

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR DE  
RADIODIFUSIÓN SONORA IBOC-AM DIGITAL**



**Luis Javier López Mora  
José Ricardo Figueroa Miranda**

*Universidad del Cauca*  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT**  
**Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas en Telecomunicaciones**  
**Popayán, 2012**

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR DE  
RADIODIFUSIÓN SONORA IBOC-AM DIGITAL**



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

**LUIS JAVIER LÓPEZ MORA  
JOSÉ RICARDO FIGUEROA MIRANDA**

**Directora:  
Mag. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT  
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas en Telecomunicaciones  
Popayán, 2012**

# CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCION .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN AL ESTÁNDAR DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL IBOC.....	1
1.2 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.....	2
1.3 OBJETIVOS .....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO .....	3
CAPÍTULO 2. ESTÁNDAR DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL IBOC AM.....	5
2.1 SISTEMA IBOC AM.....	6
2.1.1 Servicios Soportados.....	7
2.1.2 Modos de Funcionamiento.....	8
2.1.2.1 Modo híbrido (Simulcast).....	8
2.1.2.2 Modo totalmente digital.....	8
2.2 CANALES LÓGICOS. ....	8
2.3 MEZCLADOR.....	9
2.3.1 Operación del Mezclador. ....	9
2.4 CODIFICADOR DE CANAL.....	10
2.5 ENTRELAZADOR. ....	11
2.5.1 Matrices del Entrelazador. ....	12
2.6 PROCESAMIENTO DE CONTROL DEL SISTEMA.....	12
2.7 MAPEADOR DE SUBPORTADORA OFDM.....	13
2.7.1 Procedimientos de Mapeo de Subportadora OFDM.....	14
2.7.1.1 Subportadoras Primarias.....	14
2.7.1.2 Subportadoras Secundarias y Terciarias. ....	14
2.7.1.3 Subportadoras de Referencia.....	15
2.8 GENERADOR DE SEÑAL OFDM. ....	15
2.8.1 Funcionalidad. ....	16

2.9 SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	16
2.10 CANAL.....	17
2.11 RECEPTOR.....	17
<b>CAPÍTULO 3. MODELO DE SIMULACIÓN DEL NIVEL FÍSICO DEL SISTEMA DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL IBOC AM .....</b>	<b>19</b>
3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS.....	19
3.1.1 Adquisición de la Información Sobre el Funcionamiento del Sistema.....	19
3.1.1.1 Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento del Transmisor.....	20
3.1.1.2 Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento del Canal.....	21
3.1.1.3 Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento del Receptor.....	21
3.1.2 Identificación de los Fines de la Simulación.....	22
3.1.3 Formulación de los Objetivos.....	22
3.2 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	22
3.2.1 Modelo del Transmisor.....	23
3.2.1.1 Identificación de clases y objetos.....	23
3.2.1.2 Identificación de estructuras.....	24
3.2.1.3 Identificación de sujetos.....	25
3.2.1.4 Definición de los atributos.....	25
3.2.1.5 Identificación de servicios o métodos.....	26
3.2.2 Modelo del Canal.....	26
3.2.2.1 Identificación de clases y objetos.....	26
3.2.2.2 Identificación de estructuras.....	27
3.2.2.3 Identificación de sujetos.....	27
3.2.2.4 Definición de los atributos.....	27
3.2.2.5 Identificación de servicios o métodos.....	27
3.2.3 Modelo del Receptor.....	27
3.2.3.1 Identificación de clases y objetos.....	27
3.2.3.2 Identificación de estructuras.....	28
3.2.3.3 Identificación de sujetos.....	29
3.2.3.4 Definición de los atributos.....	29
3.2.3.5 Identificación de servicios o métodos.....	30
3.3 MODELO DE SIMULACION.....	31
3.3.1 Modelo de Simulación del Subsistema Transmisor.....	31
3.3.1.1 Generador de Información.....	31
3.3.1.2 Aleatorizador.....	31

3.3.1.3	Codificador de Canal.....	32
3.3.1.4	Entrelazador.....	33
3.3.1.5	Procesamiento de Control del Sistema. ....	35
3.3.1.6	Mapeador de Subportadoras OFDM. ....	35
3.3.1.7	Generador de Símbolos OFDM.....	37
3.3.2	Modelo de Simulación del Subsistema Canal de Comunicación. ....	37
3.3.2.1	Caracterización del Modelo AWGN. ....	37
3.3.3	Modelo de Simulación del Subsistema Receptor. ....	38
3.3.3.1	Regenerador de Símbolos OFDM. ....	38
3.3.3.2	Demapeador de Subportadoras OFDM.....	38
3.3.3.3	Desentrelazador.....	40
3.3.3.4	Decodificador de Canal.....	42
3.3.3.5	Caracterización del Desaleatorizador.....	42
CAPÍTULO 4.	VALIDACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	43
4.1	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN. ....	43
4.1.1	Elección del Lenguaje de Programación.....	43
4.1.2	Desarrollo del Software de Simulación.....	44
4.2	VALIDACIÓN DEL MODELO. ....	44
4.3	ESCENARIO DE SIMULACIÓN. ....	44
4.4	PLAN DE PRUEBAS.....	44
4.4.1	Diagramas de Constelación .....	45
4.4.2	Diagramas de Ojo.....	45
4.4.3	Graficas de Espectro. ....	45
4.4.4	Graficas de BER vs SNR. ....	46
4.5	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
4.5.1	Análisis de los Diagramas de Constelación.....	46
4.5.2	Análisis de los Diagramas de Ojo. ....	50
4.5.3	Análisis de Espectro. ....	53
4.5.4	Análisis de Desempeño. ....	56
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	61
5.1	CONCLUSIONES.....	61
5.2	TRABAJOS FUTUROS. ....	63
REFERENCIAS	BIBLIOGRÁFICAS.....	64

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Capas del Sistema IBOC. ....	3
Figura 2.1 Diagrama de Bloques Funcionales del Nivel Físico. ....	7
Figura 2.2 Diagrama de Bloques Funcionales del Mezclador.....	9
Figura 2.3 Diagrama de Bloques del Mezclador. ....	10
Figura 2.4 Diagrama de Bloques Conceptual del Codificador Convolutacional. ....	10
Figura 2.5 Diagrama de Bloques Conceptual del Entrelazador.....	11
Figura 2.6 Diagrama Conceptual del Procesamiento de Control del Sistema. ....	12
Figura 2.7 Diagrama Conceptual de Bloques Funcionales del Mapeador de Subportadora OFDM.....	13
Figura 2.8 Asignación de Elementos del Vector X de Salida a Subportadoras. ....	13
Figura 2.9 Constelación BPSK.....	15
Figura 2.10 Diagrama de Bloques del Generador de Señal OFDM.....	15
Figura 2.11 Diagrama de Bloques Funcionales de la Capa Física del Receptor.....	17
Figura 3.1 Diagrama General del Sistema IBOC-AM.....	23
Figura 3.2 Estructura del Codificador de Canal.....	24
Figura 3.3 Estructura del Entrelazador. ....	24
Figura 3.4 Estructura del Mapeador de Subportadoras OFDM. ....	25
Figura 3.5 Estructura del Canal de Transmisión.....	27
Figura 3.6 Estructura del Demapeador de Subportadoras OFDM. ....	28
Figura 3.7 Estructura del Desentrelazador.....	29
Figura 3.8 Estructura del Codificador de Canal.....	29
Figura 3.9 Diagrama de Bloques del Subsistema Transmisor.....	31
Figura 3.10 Bloque Mezclador. ....	32
Figura 3.11 Bloque Codificador de Canal.....	32
Figura 3.12 Bloque Entrelazador. ....	34
Figura 3.13 Mapeador de Subportadora OFDM.....	35
Figura 3.14 Diagrama Subsistema Canal de transmisión.....	37
Figura 3.15 Diagrama en Bloques del Subsistema Receptor. ....	38
Figura 3.16 Demapeador de Subportadora OFDM.....	39
Figura 3.17 Bloque Desentrelazador.....	41
Figura 3.18 Bloque Decodificador de Canal. ....	42
Figura 4.1 Diagramas de Constelación para 64 QAM (situación ideal).....	46
Figura 4.2 Diagramas de Constelación en el Receptor para 64 QAM para el canal AWGN. ....	47

Figura 4.3 Diagramas de Constelación para 16 QAM (situación ideal).....	48
Figura 4.4 Diagramas de Constelación para 16 QAM en el Receptor para el canal AWGN. .....	48
Figura 4.5 Diagramas de Constelación para la Modulación BPSK (situación ideal). ....	49
Figura 4.6 Diagramas de Constelación para la Modulación BPSK en el Receptor para el canal AWGN.....	49
Figura 4.7 Parámetros en un Diagrama de Ojo.....	50
Figura 4.8 Diagramas de Ojo para la Modulación 64QAM (situación ideal). ....	51
Figura 4.9 Diagramas de Ojo para la Modulación 64QAM en el Receptor para el canal AWGN. ....	51
Figura 4.10 Diagramas de Ojo para la Modulación 16QAM (situación ideal).....	52
Figura 4.11 Diagramas de Ojo para la Modulación 16QAM en el Receptor para el canal AWGN. ....	52
Figura 4.12 Diagramas de Ojo para la Modulación BPSK (situación ideal).....	53
Figura 4.13 Diagramas de Ojo para la Modulación BPSK en el Receptor para el canal AWGN. ....	53
Figura 4.14 Máscara Espectral Definida por la FCC para el Estándar IBOC AM en Modo Todo Digital. ....	54
Figura 4.15 Espectros (situación ideal).....	55
Figura 4.16 Espectros en el Receptor para el Canal AWGN. ....	55
Figura 4.17 Gráfica de BER vs SNR para 64QAM. ....	57
Figura 4.18 Gráfica de BER vs SNR para 16QAM. ....	57
Figura 4.19 Comparación de Resultados del Reporte Técnico con los Resultados obtenidos. ....	58

# LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Velocidad de Transmisión de Datos Aproximada de los Canales Lógicos. ....	8
Tabla 2.2 Número de Bits por Elemento de la Matriz del Entrelazador.....	12
Tabla 3.1 Atributos de los Sujetos Identificados en el Transmisor.....	25
Tabla 3.2 Procedimientos Relacionados con los Sujetos Identificados en el Transmisor..	26
Tabla 3.3 Atributos del Canal de Transmisión AWGN. ....	27
Tabla 3.4 Procedimientos Realizado por el Canal de Transmisión AWGN. ....	27
Tabla 3.5 Atributos de los Sujetos del Receptor. ....	30
Tabla 3.6 Procedimientos Asociados con las Clases del Receptor. ....	30
Tabla 3.7 Número de Bits por Elemento de la Matriz del Entrelazador.....	33
Tabla 3.8 Variables de Entrada y Salida de los Multiplexores. ....	34
Tabla 3.9 Variables de Entrada y Salida de los Mapeadores Bits.....	35
Tabla 3.10 Variables de Entrada y Salida de los Mapeadores que Componen el Bloque Mapeador de Constelación de Señal. ....	36
Tabla 3.11 Variables de Entrada y Salida de los Demapeadores BPSK, 16QAM y 64QAM. .....	40
Tabla 3.12 Variables de Entrada y Salida de los Demapeadores. ....	41
Tabla 3.13 Variables de Entrada y Salida de los Demultiplexores.....	42
Tabla 3.14 Variables de Entrada y Salida de los Decodificadores Convolucionales. ....	42
Tabla 4.1 Tabla comparativa de Lenguajes de Simulación. ....	43
Tabla 4.2 Límites de Espectro para el Estándar IBOC AM en Modo Todo Digital. ....	54
Tabla 4.3 Límites BLER vs CNR.....	57



# LISTA DE ANEXOS

Anexo A Formas de Onda y Espectros.....	67
Anexo B Caracterización de los Canales Lógicos.....	69
Anexo C Codificación de Canal.....	71
Anexo D Descripción de Procesos de Entrelazado.....	77
Anexo E Tablas de Mapeo de Subportadoras OFDM.....	83
Anexo F Resultados Según Reporte Técnico .....	87

# LISTA DE APENDICES

Apéndice A1 Validación del Modelo de Simulación.....	89
Apéndice A2 Gráficas Obtenidas para el Canal Rayleigh.....	99
Apéndice A3 Gráficas Obtenidas para los Parámetros de Control del Sistema.....	103

# LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AAC</b>	<b>(Advanced Audio Coder)</b> . Codificador de Audio Avanzado.
<b>ADS</b>	<b>(Advanced Data Service)</b> . Servicios de Datos avanzados.
<b>AM</b>	<b>(Amplitude Modulation)</b> . Modulación en Amplitud.
<b>AWGN</b>	<b>(Additive White Gaussian Noise)</b> . Canal de Ruido Blanco Gaussiano.
<b>BER</b>	<b>(Bit Error Rate)</b> . Tasa de Error de Bit.
<b>BPSK</b>	<b>(Binary Phase-Shift Keying)</b> . Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
<b>CD</b>	<b>(Compact Disc)</b> . Discos Compactos.
<b>DAB</b>	<b>(Digital Audio Broadcasting)</b> . Radiodifusión de Audio Digital.
<b>DRM</b>	<b>(Digital Radio Mondiale)</b> . Radio Digital Mundial.
<b>EIA</b>	<b>(Electronic Industries Alliance)</b> . Alianza de Industrias Electrónicas.
<b>FCC</b>	<b>(Federal Communications Commission)</b> . Comisión Federal de Comunicaciones.
<b>FDM</b>	<b>(Frequency Division Multiplexing)</b> . Multiplexación por División de Frecuencia.
<b>FFT</b>	<b>(Fast Fourier Transform)</b> . Transformada Rápida de Fourier.
<b>FM</b>	<b>(Frequency Modulation)</b> . Modulación en Frecuencia.
<b>GNTT</b>	Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones.
<b>HD Radio</b>	<b>(High Definition Radio)</b> . Radio de Alta Definición.
<b>IFFT</b>	<b>(Inverse Fast Fourier Transform)</b> . Transformada Inversa Rápida de Fourier
<b>IBOC</b>	<b>(In-Band On-Channel)</b> . En Banda Dentro de Canal.
<b>IP</b>	<b>(Interleaving Process)</b> . Proceso de Entrelazado.
<b>ISDB-T</b>	<b>(Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial)</b> . Radiodifusión Digital de Servicios Integrados Terrestres.
<b>ISI</b>	<b>(Inter Symbol Interference)</b> . Interferencia entre símbolos.
<b>MPEG-2</b>	<b>(Moving Picture Experts Group - 2)</b> . Grupo de Expertos en Imágenes Móviles – 2.
<b>MPS</b>	<b>(Main Program Service)</b> . Servicio de Programa Principal.
<b>OFDM</b>	<b>(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</b> . Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
<b>PIDS</b>	<b>(Primary IBOC Data Service)</b> . Servicio de datos primarios IBOC.
<b>QAM</b>	<b>(Quadrature Amplitude Modulation)</b> . Modulación de Amplitud en Cuadratura.
<b>QPSK</b>	<b>(Quadrature Phase Shift Keying)</b> . Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
<b>RF</b>	<b>(Radio Frequency)</b> . Radio Frecuencias.
<b>SCA</b>	<b>(Subsidiary Communications Authorization)</b> . Autorización de Comunicaciones en Subportadora.
<b>SCCH</b>	<b>(System Control Channel)</b> . Canal de Control del Sistema.

**SIDS** (*Secondary IBOC Data Service*). Servicio de Datos Secundarios IBOC.  
**SIS** (*Station Identification Service*). Servicio de Identificación de Estación.  
**SPS** (*Supplemental Program Service*). Servicio de Programa Suplementario.  
**SNR** (*Signal-to-Noise Ratio*). Relación Señal a Ruido.  
**NRSC** (*National Radio Systems Committee*). Comité Nacional de Sistemas de Radio.  
**UHF** (*Ultra High Frequency*). Frecuencia Ultra Alta.  
**VHF** (*Very High Frequency*). Frecuencia Muy Alta

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCION

## 1.1 INTRODUCCIÓN AL ESTÁNDAR DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL IBOC.

Para la implementación de los servicios de radiodifusión sonora digital terrenal en las frecuencias de 30-3.000 MHz, la Unión Internacional de Telecomunicaciones, en su Recomendación UIT-R BS.1114, propone entre otros sistemas digitales, el sistema digital IBOC, para la banda en ondas métricas y en su Recomendación UIT-R BS. 1514 para la banda en ondas decamétricas.

La tecnología IBOC (*In Band-On Channel*), desarrollada por *iBiquity Digital Corporation*, fue adoptada oficialmente por Estados Unidos en octubre de 2002, cuando la FCC (*Federal Communications Commission*) organización reguladora, la aprobó como estándar técnico para la radio digital terrestre en el país. En 2005 la NRSC<sup>1</sup> institución organizadora de estos asuntos y patrocinada por la NAB<sup>2</sup> y la CEA<sup>3</sup>, expide la norma denominada NRSC-5 [1], que designaba el uso de esta tecnología para la radiodifusión digital terrestre en la banda FM, y representaba la especificación formal por la industria de los detalles del sistema HD Radio<sup>TM</sup> [1], denominación comercial con que la empresa propietaria designó al sistema. HD Radio<sup>4</sup> fue una iniciativa de las radios privadas norteamericanas, que incluyeron 15 de las 20 cadenas de radiodifusión más importantes de Estados Unidos.

El sistema IBOC presenta dos modos de operación: un modo de funcionamiento híbrido que permite a las estaciones transmisiones simultáneas de audio digital con calidad de compresión HE-AAC (*High Efficiency AAC*) y el tradicional audio analógico, sin la necesidad de cambiar a nuevas bandas de frecuencia y un modo totalmente digital que proporciona capacidades mejoradas de funcionamiento en el mismo canal después de suprimir la señal analógica existente o cuando el canal no está siendo usado para radiodifusiones analógicas. Existe actualmente un sistema IBOC para la banda de Amplitud Modulada (AM) desde los 530 [KHz] a los 1710 [KHz] y otro para la Frecuencia Modulada (FM). [2] desde los 88 [MHz] a los 108 [MHz].

<sup>1</sup> NRSC: National Radio Systems Committee (Comité Nacional de Sistemas de Radio EEUU)

<sup>2</sup> NAB National Association of Broadcasters (Asociación Nacional de Difusores)

<sup>3</sup> CEA Consumer Electronics Association (Asociación de Consumidores Electrónicos)

<sup>4</sup> HD Radio. High Definition Radio (Radio de Alta Definición)

## 1.2 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.

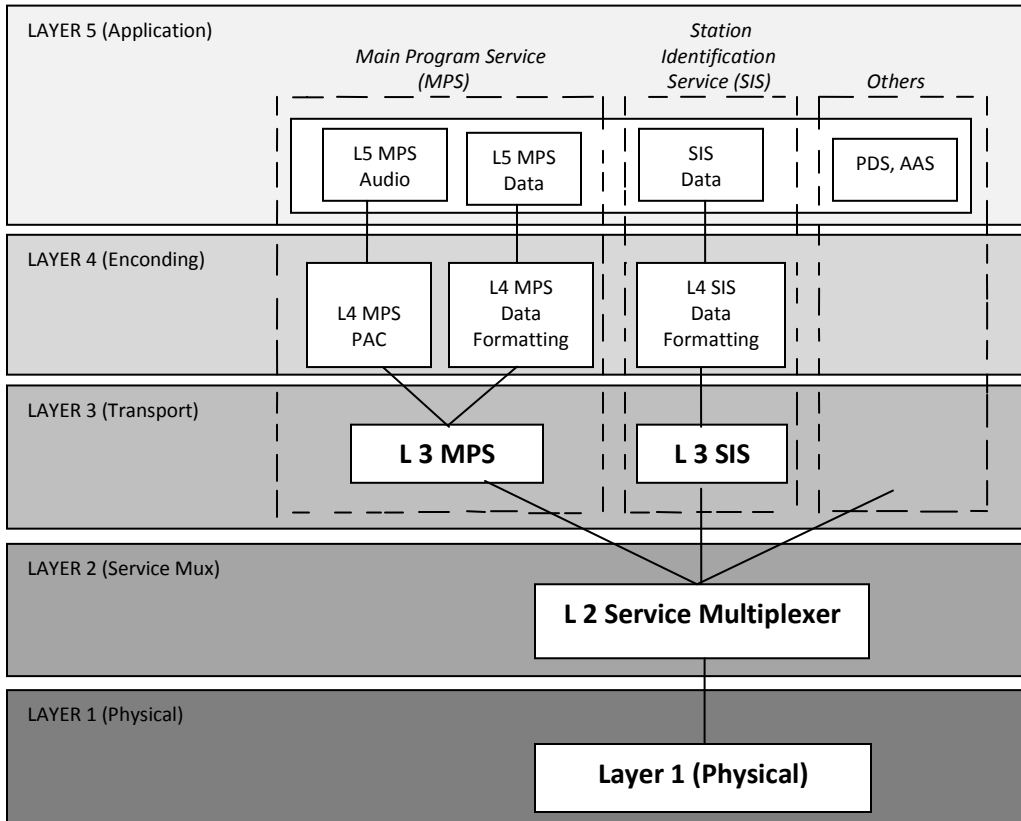
Para apoyar los servicios que soporta el sistema IBOC (*Main Program Service (MPS)*, *Station Identification Service (SIS)*, *Supplemental Program Service (SPS)*, *Servicios Avanzados de Datos (ADS)* y *Personal Data Service (PDS)*) éste sistema cuenta con un protocolo de capas ilustrado en la figura 1.1. Este protocolo está basado en el modelo de capas de la *Organización Internacional de Estándares de Interconexión de Sistemas Abiertos (ISO/OSI)*. Cada capa OSI en el terminal transmisor tiene una capa idéntica en el receptor.

En la figura 1.1 se pueden observar cómo se adaptó el protocolo al Sistema IBOC en donde se representan en orden descendente las cinco capas que lo componen: Capa 5 (Aplicación), en el transmisor esta capa recibe audio y datos del contenido del programa de la emisora, es decir que en esta capa se encuentra la fuente del programa. Capa 4 (Codificación) realiza la compresión de audio necesario a formato de datos de los materiales de origen diferentes, así como la identificación de la estación y las capacidades de control. Capa 3 (Transporte) proporciona uno o más protocolos de aplicación específica adaptados para facilitar la transferencia eficiente y robusta de la capa 4 de datos. Capa 2 (Servicio Mux) proporciona detección de errores limitado, de direccionamiento y multiplexación. Su función principal es dar formato a los datos recibidos de la capa 3 en los marcos de transferencia discreta para el procesamiento de la capa 1, es decir que la capa 2 recibe audio y datos desde las capas superiores, multiplexa esta información en PDUs<sup>5</sup> de capa 2 y enruta los PDUs a un canal lógico apropiado de capa 1. La capa 2 permite que los transportes del MPS/SPS y del AAS sean activados dentro de cualquier canal lógico, con la excepción del PIDS. La Información de las capas superiores también está en forma de PDUs, pero de capa transporte. Capa 1 (capa física), prevé la modulación, el encuadre, y la señalización necesaria para convertir los datos digitales recibidos de las capas superiores en una onda de IBOC AM para su transmisión en una asignación existente en la banda FM, en cambio la onda de FM IBOC se transmitirá al aire en la banda de VHF [3].

---

<sup>5</sup> PDU: Packet Data Unit (Unidad de paquetes de datos).

**Figura 1.1 Capas del Sistema IBOC.**



## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar y analizar el desempeño a nivel físico del Estándar de Radiodifusión Digital Sonora IBOC-AM Digital.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Simular la capa física del estándar IBOC-AM Digital, en banda base adaptando y utilizando la Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones.
- Analizar el desempeño del nivel físico del estándar IBOC-AM Digital y realizar la comparación con los parámetros técnicos del estándar IBOC-AM Digital y reportes técnicos de implementaciones de la tecnología.

## 1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El trabajo está organizado de la siguiente manera:

El capítulo 2 presenta los aspectos generales del estándar de radiodifusión sonora digital IBOC AM, los servicios que soporta, sus modos de funcionamiento y los bloques funcionales que lo conforman.

