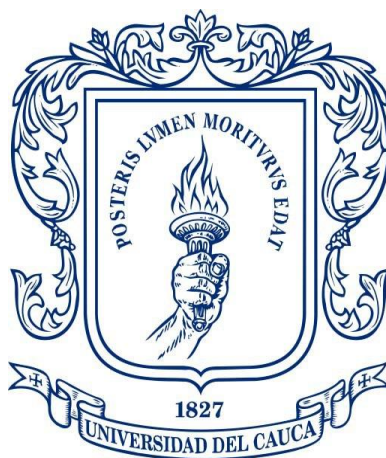


ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DEL ENLACE DE BAJADA DE LTE-ADVANCED



Trabajo de Grado

Claudia Patricia Muñoz Moreno
Marcela Yaneth Solarte Llantén

Director: Mg. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Radio
Popayán, Noviembre 2014

CONTENIDO

	Pag
CAPÍTULO 1.....	1
MOTIVACION Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	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.....	5
TECNOLOGÍA DE EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO-AVANZADO.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. CAMINO HACIA LTE- <i>ADVANCED</i>	5
2.3. REQUISITOS DE IMT- <i>ADVANCED</i>	7
2.4. REQUISITOS DE LTE- <i>ADVANCED</i>	7
2.5. TECNICAS USADAS EN LTE- <i>ADVANCED</i>	8
2.5.1. Agregación de Portadora	8
2.5.2. Multipunto Colaborativo.....	9
2.5.3. MIMO Mejorado.....	10
2.5.4. Red Auto-Organizada.....	12
2.5.5. Nodos de Retransmisión	12
2.6. ARQUITECTURA DE LTE- <i>ADVANCED</i>	13
2.7. TECNICAS DE DUPLEXACION	16
2.7.1. Duplexación por División de Frecuencia (FDD).....	16
2.7.2. Duplexación por División de Tiempo (TDD).....	16
2.8. ESTRUCTURA DE LA TRAMA LTE- <i>ADVANCED</i>	16
2.8.1. Estructura de la Trama Tipo 1	16
2.8.2. Estructura de la Trama Tipo 2.....	17
2.9. ESTRUCTURA DE LOS RECURSOS LTE- <i>ADVANCED</i>	18
2.10. TECNICAS DE ACCESO PARA LTE- <i>ADVANCED</i>	19
2.11. CANALES FÍSICOS DEL ENLACE DE BAJADA.....	20
2.11.1. Canales de Control	20
2.11.2. Canales Físicos de Trafico	21

2.12.	PDSCH.....	21
2.13.	TURBO CODIFICADOR	22
2.13.1.	Terminación Trellis.....	24
2.13.2.	Entrelazador interno.....	24
2.14.	CARACTERISTICAS DE PROPAGACION EN UN CANAL MULTITRAYECTO	25
2.15.	PARAMETROS DE EVALUACION	28
CAPÍTULO 3.....		31
METODOLOGIA.....		31
3.1.	INTRODUCCION	31
3.2.	DEFINICION DEL SISTEMA	32
3.3.	DEFINICION EN BLOQUES DEL SISTEMA.....	32
3.4.	DESCRIPCION DE LOS BLOQUES DEL SISTEMA	34
3.4.1.	Bloques internos del Transmisor eNB	34
3.4.2.	Bloques Internos del Canal	36
3.4.3.	Bloques Internos del Receptor.....	37
3.5.	DEFINICION DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACION	39
3.6.	EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS	40
CAPÍTULO 4.....		42
ANALISIS DE RESULTADOS.....		42
4.1.	INTRODUCCION	42
4.2.	ESCENARIO 1	42
4.3.	ESCENARIO 2	50
4.4.	ESCENARIO 3	58
4.5.	ESCENARIO 4	65
4.6.	ESCENARIO 5	69
CAPÍTULO 5.....		75
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		75
5.1.	CONCLUSIONES.....	75
5.2.	RECOMENDACION.....	76
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	77
BIBLIOGRAFIA.....		78
APENDICE A.....		81

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 2.1. Evolución de las Comunicaciones Móviles [7].	6
Figura 2.2. Tipos de Agregación de Portadoras [9].	9
Figura 2.3. Transmisión Conjunta CoMP para DL [1].	10
Figura 2.4. Principales Modos de MIMO en LTE-Advanced [8].	11
Figura 2.5. Esquema Básico de un Nodo de Retransmisión [13].	13
Figura 2.6. Arquitectura del sistema LTE-Advanced [9].	14
Figura 2.7. Estructura Trama Tipo 1 [11].	17
Figura 2.8. Estructura Trama Tipo 2 [11].	17
Figura 2.9. Estructura Básica de la trama en tiempo y frecuencia [15].	18
Figura 2.10. Técnica de acceso OFDMA [16].	19
Figura 2.11. Correspondencia de Canales para el Enlace de Bajada [17].	20
Figura 2.12. Codificador Turbo para LTE-Advanced [5].	23
Figura 3.1. Fases de la Metodología.	31
Figura 3.2. Modelo general del Sistema de Simulación.	32
Figura 3.3. Bloques del Sistema Simulado.	33
Figura 3.4. Módulos Internos del Codificador.	34
Figura 3.5. Generador de Señales de Sincronización.	35
Figura 3.6. Multiplexor de Datos de Usuario Señalización y Control.	35
Figura 3.7. Generador de Símbolos OFDM.	36
Figura 3.8. Generador de Trama FDD.	36
Figura 3.9. Canal de Transmisión.	37
Figura 3.10. Desensamblador de Trama FDD.	37
Figura 3.11. Detector de Símbolos OFDM.	38
Figura 3.12. Demultiplexor de Datos de Usuario Señalización y Control.	38
Figura 3.13. Decodificador.	39
Figura 3.14. Entorno de Trabajo en <i>SystemVue</i> .	41
Figura 4.1. BLER Vs SNR para Escenario 1 Caso 1.	43
Figura 4.2. BER Vs SNR para Escenario 1 Caso 1.	44
Figura 4.3. <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 1 Caso 1.	46
Figura 4.4. BLER Vs SNR para Escenario 1 Caso 2.	47
Figura 4.5. BER Vs SNR para Escenario 1 Caso 2.	48
Figura 4.6. <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 1 Caso 2.	49
Figura 4.7. BLER Vs SNR para Escenario 2 Caso 1.	51
Figura 4.8. BER Vs SNR para Escenario 2 Caso 1.	52
Figura 4.9. <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 2 Caso 1.	53
Figura 4.10. BLER Vs SNR para Escenario 2 Caso 2.	55
Figura 4.11. BER Vs SNR para Escenario 2 Caso 2.	56
Figura 4.12. <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 2 Caso 2.	57
Figura 4.13. BER Vs E_b/N_0 para Escenario 3 Caso 1.	61

Figura 4.14. <i>Throughput</i> Vs E_b/N_0 para Escenario 3 Caso 1.	62
Figura 4.15. BER Vs E_b/N_0 para Escenario 3 Caso 2.	63
Figura 4.16. <i>Throughput</i> Vs E_b/N_0 para Escenario 3 Caso 2.	64
Figura 4.17. BLER Vs SNR para Escenario 4.	65
Figura 4.18. BER Vs SNR para Escenario 4.	67
Figura 4.19. <i>Throughput</i> Vs SNR para ETU70.	68
Figura 4.20. <i>Throughput</i> Vs SNR para EVA70.	68
Figura 4.21. BLER Vs SNR para Escenario 5 Caso 1.	70
Figura 4.22. BER Vs SNR para Escenario 5 Caso 1.	70
Figura 4.23. <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 5 Caso 1.	71
Figura 4.24. BLER Vs SNR para Escenario 5 Caso 2.	72
Figura 4.25. BER Vs SNR para Escenario 5 Caso 2.	73
Figura 4.26. <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 5 Caso 2.	73

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 2.1. Comparación entre los requerimientos ITU-R y 3GPP [1].	7
Tabla 2.2. Bloques de Recursos según Ancho de Banda [6].	19
Tabla 2.3. Modos de Operación del PDSCH [9].	21
Tabla 2.4. Modelos de Canal Multitrayecto [22].	26
Tabla 2.5. Perfil de Retardo de los Canales LTE-Advanced [22].	26
Tabla 2.6. Frecuencias <i>Doppler</i> Definidas para Modelos de Canal LTE-A [22].	27
Tabla 2.7. Tipos de Correlación [23].	27
Tabla 2.8. Matrices de Correlación [14].	27
Tabla 3.1. Configuración General del sistema.	39
Tabla 3.2. Configuración de Casos de Simulación.	40
Tabla 4.1. Parámetros de Configuración del Escenario 1.	42
Tabla 4.2. SNR, BER y <i>Throughput</i> para BLER objetivo de Escenario 1 Caso 1.	43
Tabla 4.3. Máximo <i>Throughput</i> obtenido para Escenario 1 Caso 1.	45
Tabla 4.4. SNR, BER y <i>Throughput</i> para Mínimo BLER de Escenario 1 Caso 2.	47
Tabla 4.5. Máximo <i>Throughput</i> obtenido para Escenario 1 Caso 2.	49
Tabla 4.6. Parámetros de Configuración del Escenario 2.	50
Tabla 4.7. SNR, BER y <i>Throughput</i> para BLER objetivo de Escenario 2 Caso 1.	51
Tabla 4.8. SNR, BER y <i>Throughput</i> para Mínimo BLER de Escenario 2 Caso 2.	55
Tabla 4.9. Parámetros de Configuración del Escenario 3.	58
Tabla 4.10. Resultados BER y <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 3 Caso 1.	59
Tabla 4.11. Resultados BER y <i>Throughput</i> Vs SNR para Escenario 3 Caso 2.	59
Tabla 4.12. Parámetros de Configuración del Escenario 4.	65
Tabla 4.13. SNR, BER y <i>Throughput</i> para BLER objetivo de Escenario 4.	66
Tabla 4.14. Parámetros de Configuración del Escenario 5 Caso 1.	69
Tabla 4.15. Parámetros de Configuración del Escenario 5 Caso 2.	72

LISTA DE ACRONIMOS

3GPP	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación, <i>Third Generation Partnership Project</i> .
16QAM	Modulación por Amplitud en Cuadratura de 16 niveles, <i>16 Quadrature Amplitude Modulation</i> .
64QAM	Modulación por Amplitud en Cuadratura de 64 niveles, <i>64 Quadrature Amplitude Modulation</i> .
AWGN	Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, <i>Additive White Gaussian Noise</i>)
BER	Tasa de Error de Bit, <i>Bit Error Rate</i> .
BLER	Tasa de Error de Bloque, <i>Block Error Rate</i> .
CA	Agregación de Portadora, <i>Carrier Aggregation</i> .
CC	Portadoras Componente, <i>Component Carriers</i> .
CFI	Indicador de Formato del Canal, <i>Channel Format Indicator</i> .
CoMP	Multipunto Colaborativo, <i>Collaborative Multipoint</i> .
CRC	Verificación de Redundancia Cíclica, <i>Cyclic Redundancy Check</i> .
DCI	Información de Control del Enlace de Bajada, <i>Downlink Control Information</i> .
DFT	Transformada Discreta de Fourier, <i>Discrete Fourier Transform</i> .
DL	Enlace de Bajada, <i>Downlink</i> .
DwPTS	Intervalo de Tiempo Piloto del Enlace de Bajada, <i>Downlink Pilot Time Slot</i> .
EPA	Peatonal Extendido A, <i>Extended Pedestrian A</i> .
EPC	Núcleo de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet Core</i> .
EPS	Sistema de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet System</i> .
ETU	Urbano Típico Extendido, <i>Extended Typical Urban</i> .
EVA	Vehicular Extendido A, <i>Extended Vehicular A</i> .

E-UTRAN	Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionada, <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i> .
FDD	Duplexación por División de Frecuencia, <i>Frequency Division Duplexing</i> .
GP	Periodo de Guarda, <i>Guard Period</i> .
GSM	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, <i>Global System for Mobile Communication</i> .
HARQ	Hibrido de Petición de Repetición Automática, <i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i> .
HSS	Servidor de Suscriptor Local, <i>Home Subscriber Service</i> .
IDFT	Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT, <i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IMT-Advanced	Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas, <i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i> .
IP	Protocolo de Internet, <i>Internet Protocol</i> .
ITU-R	Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector Radiocomunicaciones, <i>International Telecommunication Union Radiocommunication Sector</i> .
JT-CoMP	Transmisión Conjunta CoMP, <i>Joint Transmission Collaborative Multipoint</i> .
LTE-Advanced	Evolución de Largo Término-Avanzado, <i>LTE-Advanced, Long Term Evolution-Advanced</i> .
MBMS	Sistema <i>Multicast</i> y <i>Broadcast</i> Multimedia, <i>Multimedia Broadcast and Multicast System</i> .
MIMO	Múltiples Entradas y Múltiples Salidas, <i>Multiple Input Multiple Output</i> .
MIMO Cooperative	MIMO Cooperativo, <i>Cooperative Multiple Input Multiple Output</i> .
MME	Entidad de Gestión de Movilidad, <i>Mobility Management Entity</i> .
MU-MIMO	Múltiple Usuario MIMO, <i>Multiple User – Multiple Input Multiple Output</i> .
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal, <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> .

PBCH	Canal Físico <i>Broadcast</i> , <i>Physical Broadcast Channel</i> .
PCCC	Código Convolutivo Concatenado en Paralelo, <i>Parallel Concatenated Convolutional Code</i> .
PDCCH	Canal Físico de Control del Enlace de Bajada, <i>Physical Downlink Control Channel</i> .
PDN	Red de Paquetes de Datos, <i>Packet Data Network</i> .
PDN-GW	Puerta de la Red de Paquetes de Datos, <i>Packet Data Network Gateway</i> .
PDSCH	Canal Físico Compartido del Enlace de Bajada, <i>Physical Downlink Shared Channel</i> .
PHICH	Canal Físico Indicador de HARQ, <i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i> .
PMCH	Canal Físico <i>Multicast</i> , <i>Physical Multicast Channel</i> .
PSS	Señal de Sincronización Primaria, <i>Primary Synchronization Signal</i>
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura, <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> .
RB	Bloque de Recursos, <i>Resource Block</i> .
RE	Elemento de Recurso, <i>Resource Element</i> .
RN	Nodo de Retransmisión, <i>Relay Node</i> .
RNC	Controlador de la Red Radio, <i>Radio Network Controller</i> .
RSC	Codificadores Convolutivos Sistemáticos Recursivos, <i>Recursive Systematic Convolutional</i> .
SAE	Sistema de Arquitectura Evolucionada, <i>System Architecture Evolution</i> .
SC-FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única, <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> .
S-GW	Puerta de Servicio, <i>Serving Gateway</i> .
SON	Red Auto Organizada, <i>Self Organizing Network</i> .

SSS	Señal de Sincronización Secundaria, <i>Secondary Synchronization Signal</i> .
SU-MIMO	Único Usuario MIMO, <i>Single User – Multiple Input Multiple Output</i> .
TBS	Tamaño del Bloque de Transporte, <i>Transport Block Size</i> .
TDD	Duplexación por División de Tiempo, <i>Time Division Duplexing</i> .
UL	Enlace de Subida, <i>Uplink</i> .
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles, <i>Universal Mobile Telecommunicatios System</i> .
UpPTS	Intervalo de Tiempo Piloto del Enlace de Subida, <i>Uplink Pilot Time Slot</i> .



CAPÍTULO 1

MOTIVACION Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.1. INTRODUCCIÓN

La creciente popularidad de los teléfonos móviles inteligentes y las tabletas ha motivado el desarrollo de las redes de comunicaciones móviles de banda ancha; los usuarios y las aplicaciones exigen altas velocidades de acceso y baja latencia, mientras los operadores necesitan más capacidad y alta eficiencia [1]. Garantizar estos requisitos es difícil puesto que los recursos radio son limitados. Sin embargo la tecnología Evolución de Largo Término-Avanzado (LTE-Advanced, *Long Term Evolution-Advanced*) basado en el *Release 10* se presenta como una tecnología capaz de ofrecer mejores velocidades de transmisión de datos, baja latencia y compatibilidad con las tecnologías ya existentes.

En este trabajo de grado se evaluó y analizó el desempeño a nivel físico de LTE-Advanced, teniendo en cuenta los diferentes esquemas de modulación, la tasa de codificación de canal para diferentes modelos de canal, haciendo uso de sistemas de antenas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) y en modo Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*). Para este análisis se obtuvieron las medidas de parámetros de desempeño tales como: la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) y *throughput*¹; usando la herramienta *SystemVue*® de *Agilent Technologies*®² las cuales permitieron obtener las conclusiones que se presentan en el capítulo 5.

¹ Cantidad máxima de información transmitida por unidad de tiempo a través de un canal sin errores.

² *SystemVue*® de *Agilent Technologies*®. <http://www.agilent.com/>



1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

LTE-*Advanced* es un estándar especificado por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) bajo la denominación *Release 10* (R10). Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas (IMT-*Advanced*, *International Mobile Telecommunications-Advanced*) define una tecnología de Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) como aquella que logra velocidades pico de transmisión de datos de hasta 100Mbps en alta movilidad y 1Gbps en baja movilidad [2]. Para satisfacer los objetivos propuestos por IMT-*Advanced*, LTE-*Advanced* hace uso de las siguientes técnicas: Agregación de Portadora (CA, *Carrier Aggregation*) [3], sistemas de antenas MIMO, Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el Enlace de Bajada (DL, *Downlink*), Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en el Enlace de Subida (UL, *Uplink*) [4], codificación turbo, Duplexación por División de Frecuencia (FDD), Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) [5], Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*), Modulación por Amplitud en Cuadratura de 16 niveles (16QAM, *16 Quadrature Amplitude Modulation*), y Modulación por Amplitud en Cuadratura de 64 niveles (64QAM, *64 Quadrature Amplitude Modulation*) [6].

La evolución de la tecnología LTE basada en el *Release 8* (R8) del 3GPP es LTE-*Advanced*. Ésta ofrece mejores características convirtiéndose en una tecnología clave para el desarrollo del sector de las telecomunicaciones móviles, por esta razón LTE-*Advanced* se implementará en los próximos años como una mejora a las tecnologías ya existentes. Por lo tanto, es fundamental realizar una evaluación y análisis de desempeño de dicha tecnología. Para ello, se utiliza el recurso de la simulación ya que a nivel académico no se cuenta con los recursos hardware necesarios. En este trabajo de grado se hizo uso de *SystemVue*® de *Agilent Technologies*®, software de simulación que cuenta con un sistema LTE-*Advanced* y con licencia académica, para realizar la simulación a nivel físico teniendo en cuenta los diferentes esquemas de modulación, la codificación de canal, en modo FDD ante diferentes modelos de canal, y haciendo uso de sistemas de antena MIMO, para así dar respuesta a la pregunta de investigación:



¿Cuál es el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de la tecnología LTE-Advanced con Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y con un sistema de antenas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO)?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Analizar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de la tecnología LTE-Advanced en modo Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y con un sistema de antenas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO).

1.3.2. Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general fueron planteados los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el funcionamiento de los diferentes esquemas de modulación y codificación de un sistema LTE-Advanced empleando MIMO 2X2 y 4X4, sin agregación de portadora en el enlace de bajada.
- Evaluar el desempeño a nivel físico de la tecnología LTE-Advanced mediante la medida de parámetros como: la Tasa de Error de Bit (BER), la Tasa de Error de Bloque (BLER) y *throughput*, para el enlace de bajada, en modo FDD, teniendo en cuenta diferentes modelos de canal.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El propósito de este trabajo de grado es analizar y evaluar el desempeño del estándar LTE-Advanced, para ello este documento se encuentra organizado de la siguiente manera.

Capítulo 1: Introducción. Presenta la motivación, descripción del problema y objetivos de este trabajo de grado.



Capítulo 2: Tecnología de Evolución a Largo Término – Avanzado. Describe las principales características de LTE-*Advanced*, tales como: arquitectura, esquemas de modulación, canales de transporte, codificación, el nivel físico y sus diferentes técnicas de transmisión.

Capítulo 3: Metodología. Detalla la aplicación y adaptación una metodología para la evaluación de un modelo conceptual del sistema, teniendo en cuenta las especificaciones del *Release 10* del 3GPP.

Capítulo 4: Análisis de Resultados. Muestra los resultados obtenidos mediante la simulación de LTE-*Advanced* y su respectivo análisis.

Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos Futuros. Presenta las conclusiones referentes a la evaluación y análisis del desempeño del enlace de bajada de LTE-*Advanced* y se plantean las futuras líneas de investigación derivadas del trabajo realizado.



CAPÍTULO 2

TECNOLOGÍA DE EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO-AVANZADO

2.1. INTRODUCCIÓN

LTE-Advanced representa la evolución de LTE para cumplir con los requerimientos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector Radiocomunicaciones (ITU-R, *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*), su funcionamiento se basa en técnicas modernas y mejoradas que le permiten conseguir velocidades de transmisión de hasta 1Gbps para descarga de datos y el aumento de la capacidad de la celda. Esta cuarta generación de las comunicaciones móviles se fundamenta completamente en el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), es decir, la transmisión de voz y datos se realiza en pequeños bloques de información denominados paquetes, lo que la hace una tecnología óptima para ser usada por teléfonos inteligentes, módems inalámbricos, tabletas, y otros dispositivos móviles que en la actualidad tienen gran popularidad.

Este capítulo presenta las principales características de LTE-Advanced referidas en el *Release 10* del 3GPP. Inicialmente se ofrece una síntesis de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles hacia LTE-Advanced, luego se consignan los requisitos de IMT-Advanced y LTE-Advanced y se describen otras características de esta tecnología.

2.2. CAMINO HACIA LTE-ADVANCED

La industria de las redes de comunicaciones celulares ha recorrido un largo camino evolutivo, esta evolución se representa en la Figura 2.1, cuyo origen data de finales de los años 70 con los teléfonos móviles analógicos de gran tamaño y dedicados solo a la transmisión de voz y está constituida la primera generación de las comunicaciones móviles; la segunda generación inició en los años 90 y a



diferencia de la anterior se caracterizó por ser digital y ofrecer servicios adicionales como mensajes de texto, la tecnología de mayor despliegue fue el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communication*); luego empezó una etapa de transición hacia la tercera generación conocida como 2.5G, la cual introdujo la conmutación de paquetes en las redes GSM y con esto los mensajes multimedia cortos; posteriormente se inició la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a internet, principales características de la tercera generación de las comunicaciones móviles, el estándar que definió esta generación fue el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunicatios System*); la creciente demanda de estos servicios de tercera generación llevo a que se diera paso a una siguiente generación con altas velocidades de transmisión de datos y baja latencia, por lo cual nació LTE como un estándar para comunicaciones de datos inalámbricos y una evolución de los estándares GSM/UMTS; en la actualidad con la gran acogida de los teléfonos inteligentes y las tabletas cada vez se hace mayor la demanda de recursos radio, entonces en el 2010 surgió LTE-*Advanced* que proporciona mayor velocidad pico de datos, mejora la capacidad de la celda y provee mejoras en el servicio que la hacen una tecnología óptima para satisfacer los requerimientos de la actual cuarta generación de las comunicaciones móviles [7].

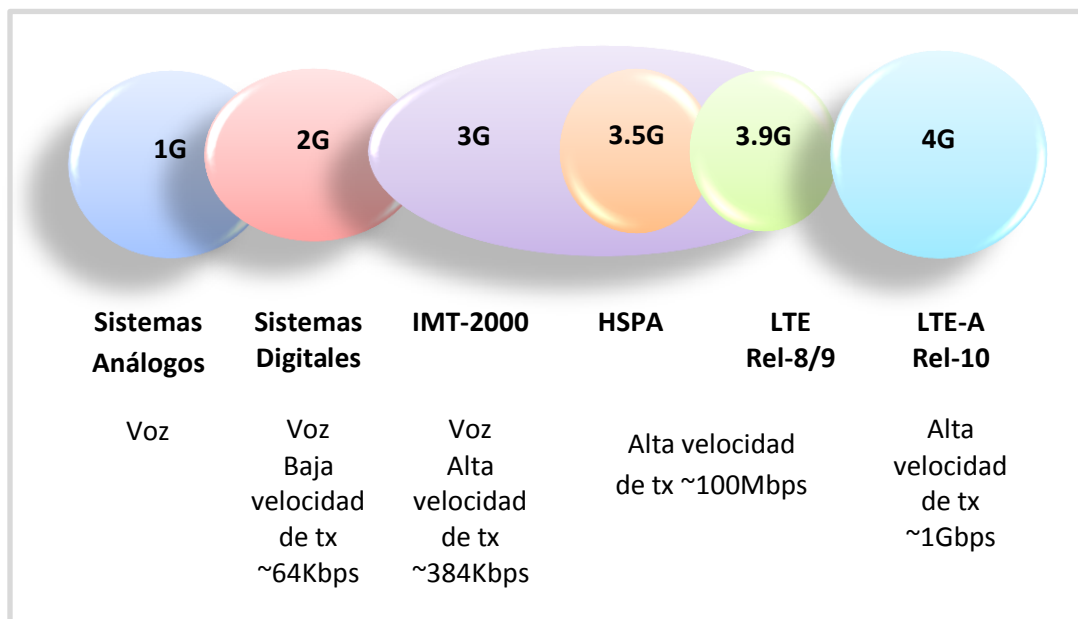


Figura 2.1. Evolución de las Comunicaciones Móviles [7].



2.3. REQUISITOS DE IMT-ADVANCED

IMT-Advanced se creó por la necesidad de establecer estándares que ofrecieran mayores velocidades de datos; La ITU-R establece los requisitos para IMT-Advanced, los orientados a desempeño son los siguientes [2]:

- Sistema capaz de soportar 100Mbps para alta movilidad y 1Gbps para baja movilidad.
- Ancho de banda escalable de por lo menos 20MHz con posibilidad de extenderse hasta 100MHz.
- Pico de eficiencia espectral de 15bits/Hz para el enlace de bajada.
- La eficiencia espectral de la celda en un entorno de cobertura urbano de 2.2bits/Hz y la eficiencia espectral en el borde de la celda en el mismo entorno de 0.06bits/Hz para el enlace de bajada.

2.4. REQUISITOS DE LTE-ADVANCED

3GPP definió los requisitos para LTE-Advanced en la serie 36 versión 10, entre sus principales características se encuentra que es la evolución de LTE, lo que hace que los terminales móviles de los estándares sean compatibles, utiliza la técnica de agregación de portadora para lograr un ancho de banda de hasta 100MHz, usa MIMO mejorado para incrementar la velocidad de los datos y mejorar la eficiencia espectral y soporta nodos de retransmisión. En la Tabla 2.1 se describen las diferencias entre lo establecido por la ITU-R y el 3GPP [1].

Tabla 2.1. Comparación entre los requerimientos ITU-R y 3GPP [1].

REQUISITOS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA	REQUISITOS 3GPP	REQUISITOS ITU-R
Pico de eficiencia espectral DL	30 bits/s/Hz (máx 8 antenas)	15 bits/s/Hz (máx 4 antenas)
Pico de eficiencia espectral UL	15 bits/s/Hz (máx 4 antenas)	6.75 bits/s/Hz (máx 2 antenas)



Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda UL	0.04 – 0.07 bits/s/Hz	0.03 bits/s/Hz
Eficiencia espectral de usuario en el borde de la celda DL	0.07 – 0.12 bits/s/Hz	0.06 bits/s/Hz
Latencia plano de usuario	10ms	10ms

2.5. TECNICAS USADAS EN LTE-ADVANCED

Las características más destacadas que introduce 3GPP a través de la tecnología *LTE-Advanced Release 10* están numeradas a continuación [1].

2.5.1. Agregación de Portadora

La Agregación de Portadora aprovecha el máximo ancho de banda de transmisión y esta permite tener compatibilidad con el R8 y R9; CA consiste en un conjunto de Portadoras Componente (CC, *Component Carries*) usadas para la transmisión a un solo terminal, pueden ser admitidas hasta cinco CC, lo que permite que en *LTE-Advanced* se logre un ancho de banda de transmisión de hasta 100MHz [8]; dependiendo del espectro usado existen tres configuraciones para la agregación de portadora, estos se muestran en la Figura 2.2.

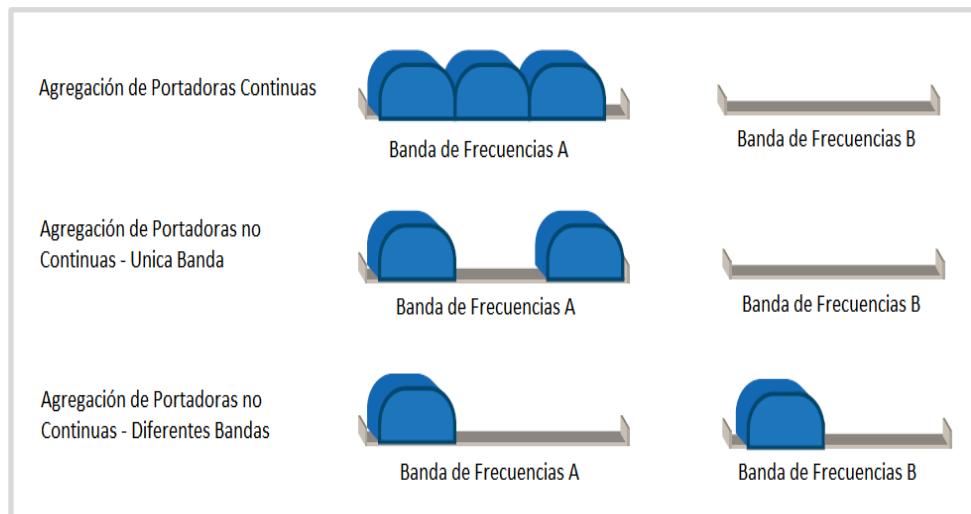


Figura 2.2. Tipos de Agregación de Portadoras [9].

