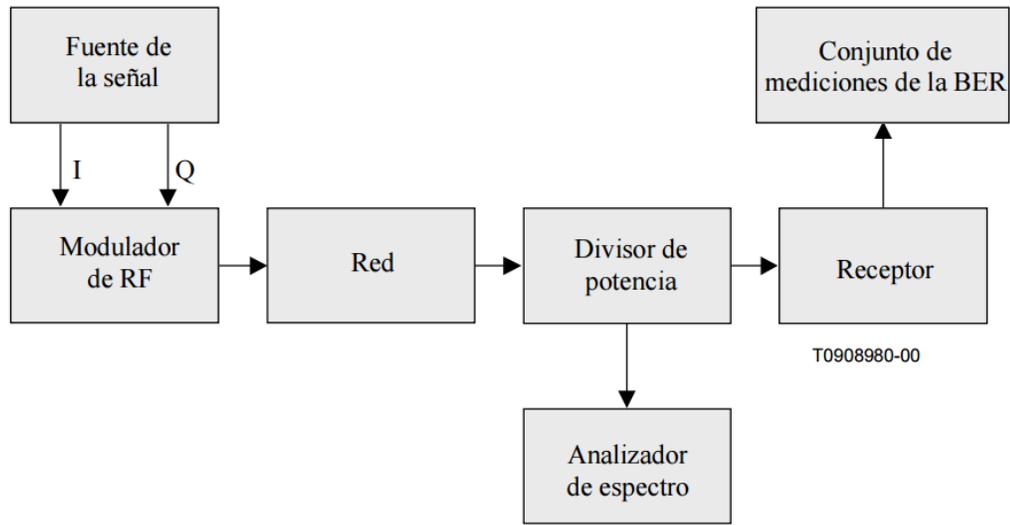


Figura 2.20: Medición de BER

de la señal recibida. En ambos tipos de medición, si se hace referencia a la BER medida, se indicará con los resultados la velocidad binaria bruta o la velocidad binaria neta. Se indicará también con los resultados el punto en el que se efectúa la medición (puntos B, C o D. Figura 2.18) de la BER.

En la figura 2.20 se muestra la configuración de la prueba para medir la BER.

Para realizar la medición, se debe activar la modulación y comenzar la transmisión, e ir contando los bits con errores durante un tiempo prolongado, hasta obtener como mínimo 100 bits con errores. Luego se compara este número con el número total de bits transmitidos en ese periodo.

Tasa de errores de modulación (MER)

Ref: [7]

El MER permite valorar que tanto se asemeja el diagrama de constelación de la señal recibida, con el diagrama de constelación ideal de la modulación digital, es el

equivalente a la información que aporta el SNR, para las modulaciones analógicas. Este método de medición proporciona un análisis del “factor de calidad” de la señal recibida. Se calcula ese factor para que incluya la degradación total de la señal que probablemente está presente en la entrada de los circuitos esenciales de un receptor comercial y se pueda de ese modo tener una indicación de la capacidad de ese receptor para decodificar correctamente la señal.

La medición se realiza en la salida de sistema de una red de distribución (punto B. Figura 2.18) mientras que la señal modulada con el formato adecuado se aplica en la entrada del extremo de entrada o en la entrada de la red de distribución, según la parte del sistema que se va a medir. El extremo de entrada puede incluir convertidores de modulación (del formato PSK al formato QAM). En la figura 2.21 se muestra la configuración de la prueba para medir la tasa de errores de modulación.

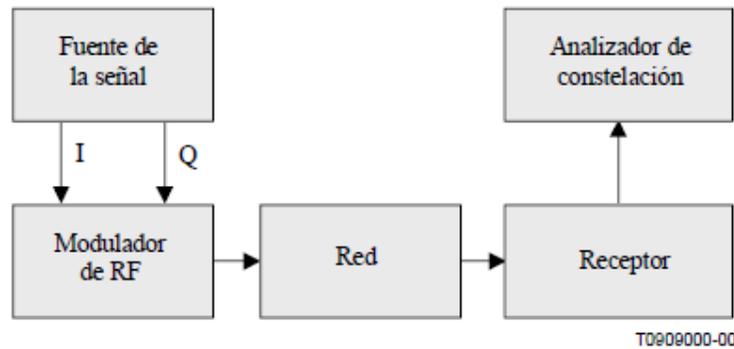


Figura 2.21: Medición de MER

El procedimiento de medición es el siguiente:

- Ajustar la señal de entrada para obtener el formato de modulación, la frecuencia de canal y el nivel de señal deseados.
- Seleccionar las condiciones de funcionamiento adecuadas del equipo de me-

dición.

- Se restablecen la frecuencia de la portadora y la temporización de los símbolos, que elimina los errores de frecuencias y la rotación de fase.

El analizador de constelación capta un registro de tiempo de N pares coordinados de símbolos recibidos $(I_j + \delta I_j, Q_j + \delta Q_j)$. N será significativamente mayor que los M puntos de símbolo. El par de símbolos ideal es (I_j, Q_j) . Para cada símbolo recibido, se adopta una decisión con respecto a qué símbolo se transmitió.

El vector de error se define como la distancia desde la posición ideal del símbolo elegido (el centro de la casilla de decisión) hasta la posición real del símbolo recibido. La diferencia puede expresarse como vector $d_j = (\delta I_j, \delta Q_j)$.

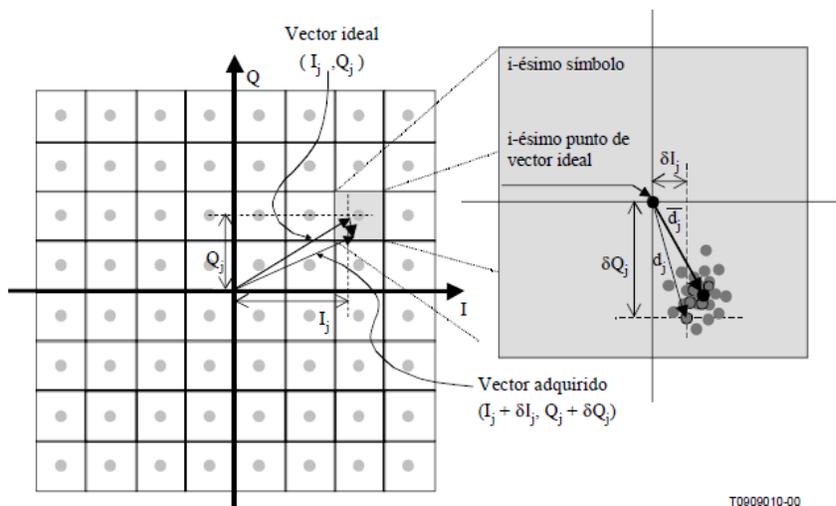


Figura 2.22: Constelación

En la figura 2.22 se muestra un ejemplo de representación del diagrama de constelación de un formato de modulación de 64 QAM y la distancia $(\delta I_j, \delta Q_j)$ para cada uno de los N símbolos recibidos en el punto i -ésimo de la posición ideal (I_j, Q_j) .

Para cada símbolo M aparece una nube de vectores de error. La suma de los

cuadrados de la magnitud de los vectores de símbolo ideal se divide por la suma de los cuadrados de las magnitudes de los vectores de error de símbolo. Tal como se muestra en la ecuación 2.5.

$$MER = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right\} \quad (2.5)$$

Antes de iniciar la medición, se debe verificar el funcionamiento del modulador, conectando el analizador de constelaciones directamente en la salida de este.

Se debe tomar nota del diagrama de constelaciones representado, y asumir como la posición de referencia de la medición. La tasa de errores de modulación medida (MER) se expresa en dB.

Diagrama de Constelación

Ref: [7]

La medición del diagrama de constelación se realiza con un analizador de señales, o también puede utilizarse un analizador de vector.

El procedimiento de medición es el siguiente:

- Ajustar la señal de entrada para obtener el formato de modulación, la frecuencia de canal y el nivel de señal deseados.
- Seleccionar las condiciones de funcionamiento adecuadas del equipo de medición.
- Se restablecen la frecuencia de la portadora y la temporización de los símbolos, que elimina los errores de frecuencias y la rotación de fase.

El diagrama de constelación puede obtenerse en diferentes puntos, tales como salida del transmisor, en el receptor antes de la etapa de corrección de errores (punto B. Figura 2.18), según sea la medida que se desea obtener.

Multitrayectoria

Para medir la relación de potencia deseada/ potencia no deseada se utiliza la ecuación 2.6 donde ΔL es la distancia entre los máximos y mínimos de la onda que se forma en el espectro de potencia dentro del ancho de banda, debido a los retardos de multitrayecto, como se muestra en la figura 2.23. El retardo viene dado por el inverso del periodo de la onda que se forma debido a la multitrayectoria. Esta medición se realiza en el punto A de la figura 2.18.