En el capítulo 3 se explica la metodología de desarrollo empleada para la realización de este trabajo de grado, donde se plantea el diseño del modelo en diagramas de bloques funcionales y subbloques funcionales. Se describe las estructuras que conforman el estándar.

En el capítulo 4 se desarrolla la validación del modelo y el análisis de los resultados de la simulación del nivel físico del estándar de radiodifusión sonora digital IBOC AM.

El capítulo 5 contiene las conclusiones del presente trabajo de grado y las líneas futuras a seguir.



## CAPÍTULO 2. ESTÁNDAR DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL IBOC AM

En este capítulo se analiza y detalla el funcionamiento del sistema IBOC-AM, tratando aspectos como características de la transmisión, formas de onda, sistema de control de canal, modos de servicios disponibles, canales lógicos, componentes de interfaz de la capa 1, sistema de control y de transmisión.

Uno de los desarrollos tecnológicos más sobresalientes en el sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, es el relacionado con la introducción de las tecnologías digitales en los sistemas de telecomunicaciones, es así como, en el campo de la radiodifusión sonora se han desarrollado a nivel mundial diferentes estándares como, el formato japonés denominado Transmisión Digital de Servicios Integrados –Radiodifusión Sonora Terrestre (ISDB-T<sub>SB</sub>, *Integrated Services Digital Broadcasting –Terrestrial Sound Broadcast*), el estándar francés Radio Digital Mundial (DRM, *Digital Radio Mondiale*), el estándar europeo de Radiodifusión Sonora Digital (DAB, *Digital Audio Broadcasting*) y el estándar americano Canal dentro de Banda (IBOC, *In-Band On-Channel*), con la finalidad de mitigar problemas de baja calidad, desvanecimientos de la señal, vulnerabilidad a problemas de recepción y estática causados por interferencia y, distorsión por múltiples trayectorias, presentes en la actual radiodifusión sonora analógica [2].

A nivel nacional, el estándar americano IBOC en la modalidad de Amplitud Modulada (AM, *Amplitude Modulation*) y Frecuencia Modulada (FM, *Frequency Modulation*) ofrece la posibilidad de operación híbrida entre la tradicional tecnología analógica y la tecnología digital para facilitar la transición de la radiodifusión sonora a su formato totalmente digital.

El estándar y la tecnología IBOC fueron creados y desarrollados por la empresa *Ibiquity Digital Corporation*, IBOC también es conocido como NRSC-5, en virtud de las entidades que lo ha estandarizado: El Comité Nacional de Sistemas de Radio (NRSC, *National Radio Systems Committee*) junto con la Asociación Nacional de Radiodifusores (NAB, *National Association of Broadcasters*); a nivel comercial la *Ibiquity* lo denominó como HD Radio (*Hybrid Digital*). Esta tecnología permite la continuidad del servicio analógico, garantizando al público radioescucha durante el periodo de transición a la Radio Digital Terrestre (RDT, *Radio Digital Terrestrial*), la recepción del servicio analógico; la coexistencia de receptores analógicos y digitales mediante la misma señal recibida, se hace en el modo de funcionamiento Simulcast<sup>1</sup>; por la utilización de las frecuencias AM y

---

<sup>1</sup>Simulcast: Se define como la capacidad para transmitir en el mismo canal la señal analógica y la señal digital, sin que hayan interferencias entre ellas.

FM existentes para su implementación, lo que permite reutilizar equipos, así como la línea de transmisión y antena (parte de radiación de la energía) además de ahorrar espectro [2].

La especificación IBOC-AM, que trabaja en la banda de Frecuencia Media (MF, *Medium Frequency*), provee una calidad similar a la de frecuencia modulada FM, en los receptores. Por tal motivo este trabajo de grado concentra su interés en el modo de funcionamiento totalmente digital.

## 2.1 SISTEMA IBOC AM.

El nivel físico del sistema IBOC-AM Digital convierte la información de audio y datos procedente de la capa 2 y del control del sistema, desde el administrador de configuración, en una forma de onda AM que se transmite en las frecuencias ya existentes en la banda MF. Esta información y el control, se transportan en tramas de transferencia discretas, conocida como, Capa 2 Protocolo de Unidad de Datos (*L2 PDUs*). El (*L2 PDUs*) varía en tamaño y forma dependiendo del modo de servicio empleado. Este, es un componente importante del control del sistema, ya que determina las características de transmisión de cada canal lógico.

Después de evaluar los requerimientos de las aplicaciones, las capas superiores del protocolo seleccionan los modos de servicio de tal manera que se puedan configurar los canales lógicos. La pluralidad de los canales lógicos refleja la flexibilidad inherente del sistema, lo que soporta la entrega simultánea de varias clases de audio digital y de datos. En este nivel también se recibe el control del sistema que hace el administrador de configuración, para el uso de la capa física y se utiliza en el procesador del sistema de control. La figura 2.1 muestra un diagrama de los bloques funcionales del procesamiento del nivel físico. El audio y datos son transportados desde los protocolos de los niveles más altos a través de varios canales lógicos P1, P3, PIDS<sup>2</sup>, los cuales pasan al proceso de mezclado<sup>3</sup>, luego se suscriben con una "S" como subíndice para indicar que ya han superado esta etapa. Después, los vectores se marcan con una "G" para indicar que han sido procesados por el bloque codificador de canal en donde pasan por un proceso de codificación convolucional. Para cada canal lógico se asignan un mezclador y un codificador de canal dedicados. Al culminar el proceso de entrelazado los canales lógicos se convierten en matrices del entrelazador PU, PL, S, T, PIDS<sup>4</sup>. Luego, el mapeador de subportadora OFDM<sup>5</sup> genera un símbolo OFDM que se lleva al dominio del tiempo y concatenado con otros símbolos por el bloque generador de señal OFDM. Finalmente, el subsistema de transmisión lleva la señal a Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) y la transmite [1].

El Canal de Control del Sistema (SCCH, *System Control Channel*) transporta información de control y estado, desde el administrador de configuración. Donde el procesamiento de control de sistema genera un vector R, este vector contiene información de control y estado que es transmitida en las portadoras de referencia.

---

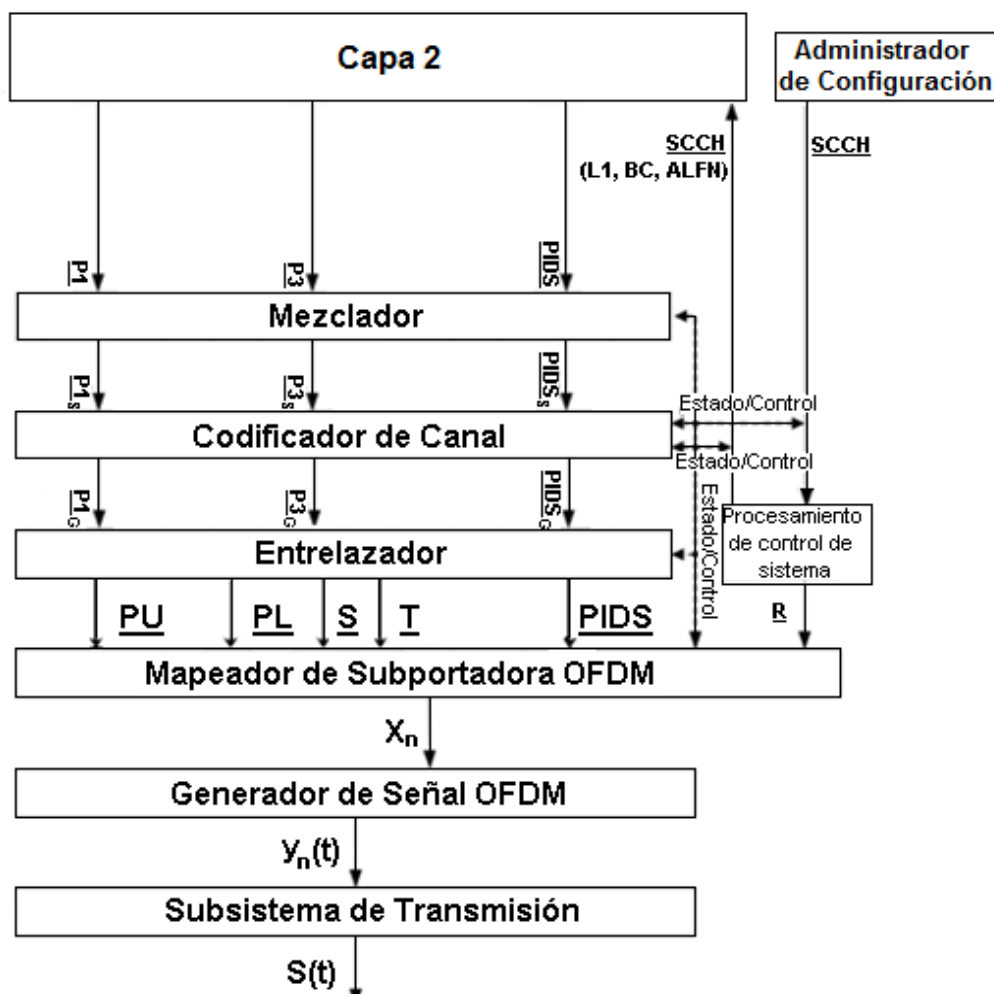
<sup>2</sup>El subrayado sencillo, es una notación para nombrar un canal lógico, referente al hecho de que los datos se pasan entre las diversas funciones como vectores.

<sup>3</sup>El proceso de mezclado aleatoriza los datos de cada canal lógico.

<sup>4</sup>El formato subrayado doble indica matrices de dos dimensiones.

<sup>5</sup>OFDM: Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Figura 2.1 Diagrama de Bloques Funcionales del Nivel Físico.



### 2.1.1 Servicios Soportados.

Los servicios soportados por esta tecnología se describen a continuación. [2]

**Servicio de Programa Principal (MPS, Main Program Service):** Corresponde al programa de audio convencional, además puede incluir datos relacionados con el programa; por ejemplo, nombre de la canción, intérprete, etc.

**Servicio de Datos Personal (PDS, Personal Data Service):** Corresponde a datos no relacionados con el programa y que son transmitidos para usuarios determinados

**Servicio de Identificación de Estación (SIS, Station Identification Service):** Se utiliza para la transmisión de los datos necesarios para la identificación de cada estación de radio. Le permite al usuario una fácil selección de la estación.

**Servicio de aplicaciones Auxiliares (AAS, *Auxiliary Application Service*):** Corresponde a la transmisión de datos auxiliares para aplicaciones específicas.

### 2.1.2 Modos de Funcionamiento.

El sistema IBOC-AM opera en dos modos diferentes: modo híbrido, modo totalmente digital [2].

#### 2.1.2.1 Modo híbrido (Simulcast).

La señal digital se transmite en bandas laterales, donde, esta se reduce en amplitud respecto a la señal analógica. Permite la recepción de los programas tanto para los receptores digitales como para los receptores convencionales analógicos, no es posible la emisión en estéreo para la señal analógica. Lo más importante, es que retrasa la señal analógica con respecto a la señal digital con el objetivo de que haya una sincronización entre ambas señales. En el anexo A.1 se ilustra el espectro correspondiente a este modo.

#### 2.1.2.2 Modo totalmente digital.

Se transmiten únicamente las señales digitales, donde se suprime la señal analógica, desplazando en frecuencia y aumentando la potencia de la señal digital.

En el anexo A.2 se ilustra y describe detalladamente la distribución del espectro para el modo de funcionamiento totalmente digital. Este trabajo considera el modo totalmente digital.

## 2.2 CANALES LÓGICOS.

Un canal lógico es un camino de señales que conduce L2 PDU en tramas de transferencia dentro y fuera del nivel físico del sistema IBOC-AM con un grado específico de servicio. Los canales lógicos son denotados por símbolos como P1, PIDS, etc.

En este nivel del sistema IBOC-AM Digital se proporciona tres canales lógicos P1, P3, PIDS. Donde P1 y P3 están destinados para la transferencia de audio y de datos, mientras que PIDS está diseñado para soportar el servicio de información de la estación (SIS). El canal P1 está diseñado para ser más robusto que el canal lógico P3, lo que permite una transferencia de información que puede ser adaptada para conformar una diversidad de aplicaciones. La Tabla 2.1 muestra la velocidad de transmisión de datos soportada por cada canal lógico en función del modo de servicio [1].

**Tabla 2.1 Velocidad de Transmisión de Datos Aproximada de los Canales Lógicos.**

Modo de Servicio	Velocidad de Transmisión de Datos (Kbps)			Forma de Onda
	P1	P3	PIDS	
MA1	20	16	0.4	Híbrida
MA3	20	20	0.4	Digital Total

En el anexo B se muestra la información de caracterización de los canales lógicos, en función del modo de servicio para IBOC-AM digital.

## 2.3 MEZCLADOR.

Este bloque aleatoriza los datos digitales en cada canal lógico, para “bloquear” y mitigar la periodicidad de la señal<sup>6</sup>, cuando la onda se demodula en un demodulador analógico de AM. Los bits en cada canal lógico, se aleatorizan en el dominio del tiempo y se sincronizan en el receptor.

Las entradas a los mezcladores, son los canales lógicos activos que vienen desde el nivel 2 determinados por el modo de servicio; el tamaño de las tramas en función del modo de servicio para los canales lógicos se muestra en el anexo B. Las salidas de los codificadores, son tramas de transferencias de bits aleatorizadas provenientes de los canales lógicos activos. El mezclador, genera un código pseudoaleatorio que se adiciona en módulo 2 simplificando los vectores de entrada de estos. El código generado es un registro de desplazamiento con retroalimentación FEC. Como se muestra en la figura 2.2 existen tres mezcladores paralelos, uno para cada canal lógico [1].

Figura 2.2 Diagrama de Bloques Funcionales del Mezclador.



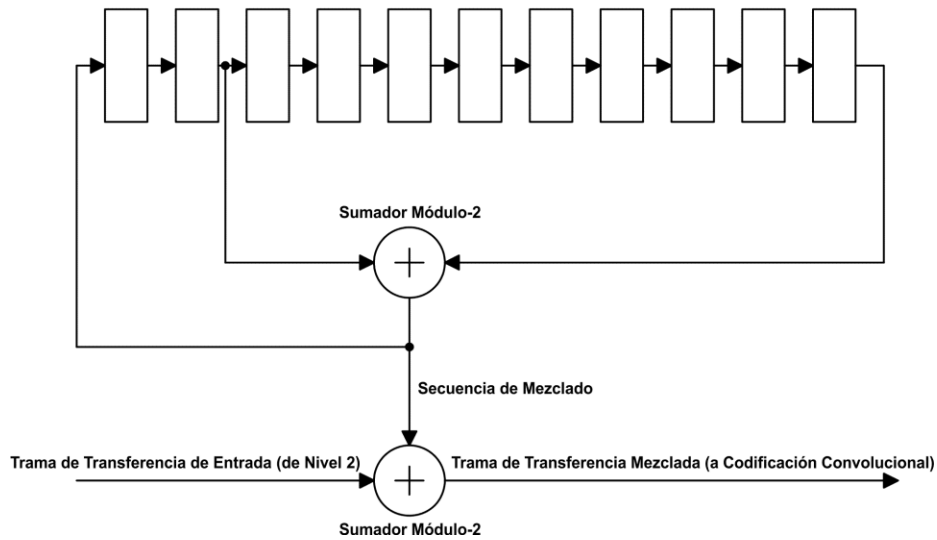
### 2.3.1 Operación del Mezclador.

Todos los mezcladores paralelos son idénticos pero operan a velocidades diferentes, dependiendo del modo de servicio activo. Un diagrama de bloques detallado del mezclador se muestra en la figura 2.3. Cada mezclador genera una frecuencia de longitud máxima mezclada, usando un registro de desplazamiento con retroalimentación lineal con un polinomio primitivo

$$P(x) = 1 \oplus x^2 \oplus x^{11} \quad (2.1).$$

<sup>6</sup> Se resumen las secuencias largas de unos y ceros lógicos.

**Figura 2.3 Diagrama de Bloques del Mezclador.**



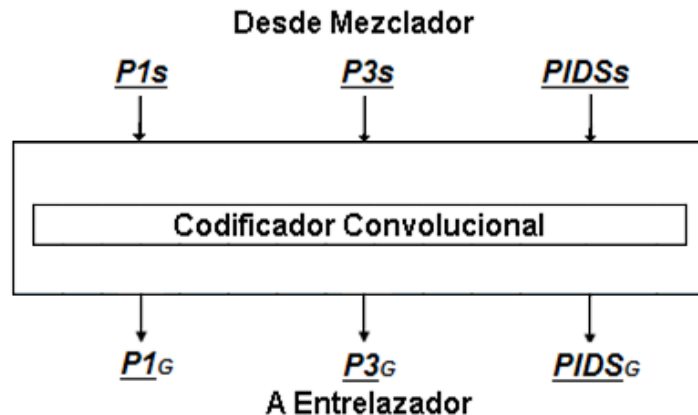
Un bit de una trama de transferencia mezclada, se genera al adicionar en módulo-2 el primer bit de la trama de transferencia de entrada con el bit de secuencia de mezclado, el cual a su vez es generado al adicionar, también en módulo-2, el segundo y décimo primer bits del registro; añadiendo el bit de entrada asociado con el bit correspondiente de la secuencia de codificación. El proceso continua hasta que el ultimo bit de la trama de transferencia de entrada este codificado o mezclado.

Para cada canal lógico, el mezclador se reinicia en el estado 0111111111 al recibir una nueva trama de transferencia.

## 2.4 CODIFICADOR DE CANAL.

El bloque codificador de canal es un codificador convolutivo que mejora el desempeño de la señal en presencia de interferencias y deficiencias de los canales, como se muestra en la figura 2.4, el proceso de codificación se caracteriza por la sola operación de la codificación convolutiva.

**Figura 2.4 Diagrama de Bloques Conceptual del Codificador Convolutivo.**



Las entradas para el codificador convolucional son las tramas de transferencia de bits mezclados. Las salidas del proceso, son tramas de transferencia de bits codificados asociados con cada uno de los canales lógicos activos que pasan al entrelazador. A la entrada del codificador convolucional cada canal lógico tiene una  $S$  como subíndice y a la salida una  $G$ , la cual indica que ese canal ya ha sido codificado. Así:  $P1_S \rightarrow P1_G$ .

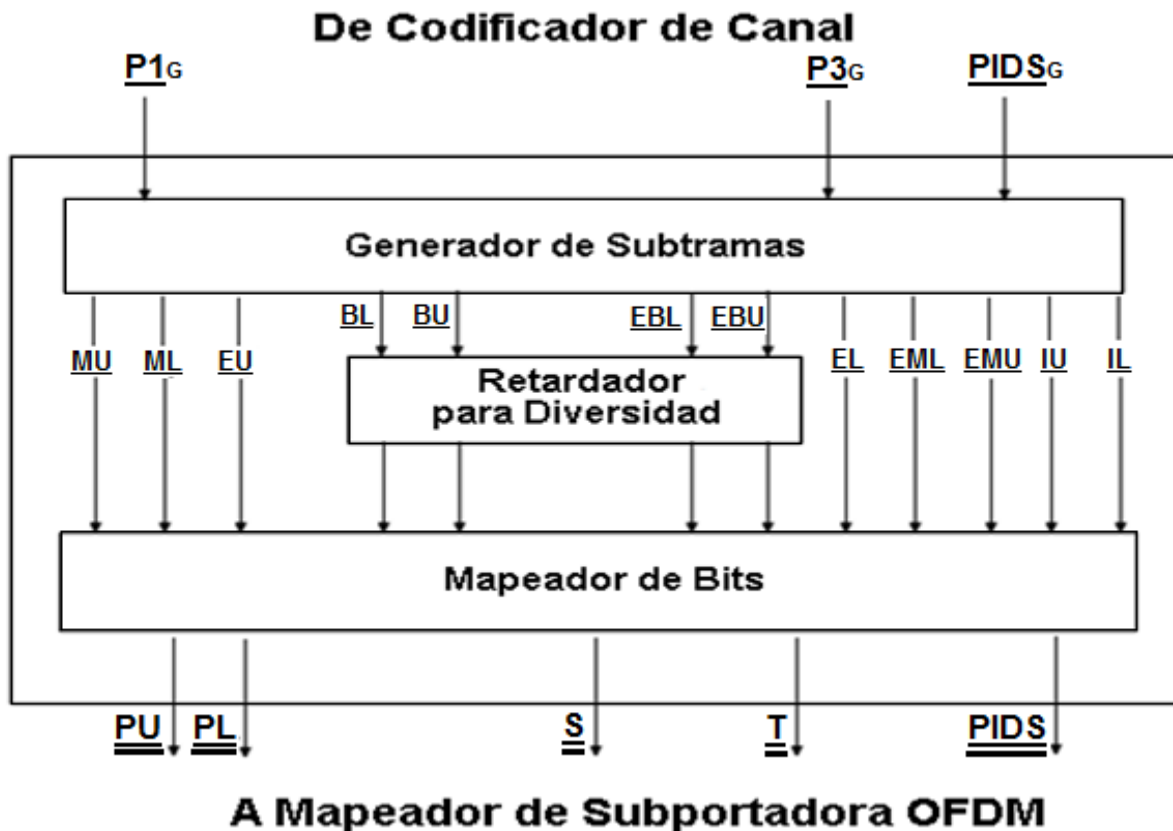
La codificación convolucional se aplica a los canales lógicos por separado para corregir y detectar errores, en algunos casos se utiliza una matriz perforada para disminuir la tasa de codificación. Cada canal lógico se procesa utilizando diferentes polinomios codificadores, tasas de codificación y matrices perforadas, en el anexo C se definen las características en función del canal y el modo de servicio.

## 2.5 ENTRELAZADOR.

Los canales lógicos pierden su significado cuando se toman los vectores provenientes del codificador convolucional y se genera una matriz de bits reordenados. Este reordenamiento de bits antes de la transmisión, mitiga el impacto de la ráfaga de errores causada por los desvanecimientos y la interferencia, que son configurables por el modo de servicio. Cada matriz está compuesta de información completa o parcial de los canales lógicos y se asocia con una porción específica del espectro de transmisión.  $\underline{PU}$  y  $\underline{PL}$ , por ejemplo, se asignan a las bandas laterales primarias mientras que  $\underline{S}$  y  $\underline{T}$  se asignan a las bandas laterales secundarias y terciarias, respectivamente.

El entrelazador consta de tres Procesos de Entrelazado (IP, *Interleaving Process*): P1, P3 y PIDs. Como se observa en la figura 2.5 los IP son paralelos.

Figura 2.5 Diagrama de Bloques Conceptual del Entrelazador.



Un IP contiene uno o mas entrelazadores, y en algunos casos un buffer con retardo para diversidad como se muestra en el anexo D. El modo de servicio determina que entradas y que IPs están activas en un momento dado. Los IPs, también generan subtramas, creando rutas con retardo para diversidad que se traducen en cadenas principales y de respaldo. La asignación de bits a la salida del entrelazador se encarga de los bits codificados en locaciones únicas en la salida del entrelazador, convirtiendo las salidas del entrelazador en matrices.

### 2.5.1 Matrices del Entrelazador.

Una matriz del entrelazador se utiliza para reordenar y agrupar los bits de las subtramas, estos bits son codificados individualmente para ser dirigidos a unos bloques específicos dentro de la matriz del entrelazador. Un bloque del entrelazador puede ser visto como un entrelazador menor independiente.

En general, una matriz del entrelazador tiene 256 filas y un bloque del entrelazador tiene 32 filas, por lo tanto hay 8 bloques del entrelazador por cada matriz. El número de columnas en una matriz del entrelazador depende de la matriz específica. El sistema AM utiliza cinco diferentes matrices del entrelazador; PU, PL, S, T, y PIDS. Cada una de las matrices tiene 25 columnas excepto la matriz PIDS, que tiene solamente dos. Además, el número de bits en cada elemento de una matriz no sólo depende de la matriz del entrelazador sino también del modo de servicio. El número de bits por elemento para cada matriz en cada modo de servicio se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Número de Bits por Elemento de la Matriz del Entrelazador.**

Matrices del Entrelazador				
<u>PU</u>	<u>PL</u>	<u>S</u>	<u>T</u>	<u>PIDS</u>
6	6	6	6	4

Los procesos de entrelazado se ilustran en el anexo D, en función del modo de servicio.