La agregación de portadoras continuas en única banda, se da cuando las CC son adyacentes entre sí, en la misma banda de frecuencias; por otra parte la agregación de portadoras no continuas en única banda, ocurre cuando múltiples CC dentro de la misma banda de frecuencias son usadas de una manera no continua y por último, la agregación de portadoras no continuas en diferentes bandas sucede cuando múltiples CC son separadas en distintas bandas de frecuencias [10].

2.5.2. Multipunto Colaborativo

En las redes inalámbricas, el desvanecimiento por multitrayecto causado por las diferentes obstrucciones que existen en los entornos de transmisión afecta seriamente el desempeño de las comunicaciones inalámbricas.

3GPP introduce una técnica de comunicación llamada Multipunto Colaborativo (CoMP, *Collaborative Multipoint*), esta se refiere a la cooperación de dos o tres nodos separados geográficamente para proporcionar servicios a múltiples usuarios; CoMP se basa en el procesamiento de señales coordinadas o cooperativas entre varias celdas. En el lado izquierdo de la Figura 2.3 se pueden observar tres nodos transmitiendo a tres terminales de una forma convencional, es decir, no coordinada, lo que significa que la señal deseada de un terminal está siendo afectada por las dos señales de las otras dos celdas. En el centro de la Figura 2.3 se muestra la Transmisión Conjunta CoMP (JT-CoMP, *Joint*



Transmission Collaborative Multipoint) en modo único usuario, esta permite que hasta tres celdas transmitan conjuntamente a un terminal los mismos recursos en tiempo y frecuencia; a la derecha de la Figura 2.3 se ilustra la transmisión en modo múltiple usuario CoMP, en esta, los usuarios comparten los mismos recursos, la potencia de transmisión total por usuario es la misma que en el caso no coordinado pero en este escenario la interferencia entre celdas es superada, por lo tanto, CoMP actúa como una herramienta para mejorar cobertura de alta velocidad de datos, el *throughput* del sistema y el del borde de la celda [1].

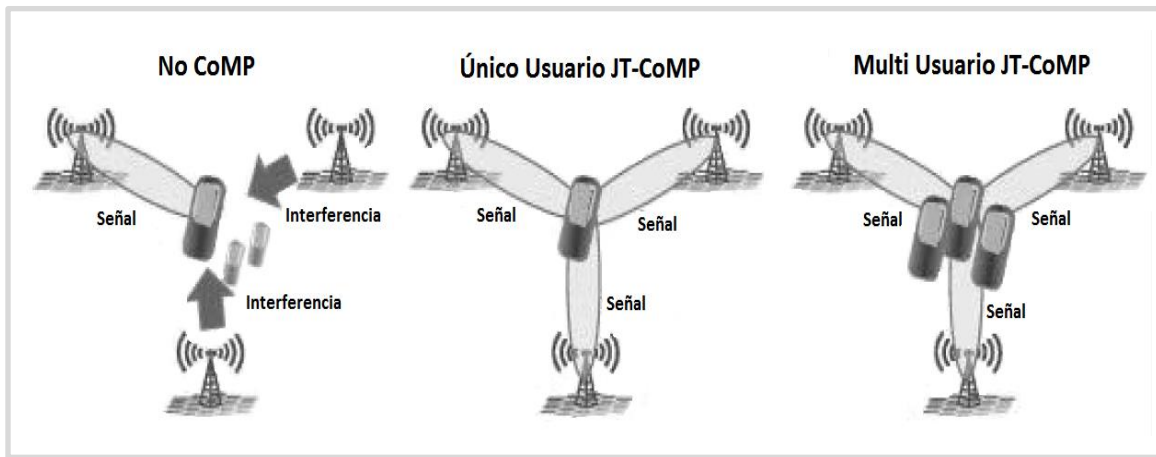


Figura 2.3. Transmisión Conjunta CoMP para DL [1].

2.5.3. MIMO Mejorado

La técnica MIMO Mejorado se basa en el uso de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción para mejorar la eficiencia espectral y la tasa pico de datos. *LTE-Advanced* soporta configuraciones desde 2X2 hasta 8X8 antenas en el enlace de bajada y en el enlace de subida soporta las configuraciones 2X2 y 4X4 antenas; los principales modos que utiliza esta técnica en *LTE-Advanced* se muestran en la Figura 2.4 y se describen a continuación [8] [11].

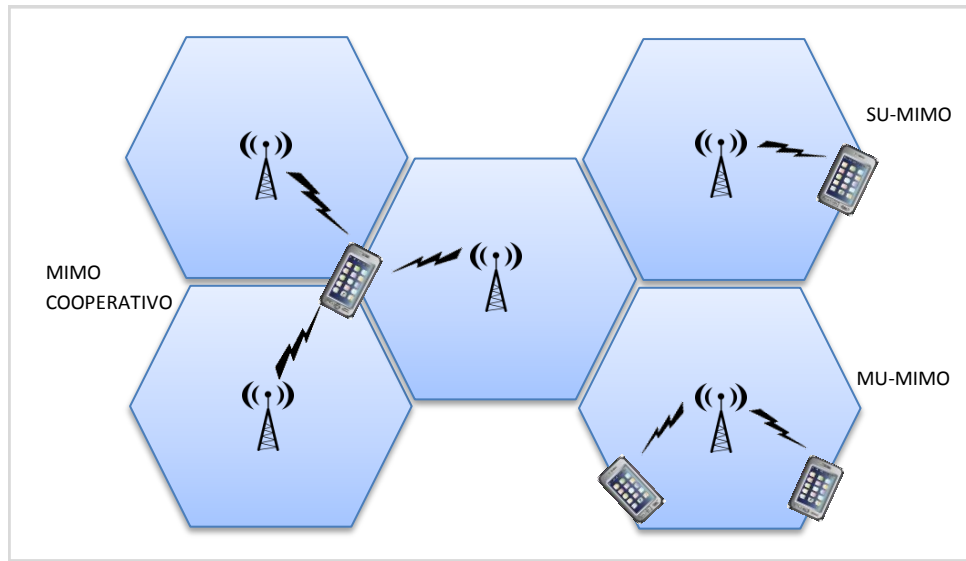


Figura 2.4. Principales Modos de MIMO en LTE-Advanced [8].

2.5.3.1. Único Usuario MIMO

En el modo Único Usuario MIMO (SU-MIMO, *Single User - Multiple Input Multiple Output*) un equipo de usuario puede recibir hasta ocho flujos diferentes provenientes del *eNodeB*³; se pueden seleccionar las técnicas de diversidad de transmisión y multiplexación espacial para la configuración de estos flujos de datos, estas características junto con el alto orden de MIMO permiten que se incremente la tasa de datos pico para un único usuario [8].

2.5.3.2. Múltiple Usuario MIMO

El modo Múltiple Usuario MIMO (MU-MIMO, *Multiple User - Multiple Input Multiple Output*) permite que el eNB se comunique con múltiples UE, es decir, proporciona el acceso de varios UE sobre los mismos recursos en tiempo y frecuencia aprovechando la ortogonalidad o desacoplo espacial entre los flujos, mejorando así la capacidad de la celda [8] [12].

³ *eNodeB* ó eNB: Se refiere a la estación base en LTE-Advanced



2.5.3.3. MIMO Cooperativo

El modo MIMO Cooperativo (*MIMO Cooperative, Cooperative Multiple Input Multiple Output*) permite que la calidad de la señal de los equipos de usuario ubicados en el borde de la celda sea mejorada haciendo uso de la técnica CoMP, esta técnica permite mejorar la capacidad y rendimiento de la celda [7].

2.5.4. Red Auto-Organizada

Una Red Auto Organizada (SON, *Self Organizing Network*) puede automáticamente extenderse, cambiar, configurar y optimizar su topología, cobertura, capacidad, tamaño de celda y asignación del canal basándose en los cambios en la localización, patrón de tráfico, interferencia y el estado del entorno; por estas características, SON mejora la calidad y desempeño de la red mientras reduce el costo de operación [7].

2.5.5. Nodos de Retransmisión

LTE-*Advanced* introduce el concepto de Nodo de Retransmisión (RN, *Relay Node*) con el objetivo de optimizar el desempeño en cuanto a cobertura y *throughput*. RNs son estaciones base de redes móviles que se conectan a la red a través de un enlace de retorno inalámbrico, en lugar de utilizar un cable o enlace dedicado; con el uso de RN se puede mejorar la capacidad [7] y también los siguientes aspectos [13]:

- Cobertura de alta velocidad de datos.
- Movilidad de grupo.
- Despliegue de redes temporales.
- Rendimiento en el borde de celda.
- Provee cobertura en nuevas áreas.

El equipo de usuario se conecta al RN y este se conecta a un nodo donante eNB como lo muestra la Figura 2.5; la comunicación entre el RN y eNB puede ocurrir de dos maneras: en banda, cuando se comparte el intervalo de frecuencia que es utilizado para comunicarse el eNB con el UE, o fuera de banda cuando se utilizan diferentes frecuencias.

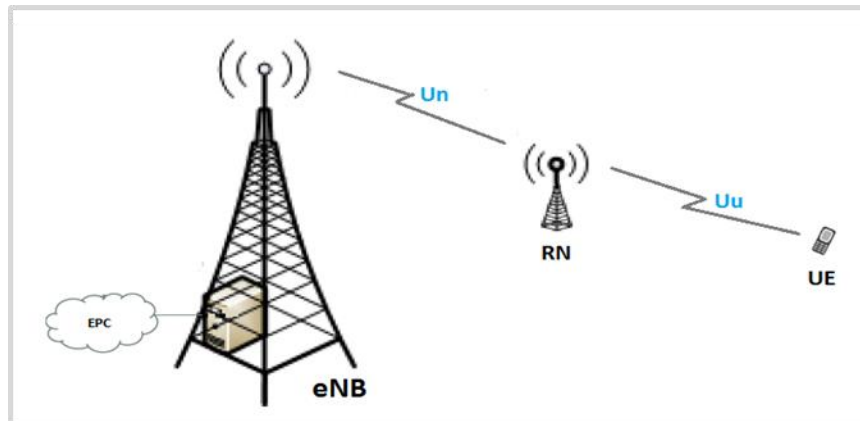


Figura 2.5. Esquema Básico de un Nodo de Retransmisión [13].

2.6. ARQUITECTURA DE LTE-ADVANCED

La red evolucionada de cuarta generación propuesta por 3GPP para LTE-Advanced se conoce con el nombre de Sistema de Arquitectura Evolucionada (SAE, *System Architecture Evolution*), consta de tres componentes fundamentales como se muestra en la Figura 2.6, los cuales son: el equipo de usuario, la Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*) y el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*), en conjunto los dos últimos se conocen como el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) con esto se unifican los servicios de voz y datos para que todo el tráfico sea basado en IP; esta arquitectura plana reduce el número de elementos empleados en la red y trae ventajas como: menor latencia, mejorar la capacidad de la red y la tasa de transferencia.

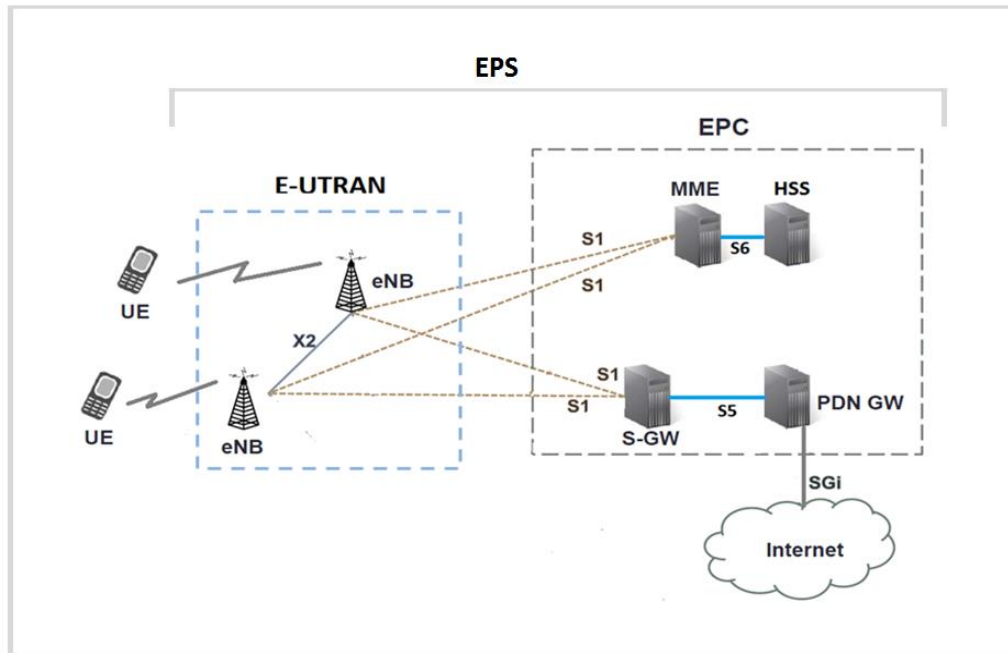


Figura 2.6. Arquitectura del sistema LTE-Advanced [9].

Cada elemento de la arquitectura que se muestra en la Figura 2.6 se detalla a continuación.

- **Equipo de Usuario**

Es el dispositivo que permite el acceso de los usuarios a los servicios de la red, las diferentes categorías de UE están especificadas en el R10 [14], estas van en un rango desde la categoría 1 con las características básicas, hasta la categoría 8 con las cuales se permiten servicios más complejos y mayores velocidades de datos.

- **E-UTRAN**

Contiene un conjunto de eNBs, los cuales son una combinación de *NodeB* y Controlador de la Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*) usados en las redes de comunicaciones móviles de tercera generación; la conexión entre eNBs se hace usando interfaces X2, a través de las cuales se intercambia tráfico de usuario



durante el proceso de *Handover*⁴; para la conexión con EPC se utilizan interfaces S1.

- **EPC**

Proporciona servicios de conectividad IP para explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN; consta de los cuatro componentes que se resumen a continuación [9] [11]:

- La Puerta de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*) es responsable del enrutamiento y reenvío de paquetes entre UE y la Red de Paquetes de Datos (PDN, *Packet Data Network*) mediante la interfaz S1-U; además actúa como un ancla cuando los UE se mueven entre eNBs.
- El Servidor de Suscriptor Local (HSS, *Home Subscriber Service*) contiene la base de datos en la cual se encuentra toda la información de usuarios locales.
- La Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*) gestiona el acceso y la movilidad de los UEs, también establece el trayecto portador para los UEs; además maneja la información del HSS para que se realice la autenticación y autorización de los terminales móviles.
- La Puerta de la Red de Paquetes de Datos (PDN-GW, *Packet Data Network Gateway*) se encarga de que se establezca la conexión entre EPC e internet; además soporta funciones para realizar la asignación de direcciones IP a los equipos de usuario.

⁴ *Handover*: mecanismo usado para transferir el servicio de un eNB a otro cuando la calidad del enlace sea insuficiente



2.7. TECNICAS DE DUPLEXACION

La Duplexación hace referencia al proceso de establecer una comunicación Bi-direccional, para que esto se lleve a cabo, LTE-*Advanced* utiliza las técnicas FDD y TDD [9].

2.7.1. Duplexación por División de Frecuencia (FDD)

Cuando un sistema opera en modo FDD hay dos frecuencias portadoras una para el enlace de subida f_{UL} y otra para el enlace de bajada f_{DL} , la transmisión en el enlace de subida y en el enlace de bajada puede ocurrir simultáneamente dentro de una celda.

2.7.2. Duplexación por División de Tiempo (TDD)

En modo TDD solo hay una frecuencia portadora por celda, por tanto la transmisión en el enlace de subida y en el enlace de bajada se separa en el dominio del tiempo.

2.8. ESTRUCTURA DE LA TRAMA LTE-ADVANCED

La transmisión está organizada en tramas, cada una con una duración de 10ms, LTE-*Advanced* soporta dos tipos de estructuras de trama, el tipo 1 aplica para FDD y el tipo 2 aplica para TDD [11].

2.8.1. Estructura de la Trama Tipo 1

Una trama LTE-*Advanced* se divide en 10 sub-tramas de igual tamaño y estas a su vez se dividen en dos intervalos de tiempo (*slots*) que tienen una duración de 0.5ms, como se muestra en la Figura 2.7; para la transmisión FDD se dispone de las 10 sub-tramas simultáneas en el enlace de bajada y en el enlace de subida ya que estas son separadas en el dominio de la frecuencia.

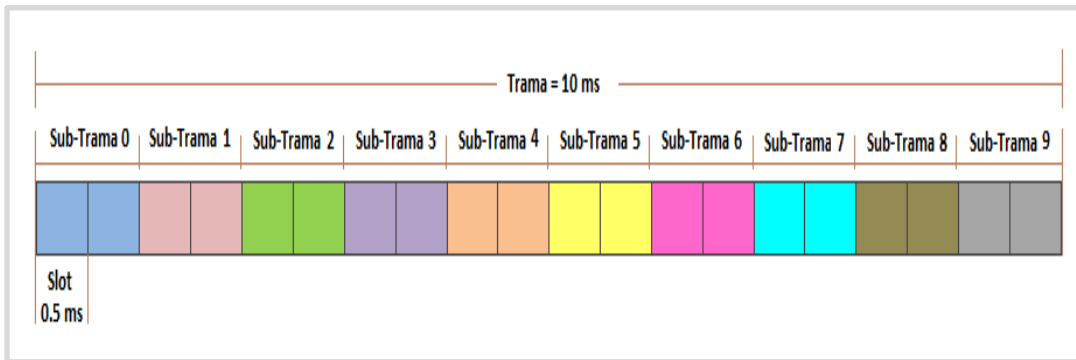


Figura 2.7. Estructura Trama Tipo 1 [11].

2.8.2. Estructura de la Trama Tipo 2

La estructura de la trama tipo 2 se ilustra en la Figura 2.8; la trama se divide generando dos medias tramas las cuales tienen una duración de 5ms cada una, a su vez, estas son divididas en ocho intervalos de tiempo cada uno con duración de 0.5ms y contienen tres campos espaciales que son: Intervalo de Tiempo Piloto del Enlace de Bajada (DwPTS, *Downlink Pilot Time Slot*), Intervalo de Tiempo Piloto del Enlace de Subida (UpPTS, *Uplink Pilot Time Slot*) y Periodo de Guarda (GP, *Guard Period*). La longitud del DwPTS y UpPTS está sujeta a la duración total de DwPTS, UpPTS y GP la cual es igual a 1ms.

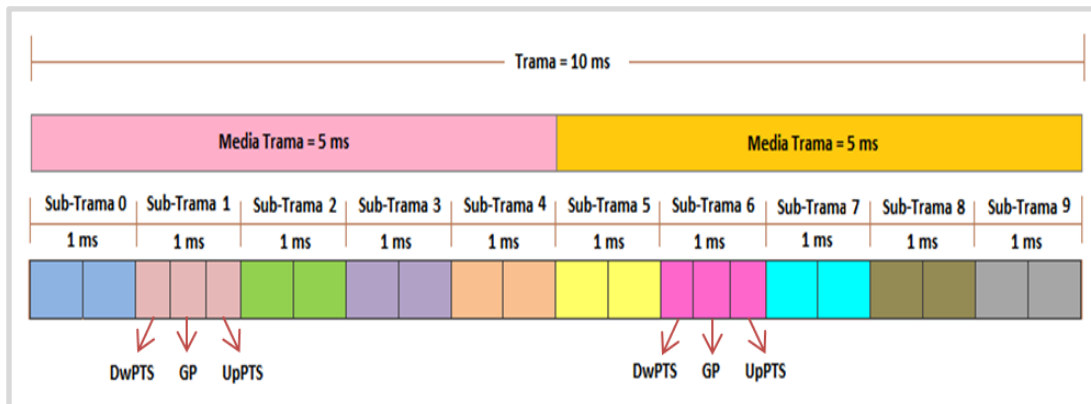


Figura 2.8. Estructura Trama Tipo 2 [11].



2.9. ESTRUCTURA DE LOS RECURSOS LTE-ADVANCED

En los numerales 2.8 se explica la estructura de la trama en el dominio del tiempo; ahora, en el dominio de la frecuencia los recursos se agrupan en conjuntos de 12 sub-portadoras separadas 15KHz, por lo tanto, ocupan un ancho de banda total de 180KHz; de esta manera el conjunto de 12 sub-portadoras cada una de ellas con 7 símbolos OFDM asociados en el tiempo, se denomina un Bloque de Recursos (RB, *Resource Block*). La unidad de recursos más pequeña se llama Elemento de Recurso (RE, *Resource Element*) la cual contiene una sub-portadora y un símbolo OFDM [15]. La Figura 2.9 muestra la representación de la estructura de la trama en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

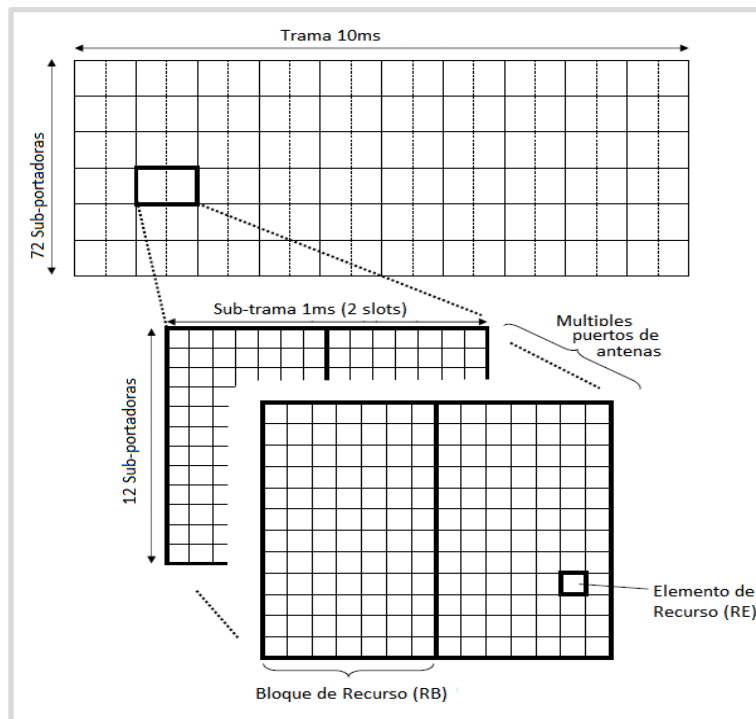


Figura 2.9. Estructura Básica de la trama en tiempo y frecuencia [15].

La cantidad de RBs se asigna según el ancho de banda; en el 3GPP se establece esta correspondencia como se muestra en la Tabla 2.2 [6].



Tabla 2.2. Bloques de Recursos según Ancho de Banda [6].

Ancho de Banda del canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Cantidad de Bloques de Recursos	6	15	25	50	75	100

2.10. TECNICAS DE ACCESO PARA LTE-ADVANCED

En LTE-Advanced se utilizan dos técnicas de acceso múltiple, para el enlace de bajada OFDMA y para el enlace de subida SC-FDMA, dichas técnicas permiten aprovechar los recursos radio disponibles para lograr altas velocidades de transmisión [4]. Con la técnica de acceso múltiple OFDMA los diferentes símbolos que se modulan sobre las sub portadoras pueden pertenecer a usuarios diferentes, de esta forma, se transmiten simultáneamente múltiples portadoras en paralelo que correspondan a distintos flujos de información [12]; el alto consumo de energía hace a la técnica OFDMA inadecuada para el enlace de subida por lo que se utiliza SC-FDMA, la Figura 2.10 muestra símbolos de datos QPSK a transmitir con cada una de estas técnicas.

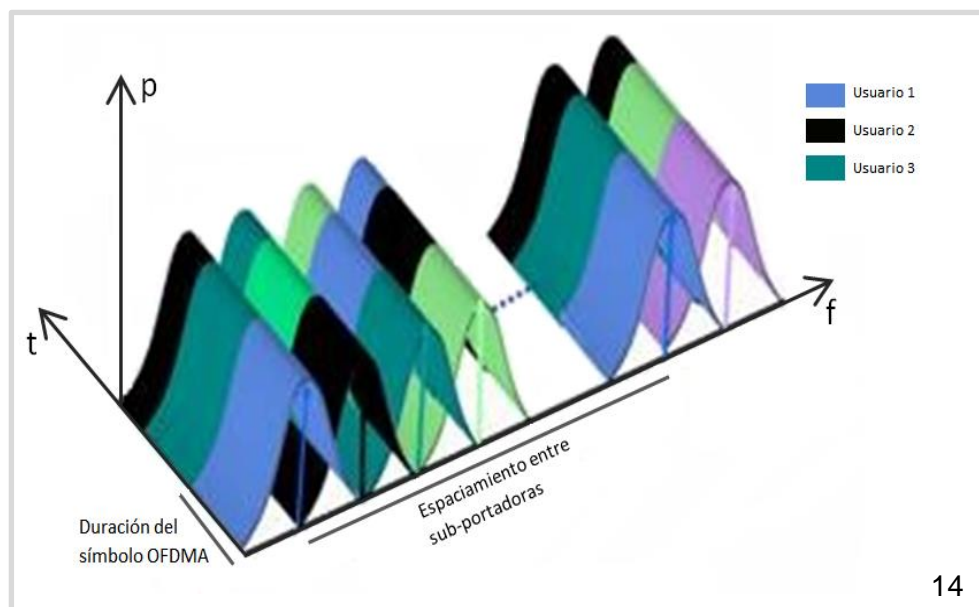


Figura 2.10. Técnica de acceso OFDMA [16].



2.11. CANALES FÍSICOS DEL ENLACE DE BAJADA

En la capa física se establece la correspondencia entre el canal de transporte, los canales lógicos y los canales físicos para el enlace de subida y el enlace de bajada, este último se muestra en la Figura 2.11 [17].

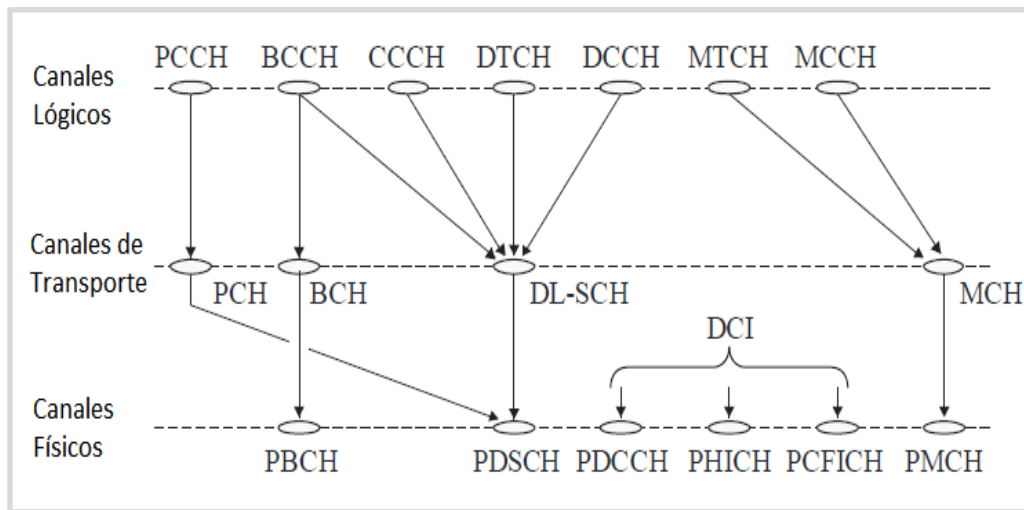


Figura 2.11. Correspondencia de Canales para el Enlace de Bajada [17].

LTE-Advanced separa los canales físicos del enlace de bajada en dos categorías: canales físicos de control y canales físicos de tráfico; el uso de los canales físicos de tráfico no es dedicado, es decir, se establece cuando un usuario debe recibir datos enviados a él; existe la posibilidad de que el enlace se establezca punto a punto o punto a multipunto. Para que la transmisión de los datos de usuario sea eficiente, son necesarios los canales físicos de control, los cuales transportan las señales de control que se generan en la capa física y los mensajes de control que se generan en las capas superiores del sistema [12].