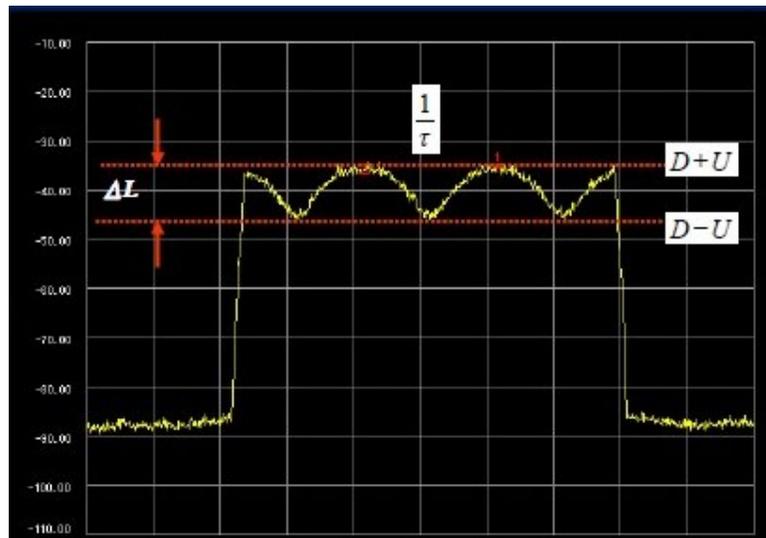


Figura 2.23: Respuesta en Frecuencia

Fuente: [10]

$$DU[dB] = 20 \log_{10} \left\{ \frac{10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1}{10^{\frac{\Delta L}{20}} - 1} \right\} \quad (2.6)$$

DU : Relación de potencia de señal deseada/no deseada.

Intermodulación

Ref: [11]

Los productos de Intermodulación en el transmisor provocan emisiones no deseadas que son inducidas por alguna señal interferente próxima a la frecuencia nominal del transmisor. Se supone un transmisor con la potencia de la señal transmitida deseada L_w a la frecuencia nominal $f_0 = f_1$ y una potencia de la señal entrante L_1 a la frecuencia $f_2 = f_0 + \Delta f$. Ello da lugar a un producto de intermodulación de tercer orden $I_{M3} = L_{IM}$ a la frecuencia f_{IM} :

$$f_{IM} = 2f_0 - (f_0 \pm \Delta f) = f_0 \pm \Delta f \quad (2.7)$$

Para tener en cuenta únicamente los mecanismos principales y despreciar los efectos de orden más elevado, debe elegirse una separación de frecuencias Δf dentro de la anchura de banda B del sistema de manera que la componente de inter-modulación L_{IM} no esté sujeta a una fuerte atenuación adicional en el receptor interferido. El nivel de la señal de la componente de intermodulación se define de la forma siguiente:

$$L_{IM} = 2L_w + L_1 + 20 \log k \quad (2.8)$$

siendo k una constante arbitraria que se introduce únicamente para obtener el producto de intermodulación a partir de la medición. En la Figura 2.24 la atenuación de intermodulación L_{AI} se define como la atenuación del producto de intermodulación L_{IM} con respecto al nivel de la señal deseada L_w para una fuente interferente 30 dB por debajo de L_w .

Introduciendo las relaciones de la Figura 2.24 en la ecuación 2.8, puede determi-

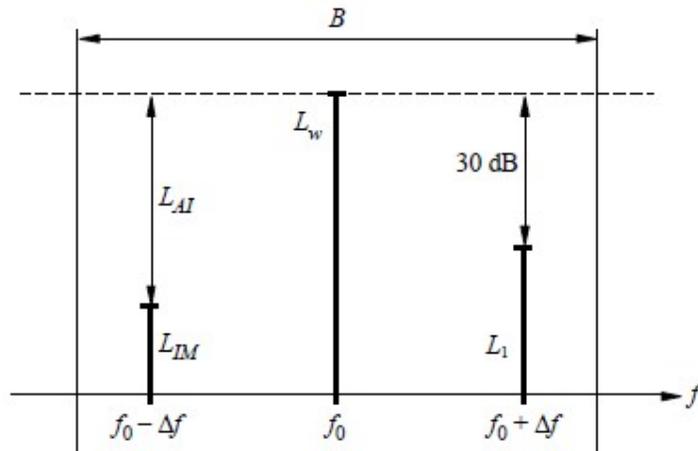


Figura 2.24: Determinación de los productos de intermodulación por el método de dos tonos

narse el valor de $20 \log k$ mediante la fórmula

$$20 \log k = 30 - 2L_w - L_{AI} \quad (2.9)$$

y el producto de intermodulación L_{IM} pasa a ser:

$$L_{IM} = L_1 - L_{AI} + 30 \text{ dB} \quad (2.10)$$

El procedimiento para realizar la medición es el siguiente:

Paso 1: Se conecta el equipo de la manera indicada en la Figura 2.25. Para reducir la influencia de los errores por desadaptación es importante que el atenuador de potencia de 10 dB se acople al transmisor sometido a prueba mediante la conexión más corta posible. La fuente de la señal de prueba interferente es una portadora de RF sin modular que proporciona la misma potencia de salida que el transmisor sometido a prueba. Dicho transmisor y dicha fuente deben estar físicamente separados de manera que la medición no resulte influenciada por radiación directa.

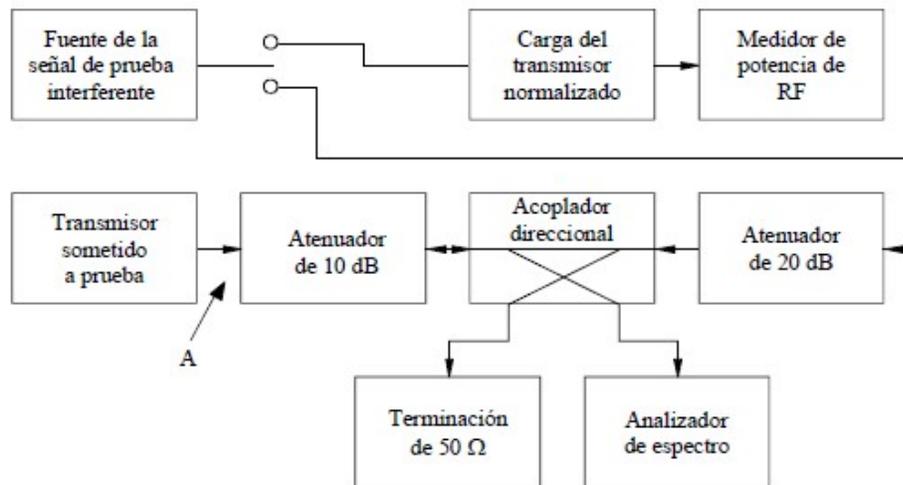


Figura 2.25: Montaje de medición de Intermodulación

Paso 2: Se ajusta el analizador de espectro a fin de que proporcione la indicación máxima para una anchura de exploración de frecuencia de 500 kHz.

Paso 3: Se ajusta la frecuencia de la fuente de la señal de prueba interferente a una gama comprendida entre 50 kHz y 100 kHz por encima de la frecuencia del transmisor sometido a prueba. La frecuencia deberá elegirse de forma que las componentes de intermodulación que van a medirse no coincidan con otras componentes no esenciales.

Paso 4: Se registra la componente de intermodulación de tercer orden más elevada obtenida en el analizador de espectro, como IM3 (dBm).

Paso 5: Se registra (dBm) el nivel de potencia de salida en RF del transmisor sometido a prueba obtenido en el analizador de espectro, como P1.

Paso 6: Se calcula la relación de intermodulación como:

Atenuación de intermodulación (referido al punto A)

$$A_{IM} = P_1 - IM_3$$

Paso 7: Se ajusta la frecuencia de la fuente de la señal de prueba interferente entre 50 kHz y 100 kHz por debajo de la frecuencia del transmisor sometido a prueba. La frecuencia deberá elegirse de forma que las componentes de inter-modulación que van a medirse no coincidan con otras componentes no esenciales.

Paso 8: Se repiten los Pasos 4 a 6.

Paso 9: El menor valor de las dos lecturas obtenidas en los Pasos 6 y 8 es la atenuación de intermodulación.

Ruido de Fase

Ref: [7]

El ruido de fase se define como la variación aleatoria de la fase instantánea de una señal con respecto a una señal ideal.

El ruido de fase se calcula indirectamente a partir de el diagrama de constelación de la señal recibida, el procedimiento para la medición es el siguiente:

- Se debe ajustar la señal de entrada para obtener el formato de modulación, la frecuencia de canal y la potencia de señal deseada.
- Configurar adecuadamente el equipo de medición, en este caso un analizador de constelación.
- El analizador de constelación debe captar un registro de N símbolos recibidos (I,Q), N debe ser significativamente mayor que los M puntos del símbolo.

Una vez que se obtienen los N símbolos, se realizan los siguientes cálculos:

1. Calcular el ángulo entre el vector (I,Q) recibido y el eje I de la constelación

de señales, tal como se muestra en la ecuación 2.11, de la misma forma se calcula el ángulo ideal con los valores de I y Q ideales, utilizando la ecuación 2.12.