### 2.6 PROCESAMIENTO DE CONTROL DEL SISTEMA.

Ensambla y codifica diferencialmente una secuencia de bits del sistema de control destinados a cada subportadora de referencia, como se muestra en la figura 2.6.

**Figura 2.6 Diagrama Conceptual del Procesamiento de Control del Sistema.**

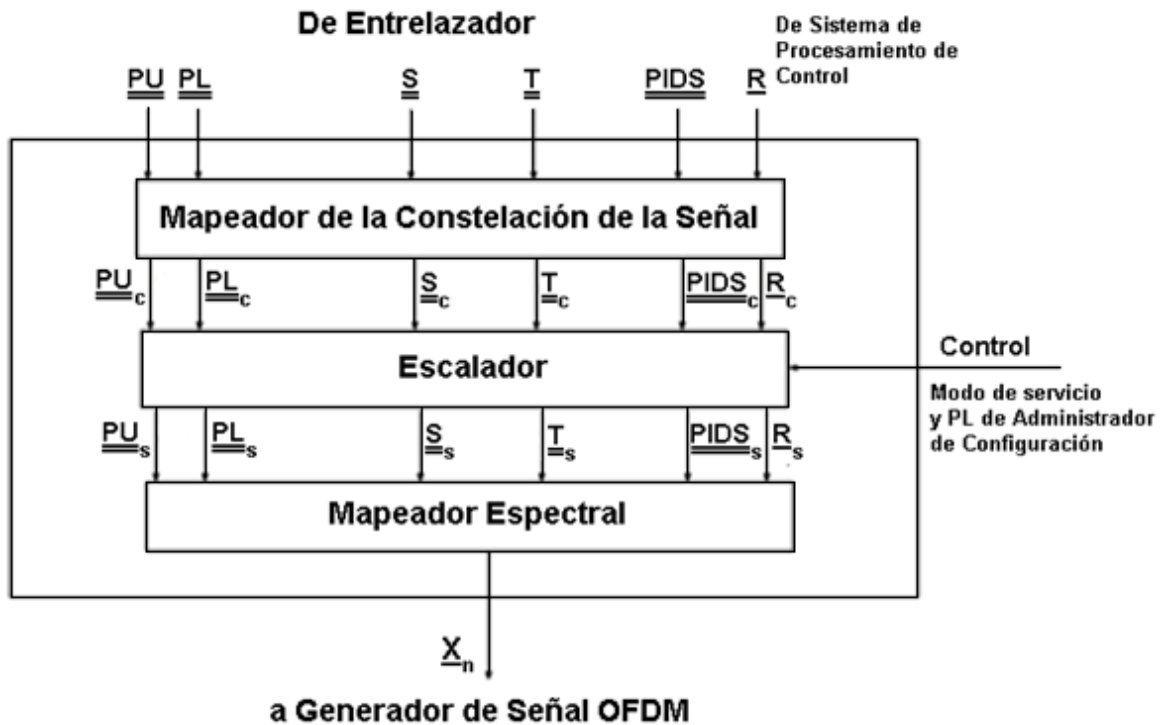




## 2.7 MAPEADOR DE SUBPORTADORA OFDM.

El bloque mapeador de subportadora OFDM asigna un valor complejo a los elementos de las matrices del entrelazador, con estos valores se conforma el vector complejo  $\mathbf{X}$ . El mapeador de subportadora OFDM transforma las filas de las matrices del entrelazador a valores en la escala de las modulaciones QPSK, 16-QAM o 64-QAM según los modos de servicio MA1 y MA3 asignándolos a determinadas subportadoras OFDM en el vector de salida  $\mathbf{X}$ . El Sistema de control de los bits de la secuencia de datos de  $\underline{R}$  transforma a símbolos BPSK y asigna los lugares de subportadoras de referencia en  $\cdot$ . La figura 2.7 muestra las entradas, salidas y los componentes del bloque mapeador de subportadora OFDM.

**Figura 2.7 Diagrama Conceptual de Bloques Funcionales del Mapeador de Subportadora OFDM.**



Las entradas al mapeador de subportadoras OFDM son las matrices del entrelazador  $\underline{PU}$ ,  $\underline{PL}$ ,  $\underline{S}$ ,  $\underline{T}$ ,  $\underline{PIDS}$  y  $\underline{R}$  el vector de referencia del sistema de control. Las matrices  $\underline{S}$ ,  $\underline{T}$ ,  $\underline{PIDS}$  y  $\underline{R}$  se mapean en las subportadoras secundarias, terciarias, PIDS y sus subportadoras de referencia respectivamente.

La salida del mapeador de subportadora OFDM para cada símbolo OFDM es un único vector complejo  $\mathbf{X}$  de longitud 163. El vector está indexado por  $k=0,1,2,\dots,162$ . El elemento  $k^{\text{th}}$  de  $\mathbf{X}$  corresponde a la subportadora  $(k-81)$  como se muestra en la figura 2.8.

**Figura 2.8 Asignación de Elementos del Vector  $\mathbf{X}$  de Salida a Subportadoras.**

Indice en $\mathbf{X}$	0	1	2	...	160	161	162
Número de Subportadora	-81	-80	-79	...	79	80	81

Las matrices del entrelazador primario (PU y PL) se mapean a constelaciones 64-QAM. En la forma de onda totalmente digital, S mapea a la banda lateral secundaria y T mapea a la banda lateral superior terciaria. Las matrices del entrelazador secundario y terciario se mapean a constelaciones 64-QAM, mientras que la matriz del entrelazador PIDS se mapea a constelaciones 16-QAM. El vector de entrada R se mapea a los puntos de la constelación BPSK.

### **2.7.1 Procedimientos de Mapeo de Subportadora OFDM.**

Se especifican los procedimientos de mapeo de subportadora OFDM.

#### **2.7.1.1 Subportadoras Primarias.**

Los elementos de estas matrices de dimensión 256x25 (PU y PL) son palabras de seis bits. Al mapear cada palabra de seis bits dentro de una matriz del entrelazador a una ubicación de la subportadora dentro del vector X, se realizan los siguientes pasos.

1. Leer una palabra de seis bits de un elemento dentro de una matriz del entrelazador.
2. Mapear la palabra de seis bits del paso 1 a un valor de la constelación compleja utilizando la tabla E.1 que se incluye en el anexo E.1.1.
3. Escalar los componentes I y Q del valor de la constelación compleja del paso 2 utilizando el factor de escala de amplitud apropiada de la tabla E.7 descrita en el anexo E.1.1.
4. Mapear el valor de la constelación escalada del paso 3 con el elemento adecuado de X utilizando la tabla E.2 descrita en el anexo E.1.1.

#### **2.7.1.2 Subportadoras Secundarias y Terciarias.**

En la forma de onda totalmente digital, S mapea a la banda lateral secundaria y T mapea a la banda lateral superior terciaria. Las matrices del entrelazador secundaria y terciaria se mapean a constelaciones 64-QAM, mientras que la matriz del entrelazador PIDS se mapea a constelaciones 16-QAM. S y T tienen dimensiones de 256x25 y cada elemento contiene seis bits por palabra. La matriz PIDS tiene elementos constituidos por cuatro bits por palabra y tiene dimensiones 32x2.

Para mapear cada palabra de seis o cuatro bits en una matriz del entrelazador a una ubicación de la subportadora dentro del vector X, se realizan los siguientes pasos:

1. Leer una palabra de 6 o 4 bits de una columna en una matriz del entrelazador.
2. Mapear la palabra de 6 o 4 bits del paso 1 a un valor de constelación compleja utilizando la tabla E.1 que se encuentra en el anexo E.1.1 para palabras de 6 bits y la tabla E.3 incluida en el anexo E.1.2 para palabras de 4 bits.
3. Escalar las componentes I y Q del valor de constelación compleja del paso 2 utilizando el factor de escala de amplitud apropiado de la tabla E.7 incluida en el anexo E.1.3.
4. Mapear el valor de la constelación escalada del paso 3 con el elemento adecuado de X utilizando la tabla E.4 o la tabla E.5 que están incluidas en el anexo E.1.2.

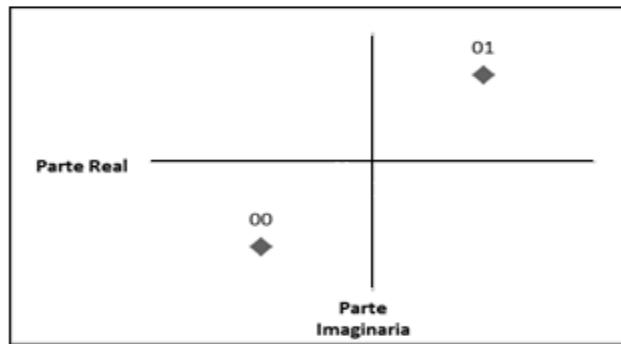
### 2.7.1.3 Subportadoras de Referencia.

El vector de entrada  $\underline{R}$  se compone de 256 bits (es decir, un único bit para cada símbolo OFDM en una trama L1). Los bits de este vector se mapean a puntos de la constelación BPSK (figura 2.9), como se muestra en la tabla E.6 incluida en el anexo E.1.3.

Para mapear cada bit dentro del vector  $\underline{R}$  a una ubicación de la subportadora dentro del vector  $\underline{X}$ , se toman los siguientes pasos:

1. Leer un bit del vector  $\underline{R}$ .
2. Mapear el bit del paso 1 a un valor de constelación compleja utilizando la tabla E.6 incluida en el anexo E.1.3.
3. Escalar las componentes I y Q del valor de constelación compleja del paso 2 utilizando el factor de escala apropiado de la tabla E.7 incluida en el anexo E.1.3.
4. Mapear el valor de la constelación escalada del paso 3 con el elemento adecuado de  $\underline{X}$  utilizando la tabla E.8 que se encuentra en el anexo E.1.3.

**Figura 2.9 Constelación BPSK.**



## 2.8 GENERADOR DE SEÑAL OFDM.

Se reciben los símbolos OFDM complejos en el dominio de la frecuencia y se entregan pulsos en el dominio del tiempo en la salida.

La entrada es un vector complejo  $\underline{X}_n$ , de longitud L, que representa los valores de la constelación compleja para cada subportadora OFDM en el símbolo OFDM n-ésimo. Este símbolo se transforma al dominio del tiempo por la IFFT y se modifica para crear un símbolo en el dominio del tiempo  $y_n(t)$ , el cual representa la porción digital de la señal IBOC AM para el símbolo n [4].

Un diagrama de bloques del generador de señal OFDM se muestra en la figura 2.10.

**Figura 2.10 Diagrama de Bloques del Generador de Señal OFDM.**



### 2.8.1 Funcionalidad.

$\mathbf{X}_n[k]$  son los puntos de la constelación escalada que vienen del mapeo de subportadora OFDM para el n-ésimo símbolo, donde  $k$  indica las subportadoras OFDM con  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1$ .

$y_n(t)$  denota la salida en el dominio del tiempo de la señal OFDM para el símbolo OFDM n-ésimo. Entonces,  $y_n(t)$  se escribe en términos de  $\mathbf{X}_n[k]$  como lo ilustra la ecuación (2.2)

$$y_n(t) = W(t - nT_s) \cdot \sum_{k=0}^{L-1} \mathbf{X}_n[k] \cdot e^{j2\pi\Delta f \left[ k - \frac{(L-1)}{2} \right] (t - nT_s)}, \quad (2.2)$$

donde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ ,  $0 \leq t < \infty$   $L = 163$  es el número total de subportadoras OFDM.  $T_s$  y  $\Delta f$  son la duración del símbolo OFDM y el espaciado de subportadora OFDM, respectivamente.

La función *conformación de pulsos*  $W(\xi)$  se define con la ecuación (2.3)

$$W(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{Para } \xi < 0 \\ \sqrt{\frac{1}{3\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-4050 \cdot \left(\frac{\tau}{T_s}\right)^2 H(\xi - \tau)} d\tau} & \text{Para } 0 \leq \xi \leq \frac{348}{270} T_s \\ 0 & \text{Para } \xi > \frac{348}{270} T_s \end{cases} \quad (2.3)$$

donde  $H(\xi)$ , es la función *pulso coseno alzado*, definida como

$$H(\xi) = \begin{cases} 0.5 \left[ 1 + \cos \left( \pi \frac{\alpha T - \xi}{\alpha T} \right) \right] & \text{Para } 0 < \xi \leq \alpha T \\ 1.0 & \text{Para } \alpha T < \xi < T \\ 0.5 \left[ 1 + \cos \left( \pi \frac{\alpha T - \xi}{\alpha T} \right) \right] & \text{Para } T \leq \xi \leq (1 + \alpha)T \\ 0 & \text{Para otro valor} \end{cases}$$

donde  $\alpha$  es la duración del prefijo cíclico

$T = 1/\Delta f$  es el periodo del espaciado de la subportadora OFDM.

### 2.9 SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN.

Cada  $y_n(t)$  representa un símbolo OFDM en el dominio del tiempo, por lo tanto es necesario que los símbolos OFDM individuales en el dominio del tiempo se sumen para producir una serie continua de pulsos; este proceso se lleva a cabo en el bloque concatenación de símbolos. La señal digital concatenada  $y_n(t)$ , se transforma al pasar de banda base a la frecuencia de portadora de RF en el proceso de conversión hacia arriba y

se combina con el audio modulado analógicamente (en el modo híbrido) para finalmente obtener la forma de onda IBOC RF para ser transmitida [1].

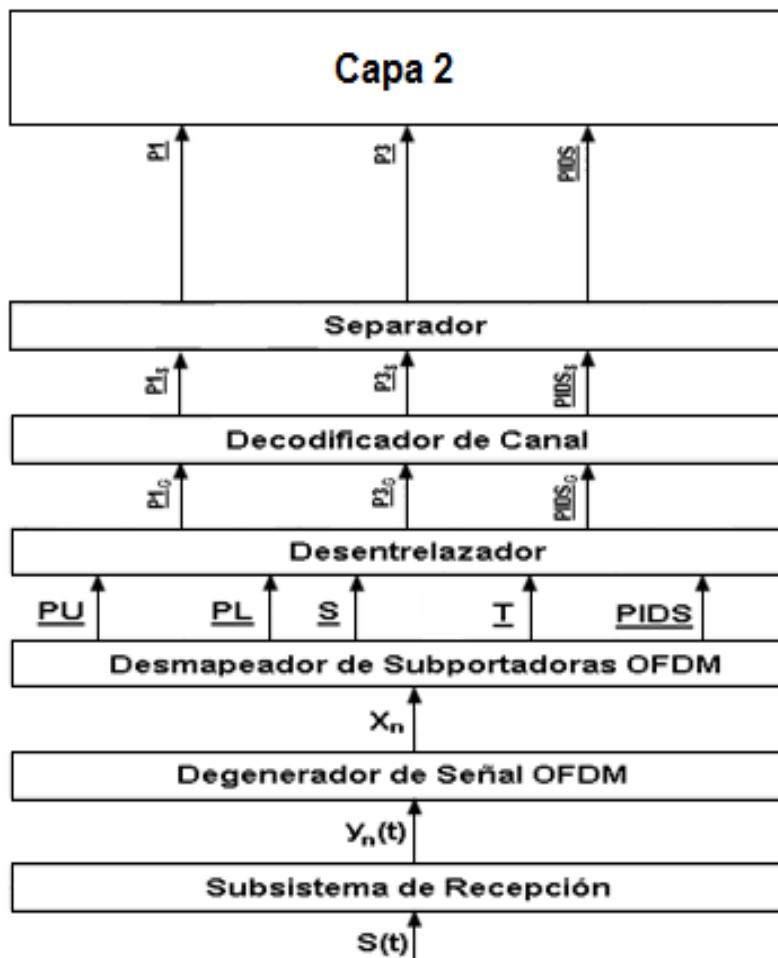
## 2.10 CANAL.

El modelo de canal AWGN en el cual únicamente se estima la degradación sufrida por la señal transmitida al verse afectada por el ruido gaussiano ofrece una buena alternativa para la evaluación del desempeño del sistema.

## 2.11 RECEPTOR.

Un equipo de recepción está conformado por funciones inversas a los bloques que componen el transmisor, el proceso de decodificación separa la información de los bits de redundancia. De igual manera, existen procesos inversos para el resto de los componentes: mezclado y separación, entrelazado y desentrelazado, mapeo y modulación de subportadora y extracción de matrices entrelazadas. En la figura 2.11, se ilustra el diagrama de bloques del receptor.

**Figura 2.11 Diagrama de Bloques Funcionales de la Capa Física del Receptor.**





# CAPÍTULO 3. MODELO DE SIMULACIÓN DEL NIVEL FÍSICO DEL SISTEMA DE RADIODIFUSIÓN SONORA DIGITAL IBOC AM

El modelo de simulación del nivel físico del sistema de radiodifusión sonora digital bajo el estándar IBOC-AM se definió teniendo en cuenta los lineamientos planteados en el documento *Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones* [5] por consiguiente en este capítulo se desarrollan las siguientes fases propuestas por los autores en la metodología.

1. Formulación del Problema y Plan de Estudios.
2. Recolección y Procesamiento de Datos.
3. Formulación de un Modelo de Simulación.
4. Evaluación del Modelo y Parámetros Estimados.

En el transcurso del capítulo se describe la aplicación de la *Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones*.

## 3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PLAN DE ESTUDIOS.

Para la ejecución de esta fase, la metodología recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Adquisición de la información sobre el funcionamiento del sistema.
2. Identificación de los fines de la simulación.
3. Formulación de los objetivos.

A continuación, se describe cada paso.

### 3.1.1 Adquisición de la Información Sobre el Funcionamiento del Sistema.

La formulación de preguntas concernientes al funcionamiento general de un sistema es la mejor manera de adquirir la información necesaria de este y lo que se desea obtener de la simulación. Esta información permite definir las variables de entrada y de salida, al igual que los parámetros que se requieran analizar con la simulación.

A continuación se presenta la lista de las preguntas planteadas para adquirir la información necesaria sobre el funcionamiento del transmisor, el receptor y el canal.

### 3.1.1.1 Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento del Transmisor.

**¿Qué tipo de señales debe procesar el transmisor?** La fuente de información generará secuencias de bits aleatorios que representan la información a transmitir, estas secuencias serán procesadas hasta obtener la señal OFDM en banda base, que se entrega al canal de transmisión.

**¿Qué pasos sigue el transmisor para el procesamiento de las señales en cuestión?** De acuerdo con el estándar de radio digital AM, para obtener la señal OFDM a partir de la generación de secuencias de bits aleatorias, en el transmisor se deben desarrollar los siguientes procesos.

**Generación de Información:** se establece la información de cada canal lógico y la matriz R de control de configuración, dependiendo de los modos de operación del sistema. Los bits que representan la información se crean a partir de una función que genera números binarios aleatorios.

**Mezclado:** mezcla los bits procedentes del generador de información con una secuencia de bits pseudoaleatoria con el fin de evitar que se presenten largas cadenas de bits consecutivos con un mismo valor. El proceso es realizado para la información de cada uno de los canales lógicos.

**Codificación de Canal:** codifica la información mezclada empleando codificadores convolucionales. Los codificadores introducen bits de redundancia en la información, lo cual hace posible la detección y corrección automática de errores.

**Entrelazado:** el entrelazado es realizado para mitigar el efecto de los errores en ráfaga, es decir errores que ocurren sobre muchos bits consecutivos. Durante este proceso los canales lógicos pierden su identidad y la información contenida en ellos es estructurada en forma de matrices, las cuales se denominan **matrices entrelazadoras**. Cada una de ellas contiene parte de la información de un canal lógico y se asocia con una porción del espectro. Las matrices entrelazadoras obtenidas de este proceso son: PL y PU, las cuales corresponden a la porción del espectro denominada **banda primaria**, S y T que corresponden a las bandas **secundaria** y **terciaria**; PIDS\_ la cual se asocia con las subportadoras -53, -27, 27 y 53<sup>7</sup> y el vector R, que se asocia con las subportadoras -1 y 1.

**Mapeo:** cada grupo de bits contenido en las matrices intercaladoras es mapeado a un vector complejo que corresponde a un punto de la constelación perteneciente al esquema de modulación asignado a la matriz intercaladora. Las matrices PL, PU, S y T son moduladas empleando el esquema 64QAM mientras que la matriz PIDS: emplea el esquema 16QAM. Por otra parte, los bits del vector R son modulados empleando el esquema de modulación binario BPSK. El resultado de este proceso es un conjunto de matrices complejas. Cada una de estas matrices es, a su vez, multiplicada por un factor de escalamiento.

**Generación del Vector  $X_n$ :** utiliza las matrices complejas producidas en el proceso de mapeo para formar un conjunto de 256 vectores complejos  $X_n$  por cada trama de transmisión. Cada uno de estos vectores, se forma por 163 elementos y representa un

---

<sup>7</sup> Cada símbolo OFDM se conforma de 163 subportadoras, las cuales son numeradas de -81 y 81



símbolo OFDM. A su vez, cada posición en un vector  $\mathbf{X}_n$  hace referencia a una de las 163 subportadoras que conforman el correspondiente símbolo OFDM.

**Generación de Símbolos OFDM:** realiza un proceso de conformación de pulsos (*pulse shaping*) sobre cada uno de los elementos de los vectores  $\mathbf{X}_n$ . La conformación de pulsos se emplea para reducir los errores causados por interferencia inter simbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*)[6]. Además este subproceso aplica la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) sobre cada símbolo OFDM para obtener su representación en el dominio del tiempo. El resultado de este proceso es una representación en banda base, en el dominio del tiempo, de las señales que son moduladas sobre cada una de las subportadoras. La duración de cada pulso es igual a la duración de un símbolo OFDM.

### 3.1.1.2 Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento del Canal.

**¿Qué tipo de señales va a procesar el canal de transmisión?** recibirá la representación en el dominio del tiempo de la señal OFDM en banda base, la cual será afectada por la degradación producida debido al ruido gaussiano, representado por medio del canal AWGN. Como salida entrega los símbolos OFDM afectado por el modelo de canal.

**¿Qué pasos sigue el canal de transmisión para el procesamiento de las señales en cuestión?** La señal OFDM en banda base es degradada por el efecto del ruido gaussiano, modelado por medio de un canal AWGN.

### 3.1.1.3 Adquisición de Información Sobre el Funcionamiento del Receptor.

**¿Qué tipo de señales va a procesar el Receptor?** recibe la señal OFDM en banda base afectada por las condiciones del canal de transmisión. Además, recupera la información correspondiente a los canales lógicos creados en el transmisor, representada mediante secuencias de bits aleatorios.

**¿Qué pasos sigue el receptor para el procesamiento de las señales en cuestión?** Para recuperar la información a partir de la señal OFDM en banda base recibida, se desarrollan los procesos complementarios a los ejecutados en la etapa de transmisión.

**Extracción de los Vectores Complejos  $\mathbf{X}_{nr}$ :** es el inverso a la Generación de Símbolos OFDM en transmisión. Este proceso tiene como entrada la representación en el dominio del tiempo de la señal recibida, la cual se encuentra degradada debido a su paso por el canal de transmisión. A partir de ella se obtiene su representación en el dominio de la frecuencia por medio de la Transformada Rápida Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), con lo cual se obtiene un conjunto de pulsos complejos degradados, a partir de los cuales se procede a recuperar, por medio de un muestreo de cada pulso, los valores complejos asociados con cada uno de los pulsos, y asignarlos a cada uno de los vectores  $\mathbf{X}_{nr}$  correspondientes a cada símbolo OFDM.

**Extracción de Matrices:** es inverso al desarrollado en la Generación del Vector  $\mathbf{X}_n$ , toma los vectores complejos  $\mathbf{X}_{nr}$  y los procesa para obtener las matrices de valores complejos.