2.11.1. Canales de Control

Para el enlace de bajada existen cuatro canales físicos de control los cuales son: el Canal Físico Broadcast (PBCH, *Physical Broadcast Channel*) encargado de transportar información básica sobre la red, el Canal Físico de Control del Enlace de Bajada (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*) el cual transporta la Información de Control del Enlace de Bajada (DCI, *Downlink Control Information*), el Canal Físico de Control Indicador de Formato (PCFICH, *Physical Control*



Format Indicator Channel) cuya función es informar al UE sobre el número de símbolos utilizados para transmitir el PDCCH, el Canal Físico Indicador de HARQ (PHICH, *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*) necesario para transportar los reconocimientos (ACK/NAK⁵).

2.11.2. Canales Físicos de Tráfico

Los canales físicos de tráfico del enlace de bajada se clasifican en: Canal Físico *Multicast* (PMCH, *Physical Multicast Channel*) se utiliza para transportar la información del Sistema *Multicast* y *Broadcast* Multimedia (MBMS, *Multimedia Broadcast and Multicast System*) y Canal Físico Compartido del Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*) se encarga del transporte de datos de usuario y control en el enlace de bajada en LTE-Advanced; el presente trabajo de grado profundiza en el siguiente numeral este canal debido a los objetivos planteados.

2.12. PDSCH

El PDSCH no es un canal dedicado, los datos en el PDSCH se transmiten en unidades llamadas Bloques de Transporte (TB, *Transport Blocks*), el orden de modulación para transmitir la información en este canal es seleccionado entre 2 bits por símbolo usando el esquema de modulación QPSK, 4 bits por símbolo empleando 16QAM y 6 bits por símbolo con 64QAM [18].

3GPP con el *Release 10* establece 9 modos de operación de PDSCH, los cuales se resumen en la Tabla 2.3 [19].

Tabla 2.3. Modos de Operación del PDSCH [9].

Modo de Transmisión	Descripción
1	Transmisión por única antena.
2	Diversidad en transmisión.
3	Multiplexación espacial en lazo abierto.

⁵ ACK/NACK: Protocolos de corrección de errores



4	Multiplexación espacial en lazo cerrado.
5	Múltiple Usuario MIMO.
6	Multiplexación espacial en lazo cerrado usando una capa transmisión.
7	R8. Soporta solo una capa de transmisión.
8	R9. Puede soportar hasta dos capas de transmisión.
9	R10 soporta hasta ocho capas de transmisión.

El canal PDSCH utiliza turbo códigos en general de tasa de codificación 1/3 [12].

2.13. TURBO CODIFICADOR

El turbo codificador está compuesto de dos Codificadores Convolucionales Sistemáticos Recursivos (RSC, *Recursive Systematic Convolutional*) en paralelo y un entrelazador, como se muestra en la Figura 2.12; un codificador RSC tiene una tasa de codificación de 1/2, a partir de este se obtienen los polinomios generadores 2.1 y 2.2 [20].

$$g_0(D) = 1 + D^2 + D^3, \quad (2.1)$$

$$g_1(D) = 1 + D + D^3. \quad (2.2)$$

Un turbo codificador utiliza un Código Convolutivo Concatenado en Paralelo (PCCC, *Parallel Concatenated Convolutional Code*) con dos codificadores de ocho estados [5]; los bits de información son codificados por ambos RSC, el primero los recibe en el orden original y el segundo los recibe intercambiados por efecto del entrelazador, de esta forma, por cada bit de entrada se obtienen tres bits de salida, uno sistemático y dos de paridad [21]; La ecuación 2.3 representa la función de transferencia para los componentes codificadores [5].

$$G(D) = \left[1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right], \quad (2.3)$$



donde 1 representa la salida sistemática del codificador RSC, $g_1(D)$ es el polinomio que realimenta la salida y $g_0(D)$ es el polinomio de realimentación a la entrada del codificador.

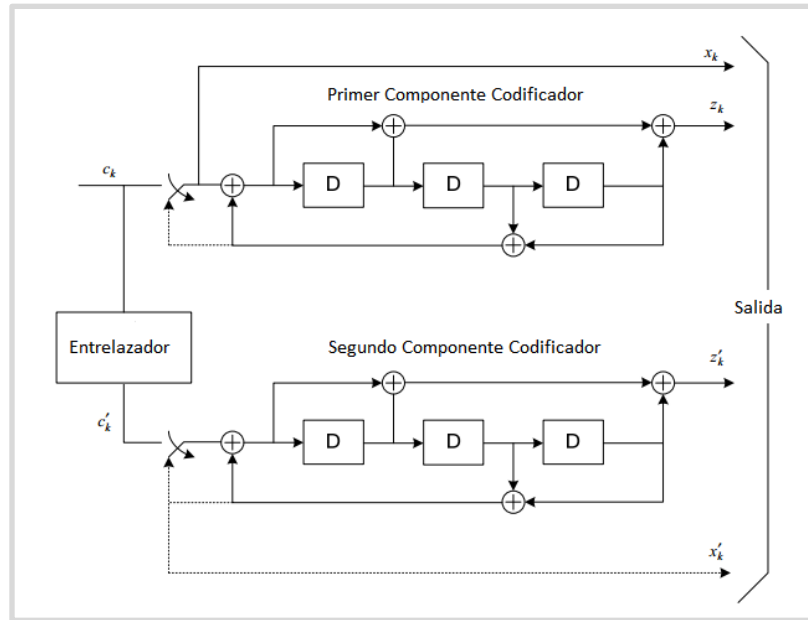


Figura 2.12. Codificador Turbo para LTE-Advanced [5].

Antes de iniciar la codificación de los bits de entrada el valor de los componentes codificadores es fijado en ceros y en la salida del turbo codificador se generan las ecuaciones 2.4 a 2.6:

$$d_k^{(0)} = x_k, \quad (2.4)$$

$$d_k^{(1)} = z_k, \quad (2.5)$$

$$d_k^{(2)} = z'_k, \quad (2.6)$$

para $k = 0, 1, 2, \dots, K - 1$, donde K es la longitud de la secuencia de entrada.

Los bits de entrada del turbo codificador son denotados por: $c_0, c_1, c_2, c_3, \dots, c_{K-1}$ y los bits de salida del primero y segundo componente codificador de ocho estados son denotados por: $z_0, z_1, z_2, z_3, \dots, z_{K-1}$ y $z'_0, z'_1, z'_2, z'_3, \dots, z'_{K-1}$ respectivamente. Los bits de salida del entrelazador interno son denotados por:



$c'_0, c'_1, c'_2, c'_3, \dots, c'_{K-1}$ y estos son los bits de entrada del segundo componente codificador de ocho estados [5].

2.13.1. Terminación Trellis

La terminación Trellis se realiza tomando los bits de cola de la retroalimentación del registro de desplazamiento después de que todos los bits de información son codificados. Los bits de cola se rellenan después de la codificación de los bits de información.

Los primeros tres bits de cola podrían ser usados para terminar el primer componente codificador mientras el segundo componente codificador está deshabilitado; los últimos tres bits de cola podrían ser usados para terminar el segundo componente codificador mientras el primer componente codificador está deshabilitado. Los bits transmitidos para la terminación Trellis están representados en las ecuaciones 2.7a, 2.7b y 2.7c [5]:

$$d_K^{(0)} = x_K, d_{K+1}^{(0)} = z_{K+1}, d_{K+2}^{(0)} = x'_K, d_{K+3}^{(0)} = z'_K, \quad (2.7a)$$

$$d_K^{(1)} = z_K, d_{K+1}^{(1)} = x_{K+2}, d_{K+2}^{(1)} = z'_K, d_{K+3}^{(1)} = x'_{K+2}, \quad (2.7b)$$

$$d_K^{(2)} = x_{K+1}, d_{K+1}^{(2)} = z_{K+2}, d_{K+2}^{(2)} = x'_{K+1}, d_{K+3}^{(2)} = z'_{K+2}. \quad (2.7c)$$

2.13.2. Entrelazador interno

Los bits de entrada del entrelazador interno de código turbo se denotan por c_0, c_1, \dots, c_{K-1} , donde K es el número bits de entrada, los bits de salida del entrelazador interno de código turbo se representan por $c'_0, c'_1, \dots, c'_{K-1}$. La relación entre los bits de entrada y los de salida se muestra en la ecuación 2.8.

$$c'_i = c_{\Pi(i)}, \quad (2.8)$$

donde $i = 0, 1, \dots, (K - 1)$

La relación entre el índice de salida i y el índice de entrada $\Pi(i)$ satisface la ecuación cuadrática 2.9.

$$\Pi(i) = (f_1 \cdot i + f_2 \cdot i^2) \bmod K. \quad (2.9)$$

Los parámetros f_1 y f_2 dependen del tamaño del bloque K .



2.14. CARACTERISTICAS DE PROPAGACION EN UN CANAL MULTITRAYECTO

El canal móvil radio puede ser caracterizado por la respuesta al impulso variante en el tiempo $h(\tau, t)$, la cual representa la respuesta del canal en un tiempo t debido a un impulso aplicado en un tiempo $t - \tau$, denotada por la ecuación 2.10.

$$h(\tau, t) = \sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j(2\pi f_{D,p}t + \varphi_p)} \delta(\tau - \tau_p), \quad (2.10)$$

donde:

$$\delta(\tau - \tau_p) = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau = \tau_p \\ 0 & \text{otros valores} \end{cases}$$

a_p , $f_{D,p}$, φ_p y τ_p son la amplitud, frecuencia *Doppler*, fase y retardo de propagación respectivamente, asociados con cada trayecto p , donde $p = 0, \dots, N_p - 1$, la frecuencia *Doppler* depende de la velocidad v del equipo terminal, la velocidad de la luz c , la frecuencia portadora f_c , y el ángulo de incidencia α_p como denota la ecuación 2.11.

$$f_{D,p} = \frac{v f_c \cos(\alpha_p)}{c}. \quad (2.11)$$

Cuando se tiene en cuenta un canal móvil con multitrayectoria la propagación de las señales se ve afectada por:

- La dispersión de retardo, esta se refiere al tiempo que pasa entre la llegada del trayecto directo y la última componente significativa de la señal multitrayecto; el 3GPP define para entornos con baja, media y alta dispersión de retardo el número de trayectos, su atenuación y retardo como se muestra en la Tabla 2.4, estos entornos se representan respectivamente por los modelos de canal Peatonal Extendido tipo A (EPA, *Extended Pedestrian A*), Vehicular Extendido tipo A (EVA, *Extended Vehicular A*) y Urbano Típico Extendido (ETU, *Extended Typical Urban*), cuyo valor de dispersión de retardo RMS se muestra en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.4.** Modelos de Canal Multitrayecto [22].

Número de Trayectos	EPA		EVA		ETU	
	Retardo [ns]	Potencia Relativa [dB]	Retardo [ns]	Potencia Relativa [dB]	Retardo [ns]	Potencia Relativa [dB]
1	0	0	0	0	0	-1
2	30	-1	30	-1.5	50	-1
3	70	-2	150	-1.4	120	-1
4	90	-3	310	-3.6	200	0
5	110	-8	370	-0.6	230	0
6	190	-17.2	710	-9.1	500	0
7	410	-20.8	1090	-7	1600	-3
8			1730	-12	2300	-5
9			2510	-16.9	5000	-7

Tabla 2.5. Perfil de Retardo de los Canales LTE-Advanced [22].

Modelo	Número de Trayectos	Dispersión de Retardo RMS	Máximo Retardo
EPA	7	45ns	410ns
EVA	9	357ns	2.51 μ s
ETU	9	991ns	5 μ s

- La dispersión de frecuencia (corrimiento *Doppler*) causada por las componentes en frecuencia que llegan como ecos de la señal principal y son perceptibles en recepción, el 3GPP especifica tres frecuencias *Doppler* típicas para los modelos



de canal LTE-Advanced las cuales indican la separación de estos ecos de la señal, en la Tabla 2.6 se describen dichas frecuencias y su relación con la velocidad del móvil [23].

Tabla 2.6. Frecuencias *Doppler* Definidas para Modelos de Canal LTE-A [22].

	Baja Frecuencia <i>Doppler</i>	Media Frecuencia <i>Doppler</i>		Alta Frecuencia <i>Doppler</i>
Frecuencia	5Hz	30Hz	70Hz	300Hz
Frecuencia Portadora	2GHz	2GHz	2GHz	2GHz
Velocidad	2.7Km/h	16.2Km/h	40.8Km/h	162Km/h

- La correlación entre antenas de un sistema MIMO se define mediante un conjunto de matrices de correlación espacial, que se aplican a los modelos de canal que se describieron en la Tabla 2.5, estos modelos se definen para alta, media y baja correlación entre antenas mediante los parámetros α y β como se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Tipos de Correlación [23].

Baja Correlación		Media Correlación		Alta Correlación	
α	β	α	β	α	β
0	0	0.3	0.3	0.9	0.9

La matriz de correlación espacial se denota mediante la ecuación 2.12 la cual expresa el producto *Kronecker* entre R_{eNB} y R_{UE} que representan la matriz de correlación del eNB y la matriz de correlación del UE respectivamente, dichas matrices de correlación se describen en la Tabla 2.8.

$$R_S = R_{eNB} \otimes R_{UE}. \quad (2.12)$$

Tabla 2.8. Matrices de Correlación [14].



2X2	R_{eNB}	$\begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ \alpha^* & 1 \end{bmatrix}$
	R_{UE}	$\begin{bmatrix} 1 & \beta \\ \beta^* & 1 \end{bmatrix}$
4X4	R_{eNB}	$\begin{bmatrix} 1 & \alpha^{1/9} & \alpha^{4/9} & \alpha \\ \alpha^{1/9*} & 1 & \alpha^{1/9} & \alpha^{4/9} \\ \alpha^{4/9*} & \alpha^{1/9*} & 1 & \alpha^{1/9} \\ \alpha^* & \alpha^{4/9*} & \alpha^{1/9*} & 1 \end{bmatrix}$
	R_{UE}	$\begin{bmatrix} 1 & \beta^{1/9} & \beta^{4/9} & \beta \\ \beta^{1/9*} & 1 & \beta^{1/9} & \beta^{4/9} \\ \beta^{4/9*} & \beta^{1/9*} & 1 & \beta^{1/9} \\ \beta^* & \beta^{4/9*} & \beta^{1/9*} & 1 \end{bmatrix}$

2.15. PARAMETROS DE EVALUACION

El análisis de desempeño del enlace de bajada de LTE-Advanced, se logra a través de la medida de BER, BLER y *throughput* en función de la SNR, estos parámetros de medida se describen a continuación.

- **BLER**

La tasa de error de bloque se refiere a la relación entre la cantidad de bloques recibidos con error y el total de bloques transmitidos, un bloque con errores se especifica como un bloque de transporte en el cual se han detectado errores, la BLER se calcula mediante la ecuación 2.13.

$$BLER = \frac{\sum_{i=1}^k (1-C_i)}{\sum_{i=1}^k 1}, \quad (2.13)$$

donde k representa la cantidad de sub-tramas transmitidas y C el valor de la Verificación de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*), la cual es,



1 cuando el bloque transmitido no contiene errores y 0 cuando se presentan errores.

- **BER**

La tasa de error de bit es la medida de calidad de la información, se mide como el número de bits recibidos con error sobre el número total de bits transmitidos en un determinado periodo de tiempo, como se expresa en la ecuación 2.14.

$$BER = \frac{\text{Numero de bis errados}}{\text{Numero de bits transmitidos}} \quad (2.14)$$

- **Throughput**

El *throughput* se define como la cantidad máxima de información permitida a través de un canal por unidad de tiempo sin errores como muestra la ecuación 2.15.

$$\text{Throughput} = \sum_{i=1}^k TBS \times C_i, \quad (2.15)$$

donde k representa la cantidad de sub-tramas transmitidas, C el valor de CRC y el Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) dado en bits por segundo, se calcula mediante la ecuación 2.16; para el *throughput* teórico se usa la ecuación 2.17. 1000 es el recíproco de 1ms y

$$TBS = \frac{12 \times 14 \times RBs \times \log_2 M \times CR' \times nA}{1ms}, \quad (2.16)$$

$$\text{Throughput}_t = \frac{12 \times 14}{1ms} \times \log_2 M \times CR \times RBs \times nA, \quad (2.17)$$

donde:

- 12, es el número de sub-portadoras en un RB.
- 14, el número de símbolos útiles en 1ms.
- RBs, indica el número de bloques de recursos asignados al ancho de banda.
- M, el orden de modulación.
- CR', la tasa de codificación efectiva del simulador.



- CR, la tasa de codificación.
- n_A , el orden de MIMO, el cual es:

- 1, para SISO
- 2, para MIMO 2X2
- 4, para MIMO 4X4.

Es importante aclarar que las medidas de BLER y BER se hacen en bloques independientes, sin embargo, hay una relación matemática presentada en la herramienta, ecuación 2.18, la cual se cumple, solo si los bits errados son eventos independientes e idénticamente distribuidos.

$$BLER = 1 - (1 - BER)^k, \quad (2.18)$$

donde k es la cantidad de bits por sub-trama o bloque de transporte.



CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1. INTRODUCCION

En este capítulo se presenta la metodología de simulación empleada para el desarrollo del trabajo de grado, resultado de la adaptación de las metodologías descritas en [24], [25] y [26], las fases definidas se muestran en la Figura 3.1 y se describen a continuación.

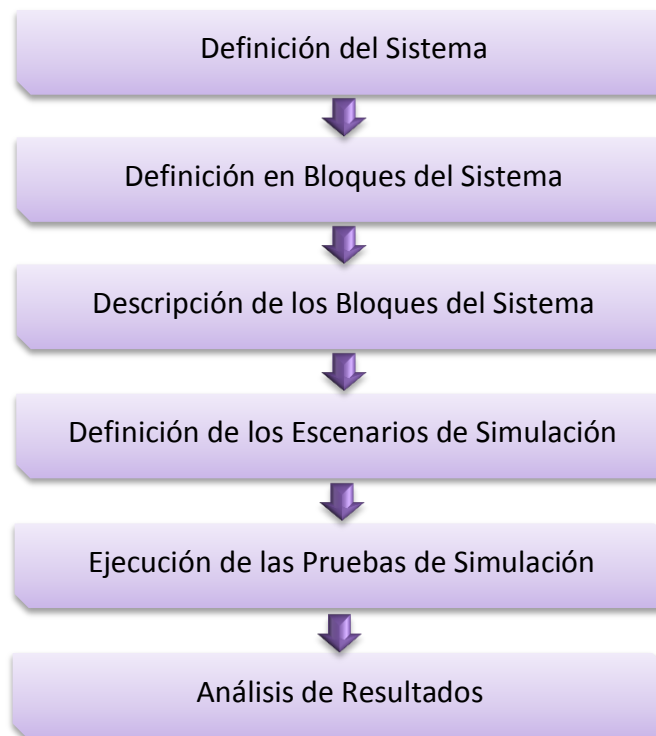


Figura 3.1. Fases de la Metodología.

- Definición del sistema: se muestra el modelado general en bloques del sistema.
- Definición en bloques del sistema: define a nivel físico el sistema en bloques desde el transmisor hasta el receptor.



- Descripción de los bloques del sistema: modela el comportamiento de la señal al pasar por cada bloque.
- Definición de escenarios de simulación y sus características: se definen los escenarios a analizar con sus parámetros característicos.
- Ejecución de las pruebas de simulación: se ejecutan las pruebas de simulación con los escenarios y los parámetros definidos.
- Análisis de resultados: se presenta el análisis de los resultados obtenidos teniendo en cuenta los parámetros de desempeño a evaluar.

3.2. DEFINICION DEL SISTEMA

El sistema simulado contiene los componentes básicos para el enlace de bajada de LTE-*Advanced* como muestra la Figura 3.2, además este sistema se configuró con MIMO 2X2 y 4X4, codificación turbo, diferentes esquemas de modulación y modelos teóricos de canal definidos en el R10.

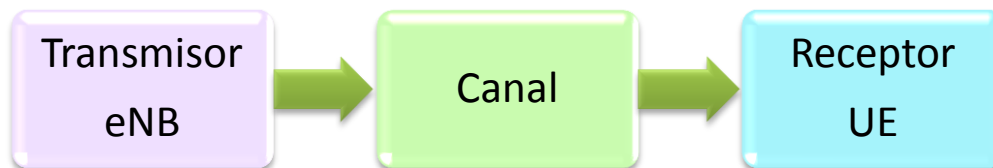


Figura 3.2. Modelo general del Sistema de Simulación.

3.3. DEFINICION EN BLOQUES DEL SISTEMA

Para la descripción detallada del sistema se utilizan bloques que representan los sistemas que intervienen sobre la señal transmitida desde la fuente hasta el receptor, esto se muestra en la Figura 3.3.

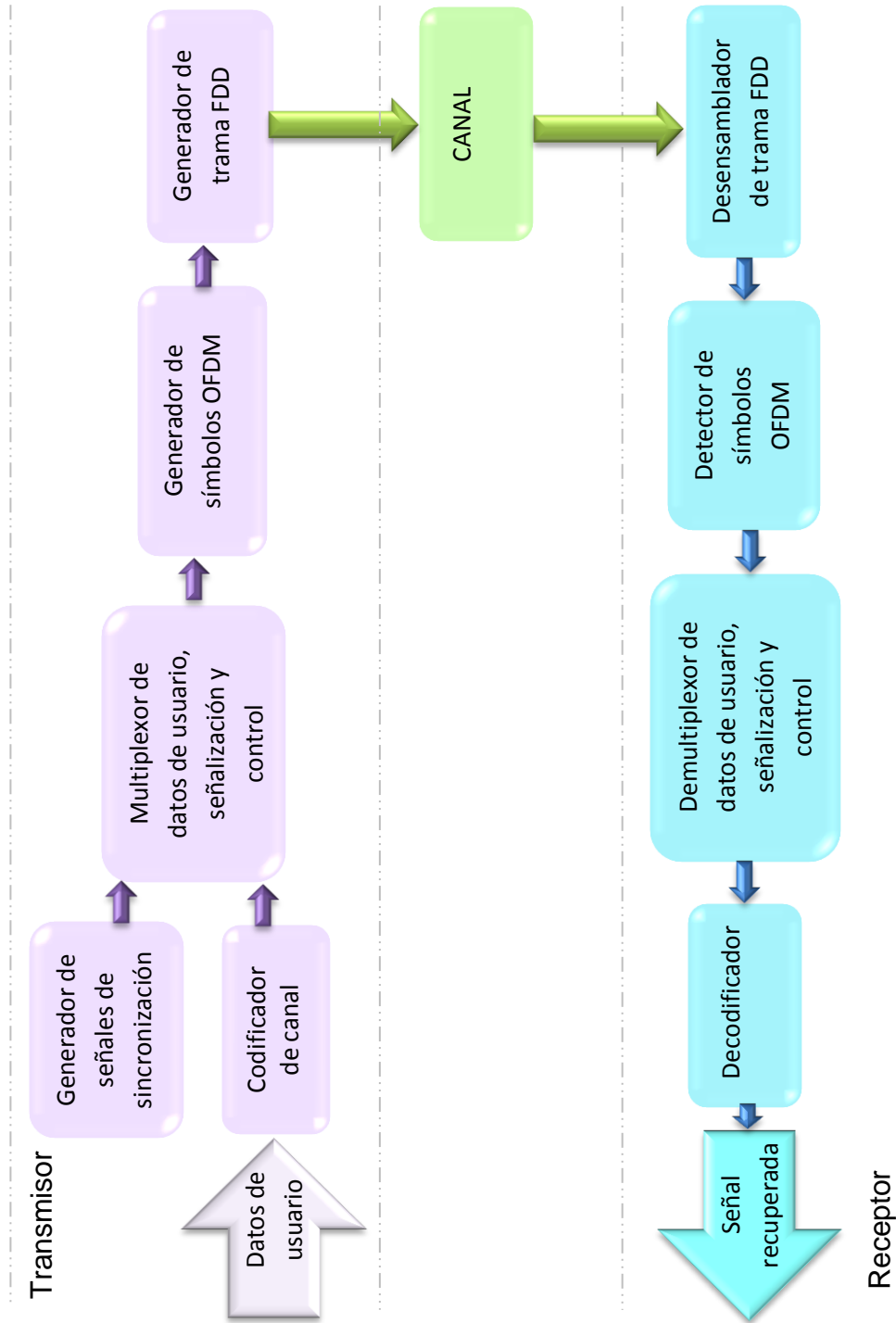


Figura 3.3. Bloques del Sistema Simulado.



3.4. DESCRIPCION DE LOS BLOQUES DEL SISTEMA

3.4.1. Bloques internos del Transmisor eNB

Como se observó en la Figura 3.3 al transmisor lo componen los bloques codificador, generador de señales de sincronización, Multiplexor de datos de usuario, señalización y control, generador de símbolos OFDM y generador de tramas FDD, a continuación se describe cada uno.

- **Codificador**

La Figura 3.4 muestra los sub-bloques del bloque de codificación [5].

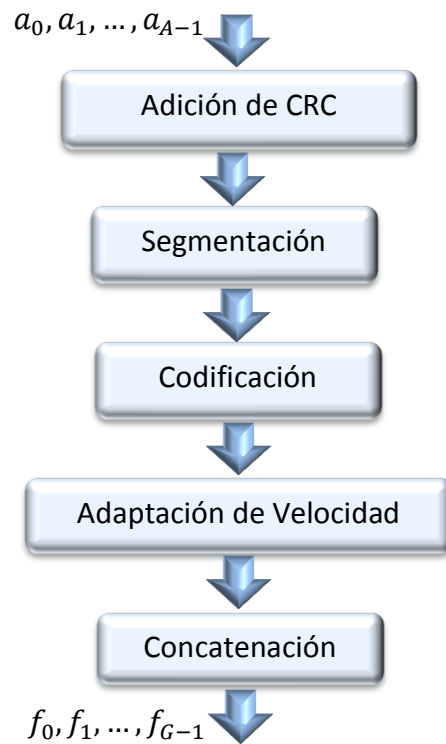


Figura 3.4. Módulos Internos del Codificador.

El bloque codificador recibe una secuencia de bits pseudoaleatorios denotada por a_0, a_1, \dots, a_{A-1} donde A es el tamaño del bloque de transporte, a la cual se le adicionan 24 bits de paridad con el fin de proporcionar la Verificación de Redundancia Cíclica (CRC), la secuencia de bits resultante se entrega al segmentador de bloque el cual la fragmenta en bloques y estos pasan al turbo codificador en donde se codifican a una tasa de 1/3 y se entregan al adaptador de velocidad para que ajuste el tamaño del bloque de código a los recursos físicos



asignados, luego éstos se transfieren al bloque de concatenación el cual organiza de manera secuencial los bloques de código y los denota a la salida como f_0, f_1, \dots, f_{G-1} donde G es el número total de bits codificados a transmitir.

- **Generador de Señales de Sincronización**

El generador de señales de sincronización está compuesto por dos sub-bloques como se muestra en la Figura 3.5 los cuales generan dos tipos de señales, la Señal de Sincronización Primaria (PSS, *Primary Synchronization Signal*) y la Señal de Sincronización Secundaria (SSS, *Secondary Synchronization Signal*) las cuales realizan la sincronización temporal a nivel de sub-trama y trama respectivamente; estas señales junto con la que sale del codificador son entregadas al bloque de Multiplexación.

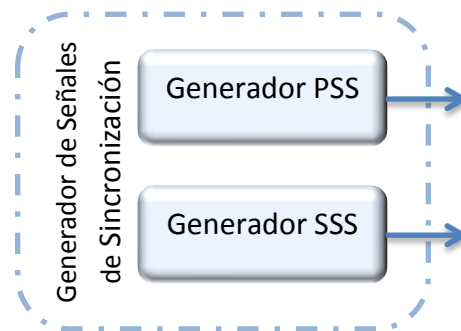


Figura 3.5. Generador de Señales de Sincronización.

- **Multiplexor de Datos de Usuario Señalización y Control**

El bloque multiplexor recibe los datos de usuario, señalización y control como se muestra en la Figura 3.6, los combina para luego entregar la señal de salida al bloque generador de símbolos OFDM.

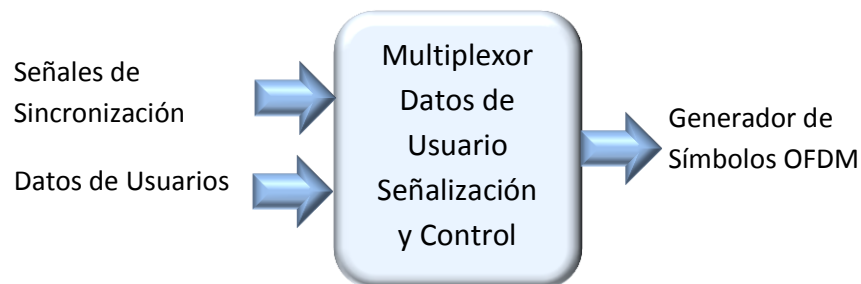


Figura 3.6. Multiplexor de Datos de Usuario Señalización y Control.



El bloque generador de símbolos OFDM está conformado por cuatro sub-bloques internos que permiten recibir la señal que proviene del Multiplexor y convertirla de serie a paralelo, esta señal luego pasa al sub-bloque modulador donde se aplica el esquema de modulación QPSK, 16QAM o 64QAM, seguido de esto, la secuencia de símbolos en el dominio de la frecuencia entra a el bloque que aplica la Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) que proporcionará las muestras temporales de la señal, por último se realiza la adición del prefijo cíclico normal o extendido y se entrega la señal al bloque generador de tramas FDD; estos sub-bloques están representados en la Figura 3.7.