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{Q_{recibido}}{I_{recibido}}\right) \quad (2.11)$$

$$\phi_2 = \arctan\left(\frac{Q_{Ideal}}{I_{Ideal}}\right) \quad (2.12)$$

2. Se calcula el error entre los dos ángulos:

$$\phi_E = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.13)$$

3. Luego se calcula el ruido de fase aplicando la ecuación 2.13, donde N corresponde con el número de símbolos recibidos.

$$Ruido\ de\ Fase = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_{E1}^2 - \frac{1}{N^2} \left(\sum_{i=1}^N \phi_{E1} \right)^2} \quad (2.14)$$

BER Vs. Portadora

Ref: [10]

En esta parte va a medir la tasa de errores en los bits (BER) cuando se varia el nivel de la portadora.

- Configurar el montaje para la prueba como se muestra en la figura 2.26.
- Fijar el esquema PN ($2^{23} - 1$) del generador de pseudorruído dentro del modulador OFDM.
- Ajustar la potencia de la señal, la frecuencia del convertidor ascendente y

del convertidor descendente.

- Verificar que todos los niveles de señales de entrada y de salida son apropiados.
- Medir la tasa de bits errados (BER) cambiando el nivel de portadora.

MER Vs. Portadora

Ref: [7]

En esta parte va a medir la tasa de error de modulación (MER) cuando se varia el nivel de la portadora.

- Configurar el montaje para la prueba como se muestra en la figura 2.26.
- Fijar el esquema PN ($2^{23} - 1$) del generador de pseudorruído dentro del modulador OFDM.
- Ajustar la potencia de la señal, la frecuencia del convertidor ascendente y del convertidor descendente.
- Verificar que todos los niveles de señales de entrada y de salida son apropiados.
- Medir la tasa de error de modulación (MER) para varios niveles de potencia de la portadora.

BER Vs. CNR

Ref: [7]

En esta parte va a medir la tasa de errores en los bits (BER) cuando se carga ruido gaussiano en las señales OFDM.

El CNR se refiere a la relación portadora/ruido para señales en radiofrecuencia. Esta medida nos indica el nivel relativo de potencia de la portadora de la señal con respecto al nivel del ruido en un sistema. Es decir nos indica la calidad del sistema.

El Procedimiento a realizar es el siguiente:

- Configurar el montaje para la prueba como se muestra en la figura 2.26.
- Fijar el esquema PN ($2^{23} - 1$) del generador de pseudorruído dentro del modulador OFDM.
- Ajustar la potencia de la señal, la frecuencia del convertidor ascendente y del convertidor descendente.
- Fijar potencia y ancho de banda de ruido del equipo de prueba de ruido de interferencia (NITE, noise interference test equipment).
- Verificar que todos los niveles de señales de entrada y de salida son apropiados.
- Medir la tasa de bits errados (BER) cambiando la relación C/N. La gama de medición de la BER estará entre 10^{-1} y 10^{-8} .

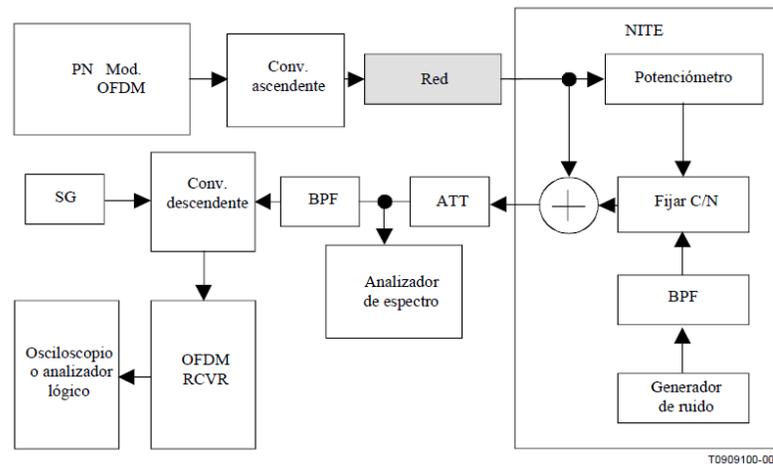


Figura 2.26: Medición de la BER en función de C/N

Ruido Marginal

El ruido marginal se mide en ausencia de la señal a transmitir dentro del ancho de banda de esta, o en su defecto en las frecuencias adyacentes donde no exista la señal, sino niveles de ruido. Para medir se toma el valor de ruido presente para varias frecuencias fuera de banda y se calcula la media.

Ruido gaussiano Vs. BER

Ref: [10]

En esta parte va a medir la tasa de errores en los bits (BER) a medida que se aumenta el nivel de ruido Gaussiano del Canal. El ruido gaussiano es el ruido cuya densidad de probabilidad responde a una distribución normal o de Gauss.

- Configurar el montaje para la prueba como se muestra en la figura 2.26.
- Fijar el esquema PN ($2^{23} - 1$) del generador de pseudoruido dentro del modulador OFDM.

- Ajustar la potencia de la señal, la frecuencia del convertidor ascendente y del convertidor descendente.
- Fijar potencia y ancho de banda de ruido del equipo de prueba de ruido de interferencia.
- Verificar que todos los niveles de señales de entrada y de salida son apropiados.
- Medir la tasa de bits errados (BER) variando el nivel de ruido Gaussiano del generador de ruido.

Características de retardo

Ref: [10]

La característica de retardo se refiere a los efectos producidos por un canal multitrayecto, en donde debido a los diferentes caminos, la señal deseada es afectada por componentes de ella misma que vienen por un camino distinto al directo y producen un retardo en la señal.

La forma de medir los retardos es como se mencionó en la sección 2.7.2, si existe más de un trayecto, existirá más de un retardo, por lo tanto la señal tendrá lóbulos de diferentes anchos, el inverso de cada uno de los anchos entre dos mínimos, expresa el retardo de la señal para cada camino.

Características de retardo de grupo

Ref: [12]

Los convertidores de frecuencias suelen ser utilizados en las telecomunicaciones, en la etapa de transmisión, para elevar la frecuencia de la señal banda base a la frecuencia asignada por el ente regulador y en los receptores para bajar la frecuen-

cia de la señal, a una frecuencia intermedia y así realizar el procesamiento de la señal. En tales comunicaciones, los sistemas deben proporcionar una transmisión de datos perfecta a bajas tasas de error de bits y, por tanto, debe presentar no sólo una característica de atenuación constante, sino también una característica de fase lineal frente a la frecuencia dentro de la banda útil.

El rendimiento del sistema se evalúa midiendo el valor relativo o absoluto del retardo de grupo.

El retardo de grupo se define como el tiempo de tránsito de una señal a través de un dispositivo en función de la frecuencia. Matemáticamente el retardo de grupo es la derivada negativa de la característica de fase del dispositivo con respecto a la frecuencia. Tal como se muestra en la ecuación 2.15.

$$\text{Retardo de Grupo} = \tau_g = -\frac{d\varphi}{d\omega} \quad (2.15)$$

Esta medida se realiza según la figura 2.18 en el punto A, a la salida del sintonizador.

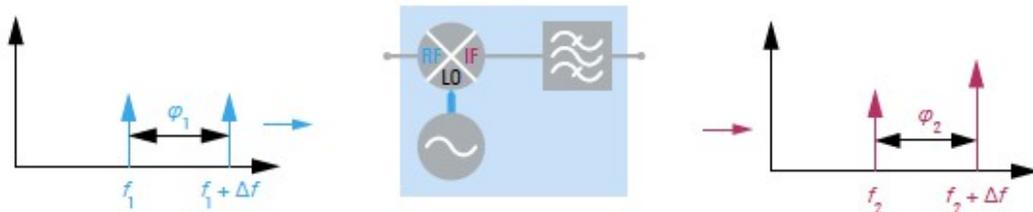


Figura 2.27: Medida del retardo de grupo utilizando el método de los dos tonos

Para realizar esta medida se debe excitar el dispositivo bajo prueba con una señal, como se muestra en la figura 2.27, medir la fase en dos frecuencias estrechamente

espaciadas y luego calcular la pendiente de fase, según la ecuación 2.16.

$$\text{Retardo de Grupo} = -\frac{1}{360^\circ} \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} \quad (2.16)$$

Este método produce una buena aproximación del retardo de grupo, siempre y cuando se pueda suponer que el cambio de fase es suficientemente lineal en el intervalo de frecuencia observado Δf (apertura).

La figura 2.28 muestra los términos $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ y $\Delta f = f_2 - f_1$.

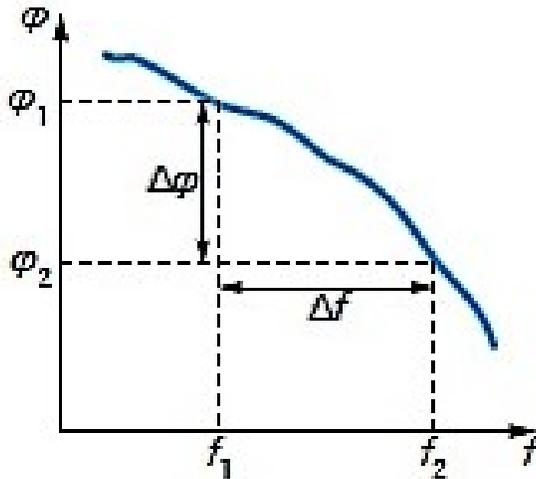


Figura 2.28: Apertura de frecuencia

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación se expone el procedimiento a seguir para desarrollar una herramienta computarizada, para simular ensayos de laboratorio en la medición de parámetros de transmisión y recepción para televisión digital terrestre, bajo el estándar ISDB-T, donde se integraron todos los medios y estrategias que se consideraron pertinentes para contribuir con el cumplimiento y desarrollo de la investigación, y que estuvo ceñida al orden establecido por los objetivos trazados.