**Demapeo:** es inverso al mapeo en el transmisor, obtiene las matrices entrelazadoras en recepción a partir de las matrices complejas.

**Decodificación de Canal:** desarrolla las funciones inversas a las implementadas en el proceso Codificación de Canal; Toma las matrices entrelazadoras para obtener los canales lógicos codificados, los decodifica para corregir los errores encontrados en ellos y posteriormente los mezcla con el objetivo de recuperar la información de los canales lógicos generados en transmisión.

### **¿Qué factores serán evaluados con la simulación?**

- Espectro y ancho de banda de las señales transmitidas.
- Relación entre la BER y la SNR en el receptor.
- Diagramas de constelación en el transmisor para las modulaciones BPSK, 16QAM y 64QAM.
- Diagramas de constelación en el receptor para las modulaciones BPSK, 16QAM y 64QAM, para diferentes valores de SNR.
- Diagramas de ojo de la señal transmitida para las modulaciones BPSK, 16QAM y 64QAM.
- Diagramas de ojo de la señal recibida para las modulaciones BPSK, 16QAM y 64QAM para diferentes valores de SNR.

### **3.1.2 Identificación de los Fines de la Simulación.**

Mediante la adaptación y aplicación de la Metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, se desarrolla la simulación del estándar de radiodifusión sonora digital IBOC-AM a nivel físico en banda base, con el propósito de evaluar y analizar su desempeño, a través de la identificación de los diferentes procesos aplicados a la señal que están integrados en los tres grandes componentes que constituyen el sistema, denominados Transmisor, Canal y Receptor.

### **3.1.3 Formulación de los Objetivos.**

- Analizar el desempeño del sistema IBOC-AM Digital a nivel físico, mediante la comparación de los resultados obtenidos en simulación.

## **3.2 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.**

Permite identificar los elementos y propiedades de cada una de las etapas del sistema. La principal fuente de información usada durante esta fase fue la especificación a nivel físico del estándar NRSC-5, la cual fue presentada en el capítulo 2 y en los anexos.

Para la identificación de los módulos y parámetros, se clasificó la información dentro de los subsistemas transmisor, canal y receptor. En la figura 3.1 se presenta el diagrama general del nivel físico del sistema de radiodifusión sonora digital IBOC-AM.

**Figura 3.1 Diagrama General del Sistema IBOC-AM.**



La abstracción de los elementos que componen el sistema y sus propiedades se realizó aplicando los siguientes procedimientos:

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

Las clases son plantillas o prototipos para instanciar o crear objetos, y los objetos son abstracciones de componentes o procesos que generan y/ó transforman una o varias señales.

Desde el punto de vista estructural, la complejidad de un sistema de telecomunicaciones puede ser manejada a través del análisis orientado a objetos por medio de la estructura Todo-Parte (*Whole-Part*).

Un sujeto es un concepto que representa el todo de un sistema desde una perspectiva alta. Para seleccionar un sujeto se representa el nivel más alto de una estructura por un solo bloque que represente toda la estructura.

Los atributos son propiedades de los objetos, las cuales frecuentemente se definen como variables miembro de dichos objetos.

Los servicios o métodos se pueden definir como el comportamiento específico que puede presentar un objeto, por lo que es necesario establecer los procedimientos que cada objeto realiza para identificarlo plenamente.

### **3.2.1 Modelo del Transmisor.**

#### **3.2.1.1 Identificación de clases y objetos.**

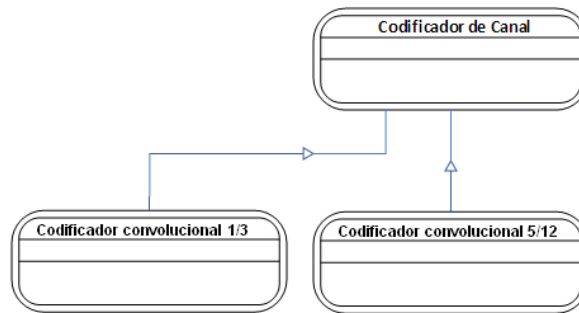
- Codificador 1/3.
- Codificador 5/12.
- Retardador para diversidad.
- Mapeador de bits.
- Mapeador de constelación.
- Escalador.
- Mapeador espectral.

### 3.2.1.2 Identificación de estructuras.

Las estructuras que pueden identificarse en el transmisor son las siguientes:

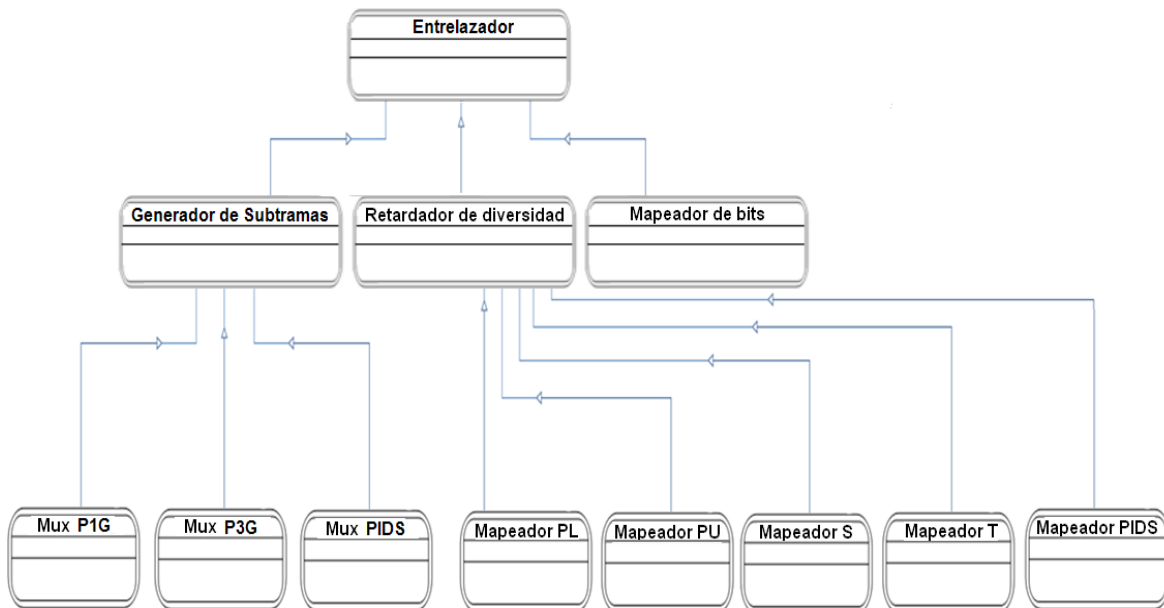
**Codificador de Canal:** conformado por los codificadores convolucionales con tasas de codificación de 1/3 y 5/12, como se muestra en la figura 3.2.

**Figura 3.2 Estructura del Codificador de Canal.**



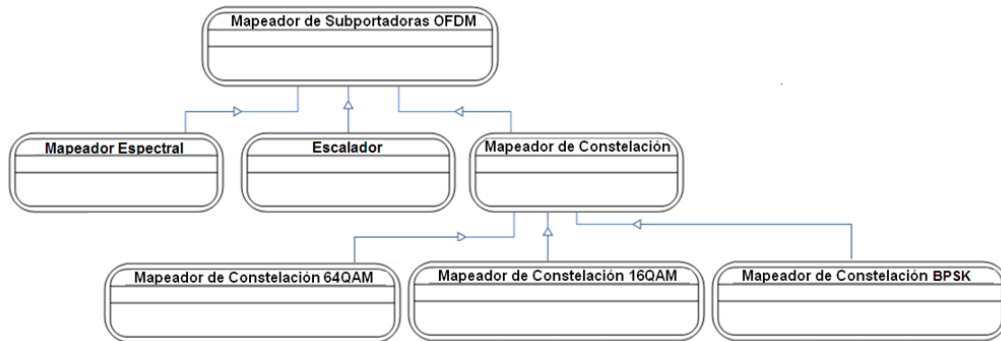
**Entrelazador:** conformado por el generador de subtramas, el retardo por diversidad y el mapeador de bits. A su vez, el generador de subtramas está conformado por tres multiplexores, uno para cada canal lógico. De forma similar, el mapeador de bits se conforma por 5 mapeadores individuales: Mapeador PL, mapeador PU, mapeador S, mapeador T y mapeador PIDS. La figura 3.3 muestra la estructura del entrelazador.

**Figura 3.3 Estructura del Entrelazador.**



**Mapeador de Subportadoras OFDM:** conformado por el mapeador de constelación, el escalador y el mapeador espectral. El mapeador de constelación, a su vez está conformado por el mapeador 64QAM, el mapeador 16QAM y el mapeador BPSK. La figura 3.4 muestra la estructura de este bloque.

**Figura 3.4 Estructura del Mapeador de Subportadoras OFDM.**



### 3.2.1.3 Identificación de sujetos.

Los sujetos identificados en el transmisor fueron los siguientes:

- Generador de canales lógicos.
- Aleatorizador.
- Codificador de canal.
- Generador de subtramas.
- Procesamiento del control del sistema.
- Mapeador de subportadoras OFDM.
- Generador de señal OFDM.

### 3.2.1.4 Definición de los atributos.

Los atributos que representan las propiedades más importantes de cada uno de los sujetos identificados para el transmisor son descritos en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Atributos de los Sujetos Identificados en el Transmisor.**

Clase	Nombre atributo	Descripción
Generador de canales lógicos	Nframes	Número de tramas que son generadas.
Aleatorizador.	Secuencia	Secuencia pseudoaleatoria con la que el flujo de bits procedente de la fuente de información es mezclado.
Codificador de canal	Polinomio	Polinomio generador del código convolucional.
	Perforación	Vector de perforación que permite obtener distintas tasas de codificación.
Generador de subtramas	b,n,k	Índices que señalan a los diferentes bits de la matriz intercaladora y los cuales son empleados por el algoritmo de intercalamiento.
Procesamiento del control del	Contador de bloques	Variable empleada para la colocación la numeración de bloques en la trama R.

sistema	Contador de frames	Variable que numera los frames transmitidos.
Mapeador de constelación.	Constelación	Conjunto de valores complejos que se asocian con un grupo de bits.
Escalador	Factor Escalar	Factor de normalización de la constelación.
Generador de señal OFDM.	Tiempo de bit	Tiempo de duración de un bit.
	Tiempo de muestra	Tiempo de duración de una muestra de la señal OFDM.
	Longitud FFT	Longitud de la transformada rápida de Fourier.

### 3.2.1.5 Identificación de servicios o métodos.

La tabla 3.2 muestra los principales procedimientos asociados con las clases del Transmisor.

**Tabla 3.2 Procedimientos Relacionados con los Sujetos Identificados en el Transmisor.**

Clase	Procedimiento	Descripción
Generador de Canales lógicos	Generar Canales	Genera un conjunto de datos aleatorios correspondientes a los canales lógicos para un número determinado de tramas.
Aleatorizador	<i>Scrambler</i>	Mezcla el flujo de bits con una secuencia pseudoaleatoria, con el fin de evitar las cadenas largas de unos o de ceros.
Codificador de Canal	Codificar	Codifica los datos empleando un código convolucional.
Generador de subtramas	dividir Trama	Divide la trama de un canal lógico en varias subtramas.
Retardador por diversidad	generar Retardo	Produce un retardo de un tiempo igual al tiempo de 3 tramas en algunas subtramas.
Mapeador de bits	mapear Bits	Mapea los bits de las subtramas en las matrices intercaladoras correspondientes a las portadoras primaria, secundaria terciaria.
Procesamiento del control del sistema	generar Vector R	Genera el vector R de acuerdo con la información contenida en los campos PSM, PLevel, AAB los cuales son generados por el generador de los canales lógicos.
Mapeador de constelación	Mapear Constelación	Mapea las matrices intercaladoras en fasores complejos que representan el estado de la portadora.
Escalador	Escalar	Multiplica la matriz compleja obtenida después de realizar el proceso de mapeo de constelación por un factor de normalización.
Mapeador Espectral	Mapear	Mapea los valores de la matriz compleja normalizada al vector $X_n$ .
Generador Símbolo OFDM	crear Símbolo	Crea el símbolo OFDM a partir de los valores complejos en el vector $X_n$ .

## 3.2.2 Modelo del Canal.

### 3.2.2.1 Identificación de clases y objetos.

El canal de comunicaciones, introduce diversos tipos de degradaciones sobre la señal que transporta. Una de las fuentes de degradación con mayor efecto en los sistemas de

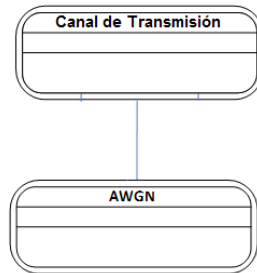
comunicaciones inalámbricas de largo alcance es la introducción de ruido blanco gaussiano. Para representar este efecto de degradación se ha identificado como modelo el canal AWGN.

### 3.2.2.2 Identificación de estructuras.

La única estructura identificada para el canal es la siguiente:

**Canal de Transmisión:** se conforma por la clase AWGN como se aprecia en la figura 3.5.

**Figura 3.5 Estructura del Canal de Transmisión.**



### 3.2.2.3 Identificación de sujetos.

En el modelo del canal se identificó un único sujeto, el canal de transmisión.

### 3.2.2.4 Definición de los atributos.

La tabla 3.3 muestra los atributos de cada una de las clases del canal de transmisión.

**Tabla 3.3 Atributos del Canal de Transmisión AWGN.**

Clase	Nombre atributo	Descripción
Canal AWGN	SNR	Relación señal a ruido del canal gaussiano

### 3.2.2.5 Identificación de servicios o métodos.

La tabla 3.4 muestra los procedimientos de cada una de las clases del canal.

**Tabla 3.4 Procedimientos Realizado por el Canal de Transmisión AWGN.**

Clase	Procedimiento	Descripción
Canal AWGN	agregar Ruido	Adiciona ruido AWGN.

## 3.2.3 Modelo del Receptor.

### 3.2.3.1 Identificación de clases y objetos.

- Regenerador de símbolo OFDM.
- Demapeador espectral.
- Descalador.
- Demapeador de constelación.
- Demapeador de subportadoras OFDM.

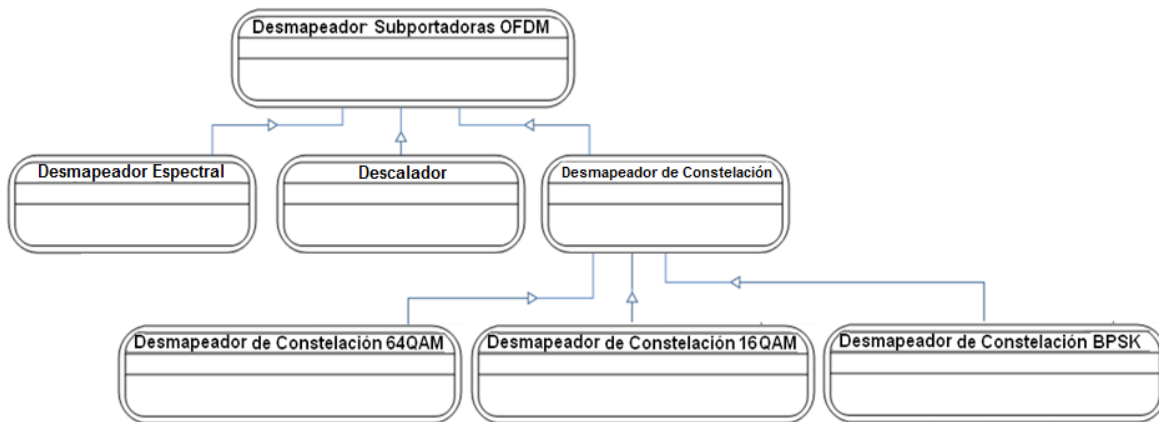
- Demapeador de bits.
- Eliminador de retardo por diversidad.
- Regenerador de subtramas.
- Decodificador 5/12.
- Decodificador 1/3.
- Aleatorizador.

### 3.2.3.2 Identificación de estructuras.

Las estructuras que pueden identificarse en el receptor son las siguientes:

**Demapeo Subportadoras OFDM:** conformado por el demapeador de constelación, el descalador y el demapeador espectral. El demapeador de constelación, a su vez está conformado por el demapeador 64QAM, el demapeador 16QAM y el demapeador BPSK. La figura 3.6 muestra esta estructura.

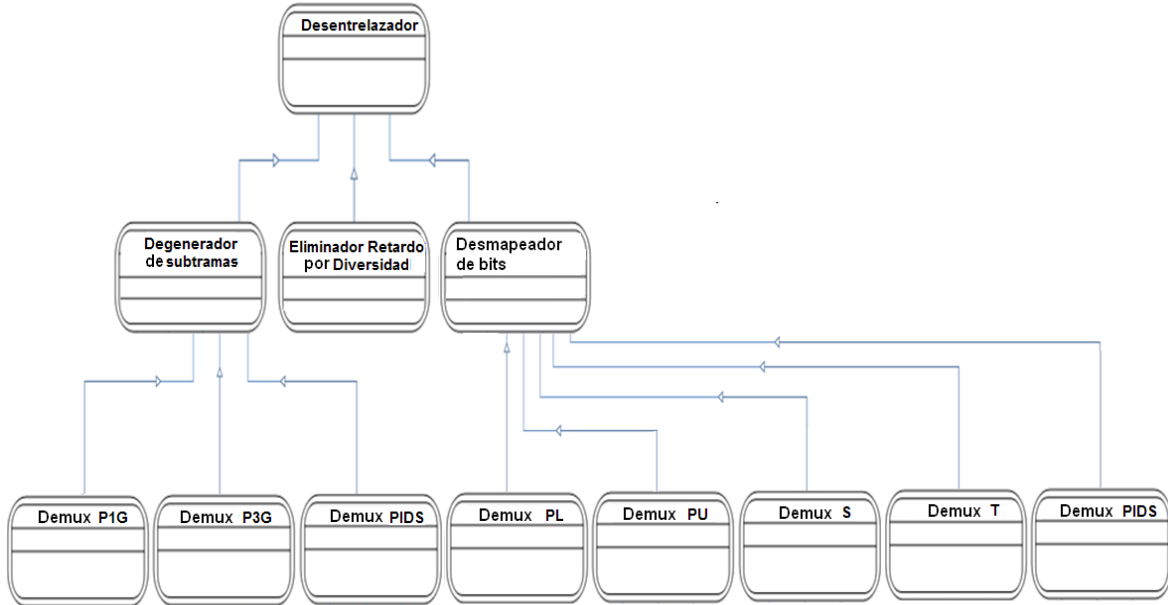
**Figura 3.6 Estructura del Demapeador de Subportadoras OFDM.**



**Desentrelazador:** conformado por el regenerador de subtramas, el eliminador del retardo por diversidad y el demapeador de bits. A su vez, el regenerador de subtramas está conformado por tres demultiplexores, uno para cada canal lógico. De forma similar, el demapeador de bits se conforma por 5 demapeadores individuales: demapeo PL, demapeo PU, demapeo S, demapeo T y demapeo PIDS. La figura 3.7 muestra la estructura del entrelazador.

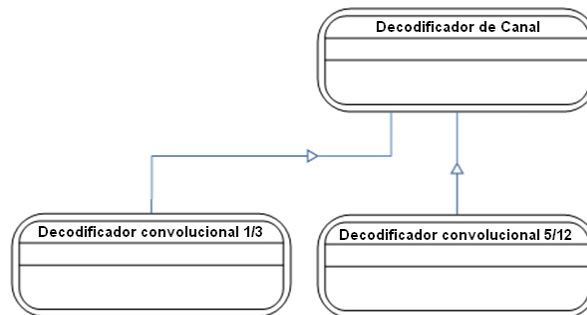


**Figura 3.7 Estructura del Desentrelazador.**



**Decodificador de Canal:** conformado por los decodificadores convolucionales con tasas de decodificación de 1/3 y 5/12, como se muestra en la figura 3.8

**Figura 3.8 Estructura del Codificador de Canal.**



### 3.2.3.3 Identificación de sujetos.

Los sujetos identificados en el receptor fueron los siguientes:

- Regenerador de señal OFDM.
- Demapeador de subportadoras OFDM.
- Desentrelazador.
- Decodificador de canal.
- Desaleatorizador.

### 3.2.3.4 Definición de los atributos.

La tabla 3.5 describe los atributos de cada uno de los sujetos identificados en el receptor.

**Tabla 3.5 Atributos de los Sujetos del Receptor.**

Clase	Nombre atributo	Descripción
Descrambler.	Secuencia.	Secuencia pseudoaleatoria con la que el flujo de bits procedente de la fuente de información es mezclado.
Decodificador de canal.	Polinomio.	Polinomio generador del código convolucional.
	Perforación.	Vector de perforación que permite obtener distintas tasas de codificación.
Regenerador de subtramas.	b,n,k.	Índices que señalan a los diferentes bits de la matriz intercaladora y los cuales son empleados por el algoritmo de intercalamiento.
Demapeo constelación.	Constelación.	Conjunto de valores complejos que se asocian con un grupo de bits.
Descalador.	Factor Escala.	Factor de normalización de la constelación
Regenerador de señal OFDM.	Tiempo de bit.	Tiempo de duración de un bit.
	Tiempo de muestra.	Tiempo de duración de una muestra de la señal OFDM.
	Longitud FFT.	Longitud de la transformada rápida de Fourier.

### 3.2.3.5 Identificación de servicios o métodos.

La tabla 3.6 muestra los principales procedimientos asociados con las clases del receptor.

**Tabla 3.6 Procedimientos Asociados con las Clases del Receptor.**

Clase	Procedimiento	Descripción
Regenerador Símbolo OFDM	Obtener $X_n$	A partir del símbolo OFDM recupera los valores complejos asociados con puntos del constelación los cuales son almacenados en el vector $X_n$ .
Demapeador Espectral	Demapear	Demapea los valores del vector $X_n$ en la matriz compleja normalizada.
Descalador	Descalar	Divide la matriz compleja obtenida por el mapeo de constelación entre un factor de normalización para así obtener una matriz desnormalizada.
demapeador de constelación	Demapear Constelación	Demapea las matrices complejas que contienen fasores que indican el estado de las portadoras hacia las matrices intercaladoras que contienen la información.
demapeo de bits	Demapear Bits	Demapea los bits de las matrices intercaladoras correspondientes a las portadoras primarias, secundaria y terciaria en las subtramas.
Eliminador Retardo por diversidad	eliminar Retardo	Elimina el retardo de tiempo introducido en algunas subtramas durante el proceso de transmisión
regenerador de subtramas	Unir Subtramas	Une las subtramas de un canal en la trama correspondiente
decodificador de Canal	decodificar	decodifica los datos empleando un decodificador de Viterbi
Desaleatorizador	scrambler	Mezcla el flujo de bits recibido con la misma secuencia pseudoaleatoria con la que fue mezclada en la transmisión para así recuperar la información no aleatorizada

### 3.3 MODELO DE SIMULACION.

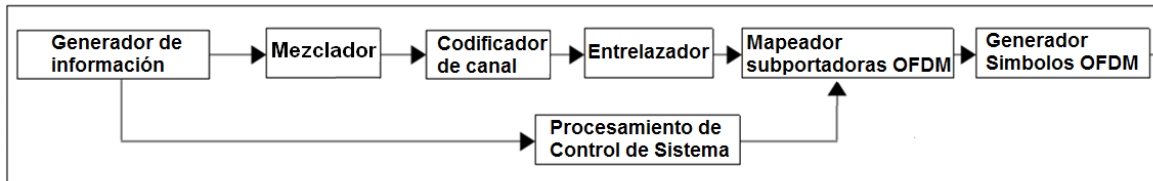
El modelo de simulación se divide en tres subsistemas: transmisor, canal de transmisión y receptor, tal como fue ilustrado en la figura 3.1.

En las siguientes secciones se presenta el modelo de simulación de cada uno de los subsistemas, describiendo los bloques funcionales de cada uno de ellos.