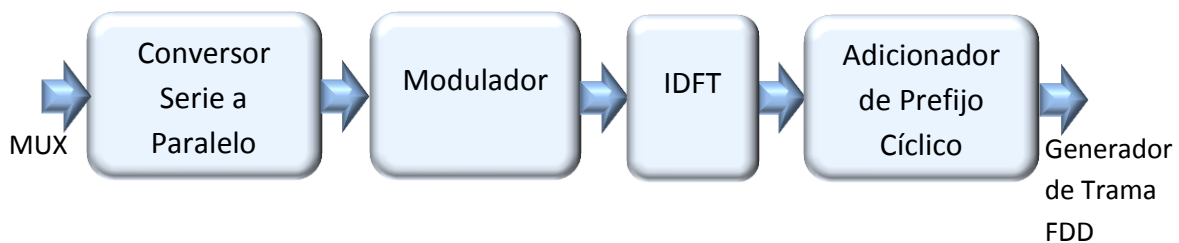


Figura 3.7. Generador de Símbolos OFDM.

- **Generador de Trama FDD**

El generador de tramas FDD se ilustra en la Figura 3.8 mediante un sub-bloque Multiplexor de intervalos de tiempo el cual recibe los símbolos OFDM y toma 20 intervalos de tiempo con duración de 0.5ms para formar una trama FDD; cuando se utiliza el prefijo cíclico normal cada intervalo de tiempo contiene siete símbolos OFDM.

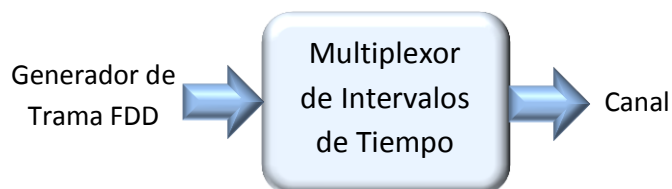


Figura 3.8. Generador de Trama FDD.

3.4.2. Bloques Internos del Canal

El canal multitrayectoria está compuesto por dos sub-bloques, que representan el multitrayecto y el Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White*



Gaussian Noise) el cual se adiciona a las señales antes de llegar al receptor como se muestra en la Figura 3.9, 3GPP modela los canales multitrayecto considerando los modelos EVA, EPA y ETU.

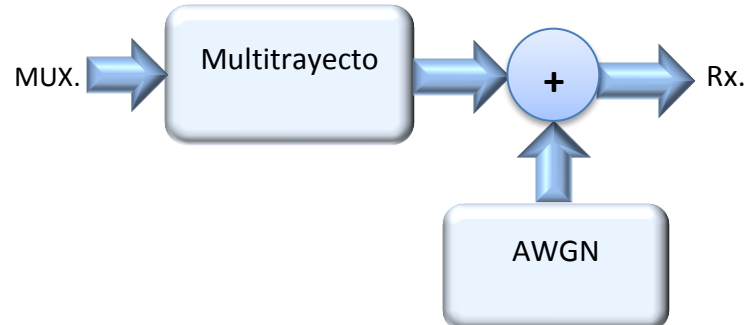


Figura 3.9. Canal de Transmisión.

3.4.3. Bloques Internos del Receptor

Como se ilustró en la Figura 3.3 el receptor contiene los sub-bloques desensamblador de trama, detector de señal, detector de símbolo OFDM, demultiplexor de datos de usuario, decodificador y el sub-bloque de señalización y control, los cuales se describen a continuación.

- **Desensamblador de Trama FDD**

El bloque desensamblador de trama FDD se compone de tres sub-bloques, el sincronizador que se encarga de la sincronización en tiempo y frecuencia, luego el demultiplexor de tramas FDD en donde se obtienen los intervalos de tiempo que son entregados al demultiplexor de Intervalos de tiempo para que se obtengan símbolos OFDM en la salida; como se muestra en la Figura 3.10.

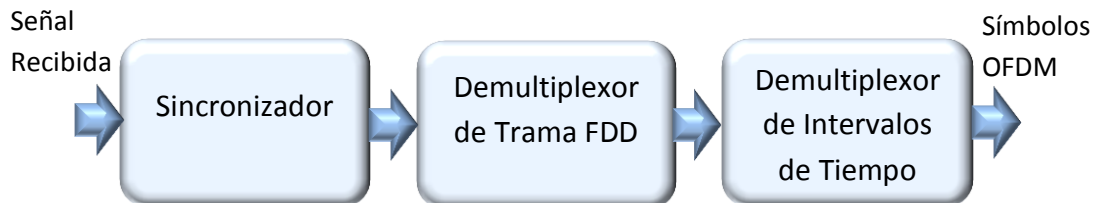


Figura 3.10. Desensamblador de Trama FDD.



- **Detector de Símbolos OFDM**

El bloque Detector de símbolos OFDM recibe la señal del desensamblador de tramas FDD, el primer sub-bloque se encarga de remover el prefijo cíclico de los símbolos OFDM, luego se entregan los símbolos en el dominio del tiempo al siguiente sub-bloque donde se aplica la Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) para obtener a la salida las muestras frecuenciales de la señal modulada que coinciden con los diferentes símbolos enviados, para que el posterior sub-bloque realice la respectiva demodulación, en el siguiente sub-bloque la señal es convertida de paralelo a serie y es entregada al demultiplexor de datos de usuario, señalización y control; en la Figura 3.11 se muestran los cuatro sub-bloques que hacen parte del detector de símbolos OFDM.

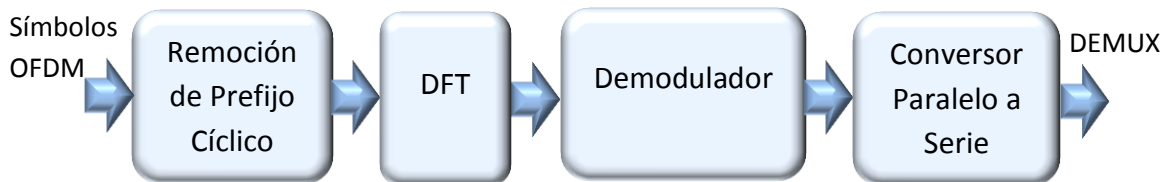


Figura 3.11. Detector de Símbolos OFDM.

- **Demultiplexor de Datos de Usuario Señalización y Control**

El bloque demultiplexor de datos de usuario se encarga de recibir el flujo de bits que salen del convertor de paralelo a serie y separar los datos de usuario de la información de señalización y control, en la Figura 3.12 se muestra este bloque.



Figura 3.12. Demultiplexor de Datos de Usuario Señalización y Control.



- **Decodificador**

El Bloque decodificador recibe los flujos de bits codificados y los reordena para entregarlos al desadaptador de velocidad donde se sincronizan y se pasan al turbo decodificador, el cual se encarga de detectar y corregir errores para entregar al desegmentador de bloque, allí se reconstruyen los bloques de transporte usando la concatenación de secuencias de bits, luego se transfieren al verificador CRC, el cual se encarga de verificar la integridad de la información y entregar la secuencia de bits sin errores, el bloque decodificador se muestra en la Figura 3.13.

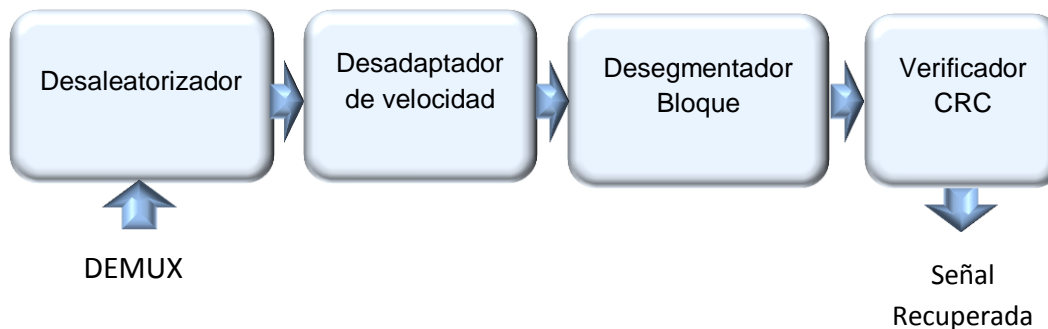


Figura 3.13. Decodificador.

3.5. DEFINICION DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACION

La configuración general del sistema LTE-Advanced se realizó con los parámetros que muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Configuración General del sistema.

Parámetro	Configuración
Modo de Duplexación	FDD
Esquema MIMO	Multiplexación espacial
Correlación de antenas	Alta
Prefijo cíclico	Normal
Modo de transmisión	TM9
Palabra código	1
HARQ	No
Cantidad de usuarios	1
Número de tramas	1000
Frecuencia portadora	2GHz
Técnica de acceso	OFDMA



Para realizar el análisis de desempeño a nivel físico de LTE-Advanced, se trabajaron cinco escenarios que se describen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Configuración de Casos de Simulación.

Escenario	MIMO	Modulación	Tasa de Codificación	Modelo de Canal	Ancho de Banda
1	2X2 4X4	QPSK	1/3, 1/2, 2/3, 5/6	ETU70	5MHz (25RB)
2	2X2 4X4	16QAM	1/3	AWGN, EPA5, EVA5, EVA70, ETU30, ETU70, ETU300	15MHz (75RB)
3	2X2 4X4	QPSK, 16QAM, 64QAM	1/3	EVA5	10MHz (50RB)
4	2X2	64QAM	1/3	EVA70 ETU70	5MHz (25RB), 10MHz (50RB), 15MHz (75RB), 20MHz (100RB)
5	SISO 2X2 4X4	16QAM	1/3	AWGN	15MHz (75RB)
	2X2 4X4	16QAM	1/3	EVA70	15MHz (75RB)

3.6. EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

Para el desarrollo de este trabajo de grado se hizo uso de la herramienta software *systemVue®* de *Agilent Technologies®*, la cual permitió el diseño de los escenarios para el enlace de bajada en un entorno de trabajo como el que se muestra en la Figura 3.14, la configuración de los elementos del sistema de comunicación se realizó por medio de las interfaces de la herramienta que cuenta además con bloques que permitieron medir los parámetros BLER, BER y *throughput*, con los cuales se estimó el desempeño del enlace de bajada de un sistema LTE-



Advanced basado en el Release 10; el apéndice A brinda una guía práctica para la configuración del enlace de bajada utilizando la herramienta.

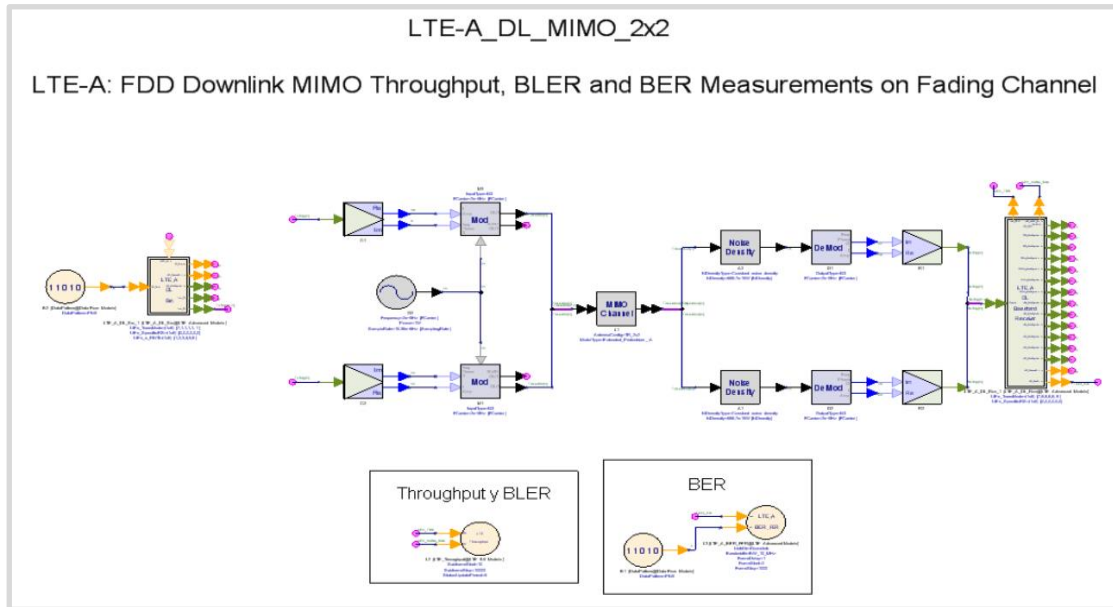


Figura 3.14. Entorno de Trabajo en SystemVue.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCION

En este capítulo se presenta el análisis de desempeño a nivel físico del sistema LTE-Advanced, basado en los resultados obtenidos desde el software de simulación *SystemVue*® de *Agilent Technologies*®, empleando diferentes escenarios relacionados con la tasa de codificación, esquema de modulación y modelos de canal teóricos para el enlace de bajada.

4.2. ESCENARIO 1

El objetivo de este escenario es analizar el desempeño del enlace de bajada de LTE-Advanced, frente a variaciones en la tasa de codificación con MIMO 2X2 y 4X4 empleando un modelo de canal ETU70, con los parámetros de configuración que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros de Configuración del Escenario 1.

Parámetro	Configuración
Modulación	QPSK
Ancho de banda	5MHz (25RB)
Tasa de codificación	1/3, 1/2, 2/3, 5/6
Modelo de canal	ETU70

CASO 1

El escenario 1 se configura con un sistema MIMO 2X2 y se analizan los resultados de desempeño en términos de BLER, BER Y *throughput*.



La Figura 4.1 muestra las curvas de BLER para diferentes tasas de codificación y valores de SNR.

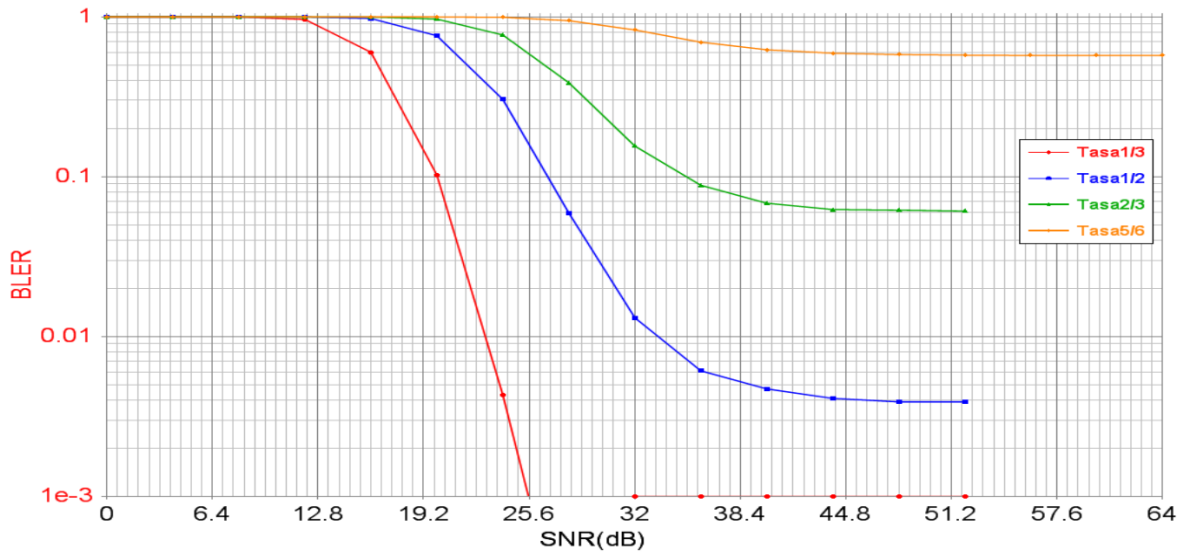


Figura 4.1. BLER Vs SNR para Escenario 1 Caso 1.

3GPP establece la BLER objetivo⁶ igual a 0.1 en el *Release 10* [19] [27], en la Tabla 4.2 se muestran los valores de BER, *throughput* y SNR, en los cuales el sistema alcanza la BLER objetivo.

Tabla 4.2. SNR, BER y *Throughput* para BLER objetivo de Escenario 1 Caso 1.

Tasa de Codificación Teórica	1/3	1/2	2/3	5/6
BLER Objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	20.01	26.7	35.09	X
BER	0.011	0.029	0.004	X
<i>Throughput</i> [Mbps]	3.69	5.63	7.39	X

⁶Se refiere al límite para el cual el indicador de calidad del canal no cambia el formato de transporte.



En la Figura 4.1 se puede observar que:

- Para las tasas de codificación de 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6 en el intervalo de SNR entre 0dB y los valores de 12dB, 16dB, 20dB y 24dB en su orden, la totalidad de los paquetes recibidos contienen errores, en adelante la BLER empieza a disminuir hasta encontrar los valores mínimos de 0, 3.904×10^{-3} , 0.061 y 0.573 respectivamente, la tasa de codificación de 1/3 presenta el mejor desempeño en términos de BLER en comparación con las tasas 1/2, 2/3 y 5/6, ya que alcanza con la menor SNR (20.01dB) la BLER objetivo y posteriormente, para las SNR mayores a 32dB el 100% de los paquetes se reciben sin errores, ya que los bits de redundancia de la tasa de codificación 1/3 en el sistema facilitan la detección y corrección de errores en el receptor.
- La tasa de codificación de 5/6 presenta la BLER más alta ya que esta tiene la más baja redundancia y limita la detección y corrección de errores en el receptor.

En la Figura 4.2 se ilustra el desempeño del sistema en términos de BER para diferentes tasas de codificación.

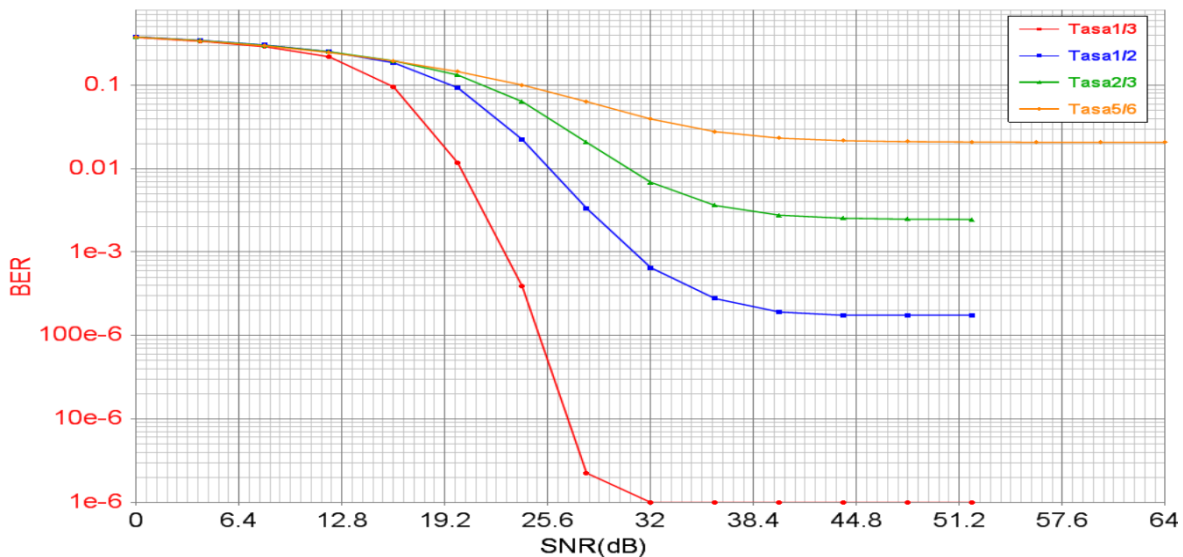


Figura 4.2. BER Vs SNR para Escenario 1 Caso 1.

La Tabla 4.3 describe los valores teóricos de *throughput* calculados mediante la ecuación 2.17 y los valores máximos alcanzados en las simulaciones con las



diferentes tasas de codificación, además la tasa de codificación efectiva del simulador.

Tabla 4.3. Máximo *Throughput* obtenido para Escenario 1 Caso 1.

Tasa de codificación teórica	1/3	1/2	2/3	5/6
Tasa de codificación efectiva del simulador	0.3223	0.4977	0.6257	0.8177
<i>Throughput</i> máximo teórico [Mbps]	5.6	8.4	11.2	14
<i>Throughput</i> máximo obtenido [Mbps]	4.136	6.541	7.47	4.813
SNR para máximo <i>Throughput</i> [dB]	24	34	44	56

En la Figura 4.2 se observa que el sistema con la tasa de codificación de 1/3 obtiene la mínima BER con la menor SNR, en el caso de la tasa de codificación 5/6 la BER se mantiene por encima de 0.01, por lo que se concluye que el mejor desempeño en términos de BER se logra con una tasa de codificación de 1/3 y el peor se obtiene cuando el sistema se configura con una tasa de codificación de 5/6, debido a que la primera usa más bits de redundancia, en comparación con la segunda.

La Figura 4.3 muestra las curvas de *throughput* contra SNR para las tasas de codificación establecidas en el escenario 1 caso 1.

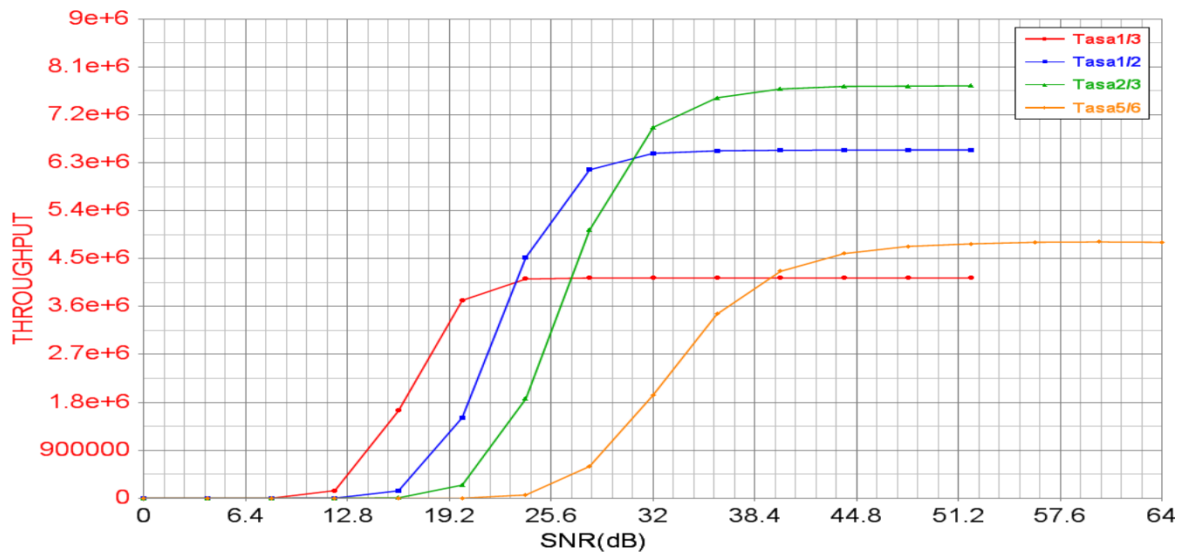


Figura 4.3. *Throughput* Vs SNR para Escenario 1 Caso 1.

Las curvas de la Figura 4.3 ilustran que el mejor desempeño en cuanto a *throughput* en el intervalo de 8dB hasta 23.4dB, se obtiene con la tasa de codificación de 1/3, luego se observa que entre 23.4dB a 30.8dB la tasa de codificación de 1/2 es mejor, y por último para valores mayores a 30.8dB la curva con el mayor *throughput* es la de 2/3 con un valor máximo de 7.47Mbps, en cuanto a la tasa de codificación de 5/6 esta muestra el peor desempeño con respecto a las demás ya que alcanza un *throughput* máximo de 4.813Mbps siendo el teórico de 14Mbps, debido a que es la tasa con menor redundancia y en consecuencia, tiene limitada protección para la detección y corrección de errores.

CASO 2

El escenario 1 se configura con un sistema MIMO 4X4 y se analizan los resultados de desempeño en términos de BLER, BER Y *throughput*.

La Figura 4.4 muestra las curvas de BLER Vs SNR para el escenario 1 caso 2.

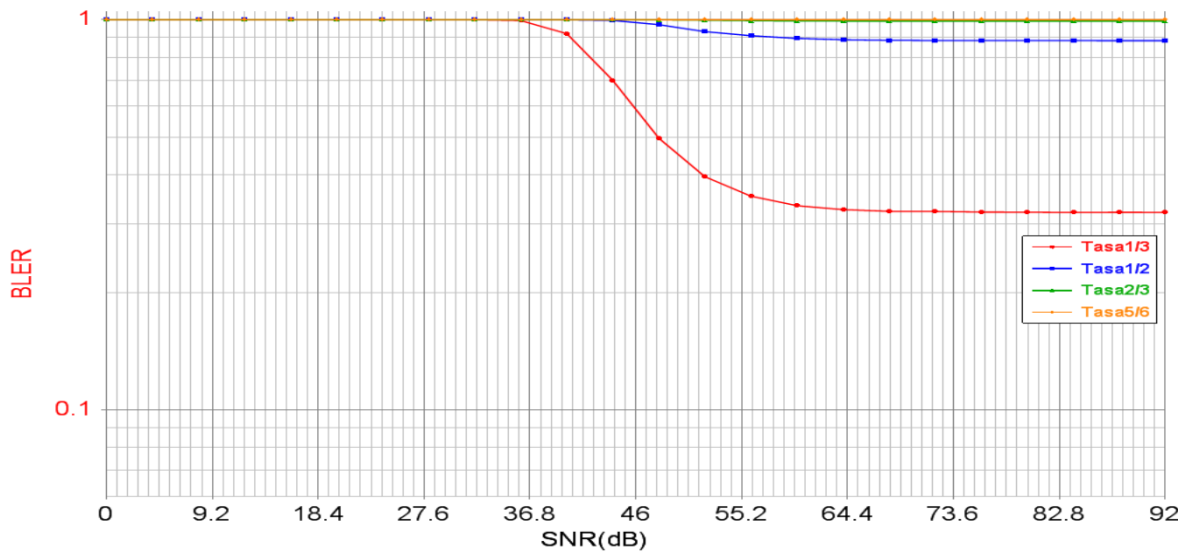


Figura 4.4. BLER Vs SNR para Escenario 1 Caso 2.

En la Figura 4.4 se puede observar que:

- El 100% de los paquetes recibidos contienen errores para las tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6 en el rango de SNR entre 0dB y 32dB, la BLER de las tasas de codificación 2/3 y 5/6 permanece constante en 1 para los SNRs evaluados, la tasa de codificación 1/3 consigue el valor de BLER más bajo en comparación con los resultados de las otras, sin embargo este valor no alcanza la BLER objetivo por lo que sería necesaria una tasa de codificación con mayor redundancia si se desea mejorar el desempeño del sistema en términos de BLER y BER.
- Ninguna de las curvas alcanza el valor de BLER objetivo, en la Tabla 4.4 se tabula la SNR, BER y *throughput* para el mínimo valor de BLER conseguido.

Tabla 4.4. SNR, BER y *Throughput* para Mínimo BLER de Escenario 1 Caso 2.

Tasa de Codificación Teórica	1/3	1/2	2/3	5/6
Mínimo BLER	0.321	0.885	0.992	1
SNR [dB]	60	70	72	64
BER	0.031	0.102	0.139	0.147
<i>Throughput</i> [Mbps]	5.492	1.35	0.122	0.002



El desempeño del escenario 1 caso 2 en términos de BER se muestra en la Figura 4.5.

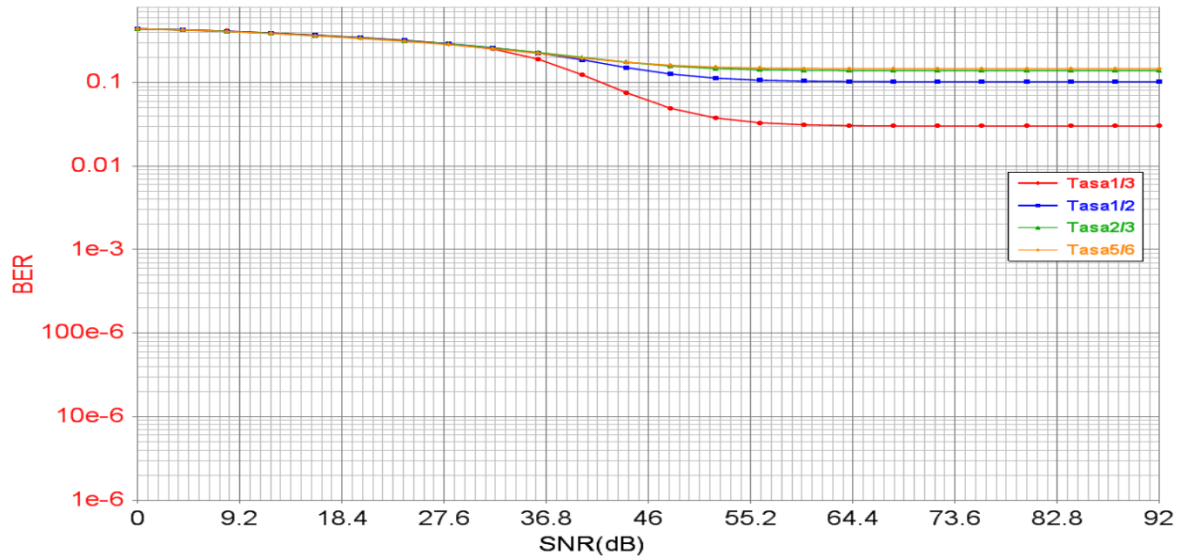


Figura 4.5. BER Vs SNR para Escenario 1 Caso 2.