3.1. Tipo de Investigación

Para obtener los resultados de esta investigación se realizó la caracterización de los métodos para medir parámetros de transmisión y recepción bajo el estándar ISDB-T, de acuerdo a lo establecido. La presente investigación es de tipo **Descriptiva**. Según Arias (2006), define la investigación descriptiva de la siguiente manera:

“Consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere.” (p. 24).

3.2. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación llevado a cabo en este trabajo fue de campo, ya que para validar la herramienta se realizaron mediciones de señales de televisión digital reales, para comparar con los obtenidos con el simulador.

Según Arias, (2006), en su libro El Proyecto de Investigación, el diseño de campo es aquel que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes. De allí su carácter de investigación no experimental. (p. 31)

3.3. Metodología

En el desarrollo de este proyecto se utilizó la versión R2008 de MATLAB para asegurar la compatibilidad con las computadoras disponibles en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV. Esta versión del software funciona correctamente para Windows XP (Service Pack 1,2 o 3), con espacio en disco mínimo 510 MB y una memoria RAM mínima de 512 MB.

MATLAB es una herramienta de software de procesamiento matemático de alto nivel que tiene su lenguaje de programación propio, muy utilizado por Ingenieros y Científicos, gracias a su entorno de desarrollo sencillo y productivo.

El paquete de MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, estas son Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario-GUI). Simulink es un entorno de diagramas de bloques para simulación de sistemas dinámicos, que funciona sobre el entorno de programación de Matlab. Soporta simulación, generación automática

de código y pruebas continuas de sistemas embebidos.

GUIDE es un entorno de programación visual disponible en MATLAB que proporciona herramientas para el diseño de interfaces de usuario. Mediante este editor de diseño de GUIDE se crea la interfaz gráfica de la aplicación (archivo .fig), con el uso de botones, paneles, etiquetas, slider, entre otros y este genera de manera automática el código de MATLAB.

3.3.1. Descripción del proceso de transmisión y recepción de la televisión digital, bajo el estándar ISDB-T e Identificación y caracterización de los métodos y procedimientos para medir parámetros de transmisión y recepción

Para la investigación se efectuaron consultas y análisis de datos provenientes de textos bibliográficos, informes, publicaciones de revistas, páginas web, investigaciones previas del tema objeto en estudio, entre otros. Tales consultas se realizaron por medios electrónicos en las páginas de la Unión internacional de Telecomunicaciones (ITU) y archivos físicos existentes en la biblioteca de la Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), esta última ubicada en Caracas.

3.3.2. Desarrollo mediante el software de simulación los bloques e interfaces amigables y de fácil entendimiento para el usuario, usando la herramienta Matlab, o simulink, que permitan generar las perturbaciones y medir los parámetros

En esta etapa de la investigación se partió de la simulación base del estándar ISDB-T desarrollada en Simulink, que se muestra en la figura 3.1, y controlada manualmente bloque a bloque. Se buscó realizar el control a través de una interfaz gráfica, para ello, se fueron ajustando los bloques por parejas desde los mas internos, es decir, variar el prefijo cíclico hasta lograr controlar todos los bloques

a través de interfaces.

Esto se realiza ya que existen bloques que dependen de las dimensiones de otros, por lo tanto fue necesario que al variar algunos bloques, los demás se ajusten automáticamente de forma adecuada.

Luego de realizar el control de la simulación, se procedió a codificar los métodos para la medición de los parámetros necesarios que se explicaron anteriormente (Capítulo 2). Para la toma de medidas, se corre la simulación base controlada por la interfaz gráfica y una vez finalizada la simulación, se guardan las variables necesarias para hacer los cálculos que posteriormente son representados por las interfaces.

Todas las funciones son codificadas de forma independientes para ser utilizadas por cualquiera de las interfaces desarrolladas. Los códigos utilizados se muestran en el Anexo II. A continuación se describen mas detalles sobre este desarrollo.

3.3.3. Validación de la herramienta desarrollada

Para la validación de la herramienta computarizada, se realizaron ensayos en los laboratorios del Departamento de Electricidad del Instituto Universitario de Tecnología Dr “Federico Rivero Palacio”, ubicado en el Km 8 de la carretera Panamericana.

Se realizó la medición de una señal de televisión digital real, utilizando el equipo de medición PROMAX TV EXPLORER HD $ISDB-T/T_B$. El experimento consistió en captar una señal de televisión digital con una antena de UHF y analizarla con el equipo antes mencionado.

Una vez obtenidos los datos experimentales, se ajustaron los valores del factor k del bloque *Multipath Rician Fading Channel* y los valores SNR del bloque

AWGN channel de simulink para los cuales se obtiene valores de MER y BER aproximados con las medidas reales, así como también se comparan los diagramas de constelaciones correspondientes, con el fin de verificar el comportamiento de la herramienta ante estos dos tipos de canales y compararlos con los datos medidos experimentalmente.

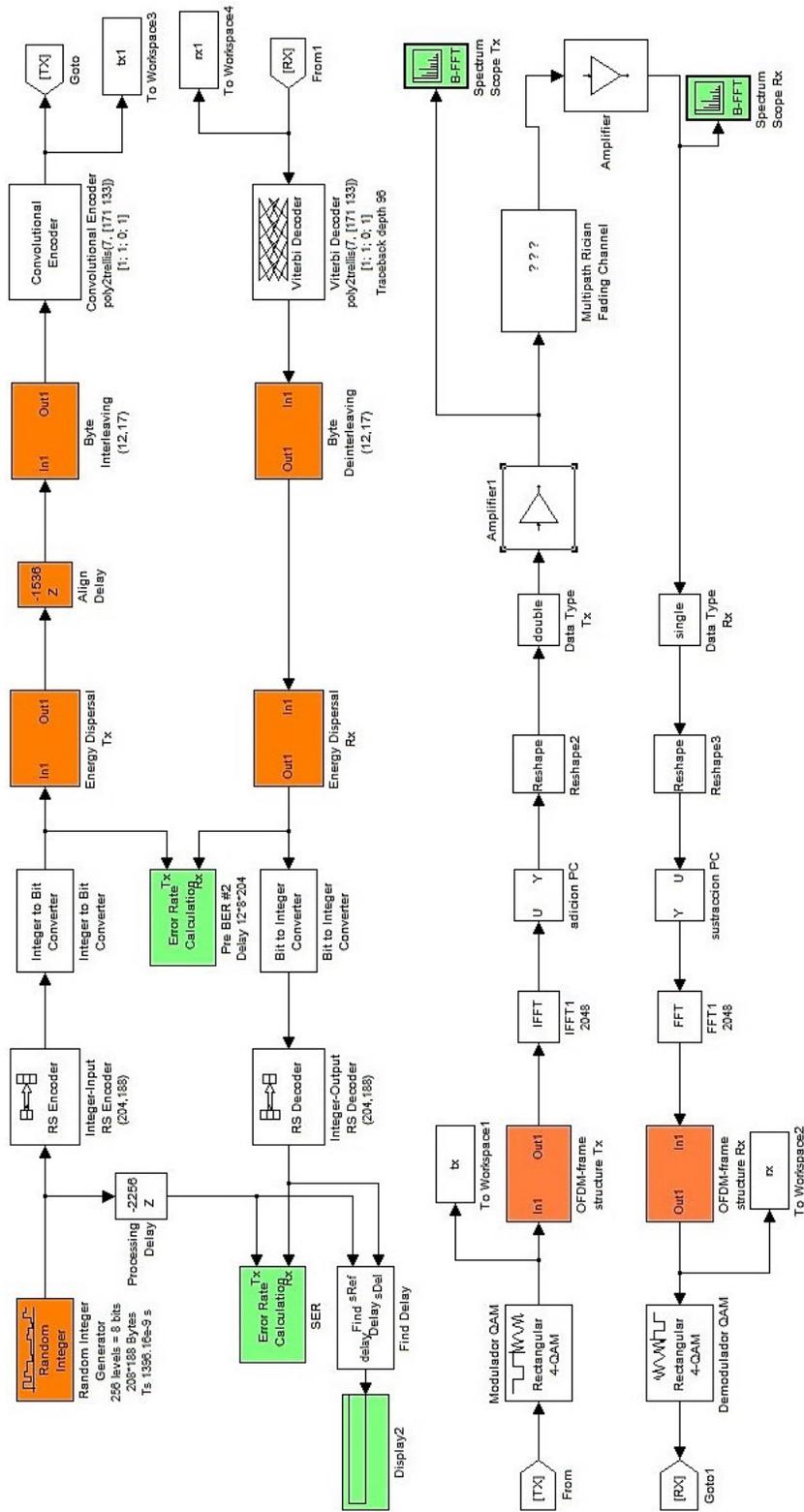


Figura 3.1: Simulación Base

CAPÍTULO IV

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Una vez desarrollada la Herramienta Computarizada siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior (Cap. 3), se realizaron una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de ésta. En este Capítulo se detallan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, así como los análisis y discusión de estos últimos.