#### 3.3.1 Modelo de Simulación del Subsistema Transmisor.

Como se observa en la figura 3.9. Puede deducirse que el transmisor se compone de los bloques: generador de información, aleatorizador, codificador de canal, entrelazador, procesamiento de control de sistema, mapeador de subportadoras OFDM y generador de símbolos OFDM.

Figura 3.9 Diagrama de Bloques del Subsistema Transmisor.



##### 3.3.1.1 Generador de Información.

Crea un conjunto de datos aleatorios que representan los datos enviados por la fuente de información. También genera los datos procedentes del administrador de configuración, los cuales son usados por la clase.

##### Variables de entrada

**Nframes:** variable que determina el número de tramas que deben ser generados.

##### Variables de salida

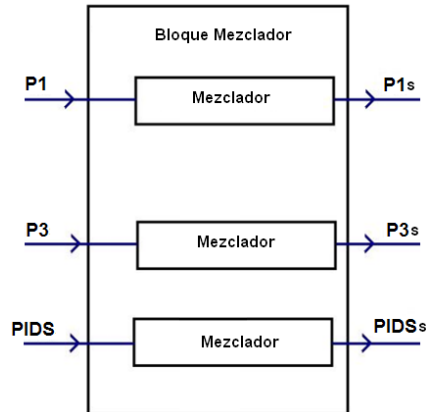
**[P1, P3, PIDS]:** bits aleatorios que representan la información generada por la fuente de datos para cada uno de los canales lógicos P1, P3, PIDS.

**[PSM, PLevel, AAB]:** información de control que contiene el modo de servicio, el nivel de potencia y el ancho de banda del canal analógico (para el modo de servicio MA1, el cual no es empleado en este trabajo de grado). Esta información es requerida por el bloque Procesamiento de Control del Sistema para generar el vector R.

##### 3.3.1.2 Aleatorizador.

Como se observa en la figura 3.10, cada canal lógico es aleatorizado de manera independiente. Sin embargo, todos los aleatorizadores son idénticos. Cada uno de ellos mezcla los bits de información que recibe en su entrada con una secuencia pseudoaleatoria.

**Figura 3.10 Bloque Mezclador.**



**Variables de entrada**

**[P1, P3, PIDS]:** datos de los canales lógicos generados por la clase Generador de Información.

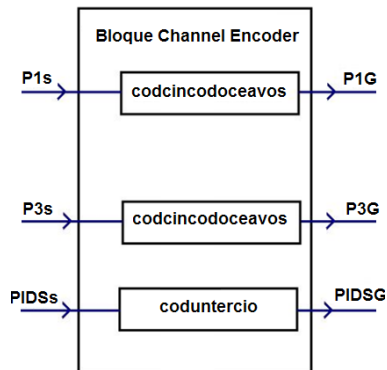
**Variables de salida**

**[P1s, P3s, PIDSs]:** datos aleatorizados de los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

**3.3.1.3 Codificador de Canal.**

Esta clase aplica una codificación convolucional a la información de cada uno de los canales lógicos aleatorizados. Para los canales lógicos P1 y P3 se usa un codificador con una tasa de codificación de 5/12 mientras que para el canal lógico PIDS se emplea un codificador con una tasa de 1/3, tal como puede observarse en la figura 3.11.

**Figura 3.11 Bloque Codificador de Canal.**



### Variables de entrada

**[P1s, P3s, PIDSs]:** datos aleatorizados correspondientes a los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

### Variables de salida

**[P1G, P3G, PIDSG]:** datos codificados correspondientes a los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

La tabla 3.7 muestra las variables de entrada y de salida de los codificadores individuales empleados en el bloque Codificador de Canal.

**Tabla 3.7 Número de Bits por Elemento de la Matriz del Entrelazador.**

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
CodCincoDoceavos	bits	y
CodUnTercio	bits	y

### 3.3.1.4 Entrelazador.

La figura 3.12 muestra el esquema del bloque entrelazador y los subbloques que lo conforman. En primer lugar, el subbloque generador de subtramas divide las tramas de los canales lógicos en subtramas. A continuación, el subbloque retardador por diversidad aplica a cuatro de las subtramas un retardo igual al tiempo de 3 tramas. Finalmente se realiza un entrelazado entre los bits de cada par de subtramas.

### Variables de entrada

**[P1G, P3G, PIDSG]:** datos codificados correspondientes a los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

### Variables de salida

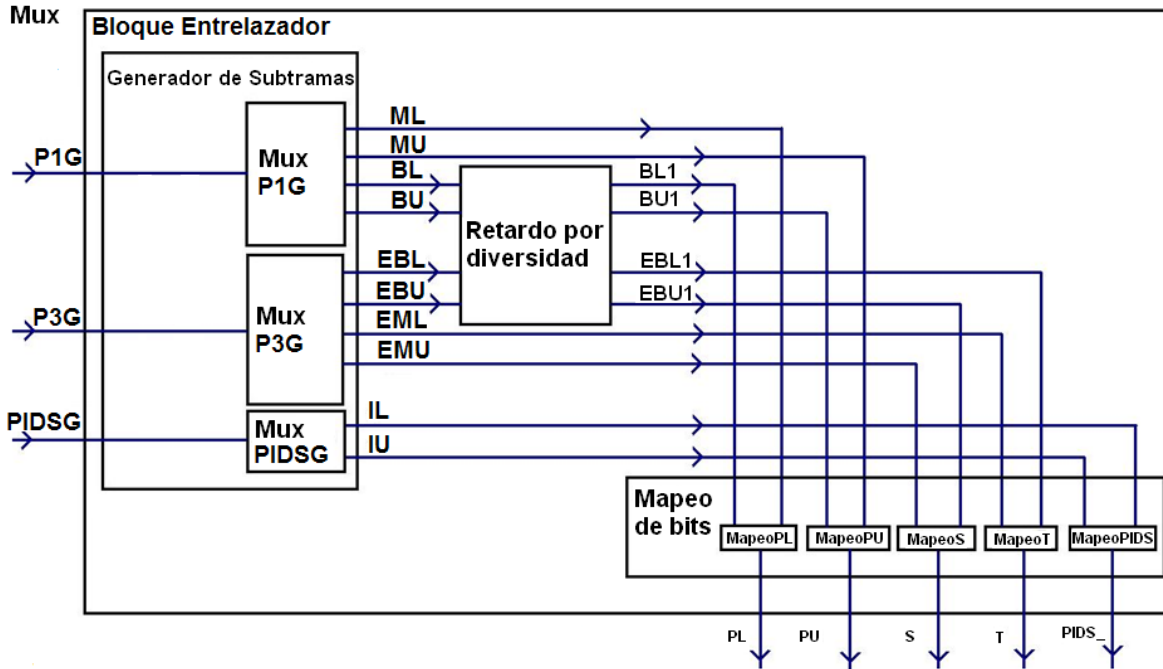
**[PL, PU]:** matrices del entrelazador, obtenidas al procesar los canales lógicos codificados, que serán mapeadas en las portadoras primarias.

**S:** matriz del entrelazador, generada al procesar los canales lógicos codificados, que será mapeada en las portadoras secundarias.

**T:** Matriz del entrelazador, obtenida al procesar los canales lógicos codificados, que será mapeada en las portadoras terciarias.

**PIDS\_:** Matriz del entrelazador correspondiente al canal lógico PIDS.

Figura 3.12 Bloque Entrelazador.



A continuación se presenta la descripción de los bloques que componen al entrelazador:

**Generador de Subtramas:** se compone de tres multiplexores, los cuales dividen los bloques de información correspondientes a los canales lógicos en subtramas. La tabla 3.8. Muestra las variables de entrada y de salida de cada uno de los multiplexores.

Tabla 3.8 Variables de Entrada y Salida de los Multiplexores.

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Multiplexor P1G	P1G	ML, MU, BL, BU
Multiplexor P3G	P3G	EML, EMU, EBL, EBU
Multiplexor PIDSG	PIDSG	IL, IU

Retardador por Diversidad: este bloque produce un retardo en algunas de las subtramas generadas por el bloque generador de subtramas.

#### Variables de entrada

[BL, BU, EBL, EBU]: subtramas a las que se les debe aplicar un retardo.

#### Variables de salida

[BL1, BU1, EBL1, EBU1]: subtramas retardadas un tiempo igual a la duración de 3 tramas.

**Mapeador de Bits:** se compone de cinco mapeadores, entrelaza los bits de dos subtramas produciendo una matriz intercaladora. La tabla 3.9 muestra las variables de entrada y salida de los mapeadores que conforman este bloque.

**Tabla 3.9 Variables de Entrada y Salida de los Mapeadores Bits.**

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Mapeo PL	ML, BL1	PL
Mapeo PU	MU, BU1	PU
Mapeo S	EMU, EBU1	S
Mapeo T	EML, EBL1	T
Mapeo PIDS	IL, IU	PIDS_

### 3.3.1.5 Procesamiento de Control del Sistema.

Genera el vector R el cual incluye señalización para control del sistema.

#### Variables de entrada

[PSM, PLevel, AAB]: contienen información de control tal como el modo de servicio, el nivel de potencia y le ancho de banda del canal analógico usado.

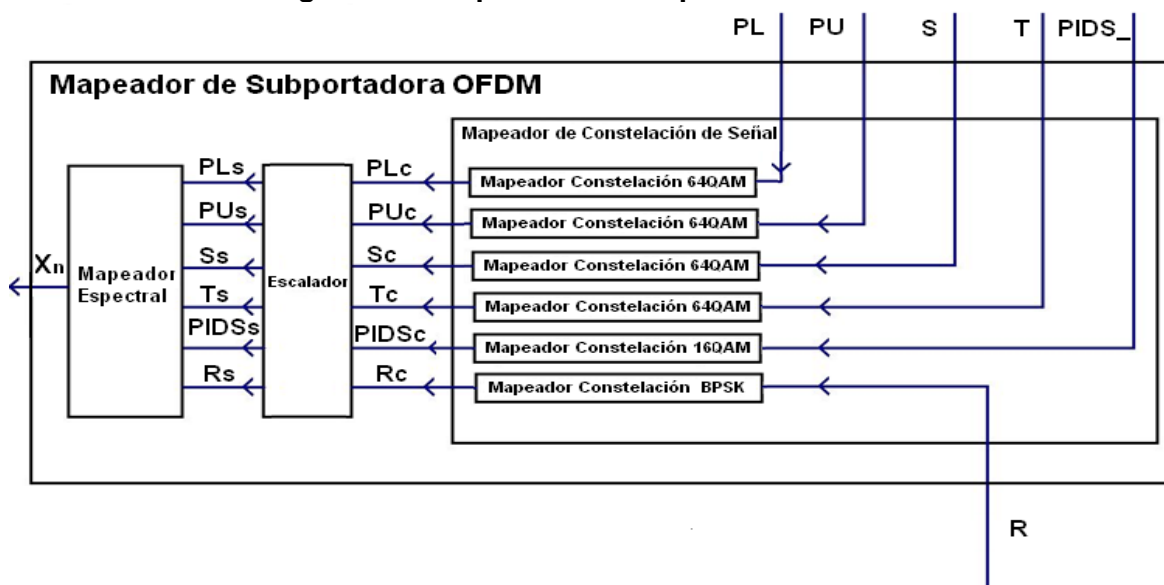
#### Variables de salida

R: vector de control transmitido junto con las tramas de información.

### 3.3.1.6 Mapeador de Subportadoras OFDM.

Las matrices obtenidas del bloque entrelazador son mapeadas en fasores complejos que corresponden a puntos de la constelación según la modulación de cada matriz. Obtenemos como resultado un conjunto de matrices complejas que posteriormente son multiplicadas cada una por un factor de escalamiento para finalizar con un mapeo de los fasores contenidos en las matrices del entrelazador a un grupo de vectores complejos donde cada vector contiene los elementos que conforman un símbolo OFDM. En la figura 3.13 se puede observar los subbloques que hacen parte de este proceso.

**Figura 3.13 Mapeador de Subportadora OFDM.**



A continuación se realiza la descripción de los subbloques que conforman esta clase:

**Mapeador de Constelación de Señal:** se compone de 6 mapeadores, cuatro de los cuales corresponden a la modulación 64QAM y se encargan de procesar los grupos de bits contenidos en las matrices intercaladoras PL, PU, S y T. Los dos restantes procesan, respectivamente, la matriz intercaladora PIDS\_ y el vector R, empleando las constelaciones de las modulaciones 16QAM y BPSK.

**Variables de entrada**

[**PL, PU, S, T, PIDS\_**]: matrices intercaladoras generadas por el entrelazador.

**R:** vector con información de control generado por el módulo procesamiento de control del sistema.

**Variables de salida**

[**PLc, PUc, Sc, Tc**]: matrices complejas que representan los puntos de la constelación 64QAM en los que han sido mapeados los grupos de bits contenidos en las matrices intercaladoras correspondientes.

**PIDSc:** matriz compleja que representa los puntos de la constelación 16QAM en los que han sido mapeados los grupos de bits contenidos en la matriz intercaladora PIDS.

**Rc:** vector complejo que representa los puntos de la constelación BPSK en los que se han mapeado los bits del vector R.

La tabla 3.10 muestra las variables de entrada y de salida de cada uno de los mapeadores individuales que conforman el mapeador de constelación de señal.

**Tabla 3.10 Variables de Entrada y Salida de los Mapeadores que Componen el Bloque Mapeador de Constelación de Señal.**

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Mapeo Constelacion64QAM	Matriz Intercaladora	Matriz Compleja
Mapeo Constelacion16QAM	Matriz Intercaladora	Matriz Compleja
Mapeo Constelación BPSK	Matriz Intercaladora	Matriz Compleja

**Escalador:** este bloque multiplica las matrices complejas obtenidas en el mapeo de constelación por un factor de escalamiento.

**Variables de entrada**

[**PLc, PUc, Sc, Tc, PIDSc, Rc**]: matrices complejas obtenidas del proceso de mapeo de constelación.

**Variables de salida**

[**PLs, PUs, Ss, Ts, PIDSS, Rs**]: matrices complejas escaladas obtenidas al multiplicar las matrices complejas de entrada por sus factores de escalamiento.



**Mapeador Espectral:** en este subbloque se toman los símbolos de las matrices y los vectores complejos obtenidos en la salida del subbloque escalador, con el objetivo de formar ordenadamente vectores complejos  $X_n$ , para luego ser enviados en cada una de las portadoras OFDM como se describe en el apartado 2.5.

#### **Variables de entrada**

[PLs, PUs, Ss, Ts, PIDSs, Rs]: matrices complejas escaladas.

#### **Variables de salida**

$X_n$ : vector formado por fasores complejos utilizados para modular cada una de las portadoras que componen a un símbolo OFDM.

#### **3.3.1.7 Generador de Símbolos OFDM.**

Transforma los fasores complejos contenidos en el vector X en una representación en banda base en el dominio del tiempo del símbolo OFDM correspondiente.

#### **Variables de entrada**

X: vector complejo que contiene los fasores complejos con los que se modula cada una de las portadoras que componen a un símbolo OFDM.

#### **Variables de salida**

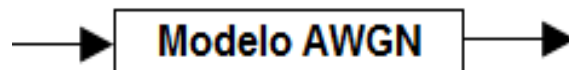
$y_n$ : representación en el dominio del tiempo en banda base del símbolo OFDM.

#### **3.3.2 Modelo de Simulación del Subsistema Canal de Comunicación.**

De acuerdo con el análisis realizado se seleccionó el modelo de canal AWGN para el desarrollo de la simulación.

El diagrama del subsistema canal de transmisión en su nivel más alto se puede apreciar en la figura 3.14.

**Figura 3.14 Diagrama Subsistema Canal de transmisión.**



#### **3.3.2.1 Caracterización del Modelo AWGN.**

Utiliza el modelo de canal AWGN para representar el deterioro sufrido por la señal transmitida, debido a la presencia de ruido gaussiano en el canal de comunicación.

#### **Variables de entrada**

$Y_n$ : representación en el dominio de la frecuencia en banda base de la señal transmitida.

**SNR:** Relación señal a ruido del canal.

### Variables de salida.

$Y_{nr}$ : representación en el dominio de la frecuencia de la señal degradada por el ruido gaussiano.

### 3.3.3 Modelo de Simulación del Subsistema Receptor.

La figura 3.15 corresponde al diagrama en bloques del subsistema receptor.

Figura 3.15 Diagrama en Bloques del Subsistema Receptor.



A continuación se describe cada uno de los bloques del subsistema.

#### 3.3.3.1 Regenerador de Símbolos OFDM.

Transforma una representación en banda base en el dominio del tiempo de un símbolo OFDM recibido, el cual ha sido afectado por las fuentes de degradación del canal, en un conjunto de fasores complejos contenidos en el vector  $X_r$ .

#### Variables de entrada

$Y_{nr}$ : representación en el dominio del tiempo en banda base del símbolo OFDM recibido.

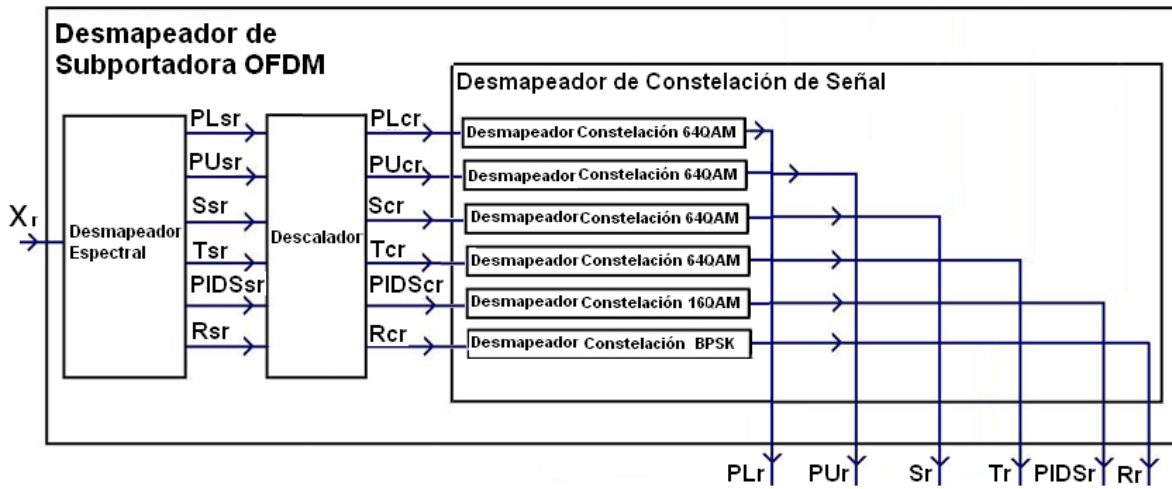
#### Variables de salida

$X_r$ : vector complejo que contiene los fasores complejos recuperados a partir del símbolo OFDM, los cuales representan puntos en las distintas constelaciones con las que se ha realizado la modulación.

#### 3.3.3.2 Demapeador de Subportadoras OFDM.

El bloque demapeador de subportadora OFDM realiza el procedimiento inverso al aplicado en el bloque mapeador de subportadora OFDM por tal razón se inicia con la recuperación de las matrices complejas a partir del conjunto de vectores  $X_r$ , posteriormente estas matrices son divididas entre los factores de escalamiento aplicados anteriormente en el transmisor, para luego realizar un demapeo de los fasores complejos que componen estas matrices obteniendo como resultado las matrices del entrelazador que posteriormente serán enviadas al Bloque desentrelazador.

Figura 3.16 Demapeador de Subportadora OFDM.



**Demapeador Espectral:** este bloque genera un conjunto matrices complejas a partir de un conjunto de vectores complejos  $X_r$ . Cada vector  $X_r$  contiene los símbolos que fueron recibidos en cada una de las portadoras de un símbolo OFDM.

#### Variables de entrada

$X_r$ : vector complejo que contiene los fasores complejos recibidos.

#### Variables de salida

[ $PL_{sr}$ ,  $PU_{sr}$ ,  $S_{sr}$ ,  $T_{sr}$ ,  $PID_{sr}$ ,  $R_{sr}$ ]: matrices y vectores complejos escalados

**Descalador:** este bloque divide las matrices complejas recibidas en el demapeo de constelación entre el mismo factor de escalamiento aplicado en transmisión.

#### Variables de entrada

[ $PL_{sr}$ ,  $PU_{sr}$ ,  $S_{sr}$ ,  $T_{sr}$ ,  $PID_{sr}$ ,  $R_{sr}$ ]: matrices complejas escaladas recibidas del demapeador espectral.

#### Variables de salida

[ $PL_{cr}$ ,  $PU_{cr}$ ,  $S_{cr}$ ,  $T_{cr}$ ,  $PID_{scr}$ ,  $R_{cr}$ ]: matrices obtenidas del proceso de desescalamiento. Demapeador de Constelación de Señal: este bloque se compone de cuatro demapeadores 64QAM, que demapean los grupos de bits de las matrices intercaladoras  $PL_r$ ,  $PU_r$ ,  $S_r$  y  $T_r$  así como un demapeador 16QAM el cual demapea la matriz intercaladora  $PID_{r}$ . Además, contiene un demapeador BPSK el cual se usa para demapear los elementos del vector  $R_r$ .

#### Variables de entrada

[ $PL_{cr}$ ,  $PU_{cr}$ ,  $S_{cr}$ ,  $T_{cr}$ ]: matrices complejas recibidas y mapeadas en 64QAM.

$PID_{scr}$ : matrices complejas recibidas y mapeadas en 16QAM.

**Rcr:** vector complejo que representa los puntos de la constelación BPSK en los que se han mapeado los bits del vector R.

**Variables de salida**

**[PLr, PUr, Sr, Tr, PIDS\_r]:** matrices intercaladoras recibidas.

**Rr:** vector con información de control recibida.

La tabla 3.11 muestra las variables de entrada y de salida de cada uno de los demapeadores individuales que conforman el **Signal Constrelaton Demapper**.

**Tabla 3.11 Variables de Entrada y Salida de los Demapeadores BPSK, 16QAM y 64QAM.**

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Demapeo Constelacion64QAM	Matriz Compleja	Matriz Intercaladora
Demapeo Constelacion16QAM	Matriz Compleja	Matriz Intercaladora
Demapeo Constelación BPSK	Matriz Compleja	Matriz Intercaladora

**3.3.3.3 Desentrelazador.**

Esta clase realiza varios procesos. En primer lugar, realiza un desentrelazado de los bits de las matrices intercaladoras, y obtiene un conjunto de subtramas. A continuación, se elimina el retardo en las subtramas a las que se les aplicó retardo para diversidad en el proceso de transmisión y finalmente se unen las subtramas en las tramas correspondientes a los canales lógicos P1, P3, y PIDS. La figura 3.17 muestra el esquema del bloque desentrelazador y los subbloques que lo conforman.