En la Figura 4.5 se observa que en el rango de SNR entre 0dB y 32dB las curvas tienen el mismo comportamiento con una BER inicial alrededor de 0.44, sin embargo en cuanto a BER, la curva que muestra el mejor desempeño es la correspondiente a la tasa de codificación de 1/3 ya que esta consigue la mínima BER (0.03) para los valores de SNR mayores a 58dB; se nota además que todas las curvas se mantienen por encima de una BER de 0.01, esto se debe a que se está simulando sobre un canal ETU con dispersión de retardo media aumentando la probabilidad de interferencia inter-símbolo.

La Figura 4.6 describe el comportamiento de las curvas de *throughput* Vs SNR para el escenario 1 caso 2.

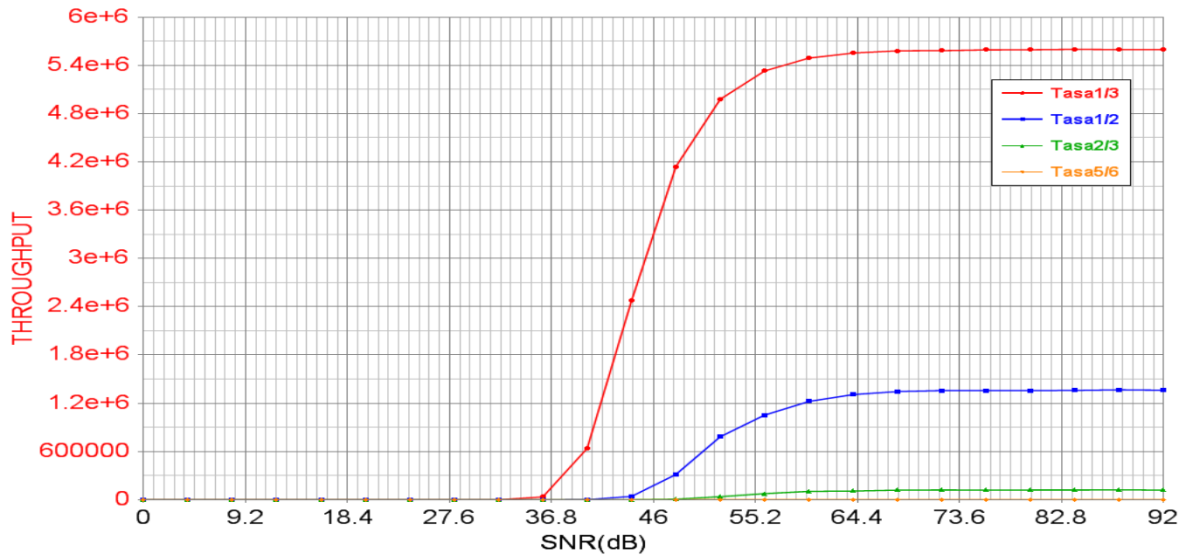


Figura 4.6. *Throughput* Vs SNR para Escenario 1 Caso 2.

Debido a la alta BER conseguida con las tasas de codificación evaluadas con MIMO 4X4, la cantidad máxima de información transmitida sin errores a través de un modelo de canal urbano con dispersión de retardo media no alcanza el valor teórico como se observa en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Máximo *Throughput* obtenido para Escenario 1 Caso 2.

Tasa de codificación teórica	1/3	1/2	2/3	5/6
Tasa de codificación efectiva del simulador	0.3463	0.4863	0.6863	0.7763
<i>Throughput</i> máximo teórico [Mbps]	11.2	16.8	22.4	28
<i>Throughput</i> máximo obtenido [Mbps]	5.9	1.36	0.122	0.002
SNR para máximo <i>Throughput</i> [dB]	70	72	72	52

De la Figura 4.6 se concluye que más redundancia en la información facilita la detección y corrección de errores en recepción, por esto las curvas de desempeño



en términos de BLER y BER que describe la tasa de codificación de 1/3 son las mejores, con lo cual se consigue el *throughput* máximo de 5.9Mbps.

Al comparar los resultados obtenidos en los casos 1 y 2, para MIMO 2X2 la tasa de codificación de 1/3 obtuvo el mejor desempeño en cuanto a BLER y BER para los SNRs evaluados; en el caso de MIMO 4X4, aunque esta presenta los valores más bajos de BLER y BER con respecto a las otras tasas de codificación, el valor de BLER se mantiene por encima de la objetivo y la BER superior a 0.01, por lo cual se precisaría de mayor redundancia para mejorar el desempeño del sistema, además, al comparar el *throughput* conseguido en los dos casos con la tasa de codificación de 1/3, el mayor *throughput* se obtiene con MIMO 4X4.

4.3. ESCENARIO 2

En este escenario se analizan los efectos que producen en el desempeño del sistema los modelos de canal teóricos que establece el *Release 10* [27] con AWGN y multitrayectoria.

Los parámetros que se muestran en la Tabla 4.6 describen la configuración de este escenario para los sistemas MIMO 2X2 y 4X4.

Tabla 4.6. Parámetros de Configuración del Escenario 2.

Parámetro	Configuración
Ancho de banda	15MHz (75RB)
Modulación	16QAM
Tasa de codificación	1/3
Modelo de canal	AWGN, EPA5, EVA5, EVA70, ETU30, ETU70, ETU300

CASO 1

Se configura un sistema MIMO 2X2 y se analizan los resultados de desempeño en términos de BLER, BER y *throughput*.

La Figura 4.7 muestra la gráfica de BLER del sistema con el canal AWGN y los canales multitrayecto, para diferentes valores de SNR, además se incluye la BLER de un sistema SISO con un canal AWGN.

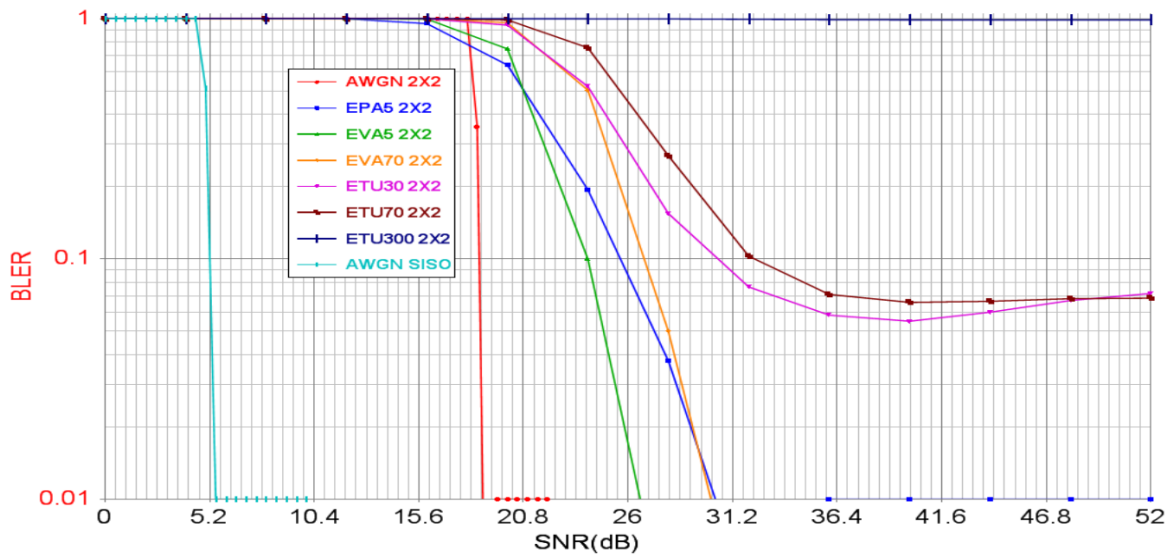


Figura 4.7. BLER Vs SNR para Escenario 2 Caso 1.

La Tabla 4.7 describe los valores de SNR, BER y *throughput* donde el sistema alcanza la BLER objetivo con cada uno de los modelos de canal.

Tabla 4.7. SNR, BER y *Throughput* para BLER objetivo de Escenario 2 Caso 1.

Canal	AWGN SISO	AWGN 2X2	EPA5	EVA5	EVA70	ETU30	ETU70	ETU300
BLER Objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	5.41	18.5	25.62	24	26.79	30.48	32.23	X
BER	0	2.25×10^{-3}	0.01	8.14×10^{-3}	3×10^{-3}	5×10^{-3}	4×10^{-3}	X
<i>Throughput</i> [Mbps]	13.52	16.16	21.82	22.59	20.39	22.44	22.57	X



De la Figura 4.7 y la Tabla 4.7 se observa que:

- Los valores mínimos de BLER en el sistema con los canales EPA5, EVA5 y EVA70 son: 0, 1.5×10^{-3} y 0.4×10^{-3} en 36dB, con ETU30 y ETU70 son 0.055 y 0.06 en 44dB.
- En el rango de SNR entre 0dB y 12dB para el sistema MIMO 2X2 con los canales multitrayectoria, el 100% de los paquetes recibidos contienen errores, con el canal ETU300 este comportamiento se mantiene para los SNRs evaluados ya que es el canal que modela multitrayectos con retardos superiores a la duración del prefijo cíclico de OFDM (Tabla 2.4), produciendo interferencia inter-símbolo ya que este prefijo es la protección frente a la ISI.

La Figura 4.8 muestra el desempeño de los canales evaluados en cuanto a BER.

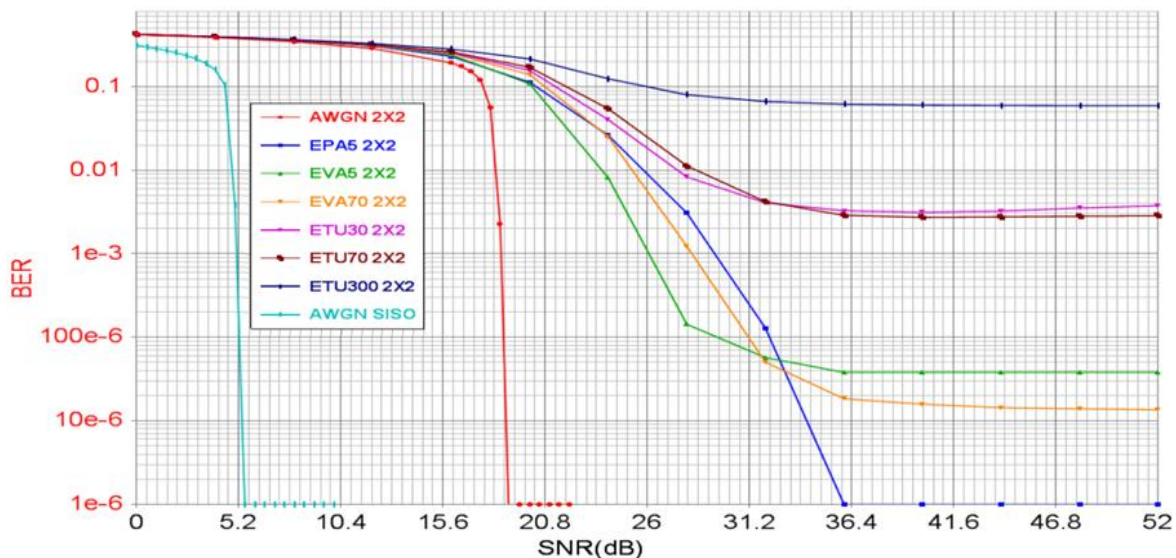


Figura 4.8. BER Vs SNR para Escenario 2 Caso 1.

En la Figura 4.8 se puede observar que:

- En el rango de SNR desde 0dB hasta 12dB el comportamiento es el mismo para todos los canales multitrayectoria con una BER inicial de 0.427, considerando solo los canales EPA5, EVA5 y EVA70 que tienen dispersión de retardo baja (EPA) y media (EVA), después de los 12dB la curva de EVA5 empieza a caer, mostrando el mejor desempeño frente a los otros hasta la SNR de 31.7dB con una BER mínima de 38.07×10^{-6} , a partir de la cual el mejor desempeño se obtiene con el canal EVA70 donde se logra una BER mínima de



13.58×10^{-6} , para los valores de SNR evaluados mayores a 33dB la BER del canal EPA5 decrece hasta alcanzar el valor de 0 en 36dB, logrando el mejor desempeño gracias a que su dispersión de retardo media es baja comparada con la de los otros canales.

- Al comparar los canales multitrayecto urbanos, los cuales se diferencian en la dispersión en frecuencia, se observa que el sistema con el canal ETU300 obtiene el peor desempeño, ya que este canal modela la dispersión en frecuencia más alta produciendo mayor interferencia inter-portadora.

Al analizar los resultados obtenidos en términos de BLER y BER con los canales ETU30, ETU70 y ETU300 correspondientes en su orden, a baja, media y alta dispersión en frecuencia, se evidencia que el desempeño tiene una relación inversa con el corrimiento *Doppler* del canal, ya que la dispersión en frecuencia aumenta la interferencia inter-portadora degradando el desempeño del sistema, además, al comparar los canales EPA, EVA y ETU de baja, media y alta dispersión en retardo respectivamente, se observa que el desempeño tiene una relación inversa con la dispersión en retardo del canal ya que si aumenta esta última, se incrementa la interferencia inter-símbolo produciendo errores en la información.

La Figura 4.9 muestra las curvas de *throughput* contra SNR para el escenario 2 caso 1.

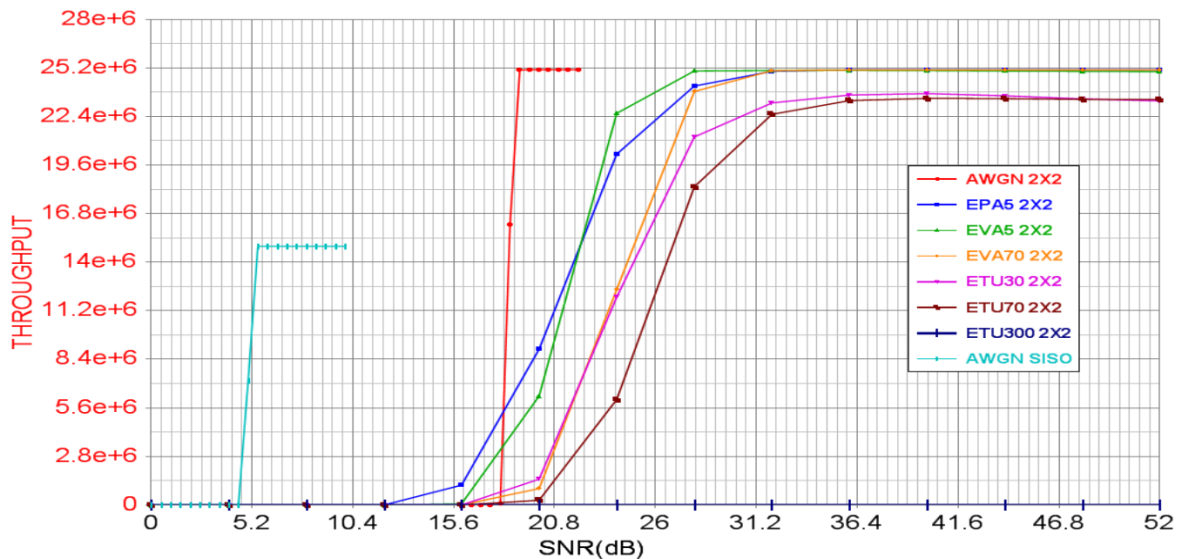


Figura 4.9. *Throughput* Vs SNR para Escenario 2 Caso 1.



En la Figura 4.9 se puede observar que:

- El valor de *throughput* máximo alcanzado para el sistema MIMO 2X2 con AWGN, EPA5, EVA5, EVA70 es de 25.1Mbps, para ETU30 y ETU70 es de 23.72Mbps y 23.45Mbps respectivamente, estos valores se mantienen por debajo del valor teórico de 33.6Mbps, así mismo en el caso del sistema SISO se obtuvo un *throughput* máximo de 14.92Mbps también por debajo del valor teórico de 16.8Mbps.
- El valor de *throughput* es igual a 0Mbps en el intervalo de SNR entre 0dB y 4.5dB para el sistema SISO con AWGN, cuando se consideran los canales multitrayecto EPA5, EVA5, EVA70, ETU30, ETU70 y ETU300 este rango se extiende hasta 12dB, en el caso del sistema con el canal ETU300 dicho valor de *throughput* se mantiene para los SNRs evaluados.
- El mejor desempeño con respecto a *throughput* en el rango de SNR de 12dB hasta 22.11dB se logra sobre un canal EPA5, en el rango de 22.11dB a 32dB el sistema con EVA5 muestra el mejor desempeño, finalmente para las SNRs mayores a 32dB el comportamiento de las curvas de EPA5, EVA5 y EVA70 es el mismo con un máximo rendimiento de 25.1Mbps.
- Los resultados muestran que los canales EPA5, EVA5 y EVA70 en el sistema LTE-Advanced alcanzan el máximo valor de *throughput*, a diferencia de los modelos de canal urbanos con los que no se puede alcanzar este rendimiento, debido a que estos modelan los retardos de dispersión altos.

CASO 2

El escenario 2 se configuró con un sistema MIMO 4X4 y se analizaron los resultados de los parámetros de desempeño.

La Figura 4.10 muestra las curvas de BLER contra SNR.

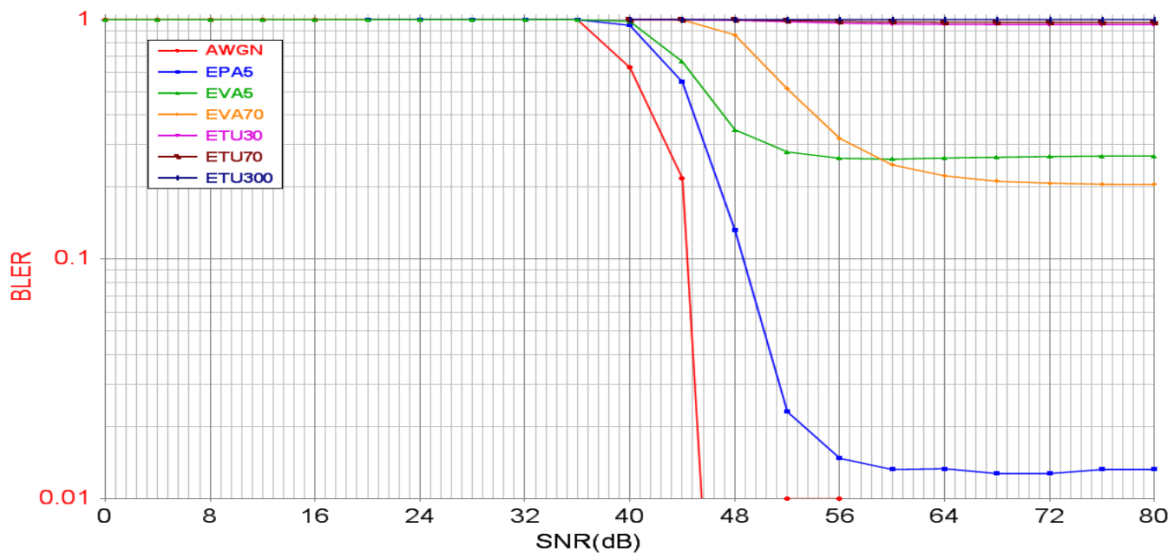


Figura 4.10. BLER Vs SNR para Escenario 2 Caso 2.

La Tabla 4.8 describe el valor mínimo de BLER obtenido para los modelos de canal teóricos que no alcanzan la BLER objetivo.

Tabla 4.8. SNR, BER y *Throughput* para Mínimo BLER de Escenario 2 Caso 2.

Canal	EVA5	EVA70	ETU30	ETU70
Mínimo BLER	0.261	0.205	0.953	0.973
SNR [dB]	60	80	76	80
BER	0.027	5.245×10^{-3}	0.175	0.159
<i>Throughput</i> [Mbps]	36.14	38.9	2.28	1.304

En la Figura 4.10 se puede observar que:

- La BLER objetivo de 0.1 solo es alcanzada por el sistema con los canales AWGN y EPA5 en los valores de SNR 44.37dB y 48.64dB respectivamente, ya que estas son las mejores condiciones de canal para el sistema.



- En el rango de SNR entre 0dB y 36dB el 100% de los paquetes recibidos contienen errores en todos los canales, para el sistema con el canal ETU300 este comportamiento de la BLER permanece constante para los SNRs evaluados, debido a que este modela la más alta dispersión de retardo y frecuencia.

La Figura 4.11 presenta los resultados de BER Vs SNR.

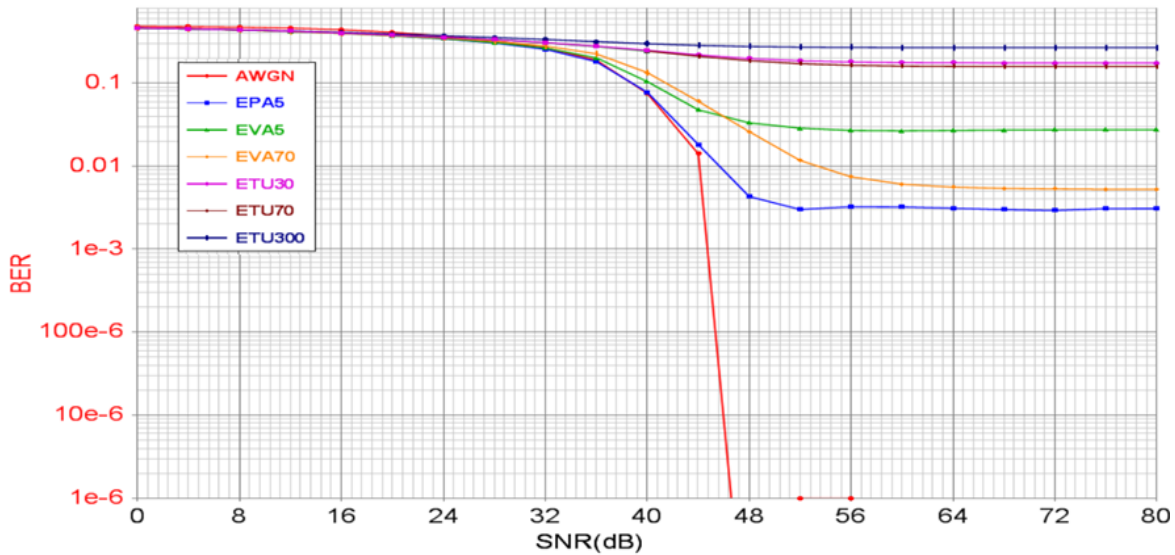


Figura 4.11. BER Vs SNR para Escenario 2 Caso 2.

En la Figura 4.11 se observa que:

- Los canales multirrayecto tienen una BER inicial de 0.46 y el comportamiento de las curvas es similar en el rango correspondiente a SNRs de 0dB a 20dB. En el caso de los canales ETU30 y ETU70, estas curvas se mantienen similares para las SNRs evaluadas, alcanzando una BER mínima de 0.175 y 0.159 respectivamente.
- Con los canales multirrayecto EPA5, EVA5, EVA70, ETU30, ETU70 y ETU300 se obtiene una BER irreducible alrededor de 2.99×10^{-3} , 5.32×10^{-3} , 0.028, 0.175, 0.159 y 0.268 respectivamente.
- Al considerar los canales multirrayecto, el sistema con el canal EPA5 obtiene el mejor desempeño en términos de BER a partir de 32dB, comparado con los otros canales multirrayecto evaluados.



Al observar los resultados de desempeño del sistema con los canales multitrayectoria, el aumento de la SNR disminuye la BER para EPA5, EVA5, EVA70, ETU30 y ETU70, sin embargo esto ocurre hasta una determinada BER, lo que se conoce como BER irreducible, en el caso de ETU300 el aumento de la SNR no tiene ningún efecto en el desempeño en términos de BLER y BER debido a que este canal presenta la más alta dispersión de retardo y frecuencia generando mayor interferencia inter-simbólica e inter-portadora.

En la Figura 4.12 se grafican las curvas de *throughput* Vs SNR.

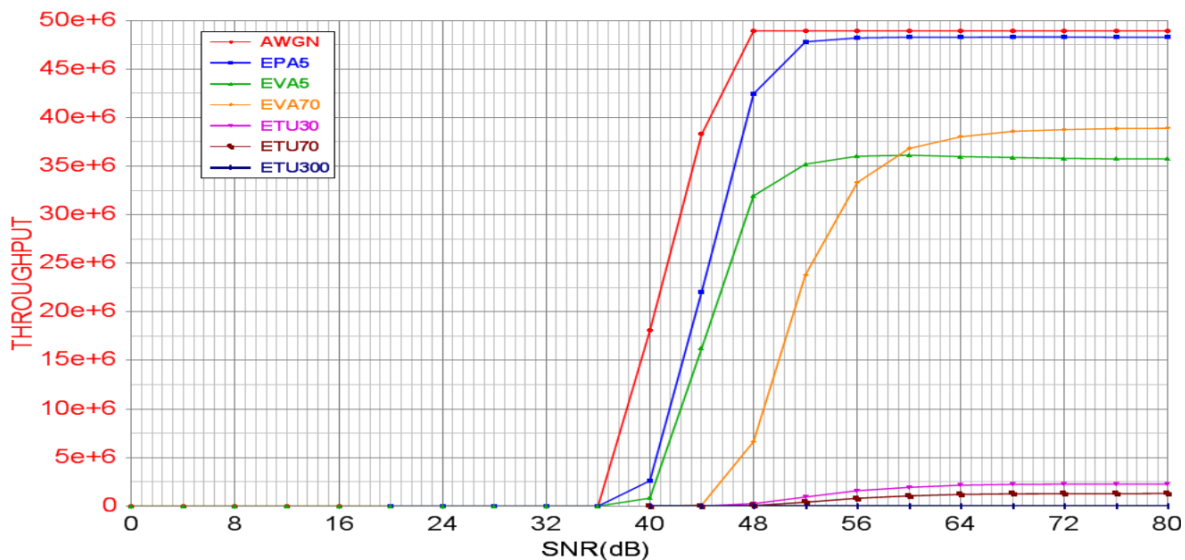


Figura 4.12. *Throughput* Vs SNR para Escenario 2 Caso 2.

De la Figura 4.12 se puede concluir que:

- El *throughput* es de 0Mbps en el intervalo de SNR entre 0dB y 36dB para los canales AWGN, EPA5, EVA5, EVA70, ETU30 y ETU70, cuando se considera el canal multitrayectoria ETU300, esta característica se mantiene para los SNRs evaluados, debido a que la totalidad de los paquetes contienen errores y la BER permanece mayor a 0.1.
- El mejor desempeño en términos de *throughput* lo alcanza el sistema con el canal EPA5, ya que tiene la dispersión de retardo más baja y por lo tanto los valores de BLER y BER más bajos, seguido por los canales multitrayecto vehiculares debido a que estos presentan dispersión de retardo media



provocando en el sistema mayor interferencia inter-símbolo comparado con el canal EPA5.

Al considerar los resultados obtenidos en los dos casos, se concluye que el mejor desempeño en términos de BLER, BER y *throughput*, en un sistema LTE-Advanced MIMO 2X2 y 4X4 sobre canales multitrayectoria teóricos, ocurre con los de baja dispersión en tiempo y frecuencia, además, los canales que modelan entornos urbanos presentan el peor desempeño, este comportamiento se debe a que al aumentar la dispersión de retardo y frecuencia se incrementa la probabilidad de interferencia inter-simbólica e inter-portadora.

4.4. ESCENARIO 3

En este escenario se analiza el desempeño de los sistemas MIMO 2X2 y 4X4 frente a diferentes esquemas de modulación con los parámetros que se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Parámetros de Configuración del Escenario 3.

Parámetro	Configuración
Ancho de banda	10MHz (50RB)
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM
Tasa de codificación	1/3
Modelo de canal	EVA5

Teniendo en cuenta, que cuando se comparan diferentes esquemas de modulación digitales, es más confiable estimar la SNR normalizada, o lo que se conoce como relación de energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido $\frac{E_b}{N_0}$; los resultados de desempeño en términos de BER y *throughput* contra SNR obtenidos con la herramienta *SystemVue* se muestran en la Tabla 4.10 caso 1 y Tabla 4.11 caso 2, estos se normalizaron teniendo en cuenta la ecuación 4.1, y los resultados se presentan en las gráficas que muestra la Figura 4.13 y Figura 4.14.

$$\frac{E_b}{N_0}_{[dB]} = SNR_{[dB]} + 10 \log\left(\frac{n}{k}\right) - 10 \log(\log_2 M), \quad (4.1)$$



donde, $\frac{n}{k}$ corresponde al inverso de la tasa de codificación y $\log_2 M$ al orden de modulación.