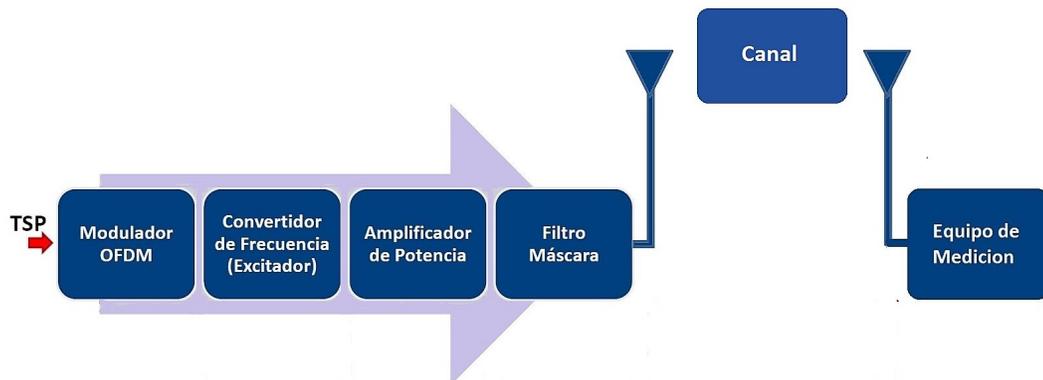


Figura 4.1: Puntos de Medición para pruebas

En la figura 4.1 se muestra la ubicación del simulador del equipo de medición para realizar las pruebas que vienen a continuación en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3.

4.1. Simulación con Canal AWGN

Los resultados que se muestran en la figura 4.2 se obtuvieron utilizando la simulación base con un canal AWGN.

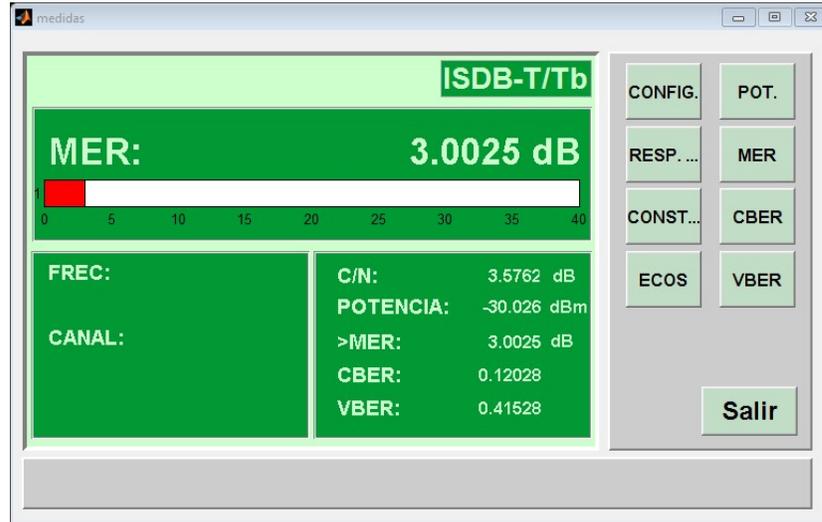


Figura 4.2: Medidas realizadas con canal AWGN

Los parámetros de entrada utilizados, que fueron ajustados en el diagrama de la figura 3.1 correspondiente a la simulación base, se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros de entrada de la señal simulada

modo	1
Modulación	QPSK
FEC	2/3
GI	1/4
SNR (dB)	1.5
Ganancia (dB)	-2

Con un canal AWGN se puede verificar la cercanía de los valores entre el MER y el CNR, en presencia de solo ruido aditivo gaussiano. Estos valores se distancian al agregar cualquier otro tipo de perturbación, por ejemplo, al agregar desvanecimiento por multitrayectoria.

Adicionalmente se realizó un conjunto de pruebas para verificar el comportamiento de la simulación ante variaciones de parámetros de entrada.

4.1.1. BER Vs. SNR

Se realiza la simulación con un canal AWGN para obtener las curvas del BER en función de la relación señal a ruido, utilizando los parámetros de entrada que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros de entrada para obtener BER Vs. SNR

modo	2
Modulación	QPSK/16QAM/64QAM
FEC	7/8
GI	1/4
SNR (dB)	Variable

En la figura 4.3 se observa los resultados obtenidos.

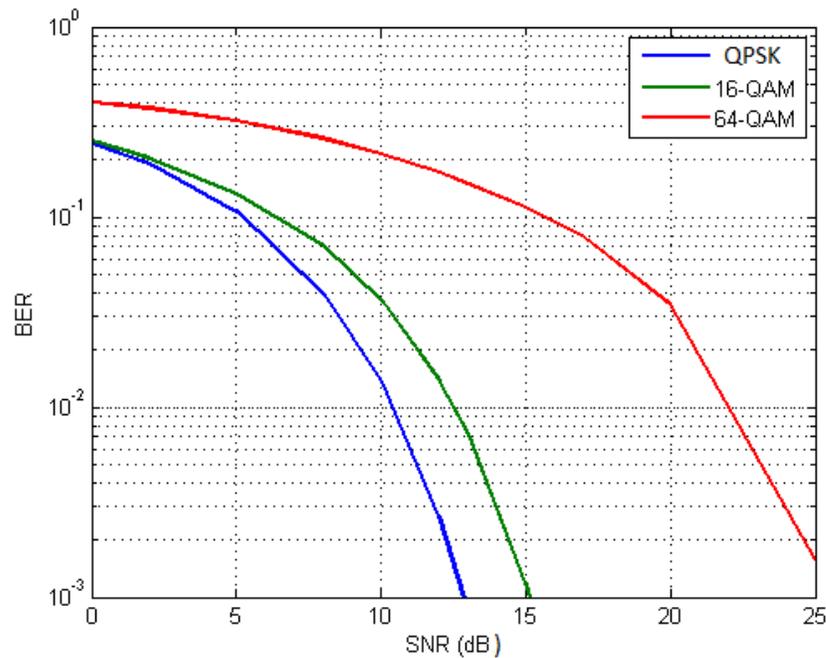


Figura 4.3: BER en función de SNR

Para la obtención de la curva anterior (figura 4.3) se codificó una función iterativa que ajusta el valor de la SNR del bloque AWGN en cada iteración, luego se corre la simulación base y se obtiene el valor del BER. Esta función al terminar las iteraciones de la SNR cambia el tipo de modulación y repite el procedimiento, hasta obtener todas las curvas representadas.

Esta función no se incluye en la ventana de la aplicación para que el usuario tenga su propio criterio al variar la SNR. No obstante estas curvas se pueden trazar manualmente tomando los valores de BER para diferentes tasas de SNR.

4.1.2. MER Vs. Potencia recibida

En esta sección se utilizó un bloque amplificador de Simulink para simular las pérdidas de potencia de la señal debido al canal, y así medir el MER para diferentes valores de potencia recibida. Los resultados se muestran en la figura 4.4.

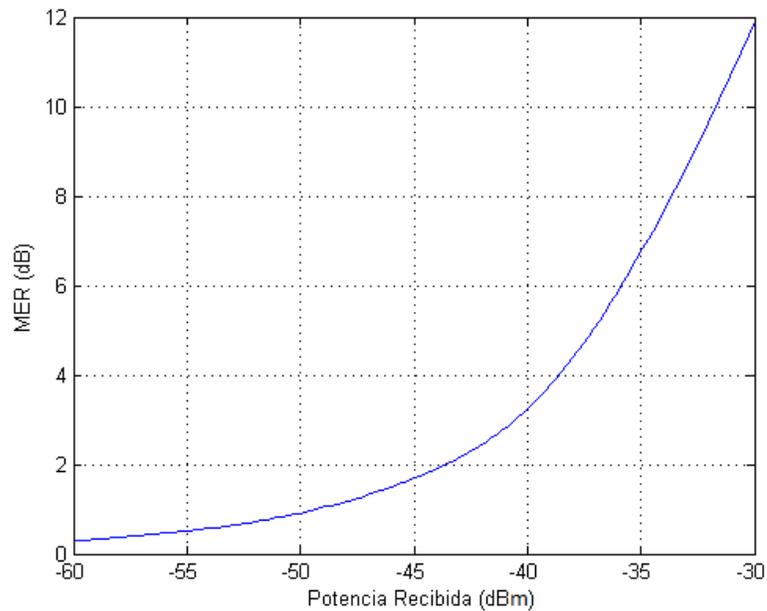


Figura 4.4: Variaciones de MER en función de la Potencia recibida

En la figura 4.4 se observa que el MER disminuye a medida que la potencia recibida es menor.

Diagramas de Constelación

En esta sección se obtuvo el diagrama de constelación para diferentes tipos de modulación digital, en los valores límites de relación señal a ruido (SNR). Se consideraron valores límites de SNR como el mínimo valor de ésta para los cuales el decodificador Viterbi aun corregía errores.