**Variables de entrada**

**[PLr, PUr]:** bloques de información entrelazados que fueron recibidos de las portadoras primarias.

**Sr:** bloque de información entrelazado que fueron recibidos en las portadoras secundarias.

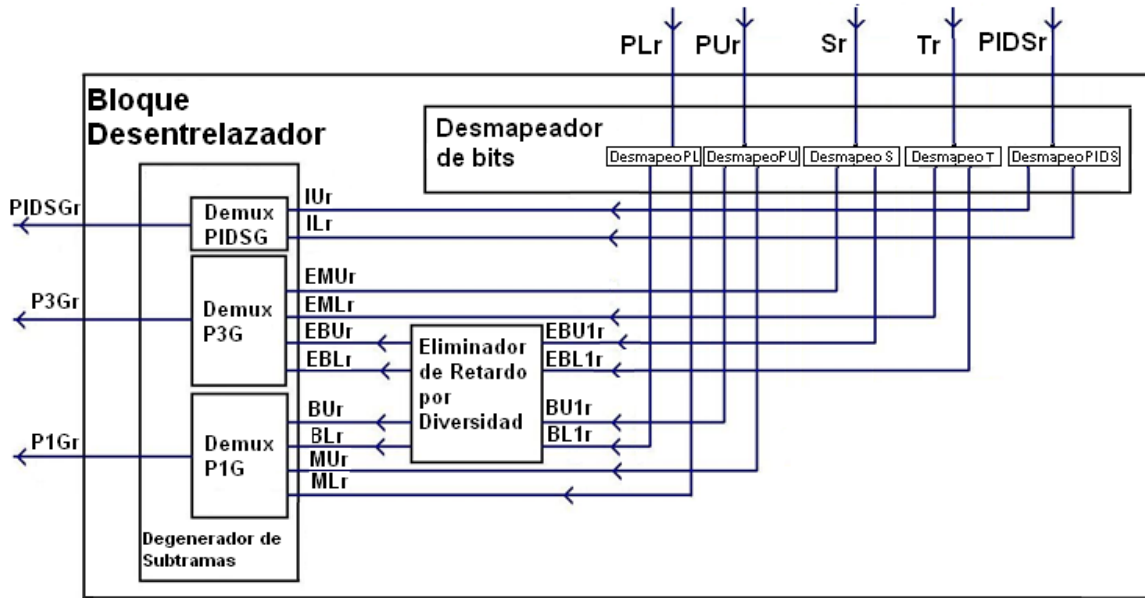
**Tr:** bloque de información entrelazado que fue recibido en las portadoras terciarias.

**PIDS\_r:** bloque de información entrelazado recibido correspondiente al canal lógico PIDS.

**Variables de salida**

**[P1Gr, P3Gr, PIDSGr]:** datos recibidos correspondientes a los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

Figura 3.17 Bloque Desentrelazador.



**Demapeador de Bits:** este bloque se compone de cinco demapeadores, cada uno de los cuales desentrelaza los bits una matriz intercaladora produciendo dos subtramas. La tabla 3.12 muestra las variables de entrada y salida de cada uno de los demapeadores que conforman este bloque.

Tabla 3.12 Variables de Entrada y Salida de los Demapeadores.

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Demapeo PL	PLr	MLr, BL1r
Demapeo PU	PUr	MUr, BU1r
Demapeo S	Sr	EMUr, EBU1r
Demapeo T	Tr	EMLr, EBL1r
Demapeo PIDS	PIDS_r	ILr, IUr

**Eliminador de Retardo por Diversidad:** este bloque elimina el retardo en algunas de las subtramas las cuales tienen un retardo aplicado durante el proceso de transmisión.

**Variables de entrada.**

**[BL1r, BU1r, EBL1r, EBU1r]:** subtramas recibidas, las cuales tienen un retardo igual a la duración de 3 tramas.

**Variables de salida.**

**[BLr, BUr, EBLr, EBUr]:** subtramas recibidas sin retardo.

**Regenerador de Subtramas:** este bloque se compone de tres demultiplexores, los cuales unen las subtramas y forman los bloques de información completos correspondientes a cada uno de los canales lógicos. La tabla 3.13. Muestra las variables de entrada y de salida de cada uno de los demultiplexores.

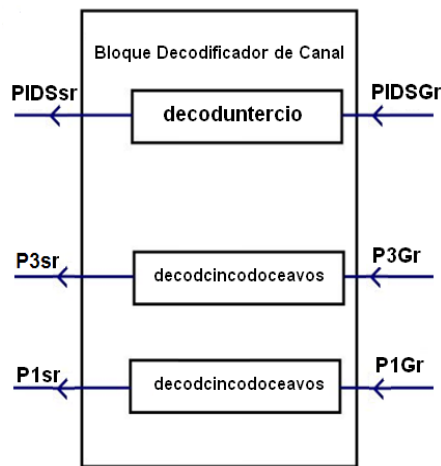
**Tabla 3.13 Variables de Entrada y Salida de los Demultiplexores.**

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Demultiplexor P1G	MLr, MUr, BLr, BUr	P1Gr
Demultiplexor P3G	EMLr, EMUr, EBLr, EBUr	P3Gr
Demultiplexor PIDSG	ILr, IUr	PIDSGr

### 3.3.3.4 Decodificador de Canal.

Esta clase aplica una decodificación de Viterbi a la información de cada uno de los canales lógicos codificados recibidos. Para los canales lógicos P1 y P3 se usa un decodificador con una tasa de codificación de 5/12 mientras que para el canal lógico PIDS se emplea un decodificador con una tasa de 1/3, tal como puede observarse en la figura 3.18.

**Figura 3.18 Bloque Decodificador de Canal.**



#### Variables de entrada.

**[P1s, P3s, PIDSs]:** datos aleatorizados correspondientes a los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

#### Variables de salida.

**[P1G, P3G, PIDSG]:** datos codificados correspondientes a los canales lógicos P1, P3 y PIDS.

La tabla 3.14 describe cada uno de los codificadores individuales empleados en el bloque Codificador de Canal.

**Tabla 3.14 Variables de Entrada y Salida de los Decodificadores Convolucionales.**

Bloque	Variables de entrada	Variables de salida
Decod Cinco Doceavos	bits	y
Decod Un Tercio	bits	y

### 3.3.3.5 Caracterización del Desaleatorizador.

El bloque desaleatorizador usado en el receptor es idéntico al bloque aleatorizador empleado en el transmisor y descrito en la sección 3.3.1.2.

# CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo muestra la elección del lenguaje de programación y el desarrollo del software de simulación, fases que conforman el proceso para la implementación del modelo. También enseña el proceso de validación del modelo. Además presenta los resultados alcanzados por medio de este y exhibe el análisis de los mismos.

## 4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.

### 4.1.1 Elección del Lenguaje de Programación.

La elección del lenguaje de programación es de vital importancia para la implementación exitosa del modelo de simulación del nivel físico del estándar IBOC-AM en modo digital.

Para esto se realiza una comparación de las principales características de varios lenguajes de programación. Entre los candidatos se encuentran lenguajes orientados a objetos tales como java, C++, Python, Basic, Ruby y Smalltalk, y las herramientas software especializadas en el cálculo científico, orientadas a la computación numérica tales como Scilab [7] y MATLAB®.[8] La tabla 4.1 muestra una comparación entre las principales características de los lenguajes orientados a objetos (LOO) y las herramientas Scilab y MATLAB®

**Tabla 4.1 Tabla comparativa de Lenguajes de Simulación.**

Características	Herramienta de Simulación		
	LOO	Scilab	MatLab®
Desarrollo Modular.	✓	✓	✓
Lenguaje de Alto Nivel.		✓	✓
Cálculos estadísticos implementados.		✓	✓
Gráficos en 2-D y en 3-D.	✓	✓	✓
Operaciones con vectores y matrices.	✓	✓	✓
Soporte para Modelo de Canal AWGN.		✓	✓
Módulo de Comunicaciones.		✓	✓
Necesidad de Licencia.	✓		✓
Complejidad para Implementar Funciones Matemáticas Avanzadas.	Alta.	Baja.	Baja.
Nivel de Robustez de la Herramienta.	Medio	Medio	Alto
Nivel de Aceptación en Comunidad Académica	Alto	Medio	Alto
Soporte en línea.	Medio	Medio	Alto

Al evaluar las características y limitaciones que se describen en la tabla 4.1. se determina que MATLAB® es la herramienta adecuada para la implementación y análisis del módulo de simulación del nivel físico del sistema IBOC-AM digital. Aunque Scilab posee muchas de las características que tiene MATLAB®, el segundo posee mayor documentación, soporte y aceptación por parte de la comunidad académica. Además, la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, posee licencias de MATLAB® [8].

#### **4.1.2 Desarrollo del Software de Simulación.**

De acuerdo con el modelo de simulación mostrado en el capítulo 3, el sistema se desarrolló por módulos. Cada uno de estos módulos y submódulos fue implementado mediante una función creada en el lenguaje de programación proporcionado por la herramienta MATLAB®. [8] Cada función es almacenada en un archivo de extensión .m y puede ser invocada por otros módulos, creando una estructura tal como la presentada en el modelo de simulación.

#### **4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO.**

La validación del modelo se realizó de manera progresiva, iniciando con el generador de información, y agregando y probando uno a uno los bloques del transmisor junto a su respectiva contraparte en recepción para verificar la interoperabilidad entre módulos, las pruebas se realizaron de manera incremental, es decir, cada par de bloques o subbloques fueron agregados, a los que se habían probado anteriormente, de manera que no solo se justificaba el funcionamiento individual de cada pareja de bloques sino, también, su interacción con los bloques anteriores, para más información referirse al apéndice A1, donde se explica a fondo la validación de cada uno de los bloques que conforman el modelo de simulación.

#### **4.3 ESCENARIO DE SIMULACIÓN.**

Los parámetros de configuración del sistema IBOC-AM en modo totalmente digital, tales como la secuencia pseudoaleatoria de los aleatorizadores, las tasas de codificación de los codificadores convolucionales, los esquemas de modulación, los algoritmos de entrelazado y la asignación de los elementos de las matrices del entrelazador a las portadoras de los símbolos OFDM, entre otros, son fijos. Esto limita los escenarios de simulación, partiendo de lo anterior se ha considerado como escenario de simulación el canal AWGN, en el cual únicamente se estima la degradación sufrida por la señal transmitida al verse afectada por el ruido gaussiano.

#### **4.4 PLAN DE PRUEBAS.**

Para el plan de pruebas, se definen dos diferentes tipos de pruebas:

**Simulación única:** se realiza una sola transmisión y se determina la BER para cada uno de los canales lógicos y de señales de control producidas por el generador de información, comparando los datos obtenidos del proceso de recepción con los datos enviados al transmisor. Adicionalmente, se pueden obtener un conjunto de gráficas que permiten evaluar cualitativamente el desempeño del sistema y el estado de las señales en distintos puntos de éste.



**Simulación múltiple:** permite definir un conjunto de valores del parámetro SNR y efectuar múltiples simulaciones, cada una empleando uno de estos valores. En cada simulación se obtiene el valor del BER para cada uno de los canales lógicos. Esto permite establecer una relación entre SNR y BER y su correspondiente gráfica para cada canal lógico. En este modo no se realizan gráficas de espectro, constelación ni diagramas de ojo.

El plan de pruebas consiste en simular varias transmisiones utilizando el canal AWGN. En la transmisión se procede a obtener la tasa de errores de los canales lógicos individuales y de las señales de control. Es posible obtener datos adicionales que permiten hacer evaluaciones cualitativas del desempeño del sistema tales como gráficas de espectro, constelación y diagramas de ojo.

#### **4.4.1 Diagramas de Constelación**

Los diagramas de constelación fueron obtenidos para las modulaciones 64QAM, 16QAM y BPSK que se producen en la salida del subbloque Mapeador de Constelación de Señal, en el transmisor y que entran al subbloque Demapeador de Constelación de Señal en el receptor [9].

#### **4.4.2 Diagramas de Ojo.**

Los diagramas de ojo en el transmisor fueron obtenidos a partir de la representación en el dominio del tiempo de la señal que sale del bloque Generador de Señal OFDM, la cual representa los pulsos complejos conseguidos para 256 símbolos OFDM por cada trama de transmisión. Para esto se tomó la señal modulada sobre 3 portadoras: la primera es una de las portadoras asignadas a la subtrama PL, la cual es modulada con el esquema 64QAM, la segunda es una de las dos subportadoras asignadas a la subtrama PIDS, las cuales son moduladas empleando 16QAM. La tercera es una de las dos subportadoras asignadas al vector R, que son moduladas usando BPSK. Para obtener los diagramas de ojo se usó un tiempo base correspondiente a la duración de dos símbolos OFDM. En el receptor, los diagramas de ojo fueron generados a partir de los datos que entran al subbloque Regenerador de Señal OFDM, los cuales constituyen la representación en el dominio del tiempo de la señal recibida, después de sufrir las degradaciones producidas por el canal [9].

#### **4.4.3 Gráficas de Espectro.**

Las gráficas de espectro en el transmisor fueron obtenidas a partir de la representación en el dominio de la frecuencia de la señal transmitida, la cual sale del bloque Generador de Señal OFDM y que corresponde a la transformada rápida de Fourier de la representación en el dominio del tiempo de la misma señal para cada una de las subportadoras. En el receptor, las gráficas de espectro son obtenidas a partir de la transformada rápida de Fourier de la señal recibida después de haber sido afectada por los efectos del canal de transmisión [9].

#### 4.4.4 Gráficas de BER vs SNR.

La BER (*Bit Error Rate*) es obtenida mediante una comparación directa entre los bits producidos por el bloque generador de canales lógicos y los bits obtenidos al finalizar el proceso de recepción. Esta comparación se realiza individualmente para cada uno de los canales lógicos. La BER depende del valor de la SNR del canal [9].

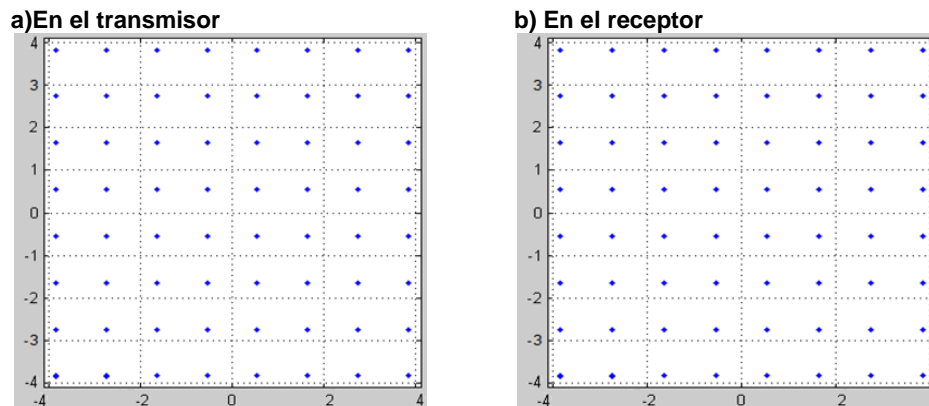
#### 4.5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

##### 4.5.1 Análisis de los Diagramas de Constelación.

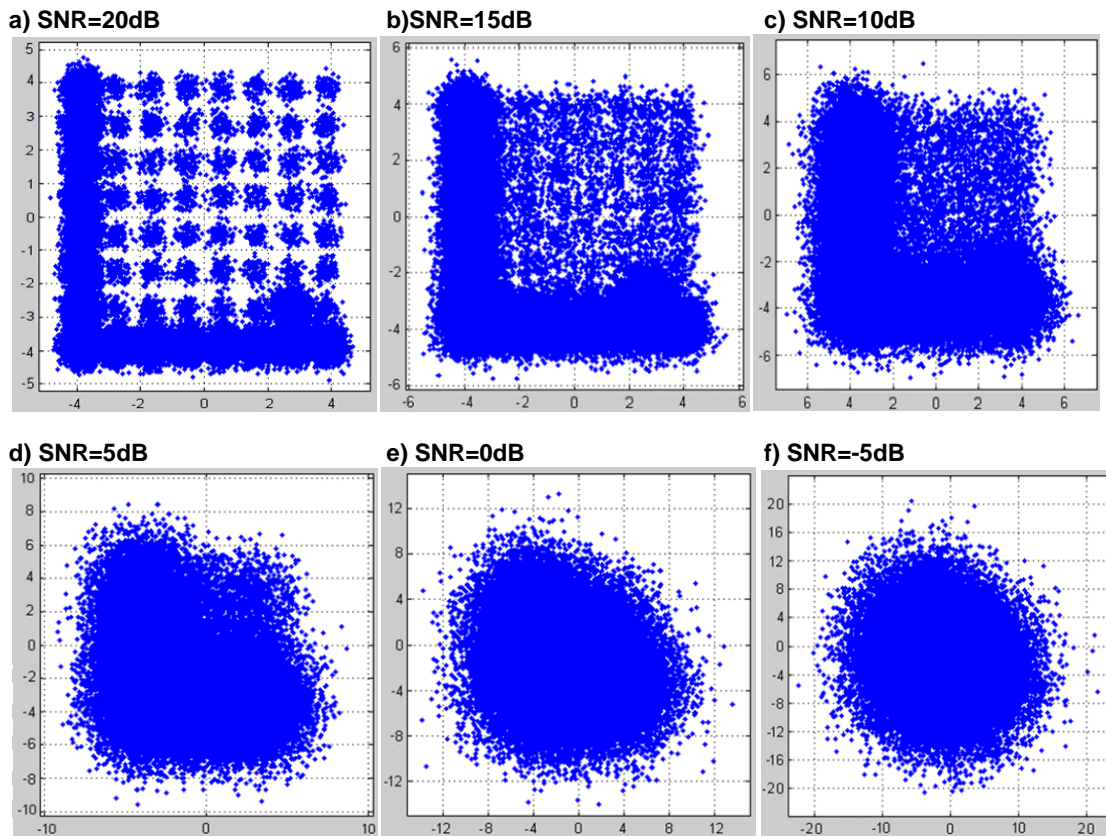
En la figura 4.1 se observan las gráficas de constelación correspondientes a la modulación 64QAM en el transmisor y en el receptor (situación ideal), el cual será tomado como referencia.

La figura 4.2 muestra el efecto que tiene el canal AWGN sobre el diagrama de constelación para valores de SNR que van desde -5dB hasta 20 dB, en pasos de 5dB. En esta figura puede observarse cómo al disminuir el valor de SNR, la constelación se degrada, llegando a un punto en que es imposible distinguir correctamente los símbolos. Esta degradación aumenta el número de bits errados en el receptor. Se observa también en el gráfico la generación de una L debido al retardo producido por las tres primeras subtramas llenas de ceros al pasar por el subbloque retardador para diversidad, esto solo ocurre para esta constelación por que las demás no sufren este retardo.

**Figura 4.1 Diagramas de Constelación para 64 QAM (situación ideal).**



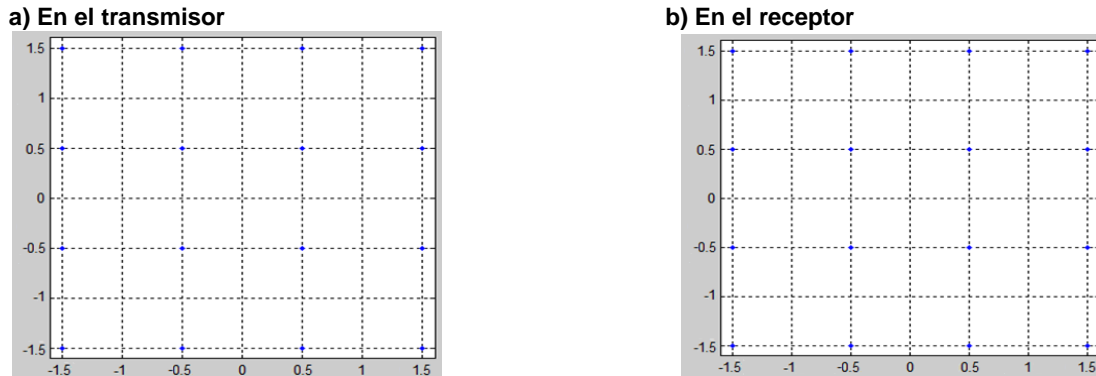
**Figura 4.2 Diagramas de Constelación en el Receptor para 64 QAM para el canal AWGN.**



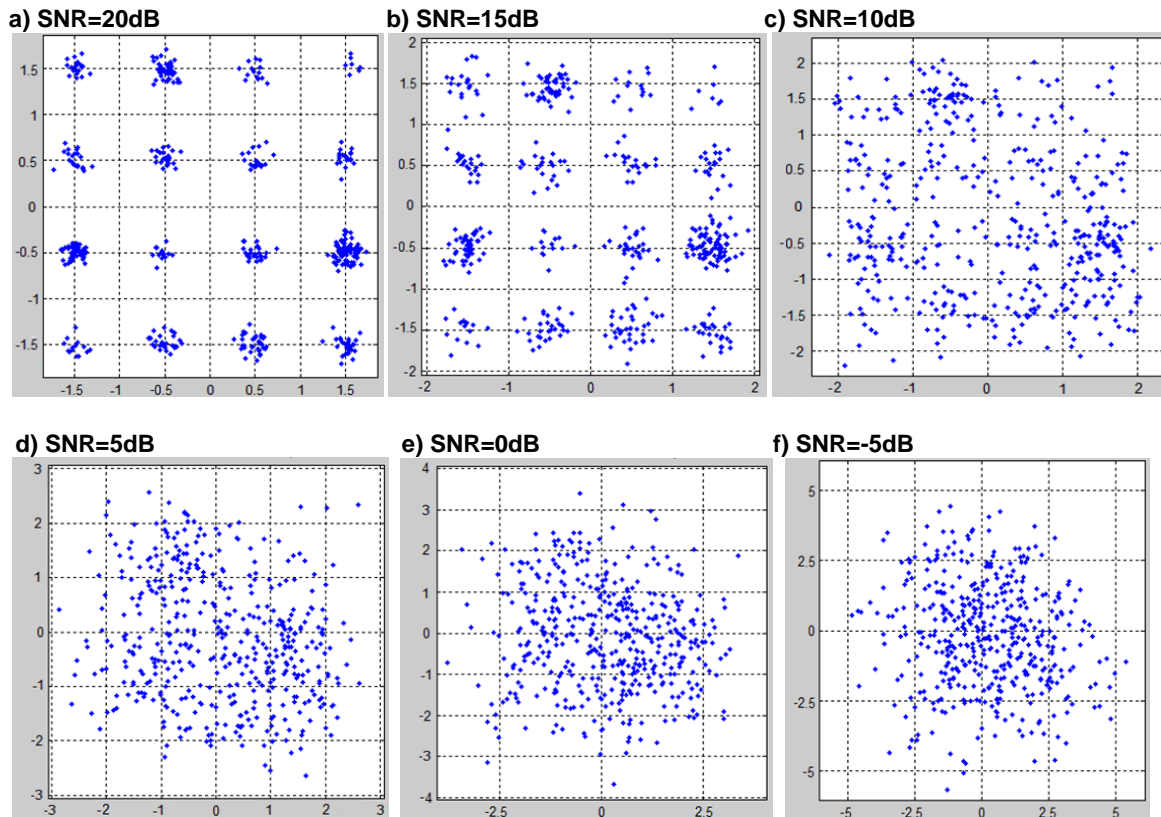
De manera similar, la figura 4.3 muestra la constelación correspondiente a la modulación 16QAM en el transmisor y en el receptor (situación ideal).

En la figura 4.4 se observa el deterioro sufrido por la constelación 16QAM al variar la SNR desde 20dB hasta -10 dB con decrementos de 5dB. Esta constelación, se degrada en menor medida que la constelación 64QAM debido a que en presencia de una misma energía promedio, y por ser una constelación inferior, la interferencia se disminuye por que existe una menor dispersión de los puntos de la constelación, aumentando la separación entre estados adyacentes, por lo que es más fácil que el receptor decodifique la señal apropiadamente, aumentando la inmunidad al ruido[10].

**Figura 4.3 Diagramas de Constelación para 16 QAM (situación ideal).**



**Figura 4.4 Diagramas de Constelación para 16 QAM en el Receptor para el canal AWGN.**

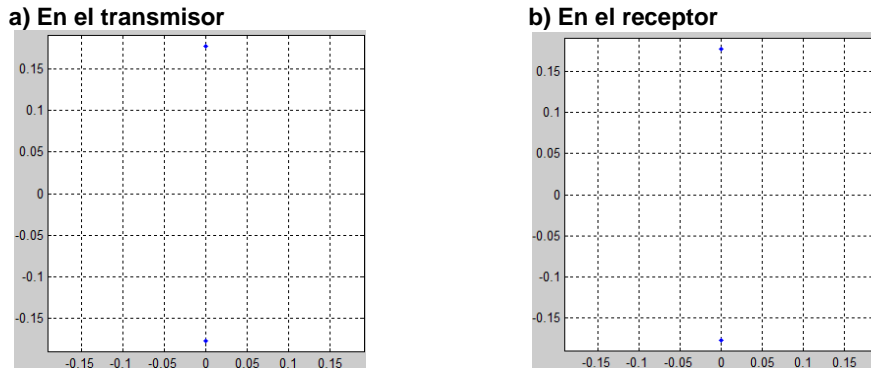


La figura 4.5 presenta los diagramas de constelación para la modulación BPSK en el transmisor y en el receptor (situación ideal).