Tabla 4.10. Resultados BER y Throughput Vs SNR para Escenario 3 Caso 1.

SNR[dB]	VER			Throughput		
	QPSK	16QAM	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM
0	0.37	0.425	0.453	0	0	0
4	0.33	0.397	0.434	0	0	0
8	0.284	0.361	0.408	0	0	0
12	0.2	0.312	0.373	505074.567	0	0
16	0.003626	0.24	0.324	4.344e6	98844.16	0
20	9.946e-6	0.108	0.257	8.168e6	5.342e6	139885.897
24	0	0.014	0.133	8.504e6	14.75e6	5.307e6
28	0	287.3e-6	0.018	8.504e6	16.9e6	22.32e6
32	0	0	356.9e-6	8.504e6	16.99e6	27.28e6
36	0	0	28.69e-6	8.504e6	16.99e6	27.55e6
40	0	0	28.5e-6	8.504e6	16.99e6	27.54e6
44	0	0	39.78e-6	8.504e6	16.99e6	27.53e6
48	0	0	54.03e-6	8.504e6	16.99e6	27.52e6
52	0	0	66.51e-6	8.504e6	16.99e6	27.52e6

Tabla 4.11. Resultados BER y Throughput Vs SNR para Escenario 3 Caso 2.

SNR[dB]	VER			Throughput		
	QPSK	16QAM	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM
0	0.44	0.46	0.474	0	0	0
4	0.427	0.449	0.466	0	0	0
8	0.411	0.436	0.456	0	0	0
12	0.389	0.418	0.443	0	0	0
16	0.363	0.396	0.425	0	0	0
20	0.335	0.371	0.403	0	0	0
24	0.301	0.341	0.378	0	0	0
28	0.258	0.307	0.349	0	0	0



32	0.182	0.263	0.313	376526.601	0	0
36	0.046	0.198	0.272	7.049e6	0	0
40	6.047e-3	0.08	0.216	15.36e6	3.534e6	0
44	2.647e-3	0.018	0.113	16.39e6	19.29e6	951194.469
48	1.816e-3	8.152e-3	0.038	16.6e6	27.98e6	14.02e6
52	1.569e-3	6.135e-3	0.017	16.68e6	28.92e6	36.77e6
56	1.513e-3	5.382e-3	0.013	16.71e6	29.31e6	41.95e6
60	1.548e-3	5.228e-3	0.012	16.69e6	29.38e6	43e6
64	1.626e-3	5.307e-3	0.012	16.67e6	29.36e6	43.36e6
68	1.679e-3	5.378e-3	0.012	16.65e6	29.35e6	43.55e6
72	1.705e-3	5.426e-3	0.012	16.64e6	29.34e6	43.58e6
76	1.719e-3	5.448e-3	0.012	16.64e6	29.34e6	43.59e6
80	1.724e-3	5.455e-3	0.012	16.64e6	29.34e6	43.6e6
84	1.726e-3	5.458e-3	0.012	16.64e6	29.34e6	43.6e6
88	1.726e-3	5.46e-3	0.012	16.64e6	29.34e6	43.6e6
92	1.727e-3	5.461e-3	0.012	16.64e6	29.34e6	43.6e6

CASO 1

Se analizan los resultados de desempeño en términos de BER y *throughput* en un sistema MIMO 2X2.

En la Figura 4.13 se ilustra el comportamiento de las curvas de BER Vs $\frac{E_b}{N_0}$; para los esquemas de modulación evaluados.

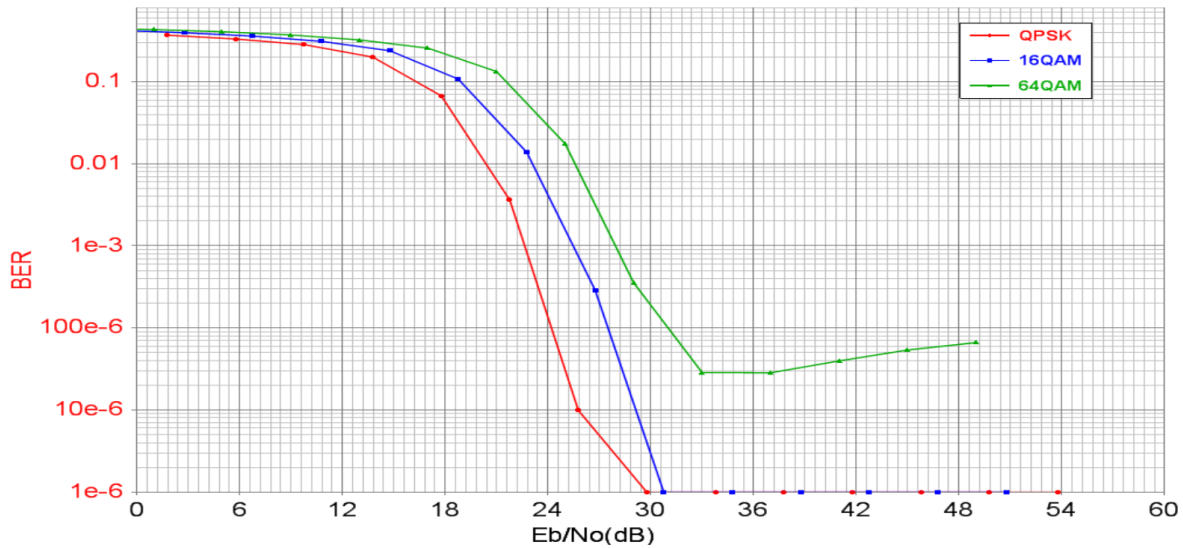


Figura 4.13. BER Vs $\frac{E_b}{N_0}$ para Escenario 3 Caso 1.

En la Figura 4.13 se puede observar que, el mejor desempeño en términos de BER se tiene con el esquema de modulación QPSK y el peor se obtiene al configurar el esquema 64QAM ya que los símbolos con este esquema se encuentran más próximos en el diagrama de constelación y debido al ruido se aumenta la probabilidad de que estos sean detectados incorrectamente.

En la Figura 4.14 se muestran las curvas de desempeño en cuanto a *throughput* para un rango de $\frac{E_b}{N_0}$.

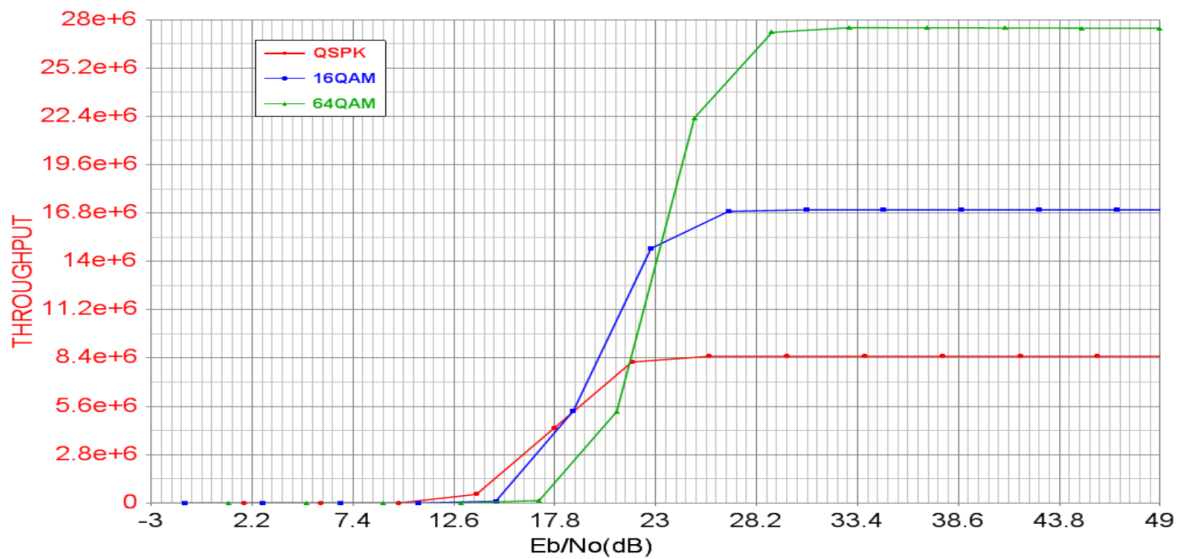


Figura 4.14. *Throughput* Vs $\frac{E_b}{N_0}$ para Escenario 3 Caso 1.

Los valores teóricos de *throughput* para QPSK, 16QAM y 64QAM son 11.2Mbps, 22.4Mbps y 33.6Mbps, se observa en la Figura 4.14 que los valores máximos alcanzados de *throughput* en este escenario son 8.4Mbps, 17.4Mbps y 27.4Mbps en su orden, aunque se consigan valores de BER bajos, el *throughput* no alcanza el valor teórico ya que este se calcula con la tasa de codificación teórica y la totalidad de los elementos de recursos asignados a la información de usuario.

De los anteriores resultados se infiere que al aumentar la cantidad de símbolos por modulación, se aumenta el *throughput* del sistema y la susceptibilidad al ruido, por lo que se requiere mayor $\frac{E_b}{N_0}$.

CASO 2

Se presentan y analizan los resultados de desempeño en términos de BER y *throughput* para el escenario 3 con un sistema MIMO 4X4.

Para los esquemas de modulación evaluados las curvas de desempeño en cuanto a BER se ilustran en la Figura 4.15.

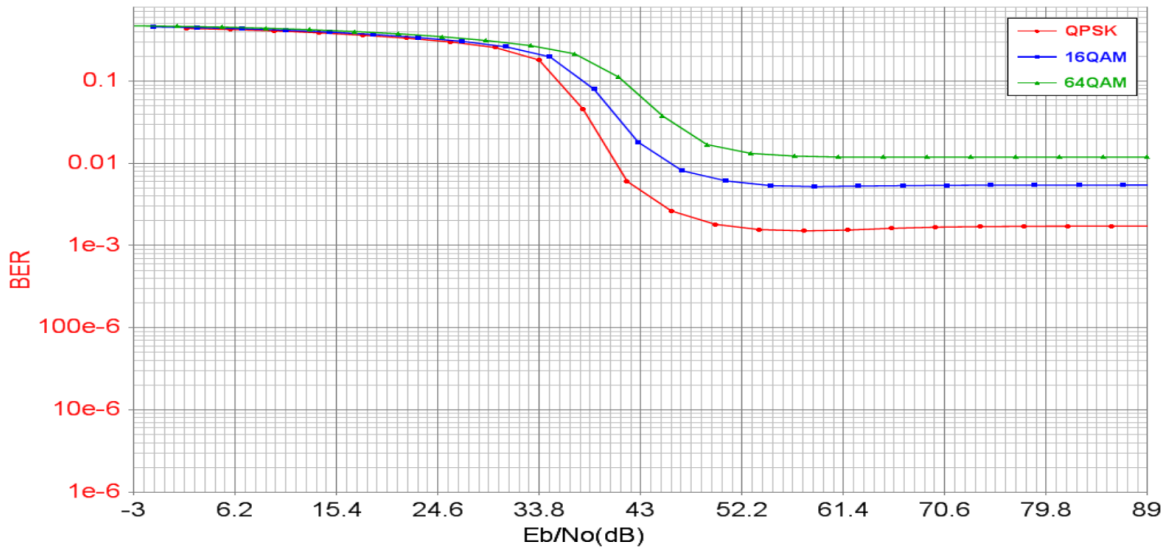


Figura 4.15. BER Vs $\frac{E_b}{N_0}$ para Escenario 3 Caso 2.

Al observar la Figura 4.15 se puede determinar que, el valor promedio de la BER inicial es 0.458, además para los valores de $\frac{E_b}{N_0}$, el esquema de modulación QPSK mantuvo el mejor desempeño en términos de BER, por lo tanto, la modulación que transporta menor cantidad de bits por símbolo es la que logra el mejor desempeño, sin embargo para MIMO 4X4 sobre el modelo de canal EVA5 los resultados obtenidos muestran que para brindar servicios donde se requiera una BER inferior a 0.1%, esta configuración es deficiente.

En la Figura 4.16 se observan los valores de *throughput* alcanzados para los tres esquemas de modulación.

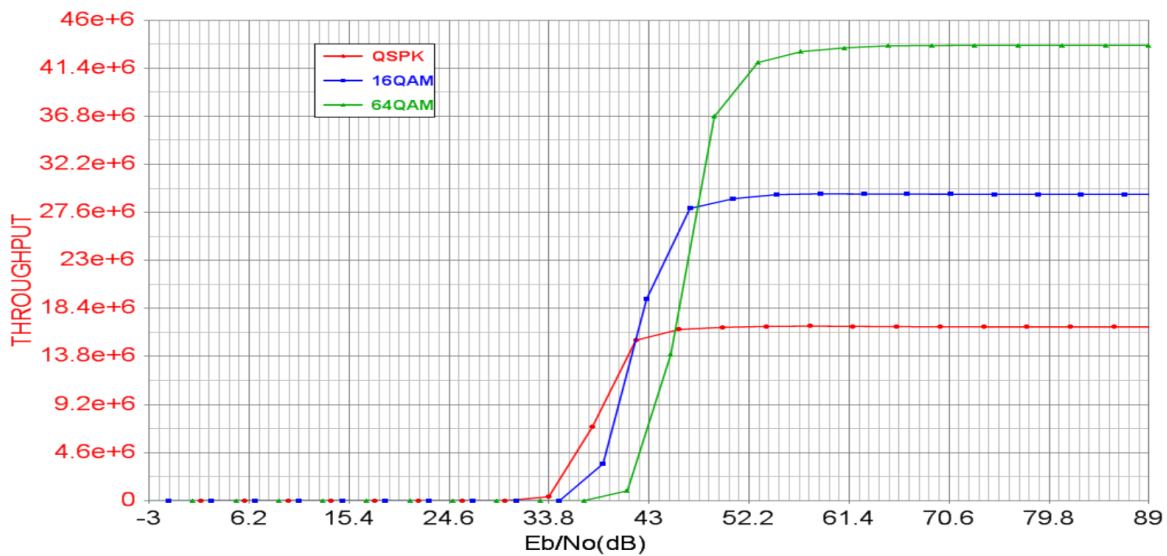


Figura 4.16. *Throughput* Vs $\frac{E_b}{N_0}$ para Escenario 3 Caso 2.

De la Figura 4.16 se observa que, los valores máximos de *throughput* son 15.5Mbps, 29.5Mbps y 43.5Mbps para QPSK, 16QAM y 64QAM en su orden, no se alcanzan los valores teóricos de *throughput* de 22.4Mbps, 44.8Mbps y 67.2Mbps, también se evidencia que al aumentar el orden de modulación es necesaria una mayor $\frac{E_b}{N_0}$ para alcanzar el máximo *throughput*.

De los resultados obtenidos en el caso 1 y 2, se puede concluir que:

- El *throughput* que se espera alcanzar en un sistema MIMO 4X4 equivale al doble del logrado en el sistema MIMO 2X2, sin embargo el incremento de las antenas degrada el desempeño en términos de BER, en consecuencia no se logra el máximo rendimiento.
- Al usar una modulación de orden superior se aumenta la probabilidad de error, ya que se transmiten más bits en un mismo instante de tiempo a diferencia de los otros esquemas de orden más bajo, por lo cual el esquema de modulación 64QAM requiere de alta $\frac{E_b}{N_0}$ para obtener el mejor desempeño en términos de *throughput*.



4.5. ESCENARIO 4

El propósito de este escenario es evidenciar los efectos en los parámetros de desempeño del sistema con MIMO 2X2 y diferentes anchos de banda frente a la variación de la dispersión de retardo.

El sistema se configuró como se muestra en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Parámetros de Configuración del Escenario 4.

Parámetro	Configuración
Modulación	64QAM
Anchos de banda	5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz
Tasa de codificación	1/3
Modelo de canal	EVA70, ETU70

En la Figura 4.17 se observan las curvas de BLER Vs SNR para el sistema con los diferentes anchos de banda y los modelos de canal evaluados.

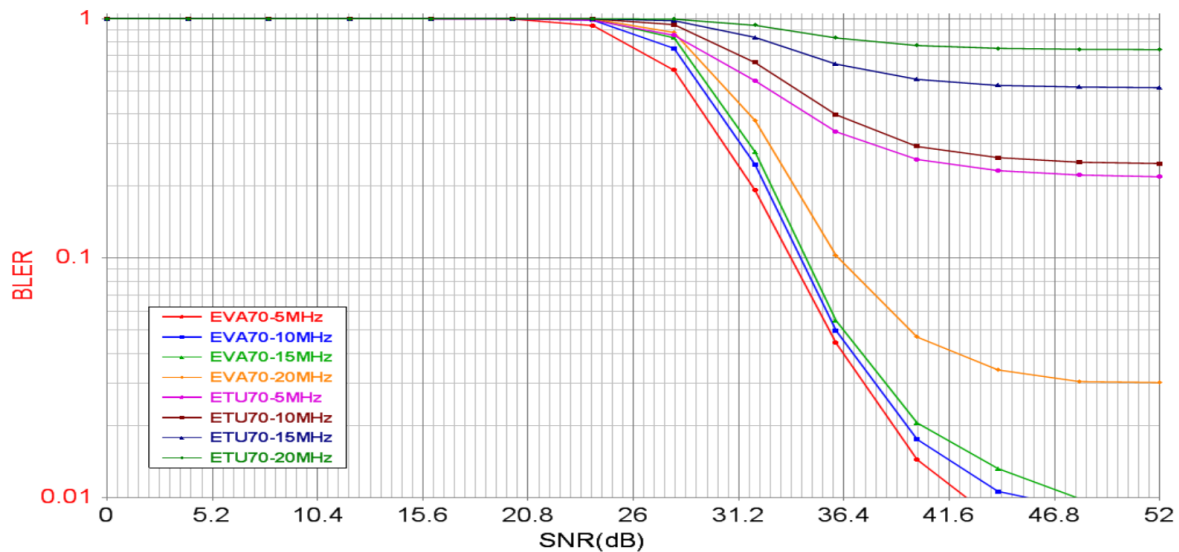


Figura 4.17. BLER Vs SNR para Escenario 4.

En la Tabla 4.13 se describen los valores de SNR, BER y *throughput* donde el sistema alcanza la BLER objetivo con el canal EVA70.

**Tabla 4.13.** SNR, BER y *Throughput* para BLER objetivo de Escenario 4.

Ancho de Banda	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
BLER Objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR [dB]	33.75	34.24	34.5	36.08
BER	3.05×10^{-3}	3×10^{-3}	3.33×10^{-3}	2.15×10^{-3}
<i>Throughput</i> [Mbps]	11.64	23.99	35.97	50.68

En la Figura 4.17 y la Tabla 4.13 se puede observar que:

- el valor de BLER es igual a 1 para cualquier SNR en el rango de 0dB a 20dB para EVA70 y de 0dB hasta 24dB para ETU70, lo que muestra que la totalidad de los bloques transmitidos llegan errados, sin embargo al incrementar la SNR el desempeño mejora ya que la BLER disminuye hasta llegar a los valores mínimos de 6.506×10^{-3} , 8.408×10^{-3} , 9.509×10^{-3} y 0.03, para EVA70 y hasta 0.219, 0.249, 0.516 y 0.744 para ETU70 en los anchos de banda de 5MHz, 10MHz, 15MHz y 20MHz respectivamente.
- La curva de 5MHz correspondiente al modelo de canal EVA70 obtiene la menor BLER y la mayor BLER se logra con el modelo de canal ETU70 con 20MHz de ancho de banda.

En la Figura 4.18 se ilustran las curvas de BER para los anchos de banda y modelos de canal descritos en el escenario 4.

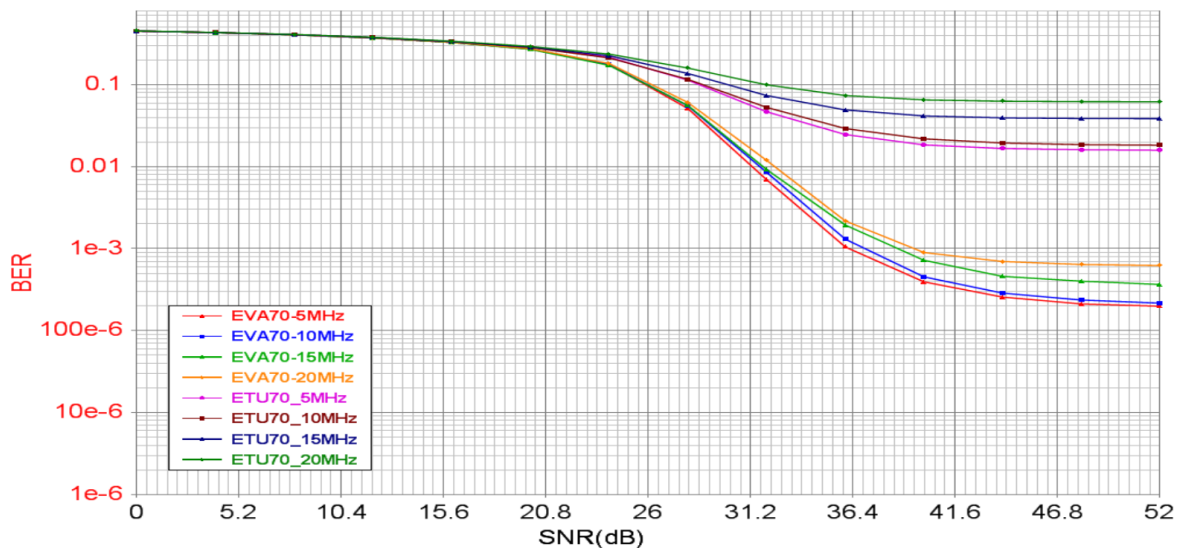


Figura 4.18. BER Vs SNR para Escenario 4.

Al observar la Figura 4.18 el valor inicial de la BER es de 0.454 para los anchos de banda con modelos de canal EVA70 y ETU70, comparando las curvas correspondientes a cada modelo de canal se nota que EVA70 logra valores de BER menores que ETU70 debido a que la dispersión de retardo RMS de este canal es más alta que la de EVA70, incrementando la interferencia inter-simbólica en el sistema.

En la Figura 4.19 y la Figura 4.20 se muestran las curvas de *throughput* Vs SNR para los diferentes anchos de banda y los modelos de canal ETU70 y EVA70.

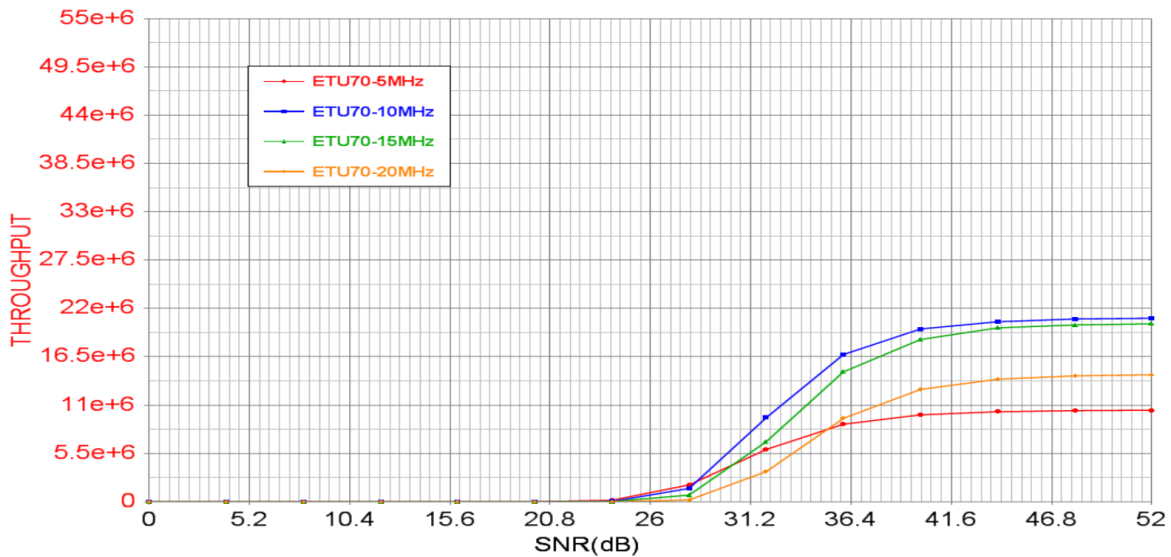


Figura 4.19. *Throughput Vs SNR para ETU70.*

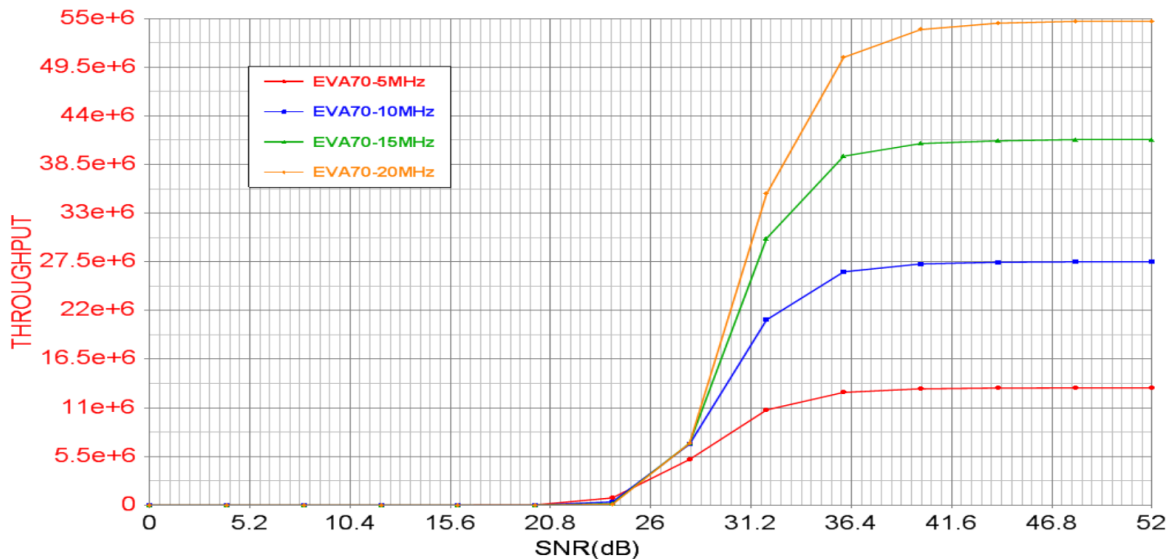


Figura 4.20. *Throughput Vs SNR para EVA70.*

De la Figura 4.19 y Figura 4.20 se concluye que:

- El sistema con el modelo de canal EVA70 y 20MHz de ancho de banda obtiene el *throughput* de 54.71Mbps, mientras que con el modelo de canal ETU70 y el mismo ancho de banda solo alcanza 14.46Mbps, esto debido a que el sistema con este canal sufre las mayores pérdidas en la información como muestran los resultados obtenidos de BER y BLER.



De los anteriores resultados se concluye que el aumentar la dispersión de retardo RMS, afecta el desempeño del sistema LTE-Advanced MIMO 2X2 negativamente, ya que se genera un incremento en la interferencia inter-simbólica, limitando la eficiencia del sistema en un determinado ancho de banda.

4.6. ESCENARIO 5

El propósito de este escenario es evidenciar el impacto sobre el desempeño del enlace de bajada en un sistema LTE-Advanced, al incrementar el número de antenas en transmisión y recepción.

CASO 1

Considera el modelo teórico de canal AWGN con los parámetros que muestra la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Parámetros de Configuración del Escenario 5 Caso 1.

Parámetro	Configuración
Modulación	16QAM
Ancho de banda	15MHz (75RB)
Tasa de codificación	1/3
Modelo de canal	AWGN
Sistema de Antenas	SISO, MIMO 2X2, MIMO 4X4

Los sistemas SISO, MIMO 2X2 y 4X4 inicialmente presentan una BLER igual a 1 hasta 4.5dB, 18dB y 36dB respectivamente, luego disminuyen hasta encontrar la BLER objetivo en 5.38dB, 18.5dB y 44.37dB en su orden, por último llegan a una BLER de cero en 5.5dB, 19.5dB y 52dB, como se muestra en la Figura 4.21.