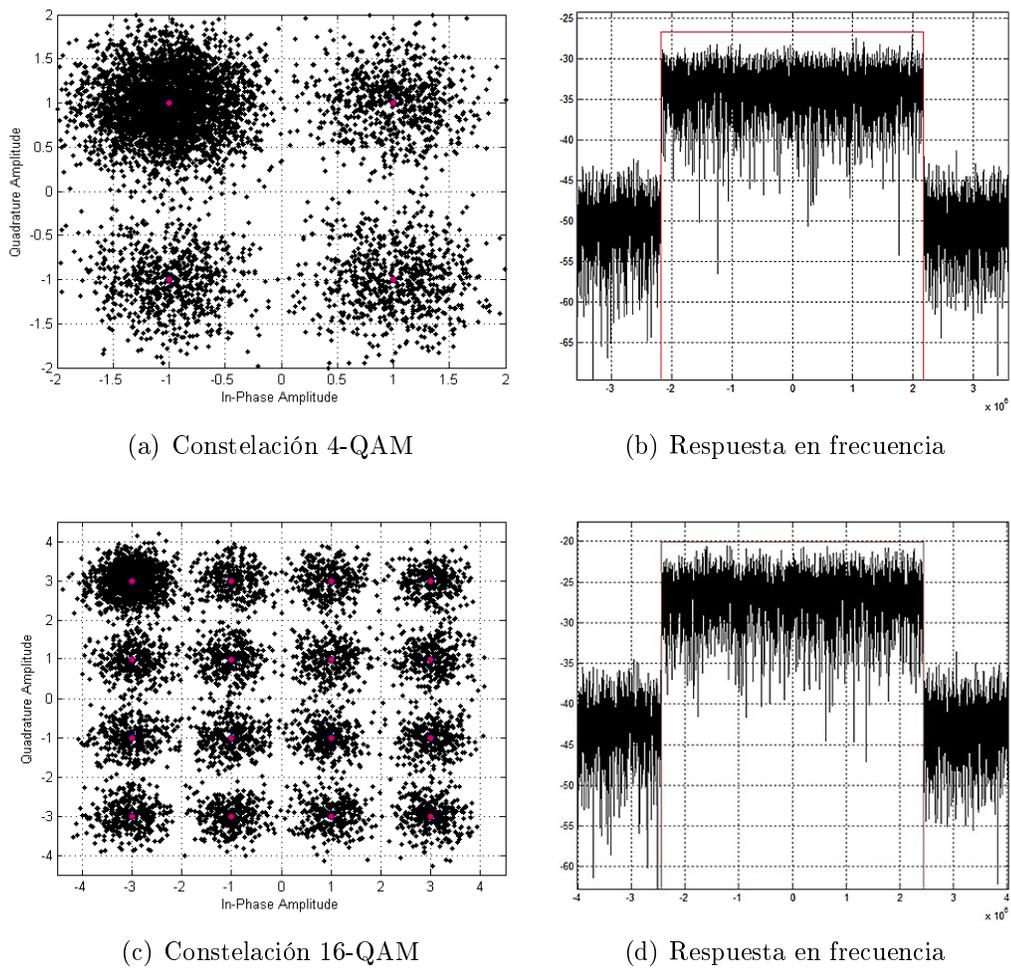


Figura 4.5: Constelación y Espectro para 4-QAM Y 16-QAM

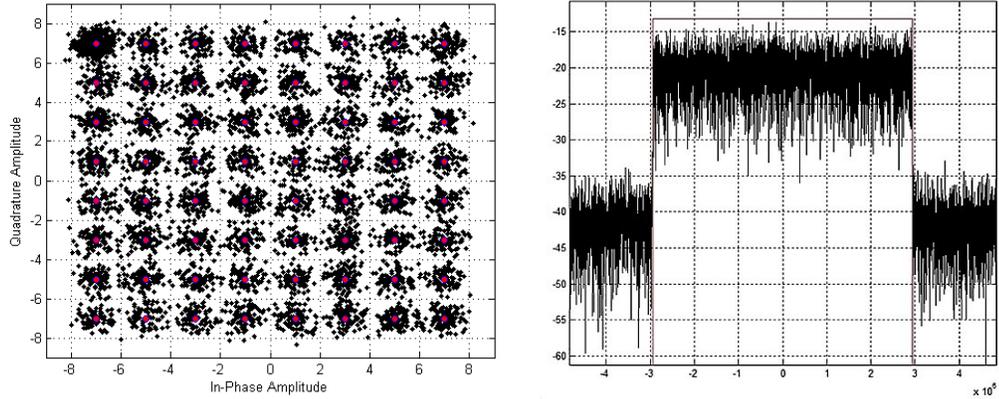


Figura 4.6: Constelación 64-QAM y Respuesta en frecuencia

En la Tabla 4.3 se muestran los parámetros utilizados para obtener los diagramas de constelación de las Figuras 4.5 y 4.6, así como también algunos parámetros medidos, tales como el MER, BER, potencia y su respuesta en frecuencia. En los diagramas de constelación (izquierda) se observan los símbolos recibidos, representados por los puntos negros, y los símbolos transmitidos, representados por los puntos rojos. En la parte derecha se muestran las respuesta en frecuencia de la señal para cada una de los diagramas de constelación, delimitado por un marco de color rojo que representa los límites donde la potencia media de la señal decae 3 dB y su diferencia en frecuencia corresponde con el ancho de banda de la señal.

Tabla 4.3: Parámetros utilizados para obtener los diagramas de constelación

Modo 2			
Modulación	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Umbral	12dB	14dB	24dB
FEC	7/8		
GI	1/4		
MER (dB)	8.88	15.38	21.06
BER	$2,7e^{-3}$	$3,3e^{-3}$	$3,9e^{-3}$
Potencia Recibida (dBm)	-32.66	-26.06	-19.93
AB medido (MHz)	4.3652	4.9098	5.8990

4.2. Simulación con Canal Rice

En esta parte se exponen los resultados obtenidos al realizar la simulación con una canal Rice, para observar los efectos de un canal con multitrayectoria.



Figura 4.7: Medidas realizadas con canal Rice

Las medidas tomadas se presentan en la figura 4.7, donde se observa que para los parámetros de entrada de la tabla 4.4, se obtiene un valor de **MER** aproximado de **2.97 dB** y un **BER** después del decodificador Viterbi de **0.239**.

Tabla 4.4: Parámetros de entrada de la señal simulada

modo	1
Modulación	QPSK
FEC	2/3
GI	1/4
Factor K del canal	5
Retardo (s)	$[0 \ 2e^{-6}]$
Ganancia (dB)	$[0 \ -1]$

Para estudiar el comportamiento de la simulación, se realizarón diferentes pruebas que se describen en las secciones siguientes, para observar la variación de algunos

parámetros importantes al modificar los parámetros de entrada.

Diagramas de Constelación

Se utiliza un canal Rice de simulink (Multipath Rician Fading Channel) para obtener las constelaciones para diferentes tipos de modulaciones, así como medir parámetros de recepción. En la tabla 4.5 se muestran los parámetros de entrada utilizados para realizar la simulación con el canal Rice.

Tabla 4.5: Parámetros utilizados para obtener los diagramas de constelación

Modo 1			
Modulación	4-QAM	16-QAM	64-QAM
Factor K del canal	23		
FEC	2/3	3/4	7/8
GI	1/16	1/16	1/32
MER (dB)	12.85	12.84	12.74
BER	0	$1,8E^{-2}$	$9,1E^{-2}$
Potencia Recibida (dBm)	-29.93	-22.91	-16.69

En la figura 4.8, se observa como los diagramas de constelación son rotados por el efecto del canal, lo que implica una variación de fase de cada uno de los puntos de la constelaciones en forma radial.