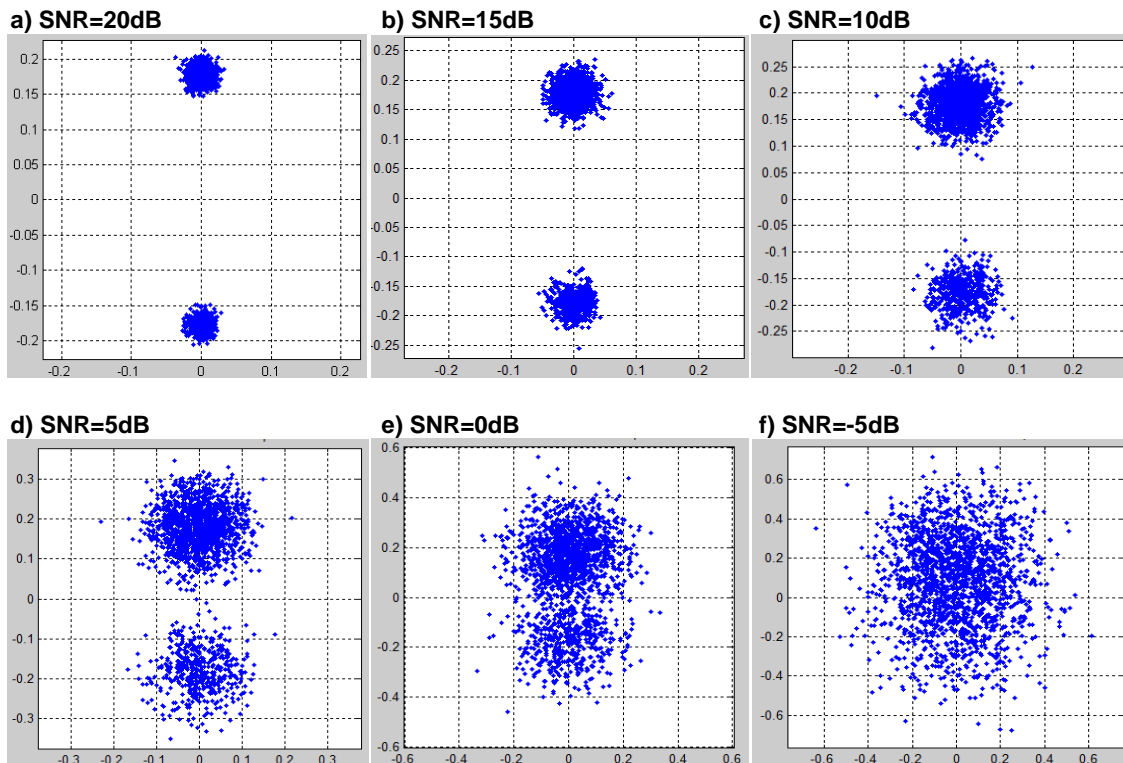
En la figura 4.6 se muestran los diagramas de constelación en el receptor para valores de SNR comprendidos entre -5dB y 20 dB transmitidos por el canal AWGN, Puede verse que aunque esta constelación sufre una degradación similar a las anteriores, es posible distinguir entre un símbolo y otro aún para un valor de SNR de 0dB. Esto significa que incluso para valores bajos de SNR, la tasa de errores se mantiene baja.

Desde el punto de vista de la velocidad de transmisión, los esquemas 16QAM y 64QAM permiten velocidades mayores ya que transportan respectivamente 4 y 6 bits por cada símbolo, a diferencia de BPSK que solo transporta un bit por símbolo.

**Figura 4.5 Diagramas de Constelación para la Modulación BPSK (situación ideal).**



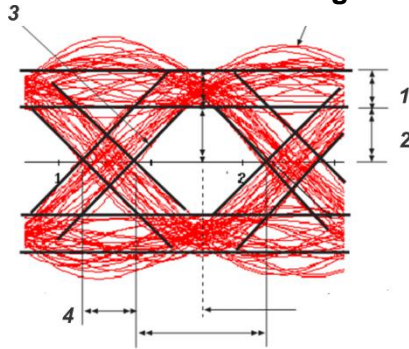
**Figura 4.6 Diagramas de Constelación para la Modulación BPSK en el Receptor para el canal AWGN.**



#### 4.5.2 Análisis de los Diagramas de Ojo.

Otra herramienta útil para analizar el desempeño de un sistema de telecomunicaciones son los diagramas de ojo. Estos diagramas corresponden a una superposición de los pulsos en banda base que representan la información que se debe transmitir. En el eje horizontal de un diagrama de ojo se encuentra el tiempo, el cual corresponde a un múltiplo del tiempo de un símbolo. Para los diagramas de ojo la escala horizontal corresponde a dos veces el tiempo de un símbolo. En el eje vertical se encuentra la magnitud de los pulsos. Los diagramas de ojo permiten determinar si los pulsos están sincronizados así como estimar la inmunidad al ruido de las señales. La figura 4.7 muestra un diagrama de ojo y los principales parámetros que pueden obtenerse al examinarlo:

Figura 4.7 Parámetros en un Diagrama de Ojo.



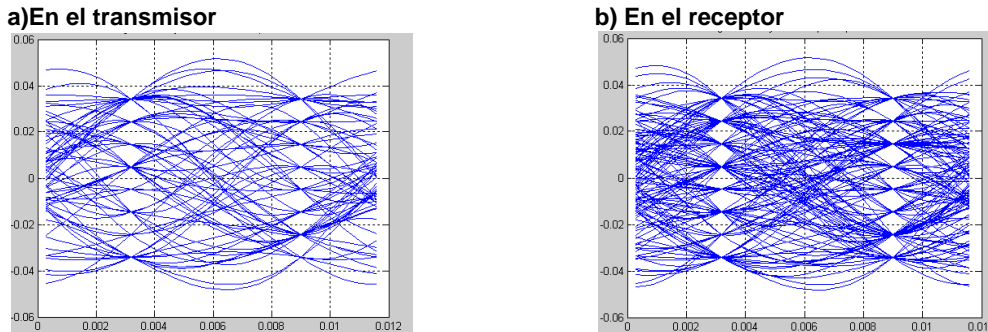
1. Nivel de distorsión al momento de muestreo, se relaciona con la SNR.
2. Nivel de ruido que puede ser tolerado por la señal, cuanto más grande, mejor.
3. Sensibilidad a errores de temporización indicada por la pendiente cuanto más pequeña, mejor.
4. Nivel de distorsión, o variación en donde ocurre el cruce por cero.

En el presente trabajo de grado se han realizado diagramas de ojo para cada uno de los esquemas de modulación empleados.

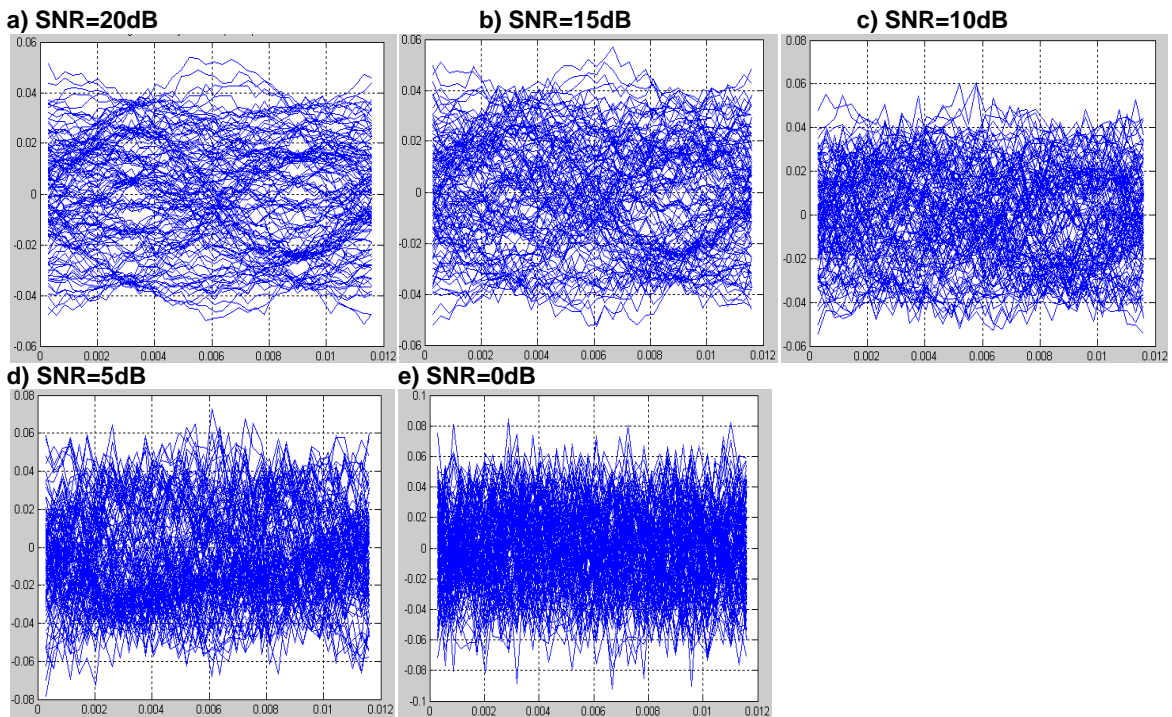
La figura 4.8 muestra los diagramas de ojo para la modulación 64QAM obtenidos en el transmisor y en el receptor (situación ideal). En ella puede observarse que los parámetros 1 y 4 valen cero, indicando una sincronización perfecta entre los pulsos. Por otra parte, debido a que los pulsos no son binarios sino que tienen múltiples niveles, se producen varias aberturas en el diagrama, en cada una de las cuales se puede obtener una estimación del parámetro 2, por lo tanto, la inmunidad al ruido es baja.

La figura 4.9, muestra los diagramas de ojo correspondientes a la modulación 64QAM en el receptor para distintos valores de SNR transmitidos por el canal AWGN. Debido al bajo valor del parámetro 2, puede notarse un rápido deterioro del diagrama de manera que al alcanzar una SNR de 10 dB o menor, es imposible distinguir los parámetros de ojo. Este hecho concuerda con los resultados obtenidos en los diagramas de constelación de esta modulación, en la cual también se aprecia un rápido deterioro de la misma al disminuir el valor de SNR.

**Figura 4.8 Diagramas de Ojo para la Modulación 64QAM (situación ideal).**



**Figura 4.9 Diagramas de Ojo para la Modulación 64QAM en el Receptor para el canal AWGN.**

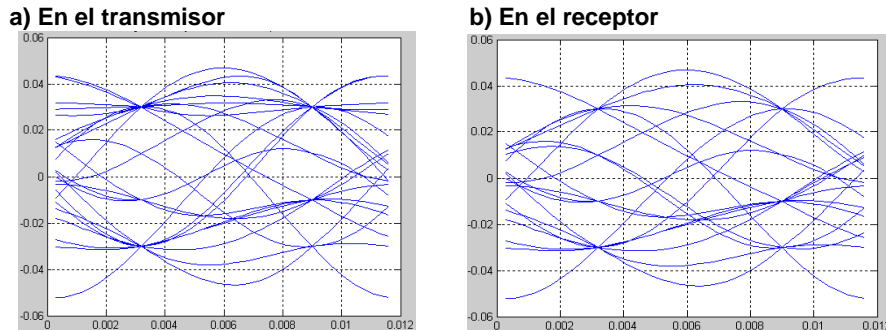


La figura 4.10 presenta los diagramas de ojo para la modulación 16QAM en el transmisor y en el receptor (situación ideal). En ellos puede observarse una sincronización perfecta de los pulsos y una inmunidad al ruido mayor que para la modulación 64QAM, debido a que estos pulsos presentan menos niveles que los pulsos 64QAM y, por lo tanto, las aberturas en el ojo son de mayor tamaño.

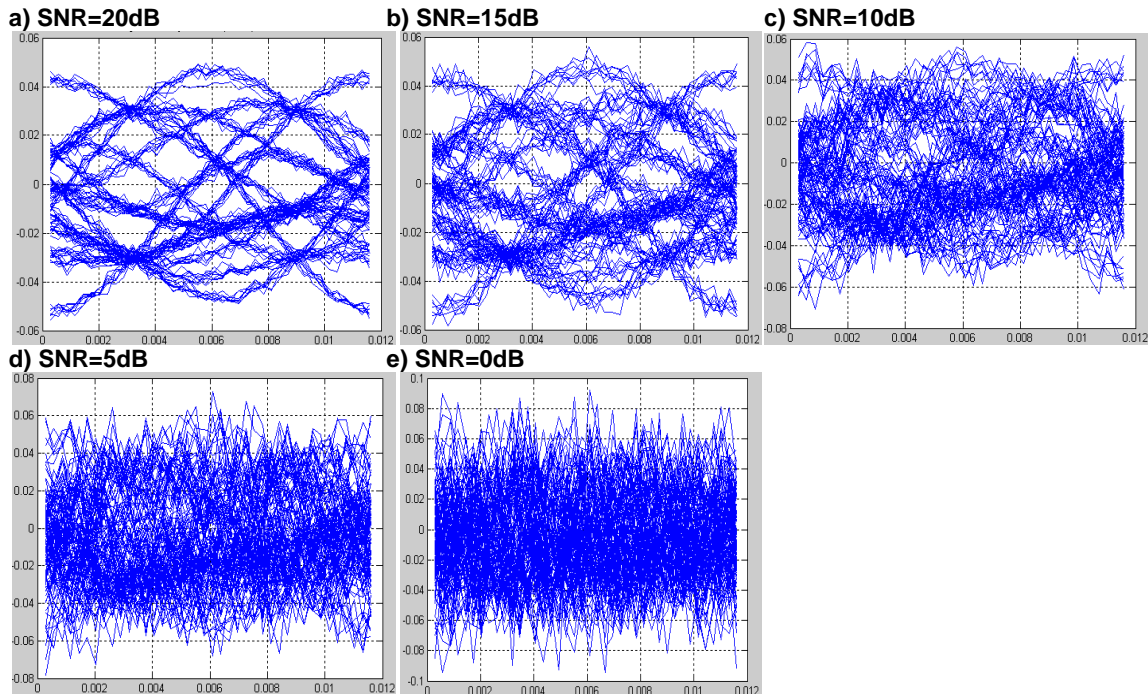
La figura 4.11 permite apreciar el deterioro sufrido por el diagrama al disminuir el valor de SNR. Se observa que a medida que SNR disminuye, aumenta el valor de los parámetros 1 y 4 lo cual indica menor sincronización y presencia de distorsión en las señales, Además, puede notarse que para valores de SNR iguales o inferiores a 5dB los parámetros de ojo se vuelven indistinguibles. A partir de esto se confirma que la

modulación 16QAM presenta mayor inmunidad al ruido que 64QAM, hecho mostrado previamente por el análisis de los diagramas de constelación.

**Figura 4.10 Diagramas de Ojo para la Modulación 16QAM (situación ideal).**



**Figura 4.11 Diagramas de Ojo para la Modulación 16QAM en el Receptor para el canal AWGN.**

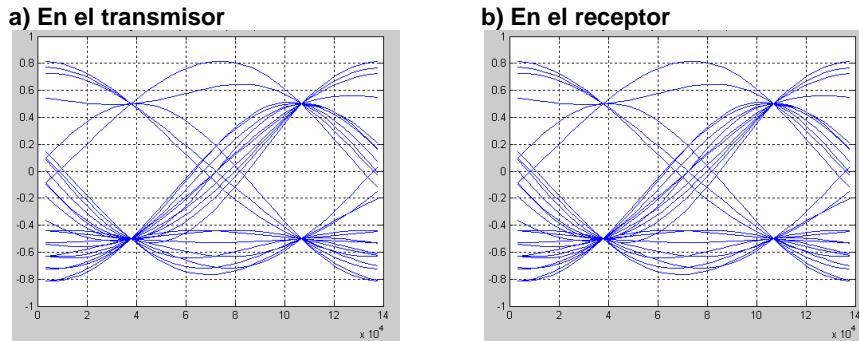


La figura 4.12 presenta los diagramas de ojo de la constelación BPSK para el transmisor y para el receptor (situación ideal). Puesto que este esquema de modulación es binario, puede observarse una mayor inmunidad al ruido que en los otros esquemas de modulación ya que la abertura del ojo es mayor. También se observa la perfecta sincronización de los pulsos derivada de los parámetros 1 y 4 cuyo valor es cero.

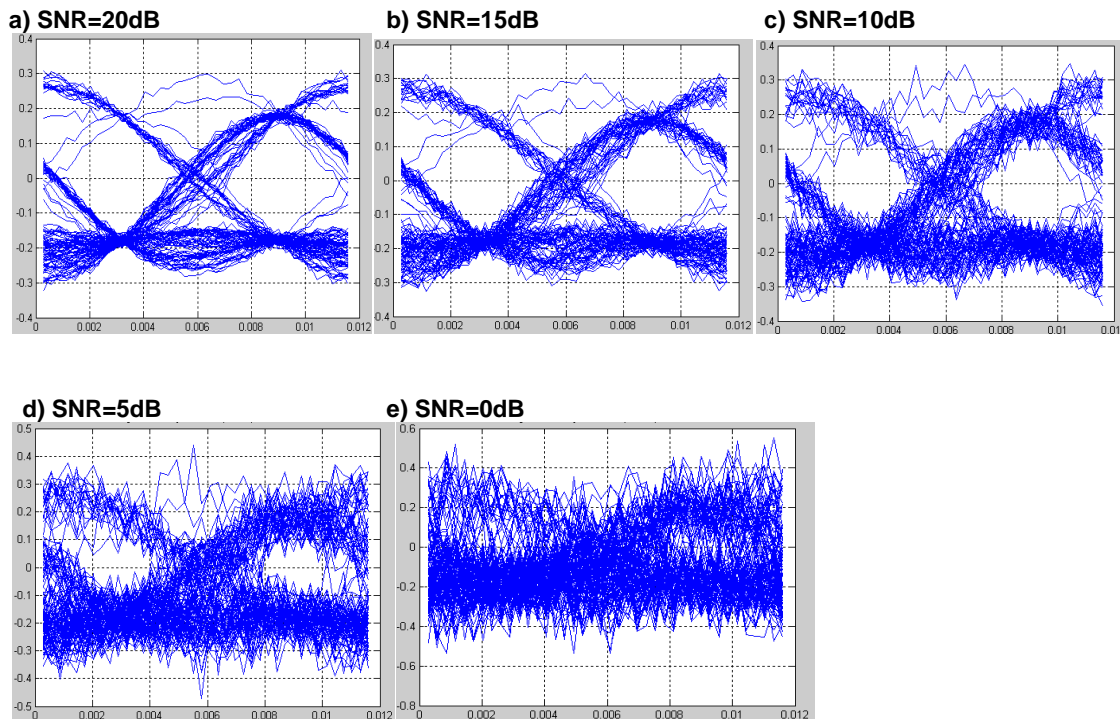
En la figura 4.13 puede notarse cómo al disminuir el valor de SNR aumenta la distorsión sin embargo aún se observa un buen nivel de inmunidad al ruido, la cual sólo tiende a desaparecer al alcanzar un valor de SNR de 0dB o inferior. El análisis de los diagramas del ojo confirma lo observado en los diagramas de constelación, es decir, que entre más símbolos posea una modulación, menor será su inmunidad al ruido.



**Figura 4.12 Diagramas de Ojo para la Modulación BPSK (situación ideal).**



**Figura 4.13 Diagramas de Ojo para la Modulación BPSK en el Receptor para el canal AWGN.**



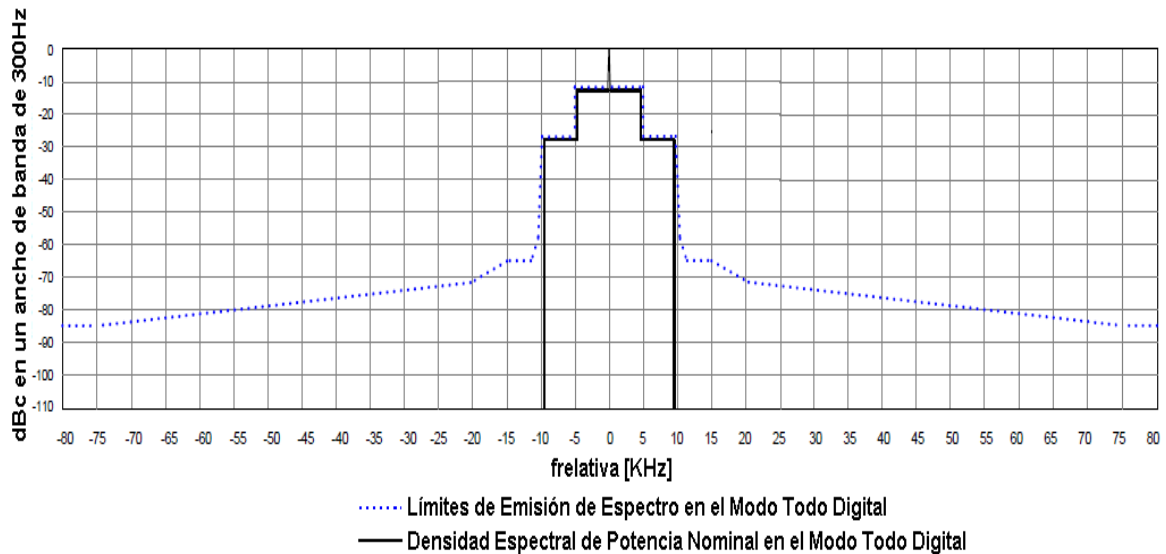
### 4.5.3 Análisis de Espectro.

El estándar IBOC AM define una máscara espectral que limita los niveles de potencia relativa a la portadora del espectro en diferentes bandas: En la tabla 4.2 se define la máscara espectral y la figura 4.14 muestra su gráfica junto con la gráfica nominal del espectro IBOC AM en modo todo digital. Las medidas deben realizarse promediando la densidad espectral de potencia en un ancho de banda de 300 Hz.