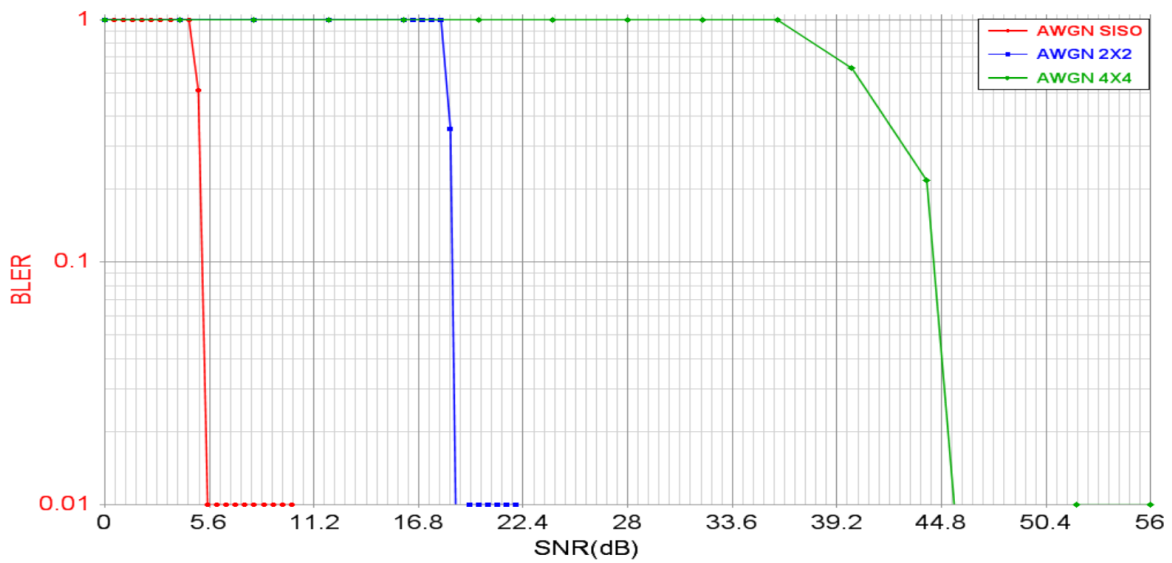


Figura 4.21. BLER Vs SNR para Escenario 5 Caso 1.

Los valores iniciales de la BER para SISO, MIMO 2X2 y 4X4 son respectivamente de 0.315, 0.425 y 0.484, a medida que la SNR aumenta la BER disminuye hasta cero en 5.5dB, 19.5dB y 52dB, como se ilustra en la Figura 4.22, además se observa que para cualquier SNR evaluado el SISO obtiene la mínima BER.

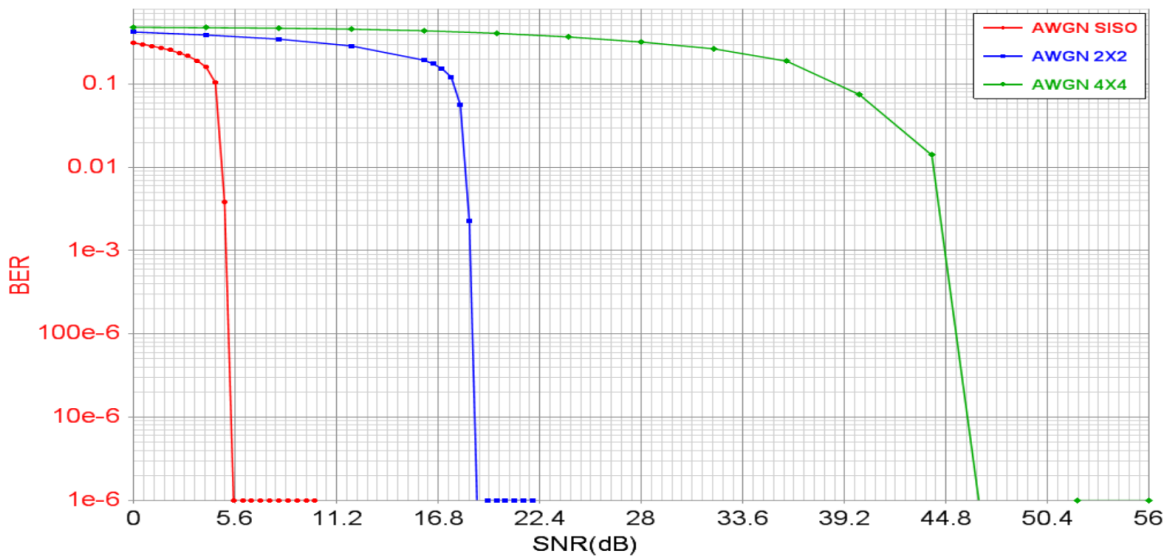


Figura 4.22. BER Vs SNR para Escenario 5 Caso 1.



En la Figura 4.23 se observan los resultados obtenidos para los sistemas SISO, MIMO 2X2 y 4X4 en los cuales el *throughput* inicial para los sistemas evaluados es 0Mbps, este valor se mantiene en cada caso hasta los valores de SNR de 4.5dB, 18dB y 36dB, en adelante el *throughput* se incrementa hasta lograr transmitir la máxima cantidad de información correspondiente a 14.92Mbps, 25.1Mbps y 48.94Mbps.

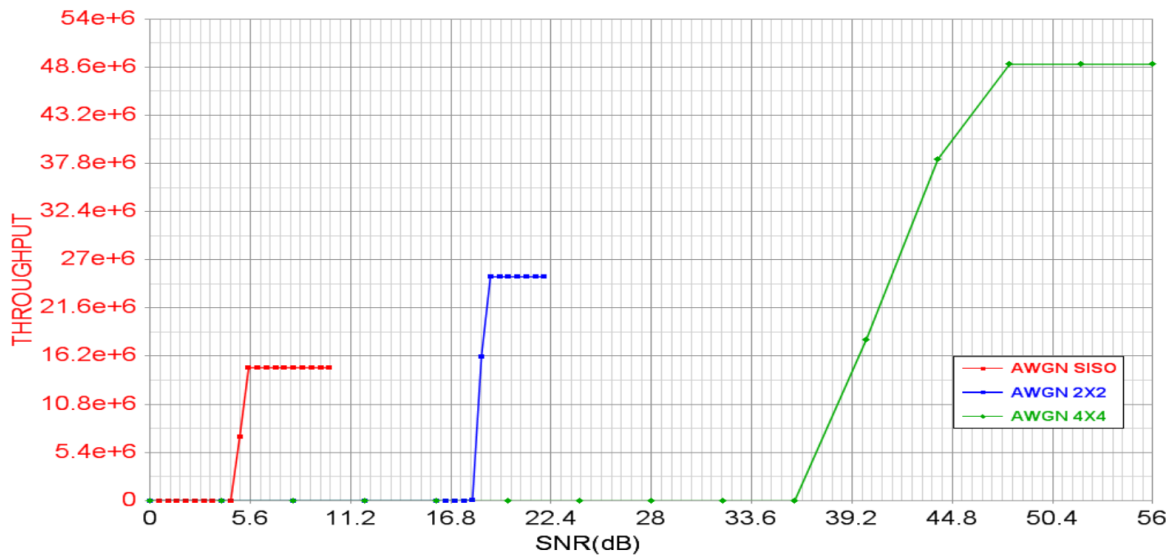


Figura 4.23. *Throughput* Vs SNR para Escenario 5 Caso 1.

Al observar los resultados obtenidos con el canal AWGN, se infiere que con el aumento en el número de antenas tanto en transmisión como en recepción, se logra mejorar el desempeño en términos de *throughput*, sin embargo para alcanzar esto, se necesita un incremento notable en la SNR.

CASO 2

Considera un canal multitrayecto vehicular teórico con frecuencia *Doppler* de 70Hz en diferentes configuraciones de MIMO con los parámetros que describe la Tabla 4.15.



Tabla 4.15. Parámetros de Configuración del Escenario 5 Caso 2.

Parámetro	Configuración
Modulación	16QAM
Anchos de banda	15MHz (75RB)
Modelo de Canal	EVA70
Tasa de codificación	1/3
MIMO	2X2, 4X4

Al observar la Figura 4.24 para los dos sistemas se nota que, la BLER inicial es igual a 1 hasta la SNR de 16dB a partir de la cual la BLER del sistema MIMO 2X2 decrece encontrando el valor objetivo (0.1) en 26.76dB y finalmente tiende a estabilizarse alrededor de su valor mínimo de 0.2×10^{-9} para SNRs mayores a 36dB, en el caso de MIMO 4X4 la BLER se mantiene en 1 hasta 44dB, luego esta decrece hasta estabilizarse alrededor de 0.203.

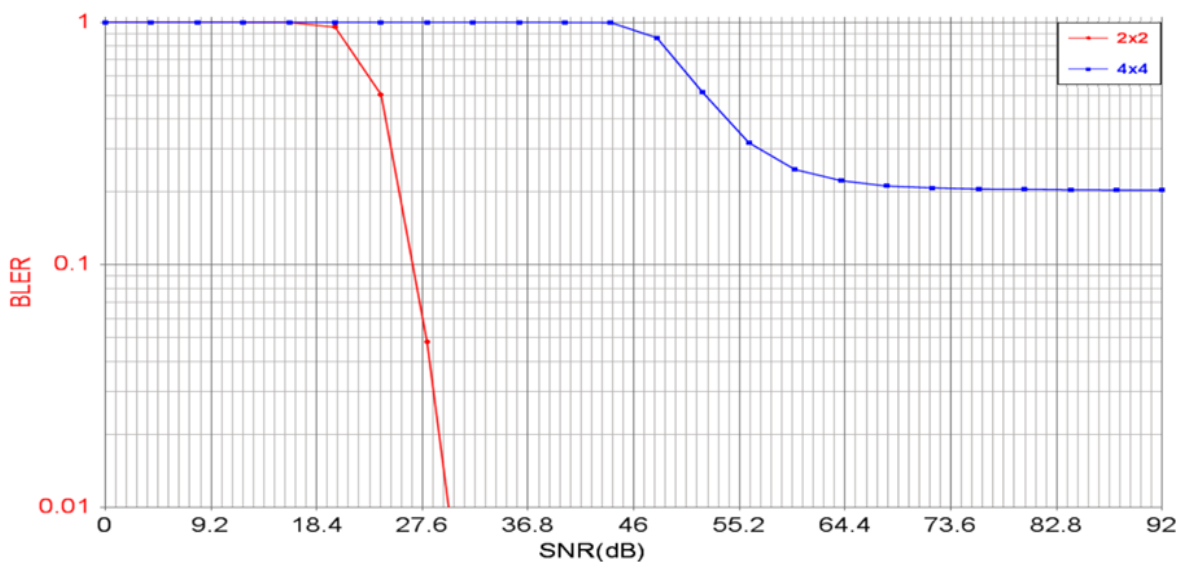


Figura 4.24. BLER Vs SNR para Escenario 5 Caso 2.

La Figura 4.25 muestra que el valor de BER inicial del sistema MIMO 2X2 es de 0.426 luego decrece hasta el valor de 2.14×10^{-6} en 52dB, para el caso MIMO 4X4 la BER inicial es de 0.462 y este disminuye hasta estabilizarse alrededor del valor mínimo de 5.24×10^{-6} a partir de 64dB, comparando los sistemas MIMO 2X2 y 4X4 los valores de BER más bajos los obtiene el sistema MIMO 2X2, ya que este sistema percibe el flujo directo y el interferente de la antena contigua a diferencia de MIMO 4X4 que recibe tres flujos interferentes de las antenas adyacentes.

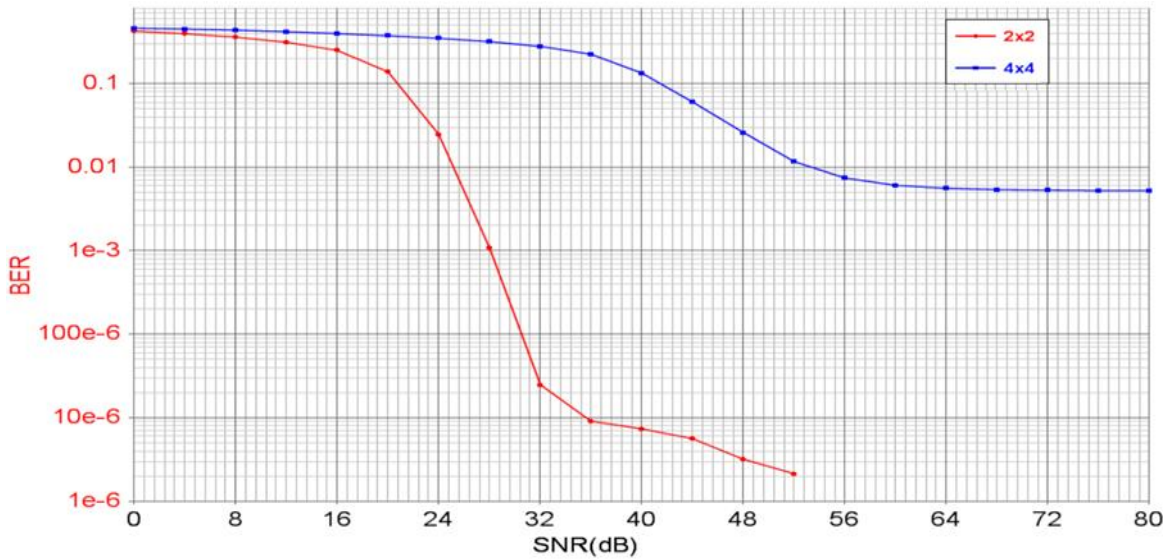


Figura 4.25. BER Vs SNR para Escenario 5 Caso 2.

El valor inicial de *throughput* correspondiente al sistema MIMO 2X2 es de 0Mbps en el intervalo de 0dB a 16dB, a partir de allí este crece hasta el valor máximo de 25Mbps en 32dB, en el caso de MIMO 4X4 se mantiene en 0Mbps hasta 44dB, luego aumenta y tiende a estabilizarse alrededor del valor máximo de 38.99Mbps, como se muestra en la Figura 4.26. Por lo cual se concluye que el aumento en el número de antenas permite transmitir más información pero exige de una mayor SNR.

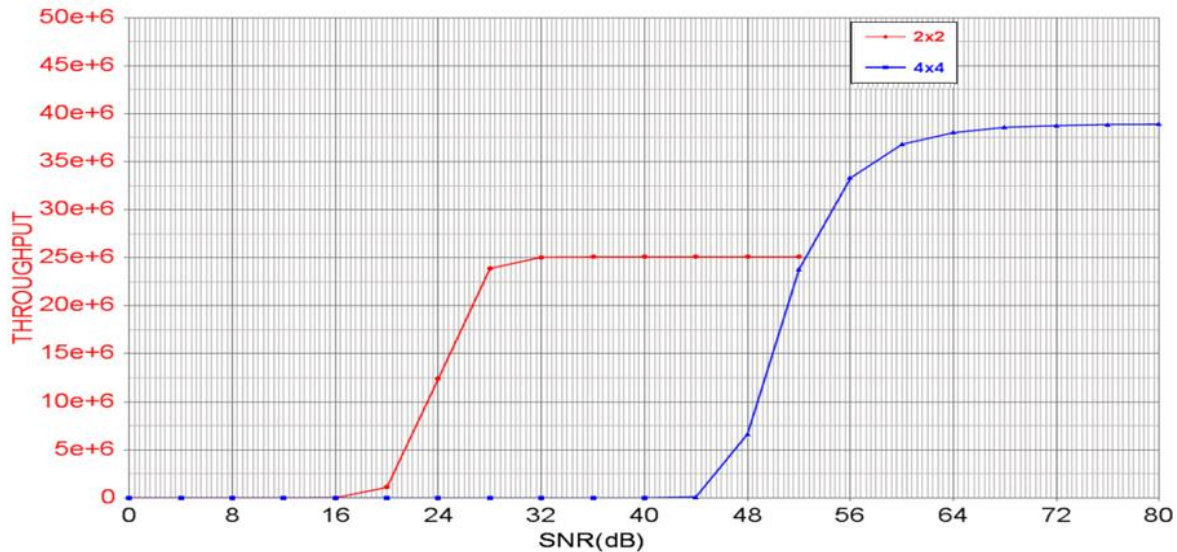


Figura 4.26. *Throughput* Vs SNR para Escenario 5 Caso 2.



Analizando los resultados de los casos 1 y 2 se deduce que el aumento en el número de antenas mejora el *throughput* pero esto requiere de un incremento considerable en la SNR ya que crece la interferencia por el efecto de los múltiples flujos de las antenas en el sistema y la alta correlación entre ellas.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

- En el enlace de bajada de un sistema LTE-Advanced MIMO 2X2, con un modelo canal teórico urbano (ETU70) de dispersión media, al comparar las tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6 el sistema obtiene el mejor desempeño en cuanto a BLER y BER con la tasa de codificación de 1/3.
- En un sistema LTE-Advanced MIMO 4X4, con un modelo canal teórico urbano (ETU70) de dispersión media, al comparar las tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6, el sistema logra los parámetros de desempeño, en cuanto a BLER y BER más bajos con la tasa de codificación de 1/3, sin embargo la BLER se mantiene por encima de 0.1 y la BER superior a 0.01, por lo que se precisaría de mayor redundancia en el sistema para mejorar el desempeño.
- Al comparar el desempeño del sistema LTE-Advanced con diferentes modelos de canal multitrayectoria el mejor desempeño en términos de BLER y BER se obtiene con el canal EPA5 para MIMO 2X2 y MIMO 4X4, este canal tiene dispersión de retardo baja, por lo cual la interferencia inter-simbólica es mínima comparada con los modelos de canal ETU de dispersión de retardo alta, donde los sistemas MIMO 2X2 y 4X4 obtienen resultados de desempeño deficientes.
- El desempeño en el enlace de bajada del sistema LTE-Advanced MIMO 2X2 y 4X4, tiene una relación inversa con la dispersión en tiempo y frecuencia presentes en el canal, por lo cual para valores altos de retardos y corrimiento *Doppler*, el desempeño del sistema en términos BLER, BER y *throughput* se degrada, debido a que aumenta la interferencia inter-símbolo e inter-portadora.
- En un sistema LTE-Advanced configurado con MIMO 2X2 o 4X4 sobre un modelo de canal EVA5, el esquema 64QAM mejora el desempeño en términos



de *throughput* del enlace de bajada, sin embargo, lograr esto requiere de una alta E_b/N_0 , debido a que con ésta modulación los símbolos se encuentran más próximos y por el ruido del canal se aumenta la probabilidad de detectarlos erradamente.

- Al aumentar la dispersión de retardo RMS, se afecta el desempeño en términos de BLER, BER y *throughput* del sistema LTE-Advanced MIMO 2X2, ya que se incrementa la interferencia inter-simbólica, limitando el desempeño del sistema.
- En los sistemas SISO, MIMO 2X2 y 4X4 de LTE-Advanced en el enlace de bajada, el aumento en el número de antenas transmisoras y receptoras exige una mayor SNR para incrementar el *throughput*, ya que al aumentar el número de antenas también crece la probabilidad de interferencia por el efecto de los múltiples flujos de las antenas en el sistema.
- Al comparar LTE-Advanced MIMO 2X2 con MIMO 4X4, se deduce que el aumento en el número de antenas transmisoras y receptoras degrada el desempeño en términos de BLER y BER, esto debido al aumento de los flujos interferentes en recepción provenientes de las antenas transmisoras contiguas a la antena con la señal de información.
- Los factores que más influyen negativamente en el desempeño del enlace de bajada de LTE-Advanced, son el número de antenas altamente correlacionadas y la dispersión en tiempo y frecuencia, ya que el incremento de estos factores deteriora el desempeño del sistema.

5.2. RECOMENDACION

- La versión de la herramienta *SystemVue*® utilizada en este trabajo de grado es un demo, debido a esto, presenta limitaciones para configurar los sistemas y simularlos, por lo cual recomendamos que para trabajos futuros se utilice esta herramienta si se cuenta con la versión completa, en caso contrario emplear otras herramientas.



5.3. TRABAJOS FUTUROS

- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE-Advanced para el enlace de bajada con agregación de portadoras.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico del enlace de subida de LTE-Advanced.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE-Advanced con múltiples usuarios.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE-Advanced para el enlace de bajada en modo TDD.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE-Advanced para el enlace de bajada en modo de trama FDD, con prefijo cíclico extendido y HARQ.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE-Advanced para el enlace de bajada con MIMO 8X8.



BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Holma y A. Toscalá, *"LTE-Advanced 3GPP Solution for IMT-Advanced"*, Inglaterra: Wiley, 2012.
- [2] R. ITU-R M.2134, *"Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s)"*, 2008.
- [3] J. Wannstrom, *"LTE-Advanced"*, Junio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>. [Último acceso: Septiembre 2013].
- [4] 3GPP, *"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE Physical Layer General Description"*, TS 36.201, V10.0.0, 2010.
- [5] 3GPP, *"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding"*, TS 36.212, V10.7.0, 2012.
- [6] 3GPP, *"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation"*, TS 36.211, V10.7.0, 2013.
- [7] X. Zhang y X. Zhou, *"LTE- Advanced Air Interface Technology"*, Estados Unidos, 2012.
- [8] I. Akyildiz, D. Gutierrez y E. Chavarria, *"The Evolution to 4G Cellular Systems: LTE-Advanced"*, ScienceDirect, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490710000303>, 2010.
- [9] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Sköld, *"4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband"*, Burlington, 2011.
- [10] H. Wang, C. Rosa y K. Pedersen, *"Performance Analysis of Downlink Inter-band Carrier Aggregation in LTE-Advanced"*, IEEE, 2011.
- [11] 3GPP, *"Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Overall description Stage 2"*, TS 36.300, V10.11.0, 2013.
- [12] R. Agusti, F. Alavarez, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez y O. Sallent, "LTE:



- Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles", España: Fundacion Vodafone, 2010.
- [13] 3GPP, "*Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)*", TR 36.912, V10.0.0, 2011.
- [14] 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), User Equipment (UE) radio access capabilities*", TS 36.306, V10.11.0 , 2014.
- [15] S. Sesia, I. Toufik y M. Baker, "*LTE - The UMTS Long Tern Evolution From Theory to Practice*", Wiley, 2011.
- [16] J. F. Restrepo, "Análisis y estudio técnico de la transferencia de tecnologia para la prestación de servicios de telefonia Banda ancha móvil en Colombia a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnologia LTE", Bogotá DC: Tesis de Maestria, Ingenieria Electronica y Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [17] R. ITU-R, "Epecificaciones detalladas de las Interfaces Radioeléctricas Terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas (IMT-Advanced)", M.2012, Ginebra, 2012.
- [18] S. Sesia, I. Toufik y B. Matthew, "*LTE - The UMTS Long Term Evolution From Theory to Pactice*", John Wiley & Sons, 2011.
- [19] 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*", TS 36.213, V10.11.0, 2013.
- [20] F. Khan, "*LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance*", Cambridge University Press, 2009.
- [21] J. Zúñiga y F. Córdoba, "Análisis de Desempeño a Nivel Físico del enlace de Bajada de LTE", Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, 2013.
- [22] K. Fazel y S. Kaiser, "*Multi-Carrier Spread Spectrum Systems*", Wiley, 2008.
- [23] 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base Station, Radio Transmission and Reception*", TS 36.104, V 10.11.0, 2013.
- [24] O. M. Ülgen, "*Simulation Methodology - A Practitioner's Perspective*",



Universidad de Michigan - Dearborn: MI, 2006.

[25] V. Wojcik, "*Steps in Simulation and Model Building*", Canada Ontario, 2003.

[26] M. Jeruchim, P. Balaban y S. Shanmugan, "*Simulation of Communication Systems, Modeling, Methodology and Techniques*", Segunda Edición, 2002.

[27] 3GPP, "*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*", TS 36.101, V10.15.0, 2014.



APENDICE A

Figura A.1. Ventana de Bienvenida.....	83
Figura A.2. Ventana de Elección de Tarea.....	83
Figura A.3. Pantalla de Ejemplo Abierto.....	84
Figura A.4. Selección del área de Trabajo.	85
Figura A.5. Área de Trabajo.	85
Figura A.6. Propiedades del Transmisor, Pestaña sistema.	86
Figura A.7. Propiedades del Transmisor, Pestaña MIMO (PDSCH).	87
Figura A.8. Propiedades del Transmisor, Pestaña canal de control.	87
Figura A.9. Propiedades del Transmisor, Pestaña de Asignación de Bloques de Recurso (PDSCH).....	88
Figura A.10. Propiedades del Transmisor, Pestaña de Potencia.....	89
Figura A.11. Propiedades del Transmisor, Pestaña Conformación del Espectro..	89
Figura A.12. Propiedades del Transmisor, Pestaña de Resumen.	90
Figura A.13. Propiedades del Canal.....	91
Figura A.14. Propiedades del Receptor.....	92
Figura A.15. Propiedades del Receptor, Pestaña de Algoritmo de Recepción.	92
Figura A.16. Propiedades del Bloque de la Medida de Throughput.....	93
Figura A.17. Propiedades del Bloque de Medida de BER.	94



Agilent Technologies

Manual de usuario Agilent System Vue™ 2013.01

Electronic System-Level (ESL) Design Software.

A.1. INTRODUCCION

SystemVue® de *Agilent Technologies*® es una herramienta de simulación que ofrece un ambiente para el diseño y verificación de sistemas de telecomunicaciones a nivel físico por medio de bloques funcionales, los cuales se pueden configurar al hacer clic sobre ellos; el siguiente manual ofrece una ilustración práctica para la configuración y medida de desempeño en un sistema de telecomunicaciones usando dicha herramienta.

A.2. ARRANQUE EN SYSTEMVUE

Al iniciar *SystemVue* se despliega la ventana de bienvenida que se muestra en la Figura A.1, en la cual podemos encontrar novedades de la versión de la herramienta, un video tutorial y otros videos que dan accesoria sobre algunas de las temáticas que aparecen en la ventana, además de la ayuda, en la cual se encuentra: la guía de programadores, guía de usuario, tutoriales, catálogo de partes y ejemplos.

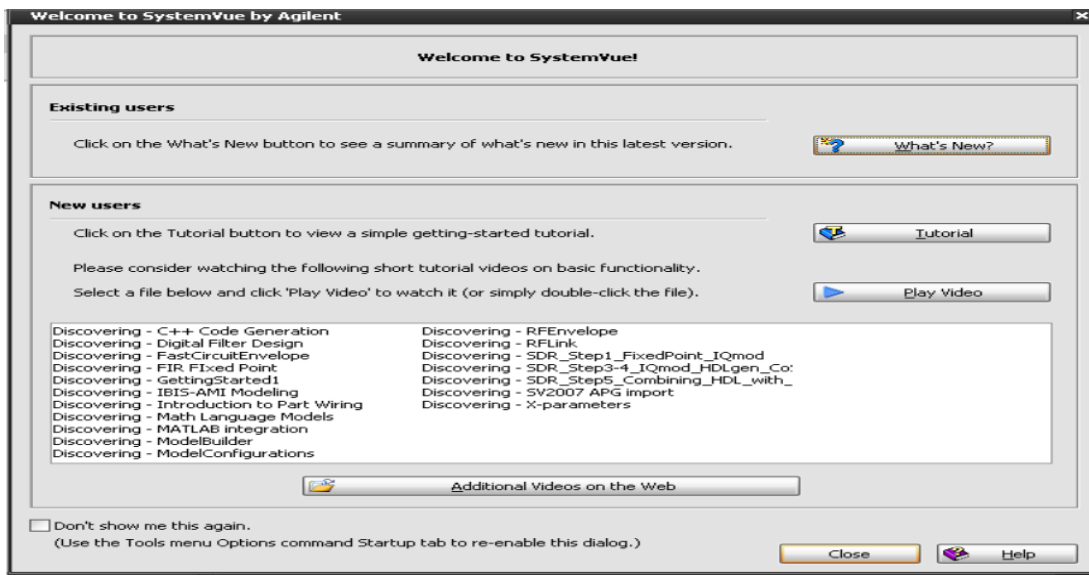


Figura A.1. Ventana de Bienvenida.

Al dar clic en cerrar a la ventana de bienvenida, se presenta la ventana de elección de tarea que muestra la Figura A.2, en esta se puede seleccionar entre abrir un espacio de trabajo nuevo, uno guardado o un ejemplo.

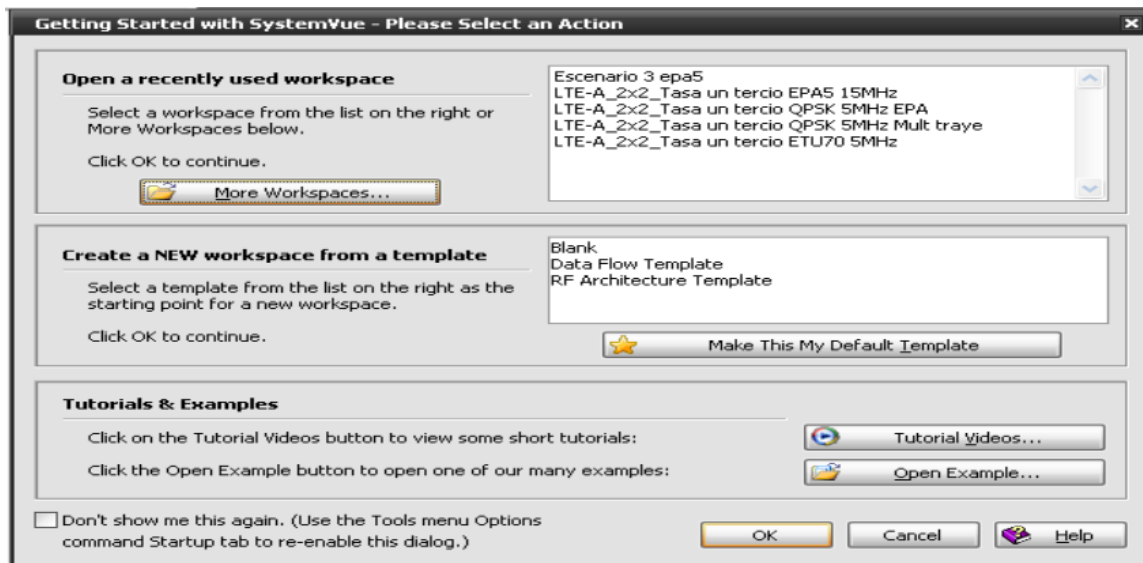


Figura A.2. Ventana de Elección de Tarea.