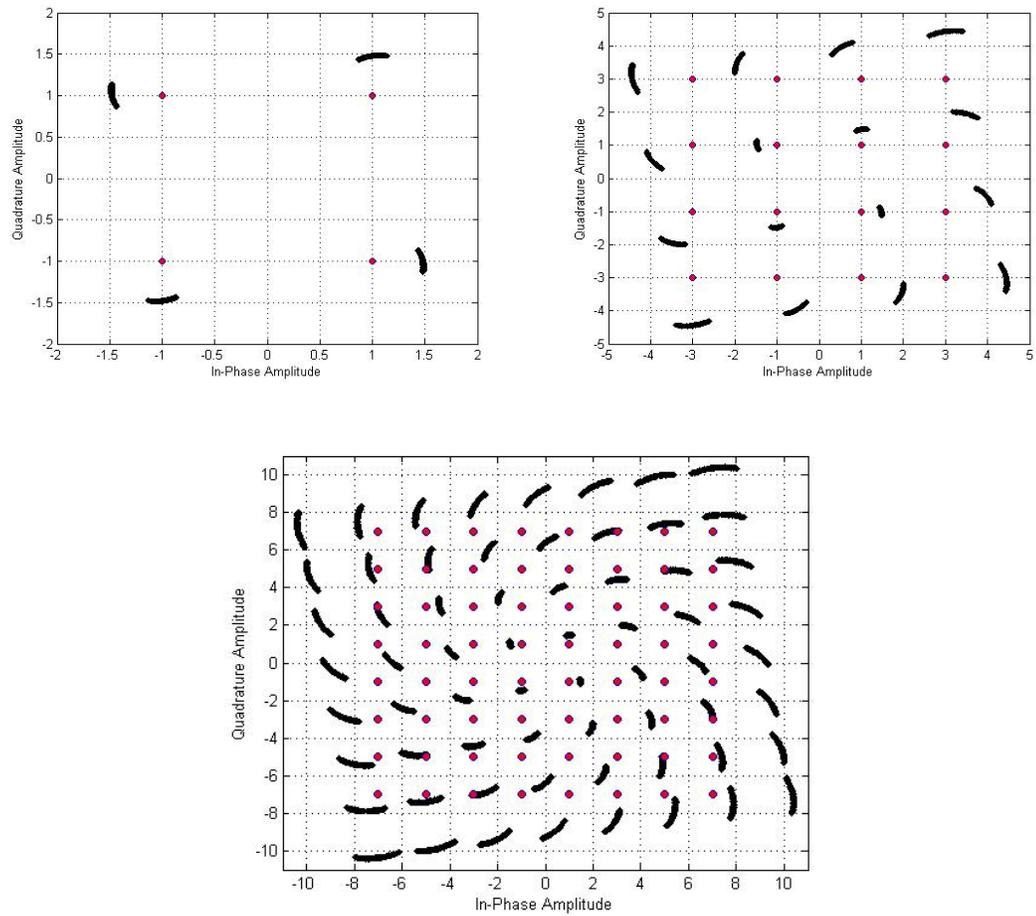


Figura 4.8: Diagramas de Constelación con canal Rice

4.3. Mediciones experimentales en campo y comparación

En la figura 4.9 se observa un diagrama de constelación obtenido para el segmento A (servicio para equipos portátiles, con modulación QPSK) del canal 24 (frecuencia 533 MHz), medido con el equipo PROMAX TV EXPLORER HD $ISDB - T/T_B$.

En ella se puede observar los efectos de un canal con desvanecimiento por multitrayectoria, donde los puntos del símbolo se distribuyen radialmente a la posición teórica demarcada por los puntos rojos.

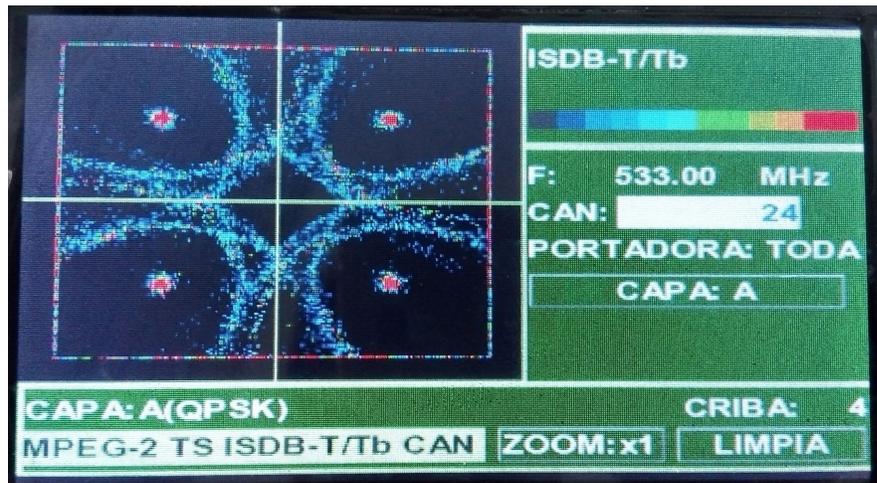


Figura 4.9: Constelación medida para el canal 24

A modo de comparación, se realiza la simulación con un canal Rice con multitrayectoria para observar el diagrama de constelación. En la figura 4.10 se observan los resultados.

En la tabla 4.6 se muestran los parámetros utilizados para obtener la constelación que se muestra en la figura 4.10.

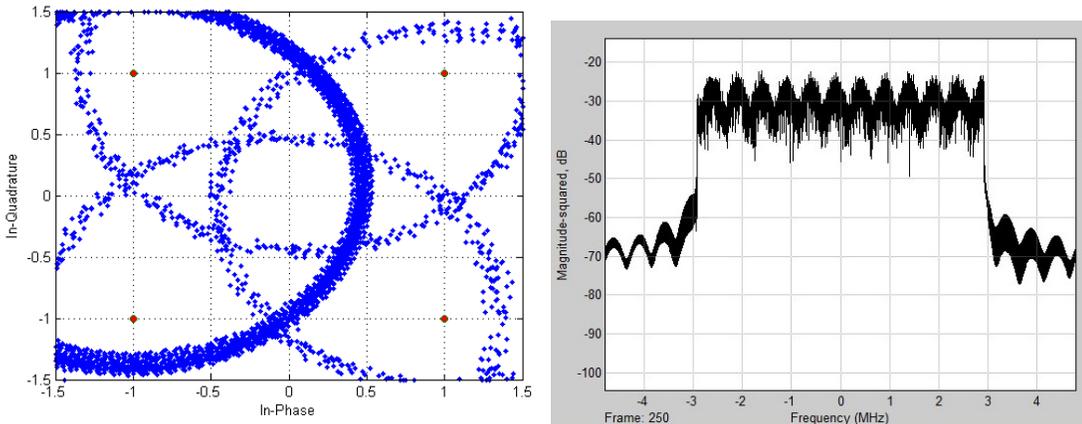


Figura 4.10: Constelación y espectro canal rice ($K=5$)

Tabla 4.6: Parámetros de la señal simulada

modo	1
FEC	2/3
GI	1/4
Factor K del canal	5
Retardo (s)	$[0 \ 2e^{-6}]$
Ganancia (dB)	$[0 \ -1]$

En la figura 4.11 se observa los parámetros medidos para la señal del canal 24, en donde se observa que el nivel del MER es de 2.7 dB. Para este nivel la imagen no logra ser decodificada correctamente, por lo que se obtiene una imagen congelada.



Figura 4.11: Parámetros medidos del canal 24

Como se mencionó anteriormente, la constelación de la figura 4.9 se ve afectada por un canal multitrayecto. Para verificar esto, se midieron los ecos con el equipo PROMAX TV EXPLORER HD *ISDB - T/T_B* obteniéndose, el resultado mostrado en la figura 4.12.

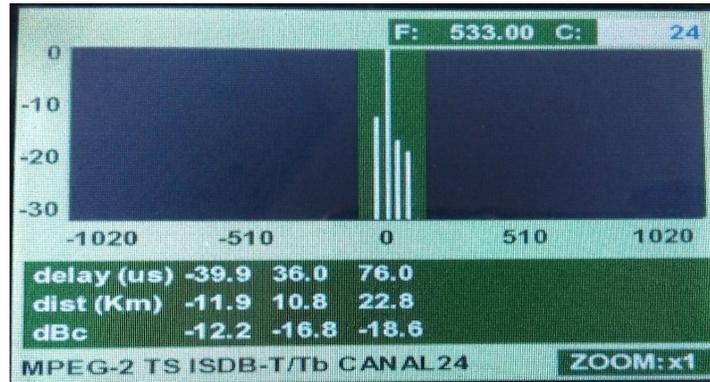


Figura 4.12: Retardo por Multitrayectoria

En la figura 4.12 se observa que la señal tiene 4 trayectos distintos, lo que origina variaciones en amplitud y fase debido a la suma de las componentes que llegan con retardo de multitrayecto. Además se observa la presencia de un adelanto de la señal (retardo con signo negativo), esto se debe a que la señal de referencia ($t=0$) es la que se recibe con mayor nivel de potencia, y la señal que tiene -39.9 microsegundos es una señal que llega primero en tiempo pero con menos potencia.

Esto es causado por la recepción simultánea de la misma señal procedente de varios transmisores ó por la reflexión de la señal sobre grandes objetos, como edificios o montañas.

Adicionalmente se obtiene el diagrama de constelación del segmento B del Canal 24 y se toma medida de sus parámetros. Esto se muestra en las figuras 4.13 y 4.14 respectivamente.



Figura 4.13: Diagrama de Constelación del canal 24

En la figura 4.14 se observa que el nivel del MER es de 31.2 dB. Este nivel es superior al umbral necesario que es de aproximadamente 23 dB para modulaciones 64-QAM tomando como referencia los niveles establecidos por el Manual del equipo Promax [9], por lo tanto la tasa de error de bit esta por debajo del limite requerido.