**Tabla 4.2 Límites de Espectro para el Estándar IBOC AM en Modo Todo Digital.**

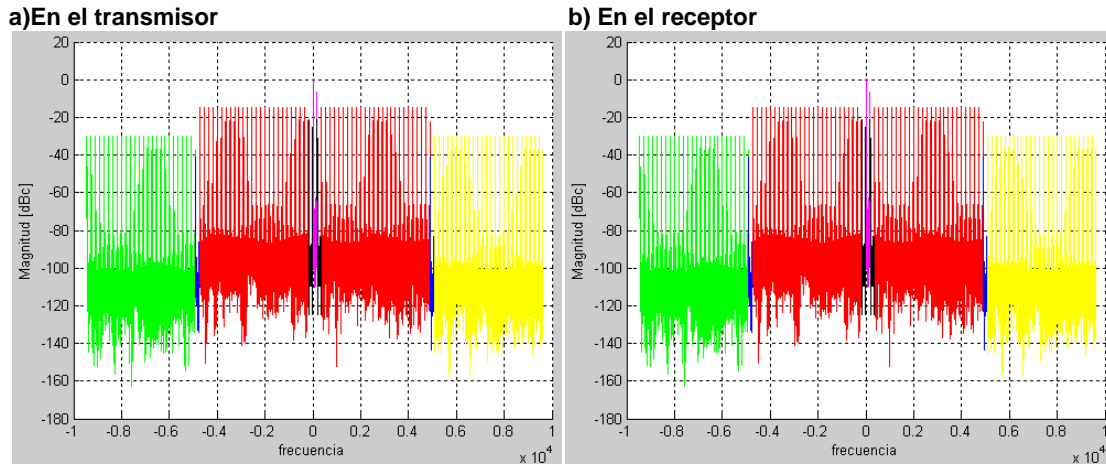
Frecuencia Relativa a la Portadora	Nivel Relativo a la Portadora sin Modular [dBc/300Hz]
181.7Hz hasta 4814.65Hz	-12.3
4814.65Hz hasta 9.8kHz	-27.3
9.8kHz hasta 10.5kHz	$-28 - ( f_{relativo}[kHz]  - 9.8) * 42.86$
10.5 hasta 11.5kHz	$-58 - ( f_{relativo}[kHz]  - 10.5) * 7.0$
11.5kHz hasta 15kHz	-65
15kHz hasta 20.5kHz	$-65 - ( f_{relativo}[kHz]  - 15) * 1.273$
20.5kHz hasta 75kHz	$-72 - ( f_{relativo}[kHz]  - 20.5) * 0.239$
Mayor 75kHz	-85

**Figura 4.14 Máscara Espectral Definida por la FCC para el Estándar IBOC AM en Modo Todo Digital.**



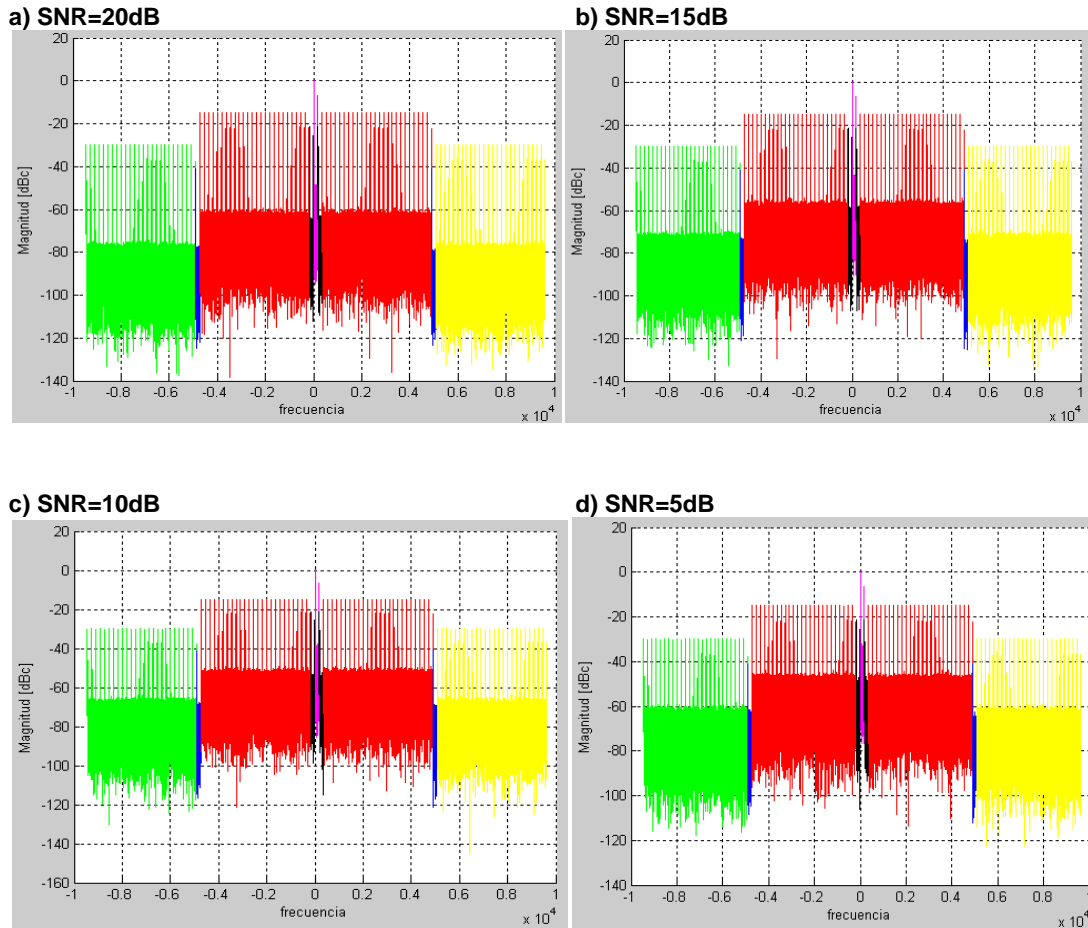
La figura 4.15 muestra el espectro total en el transmisor y en el receptor (situación ideal) En el eje horizontal se encuentra la frecuencia relativa a la frecuencia de la portadora y en el eje vertical se encuentra el nivel de potencia relativo al nivel de la portadora sin modular, expresado en dBc. En las gráficas de espectro pueden observarse las diferentes subbandas que lo conforman; en color rojo se encuentra la porción del espectro correspondiente a las subportadoras primarias; en amarillo, el espectro de las subportadoras secundarias; en verde, el de las subportadoras terciarias; en azul, el espectro de las dos subportadoras de referencia que transportan la información del canal lógico PIDS; en negro las dos subportadoras que transportan la información del vector R y en magenta, la portadora sin modular, que es empleada como referencia. Puede observarse que los valores de frecuencia y de potencia del espectro en la figura 4.15 se encuentran dentro de los límites impuestos por los valores de la máscara espectral observados en la figura 4.14. También puede examinarse en la figura 4.15 que el ancho de banda de transmisión del espectro se encuentra entre los -10kHz y 10kHz aproximadamente lo que nos da un ancho de banda cercano a los 20kHz similar al ancho de banda de la gráfica nominal del espectro IBOC AM mostrado en la figura 4.14.

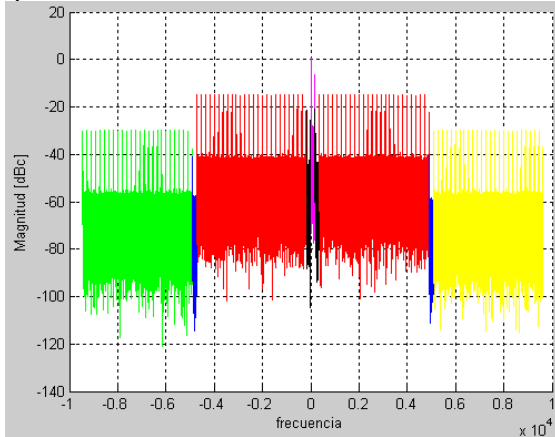
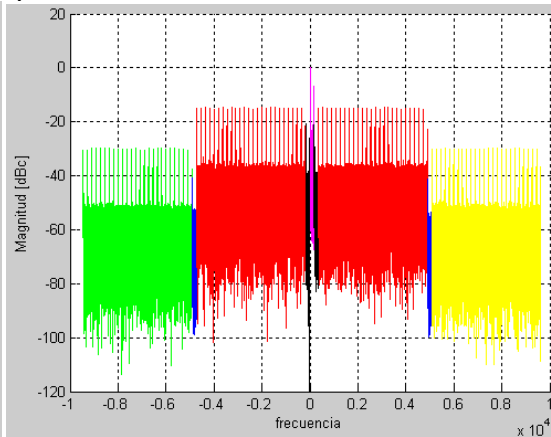
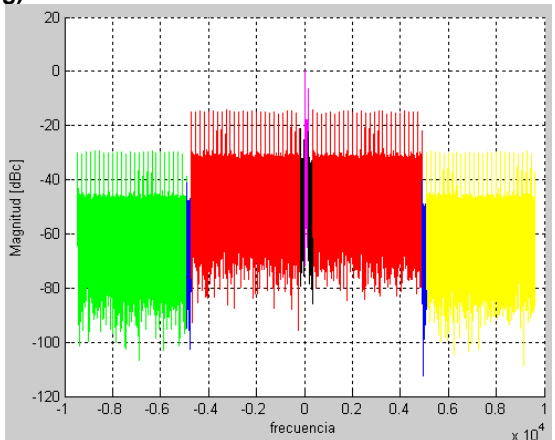
**Figura 4.15 Espectros (situación ideal).**



En la figura 4.16 puede apreciarse el espectro en el receptor al variar el parámetro SNR del canal AWGN. El decremento de SNR hace que el espectro se distorsione.

**Figura 4.16 Espectros en el Receptor para el Canal AWGN.**



**e) SNR=0dB****f) SNR=-5dB****g) SNR=-10dB**

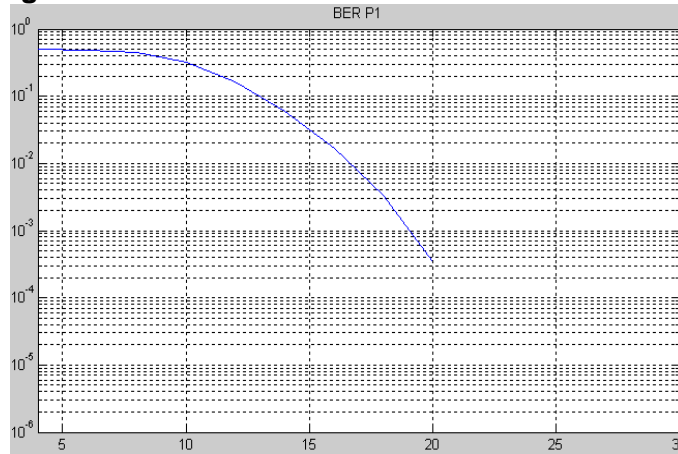
#### 4.5.4 Análisis de Desempeño.

Las figuras 4.17 y 4.18 muestran los resultados de la ejecución de la simulación en el modo de simulación múltiple. En estas figuras se observan las gráficas de BER contra SNR para cada uno de los canales lógicos. Los canales lógicos P1 y P3, utilizados para la transmisión de voz digital y datos, que son modulados empleando 64QAM, tienen un patrón de errores similar. Puede notarse que para ésta modulación la tasa de errores cae de  $2.5 \cdot 10^{-4}$  a cero cuando la relación señal a ruido supera los 20dB y que para valores de relación señal a ruido superiores a 18dB la tasa de errores se encuentra debajo de  $10^{-3}$  el cuál es considerado como la cota superior para sistemas de transmisión de voz digital [11]. Lo anterior constituye un criterio para elegir la potencia de transmisión, siendo necesario superar los 18dB de relación señal a ruido para lograr una tasa de errores adecuada para la transmisión de voz y los 20dB para la transmisión de datos, para la cual la tasa de errores debe ser inferior a  $10^{-6}$  [11].

Por otra parte, la figura 4.18 correspondiente para el canal lógico PIDS, el cual es modulado usando 16QAM, alcanza el valor de cero para un SNR de 8dB. La figura A3.1 del apéndice A.3 muestra las gráficas de BER para los datos de control modulados en BPSK. Al comparar los resultados anteriores, puede concluirse que los esquemas de modulación que presentan menor probabilidad de errores son aquellos que tienen un menor número de símbolos.

Figura 4.17 Gráfica de BER vs SNR para 64QAM.

a) Para el Canal Lógico P1



b) Para el Canal Lógico P3

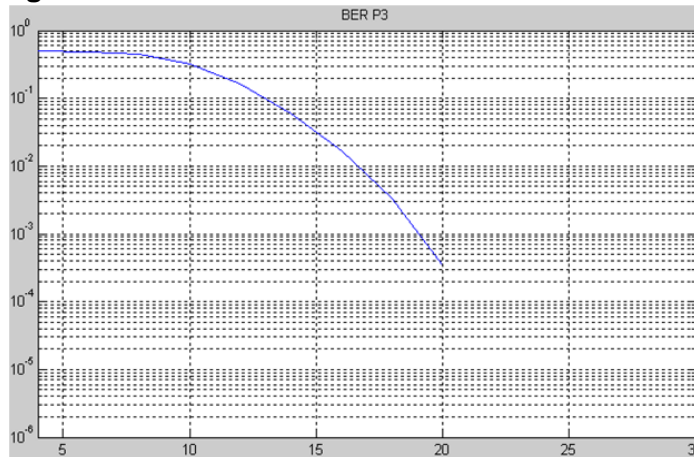
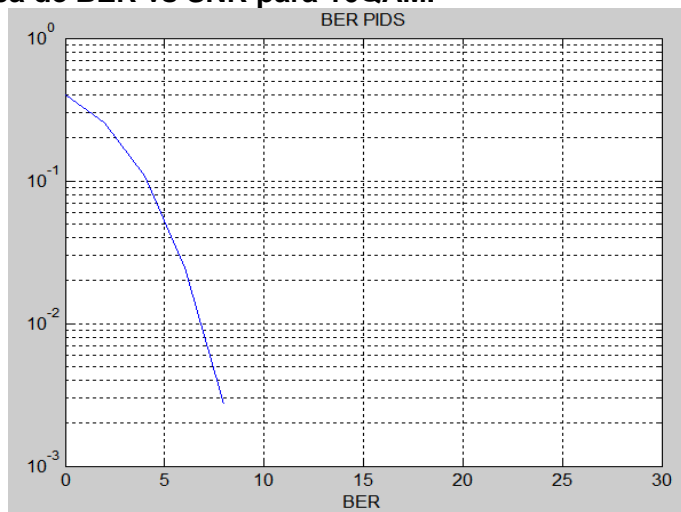


Figura 4.18 Gráfica de BER vs SNR para 16QAM.



Existen varias pruebas técnicas realizadas sobre el estándar IBOC AM de las cuales se tienen informes técnicos. Sin embargo, aquella cuyas características más se ajustan a las actividades realizadas en el este trabajo de grado son las pruebas realizadas por el Advanced Television Technology Center [12] Anexo F. La tabla 4.3 muestra los resultados mostrados en el informe técnico de dicha prueba, en la que se presenta el valor de BLER contra CNR. Las ecuaciones 4.1 y 4.2 permiten transformar estos datos en SNR y BER, los cuales permitieron generar la gráfica mostrada en la figura 4.19 en la cual se comparan los resultados obtenidos por el ATTC con los obtenidos en el presente trabajo de grado.

**Tabla 4.3 Límites BLER vs CNR.**

CNR	BLER
72,5	0,84
73	0,58
73,5	0,15
74	0,06
74,5	0

$$SNR = CNR - 13 - 10\log(20000) \quad (4.1)$$

$$BER = 1 - \sqrt[N]{1 - BLER} \quad (4.2)$$

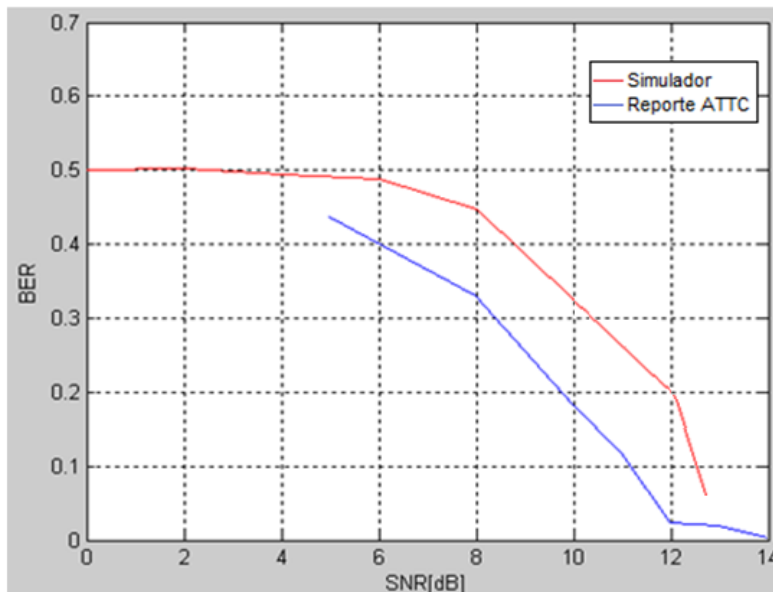
Donde

BER: Bit Error Rate.

N: Tamaño del Bloque.

BLER: Block Error Rate.

**Figura 4.19 Comparación de Resultados del Reporte Técnico con los Resultados obtenidos.**



La figura 4.19 muestra la gráfica de BER vs. SNR obtenida en la simulación la cual se encuentra en color rojo y la correspondiente gráfica obtenida a partir de los datos del reporte técnico de la Advanced Television Technology Center, la cual se encuentra en color azul. Al comparar las dos gráficas, puede observarse que la tasa de errores obtenida en el reporte técnico es menor que la obtenida en el modelo de simulación. Sin embargo, puede notarse la semejanza en el comportamiento decreciente de las dos gráficas: para valores de la SNR comprendidos entre los 5 y los 12 dB presentan una pendiente similar. De acuerdo con esto, es posible afirmar que un sistema real que implemente el estándar IBOC AM, podría presentar un desempeño mejor que el obtenido por medio de la simulación. De manera que los resultados de la simulación pueden ser tomados como referencia para estimar el desempeño de un sistema real.





# CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

## 5.1 CONCLUSIONES.

- La aplicación y adaptación de una metodología de simulación es importante porque permite definir de forma clara los objetivos, las etapas y los alcances de la simulación.
- Según se aprecia en los diagramas de constelación y de ojo correspondientes a los distintos esquemas de modulación, cuando la relación señal a ruido está por debajo de los 0dB, el efecto del ruido produce un grado de dispersión tal en los puntos de las constelaciones que hace imposible distinguir los distintos símbolos de éstas. Además, puede observarse en la figura 4.19 que la tasa de errores se aproxima a un valor de 0.5 a medida que la relación señal a ruido se acerca a cero según los resultados de la simulación para el canal lógico P1. De esto se concluye que cuando la relación señal a ruido está por debajo de 0dB no es viable una comunicación adecuada entre el transmisor y el receptor debido a la alta tasa de errores.
- Al observar las gráficas de la figura 4.17 donde se muestra la tasa bits errados contra relación señal a ruido puede notarse que para la modulación 64QAM, la cual es empleada en los canales lógicos P1 y P3, utilizados para la transmisión de voz digital y datos, la tasa de errores cae de  $2.5 \cdot 10^{-4}$  a cero cuando la relación señal a ruido supera los 20dB y que para valores de relación señal a ruido superiores a 18dB la tasa de errores se encuentra por debajo de  $10^{-3}$  el cuál es considerado como la cota superior para sistemas de transmisión de voz digital [11]. Lo anterior constituye un criterio para elegir la potencia de transmisión, siendo necesario superar los 18dB de relación señal a ruido para lograr una tasa de errores adecuada para la transmisión de voz y los 20dB para la transmisión de datos, para la cual la tasa de errores debe ser inferior a  $10^{-6}$  [11].
- Las gráficas de constelación (ver figura 4.6) muestran que la modulación BPSK presenta menor degradación ante la presencia de ruido que los demás esquemas de modulación. Esto se debe a que la modulación BPSK, al tener un menor número de símbolos presenta una mayor separación entre estados adyacentes, lo cual permite que el receptor distinga entre sus distintos símbolos, aún con la presencia de ruido. En las gráficas de constelación para BPSK se aprecia que aún con una relación señal a ruido de 0dB pueden distinguirse a qué punto de la constelación corresponden la mayoría de los símbolos dispersos por el ruido.

Debido a esta inmunidad al ruido, este esquema de modulación se emplea para transmitir las señales de control del sistema, las cuales son críticas y deben llegar con el menor número de errores posible para evitar fallos en el sistema.

- El espectro obtenido en la simulación del estándar IBOC-AM Digital que se muestra en la figuras 4.15 y 4.16 tienen un ancho de banda de 20KHz y se encuentran entre -10KHz y 10KHz, además, el nivel de potencia relativo a la portadora sin modular es de -15dBc. Esto cumple con las limitaciones impuestas por la máscara espectral definida por la FCC que se muestra en la figura 4.14, la cual tiene un ancho de banda de 20KHz, se encuentra entre -10KHz y 10KHz y un nivel máximo de potencia relativo a la portadora sin modular de -12.3dBc.
- En la comparación entre las gráficas de bits errados contra relación señal a ruido obtenidas en simulación para el canal P1 (ver figura 4.19) con las obtenidas a partir de los datos del reporte técnico de la Advanced Television Technology Center [12] (Anexo F) puede observarse que en el modelo de simulación se obtiene una tasa de errores mayor que en el reporte técnico, sin embargo, para valores de la relación señal a ruido comprendidos entre los 5 y los 12 dB presentan una pendiente similar. Por tal razón los resultados de la simulación pueden ser tomados como referencia para estimar el desempeño de un sistema real.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS.

- Realizar un estudio detallado a nivel físico del estándar de radiodifusión sonora iboc-am híbrido, hacer la simulación en MATLAB® [8] y presentar un análisis comparativo del diseño.
- Simular el estándar iboc-am digital en un escenario donde se considere la degradación de la señal transmitida debida tanto al efecto multitrayectoria como al ruido gaussiano empleando un modelo de canal tipo rayleigh.
- Implementar físicamente el sistema IBOC AM DIGITAL, realizar las mediciones correspondientes, hacer un análisis comparativo con los resultados obtenidos en la simulación del estándar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] iBiquity Digital Corporation, “HD Radio™ Air Interface Design Description Layer 1 AM”, NRSC-5 Standard and Reference Documents, 2005.  
Documento disponible en: <http://www.nrcstandards.org/SG/NRSC-5-B/1012sE.pdf>  
Fecha de último acceso: 17 Noviembre 2011.
  
- [2] National Radio Systems Committee, “NRSC-5-B In-band/on-channel Digital Radio Broadcasting Standard”, 2008.  
Documento disponible en: <http://www.nrcstandards.org/SG/NRSC-5-B/NRSC-5-B.pdf>  
Fecha de último acceso: 17 Noviembre 2011.
  
- [3] iBiquity Digital Corporation, “HD Radio™ Air Interface Design Description Layer 1 FM”, NRSC-5 Standard and Reference Documents, 2007.  
Documento disponible en: <http://www.nrcstandards.org/SG/NRSC-5-B/1011sF.pdf>  
Fecha de último acceso: 17 Noviembre 2011.
  
- [4] C. Ramírez, “Modulación por Multiportadoras Tipo OFDM, La Bases de la Nueva Generación de Transmisión de Información”, Revista de Ingenierías Universidad de Medellín, Julio-Diciembre, Año/Vol. 5, Número 009, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, pp. 75-83,  
Documento disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/750/75050907.pdf>  
Fecha de último acceso: 10 Febrero 2012.
  
- [5] Muñoz, C. y Muñoz, J. “Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones”. Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayan, 1995.
  
- [6] C. Langton, “Intuitive Guide to Principles of Communications: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)”, 2005.  
Documento disponible en: <http://www.complextoreal.com/chapters/ofdm2.pdf>  
Fecha de último acceso: 10 Febrero 2012.
  
- [7] Scilab. “[The Free Platform for Numerical Computation](http://www.scilab.org/products/scilab)”.  
Disponible en: <http://www.scilab.org/products/scilab>  
Fecha de último acceso: 17 Marzo 2012.

- [8] MatLab. "MATLAB - The Language Of Technical Computing"  
Disponible en: [<http://www.mathworks.com/products/matlab/>]  
Fecha de último acceso: 17 Marzo 2012.
- [9] Rojas C. y Semanate A. "Evaluación y Análisis de Desempeño a Nivel Físico del Estándar de Radiodifusión Digital IBOC". Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, 2010.
- [10] H. Friedenber, and S. Naik "Hitless Space Diversity STL Enables IP+Audio in Narrow STL Bands", National Association of Broadcasters Annual Convention Broadcast Engineering Conference Session, 2005.  
Documento disponible en:  
<http://www.moseleysb.com/mb/whitepapers/friedenber.pdf>  
Fecha de último acceso: 12 Noviembre 2012.
- [11] Zárate A. "Calidad de Servicio (QoS) Garantizada  
Documento disponible en:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6874/7CAPITOL6.pdf;jsessionid=74D00142B769213B550D2A0961CCAB5A.tdx2?sequence=7>  
Fecha de último acceso: 12 Noviembre 2012.
- [12] Federal Communications Commission - Report and Order and Notice of Proposed Rulemaking  
Documento disponible en:  
[http://transition.fcc.gov/Daily\\_Releases/Daily\\_Business/2012/db0501/FCC-12-46A1.pdf](http://transition.fcc.gov/Daily_Releases/Daily_Business/2012/db0501/FCC-12-46A1.pdf)  
Fecha de último acceso: 12 Noviembre 2012.