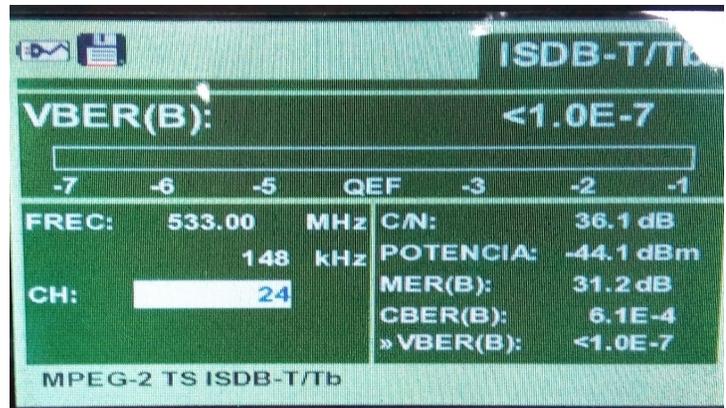


Figura 4.14: Parámetros segmento B Canal 24

4.4. Análisis y Discusión de resultados

Una vez presentados los resultados obtenidos para las distintas pruebas, en esta sección se analizan algunos aspectos resaltantes de lo observado. Todas las pruebas que se realizaron tienen como propósito cumplir con el objetivo de: **Validación de la herramienta desarrollada comparando los valores de Potencia, MER, y BER obtenidos en las simulaciones con los valores medidos experimentalmente.**

De acuerdo a las simulaciones realizadas para un esquema de transmisión de radiodifusión ISDB-T, utilizando un canal AWGN y un canal Rice se pudo observar que:

Con el canal AWGN, el MER toma un valor de aproximadamente 3 dB, para una relación S/N de 1,5 dB y una atenuación de canal de 2 dB. Al eliminar la atenuación del canal, el MER toma un valor semejante a la relación señal a ruido establecida, es decir, en presencia de solo ruido gaussiano sin atenuación, el MER es aproximadamente la relación S/N.

El canal gaussiano causa que los símbolos se reciban con errores en amplitud y fase, debido al nivel de ruido y a la atenuación del canal, formándose una nube alrededor de los puntos del símbolo ideal.

El CNR viene dado por la suma algebraica en decibelios de la relación señal a ruido (SNR) y la atenuación del canal establecido. Para el valor de CNR medido en la simulación, el decodificador Viterbi no funciona correctamente, obteniéndose mayor cantidad de errores a su salida. Para mejorar este valor sin alterar las condiciones del canal, se debe aumentar la potencia de la señal transmitida.

En la simulación con el canal Rice, para un valor de MER de 3 dB aproxima-

mente, el decodificador Viterbi reduce los errores en la trama, por lo tanto para el valor de $k=5$, se está operando por encima del umbral mínimo de recepción.

En presencia de multitrayectoria, el MER no guarda relación directa con la SNR, sin embargo, éste mejora a medida que los retardos por multitrayectoria son mayores.

Al comparar las simulaciones hechas con las pruebas experimentales, se observó que el canal Rice es el que tiene un comportamiento más estrecho con la realidad, ya que para el valor del MER aproximado a 3 dB tiene un VBER cercano al medido en el experimento y un diagrama de constelación similar al del experimento, mientras que con el canal Gaussiano para el mismo valor de MER, se obtiene un mal funcionamiento del decodificador Viterbi, obteniéndose un valor de VBER (después del decodificador Viterbi) superior al CBER (después del decodificador FEC) al agregar mas errores a la trama, separándolo así aún más del valor medido en el experimento.

Para realizar una comparación mas profunda, es necesario hacer una estimación del canal para el cual se realizaron las medidas experimentales, sin embargo, esto se encuentra fuera del alcance de este trabajo. No obstante, los resultados obtenidos se toman como referencia para el estudio del comportamiento del estándar ISDB-T, bajo diferentes esquemas de transmisión.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los métodos y procedimientos para medir parámetros de transmisión y recepción en el sistema ISDB-Tb, son de fácil entendimiento, permitiendo una sencilla codificación a través del lenguaje de programación de Matlab.

El simulador desarrollado permite estudiar varios parámetros de transmisión y recepción de la televisión digital terrestre, bajo el estándar ISDB-T, obteniéndose una solución parcial al problema planteado, permitiendo así avanzar en la implementación de prácticas de laboratorio para ejemplificar la medición de parámetros en esta área.

La interfaz gráfica desarrollada es de fácil entendimiento para el usuario, permitiendo realizar medidas con solo presionar un botón. Además, reduce los tiempos de configuración del sistema, ya que ésta ajusta las dimensiones necesarias de todos los bloques de la simulación base con solo seleccionar los parámetros básicos de funcionamiento del sistema. En caso contrario se debe ajustar cada bloque de la simulación base por separado.

Las pruebas realizadas para la validación de la herramienta no permiten determinar el grado de exactitud de las medidas. Para tener un mejor resultado se debe hacer una estimación de las condiciones del canal bajo el cual se realizaron las

pruebas de campo. Sin embargo, el simulador de medición de parámetros ISDB-T es una herramienta bastante útil para estudiar el comportamiento del estándar ISDB-T a través de una interfaz de fácil entendimiento, si bien sus medidas no son reales, cumplen con los procedimientos establecidos para la toma de estas medidas.

El manual de procedimientos para desarrollar ensayos de laboratorio permite hacer un buen uso de la herramienta desarrollada, evitando la ocurrencia de errores. Además facilita al usuario las instrucciones para llevar a cabo la configuración de los parámetros de entrada del sistema.

Durante la ejecución de este trabajo surgieron varios inconvenientes que conllevaron a la limitación del alcance establecido, y a centrar el desarrollo de la herramienta computarizada solo para medir los parámetros de transmisión: Frecuencia transmitida, Desviación en frecuencia, Ancho de banda ocupado, Máscara Espectral, Potencia transmitida y los parámetros de recepción: Respuesta de amplitud en frecuencias, Tasa de bit errados (BER), Tasa de error de modulación (MER), Diagrama de constelación, Multitrayecto, BER vs. Portadora, MER vs. Portadora, BER vs. CNR, Ruido marginal, Ruido Gaussiano vs. BER, Característica de retardo, dejando fuera del alcance de este trabajo la medida de los parámetros de transmisión: Espurias y frecuencia de muestreo IFFT y de los parámetros de recepción: Intermodulación, Ruido de Fase y Características de retardo de grupo.

El principal problema fue la limitación de memoria RAM del computador, ya que el sistema requería una gran cantidad de ésta, por lo tanto fue necesario simplificar la simulación, de lo contrario se requería una simulación con mayor cantidad de bloques, lo cual hacía que el sistema se detuviera instantáneamente dando el error “Memory allocation error”.

Otro de los inconvenientes surgidos, fue la no disponibilidad de equipos con los

cuales tener alguna referencia de la representación de estos parámetros. El equipo al cual se tuvo acceso en las instalaciones del Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, no contaba con estas funcionalidades.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda hacer uso del Manual de procedimientos para desarrollar ensayos de laboratorio para evitar cualquier inconveniente, que pueda corromper el correcto funcionamiento de la herramienta desarrollada.

Para la medición de ecos se recomienda ajustar un factor K superior a los 25 dB, para obtener así una medida correcta.

Se recomienda el desarrollo del sistema de transmisión y recepción del sistema ISDB-T mediante el uso de codificación bajo el lenguaje de programación de Matlab, para de esta manera reducir el uso de memoria RAM del computador.

Se recomienda para futuras extensiones de este trabajo, implementar la separación en capas jerárquicas (capas A, B y C) establecidas por el estándar.

Por último se recomienda la actualización de los equipos de computación disponibles en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV, para así tener un mayor provecho de esta herramienta.

REFERENCIAS

- [1] Sara Dobarro. *La Television Digital en Europa*. editorial 9, s.l, España, 1ra edition, 1998.
- [2] ITU-R. *Handbook on Digital Terrestrial Television Broadcasting Networks and Systems Implementation*. 2016.
- [3] Néstor Oscar Pisciotta. Sistema ISDB-Tb (primera parte). *Publicaciones de la Universidad Blas Pascal. Serie Materiales de Investigación*, 3(9), 2010.
- [4] Manuel Cubero. *La televisión digital: fundamentos y teorías*. MARCOM-BO,S.A, 2009.
- [5] Nestor Oscar Pisciotta. Remultiplexor ISDB-Tb. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (12), 2014.
- [6] Ramjee Prasad. *OFDM for Wireless Communications Systems*. Artech House Universal Personal Communications series, Londres, 2004.
- [7] UIT-T. Métodos para la medición de parámetros en la transmisión de señales de televisión digital por cable. *Recomendación UIT-T*, (142), 2000. Obtenido de <http://www.itu.int/rec/T-REC-J.142-200005-I/es> el 17 de Abril 2017.
- [8] NBR ABNT. 15601. *Televisão Digital Terrestre-Sistema de transmissão"*, primera edición Noviembre, 2007.
- [9] PROMAX. Manual de instrucciones. tv explorer HD ISDB-T/TB. Technical Report 1-105, 2013.

- [10] ETSI. Digital video broadcasting (DVB); measurement guidelines for DVB systems. *ETSI Technical Report*, (101 290), 2001.

- [11] UIT-R. Definición y medición de los productos de intermodulación en transmisores que utilizan técnicas de modulación de frecuencia, de fase o compleja. *Recomendación UIT-R*, (1446), 2000. Obtenido de <http://www.itu.int/publ/R-REC/es> el 17 de Abril 2017.

- [12] Rohde and Schwarz. Group delay measurements of frequency converters without lo access.

- [13] Fidas G. Arias. *El Proyecto de Investigación*. Episteme, C.A, Caracas-Venezuela, 5ta edition, 2006.