Al elegir alguna de las anteriores opciones se despliega el área de trabajo que muestra Figura A.3, al lado izquierdo de la pantalla se encuentra el árbol del espacio de trabajo, al lado derecho se muestran los bloques funcionales que se pueden seleccionar para el diseño del sistema a simular, en el centro de la pantalla se encuentran cuatro ventanas las cuales están distribuidas así: en la parte superior, el entorno de trabajo y en la parte inferior los resultados tabulados y en gráficas.

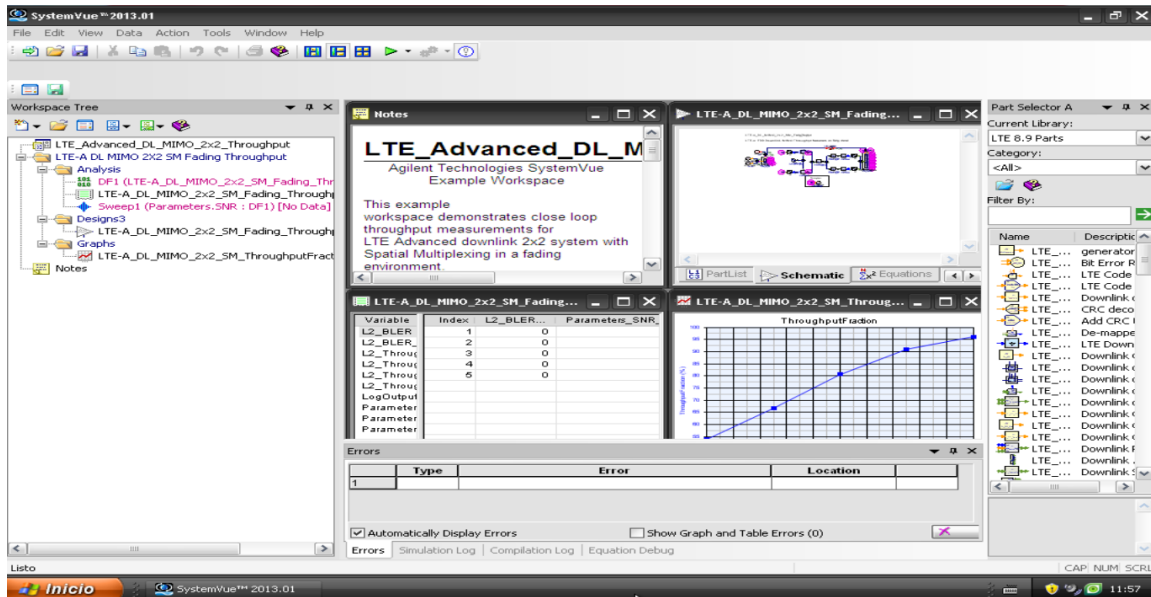


Figura A.3. Pantalla de Ejemplo Abierto.

Al hacer clic en la parte resaltado con el recuadro rojo que muestra la Figura A.4, se despliega en la pantalla el área de trabajo que se ilustra en la Figura A.5, en donde se ubican y configuran los bloques funcionales.

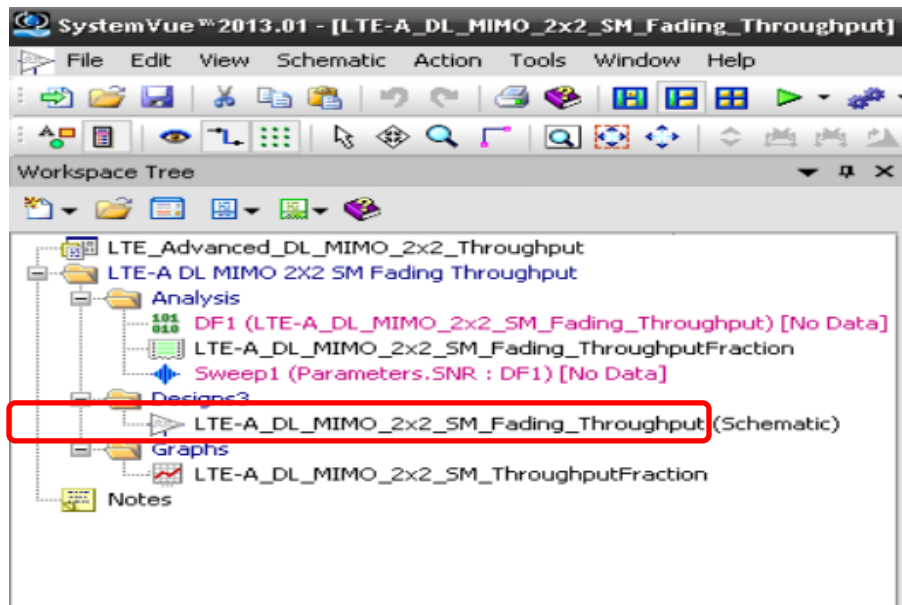


Figura A.4. Selección del área de Trabajo.

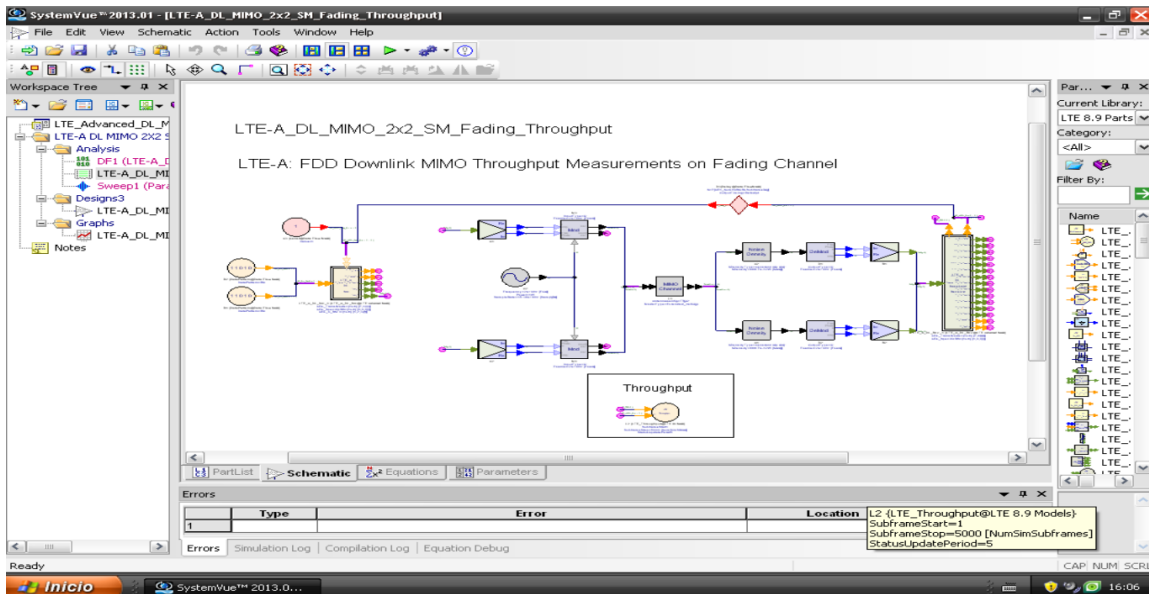


Figura A.5. Área de Trabajo.

La Figura A.5, muestra uno de los ejemplos de verificación en banda base de LTE-Advanced.



A.3. CONFIGURACION DEL SISTEMA

A.3.1. Transmisor

La Figura A.6 muestra la ventana de propiedades del transmisor con la pestaña sistema desplegada, en esta se configura el modo de trama, tipo de asignación de bloques de recursos, ancho de banda, identificación de la celda, numero de antenas transmisoras, puertos de antena, modo de transmisión, mapeo de antenas, selección de antena para transmitir las señales de sincronización.

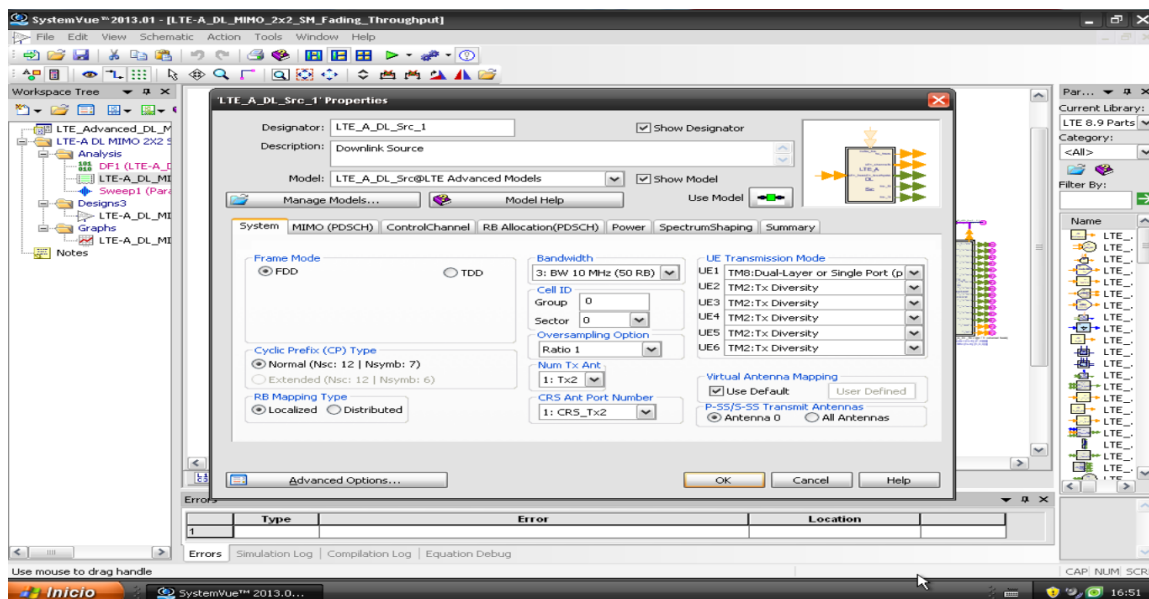


Figura A.6. Propiedades del Transmisor, Pestaña sistema.

Al desplegar la pestaña MIMO (PDSCH) como muestra la Figura A.7, se puede configurar el modo de MIMO, numero de capas y palabras código.

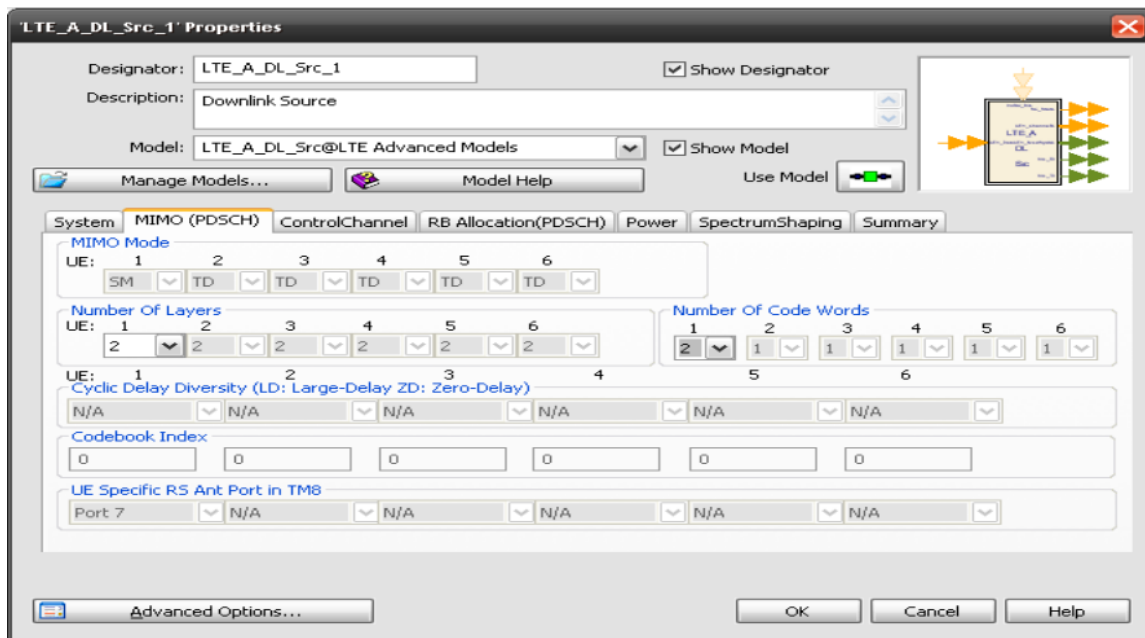


Figura A.7. Propiedades del Transmisor, Pestaña MIMO (PDSCH).

La Figura A.8 muestra las opciones de la pestaña de canal de control, donde se selecciona el número de símbolos de control en el canal PDCCH, la duración del PHICH y los grupos de sub-portadoras.

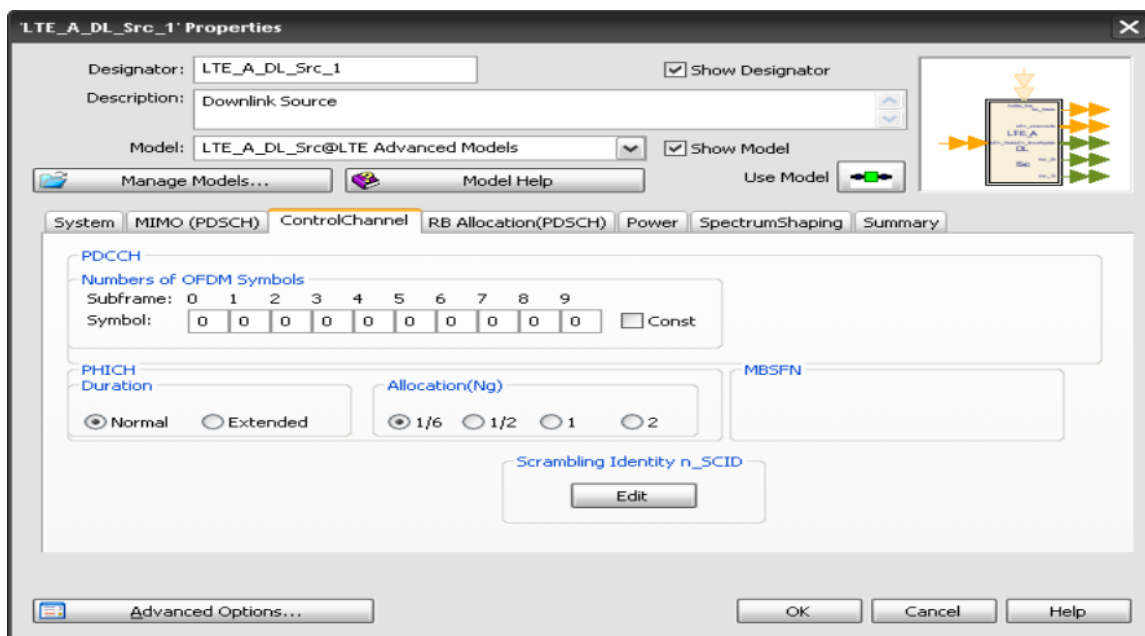


Figura A.8. Propiedades del Transmisor, Pestaña canal de control.



La configuración de HARQ, categoría del dispositivo, la carga, esquema de modulación y asignación de bloques de recursos se realiza en la pestaña de asignación de bloques de cursos (PDSCH), como se muestra en la Figura A.9.

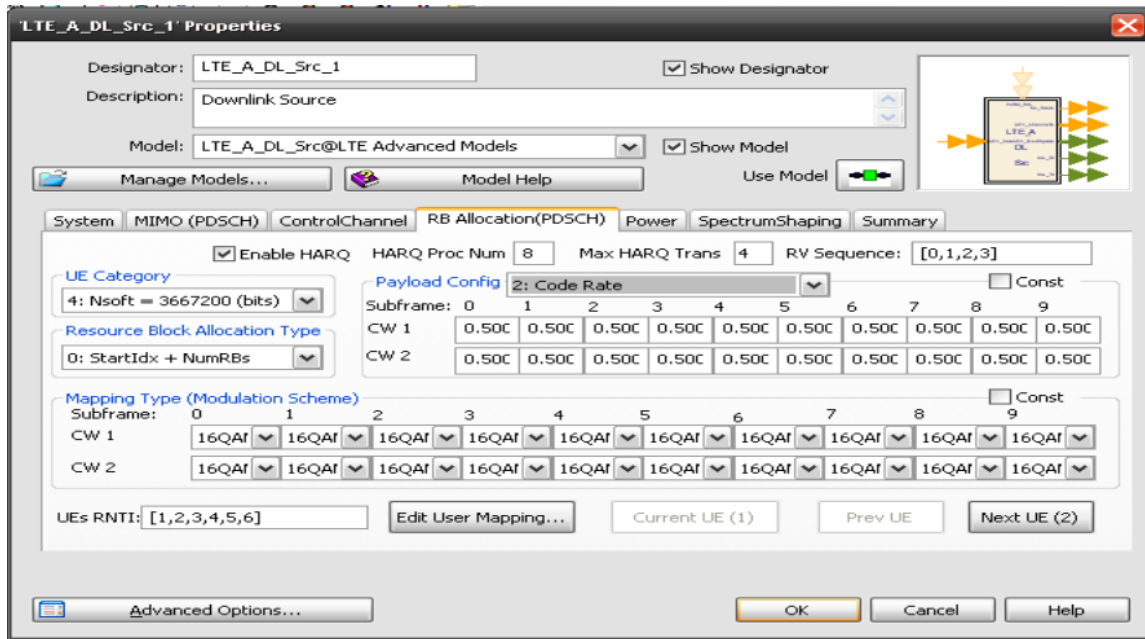


Figura A.9. Propiedades del Transmisor, Pestaña de Asignación de Bloques de Recurso (PDSCH).

La Figura A.10 muestra la pestaña de potencia donde se configura este parámetro para las diferentes señales de control.

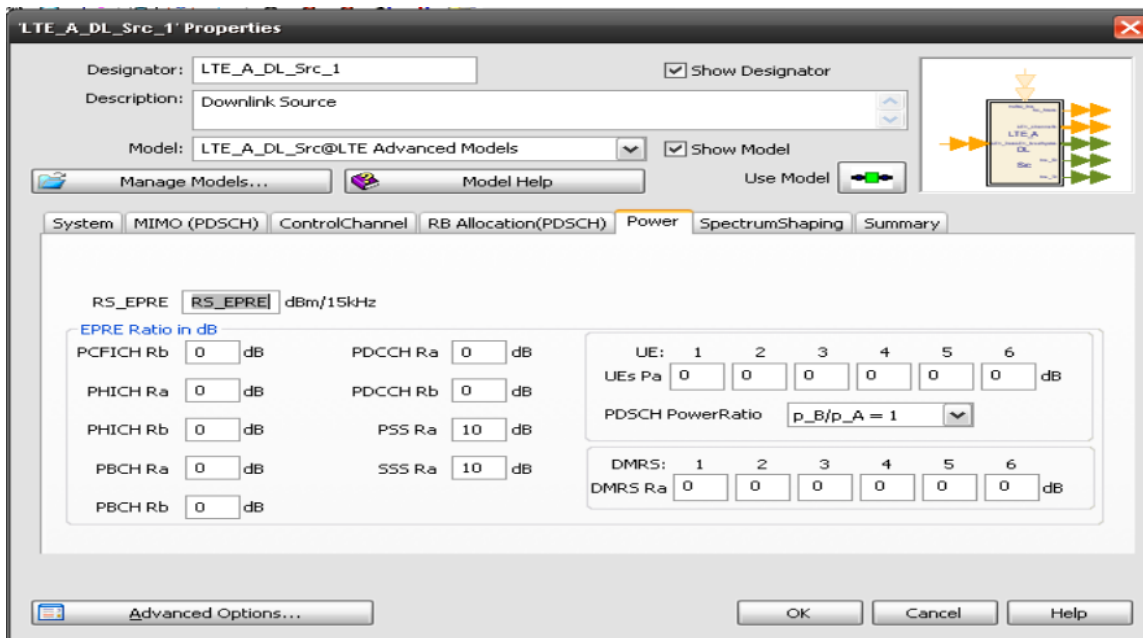


Figura A.10. Propiedades del Transmisor, Pestaña de Potencia.

En la pestaña conformación del espectro, se realiza la configuración del mismo, teniendo en cuenta las opciones que se muestran en la Figura A.11.

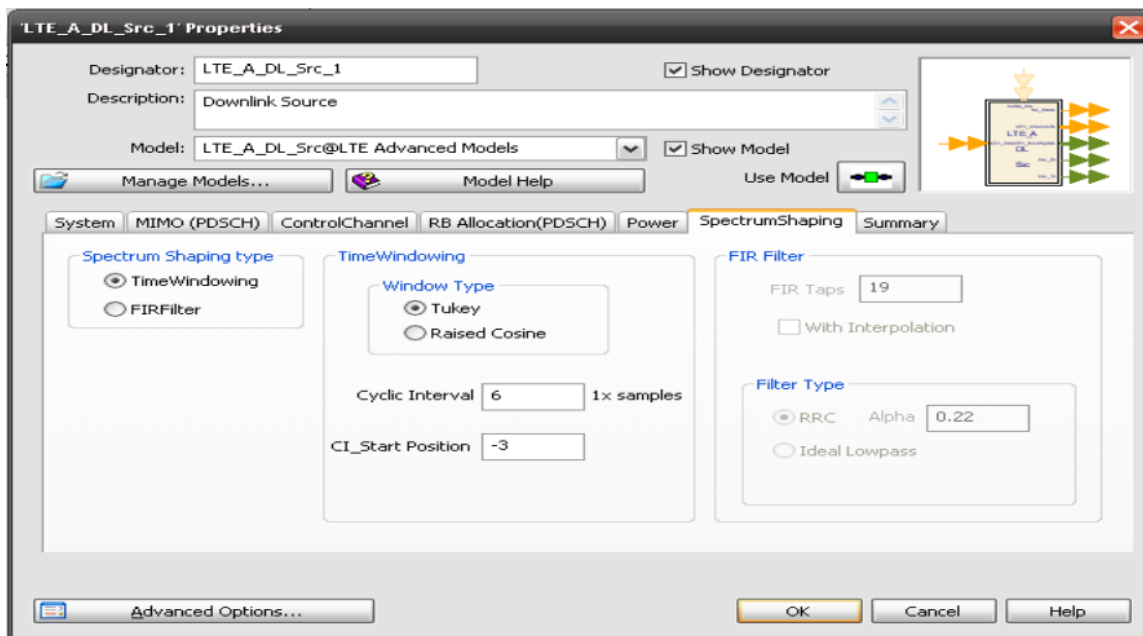


Figura A.11. Propiedades del Transmisor, Pestaña Conformación del Espectro.



En la pestaña de resumen se presentan las tramas y la respectiva asignación de bloques de recurso mediante el grafico que muestra la Figura A.12.

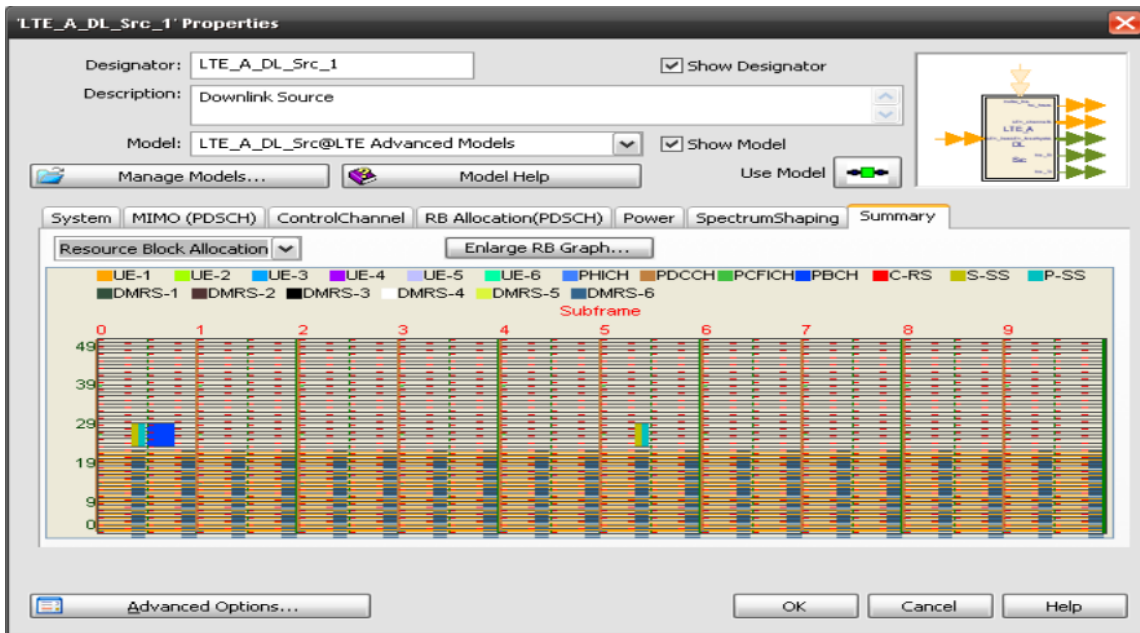


Figura A.12. Propiedades del Transmisor, Pestaña de Resumen.

A.3.2. El Canal

La configuración del canal se realiza mediante la interfaz que muestra la Figura A.13, en donde se establecen, el número de antenas, el tipo de correlación entre ellas, el modelo de canal (EPA, EVA, ETU) y la velocidad del dispositivo.

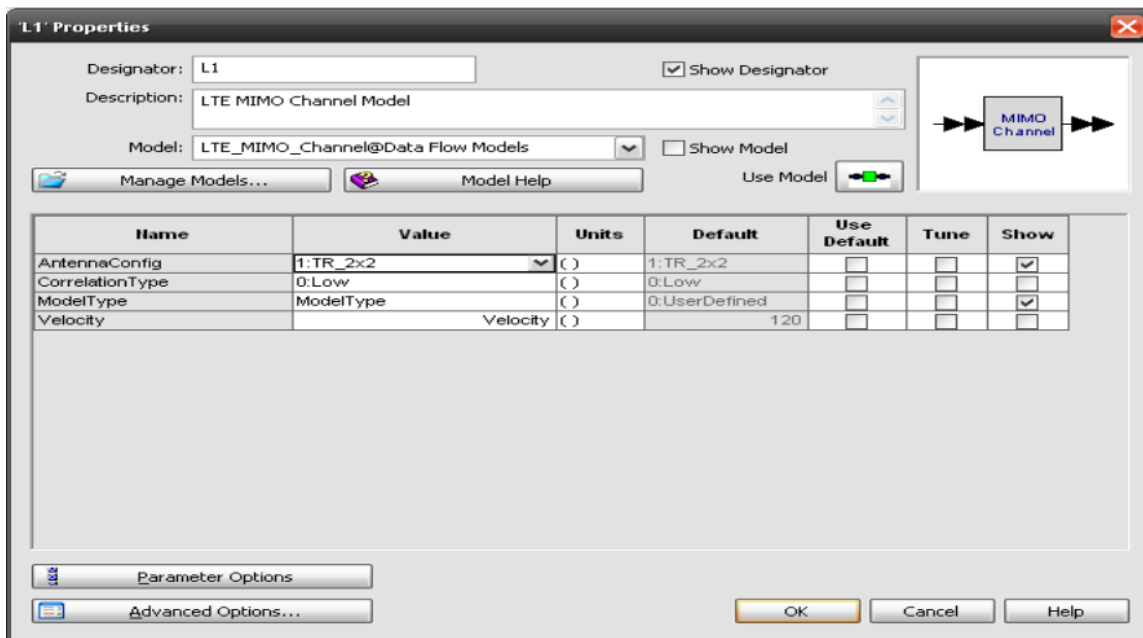


Figura A.13. Propiedades del Canal.

A.3.3. El Receptor

Las propiedades del receptor se presentan en la Figura A.14, en donde es necesario realizar la misma configuración que se tuvo en cuenta en el transmisor en las pestañas de: sistema, MIMO (PDSCH), canal de control, asignación de bloques de recurso y potencia, adicionalmente en el receptor se presenta la pestaña algoritmo de recepción, como se muestra la Figura A.15 en la cual se presentan los parametros de modo de sincronizacion, tipo de demodulacion, algoritmo de interpolacion y decodificacion de MIMO.

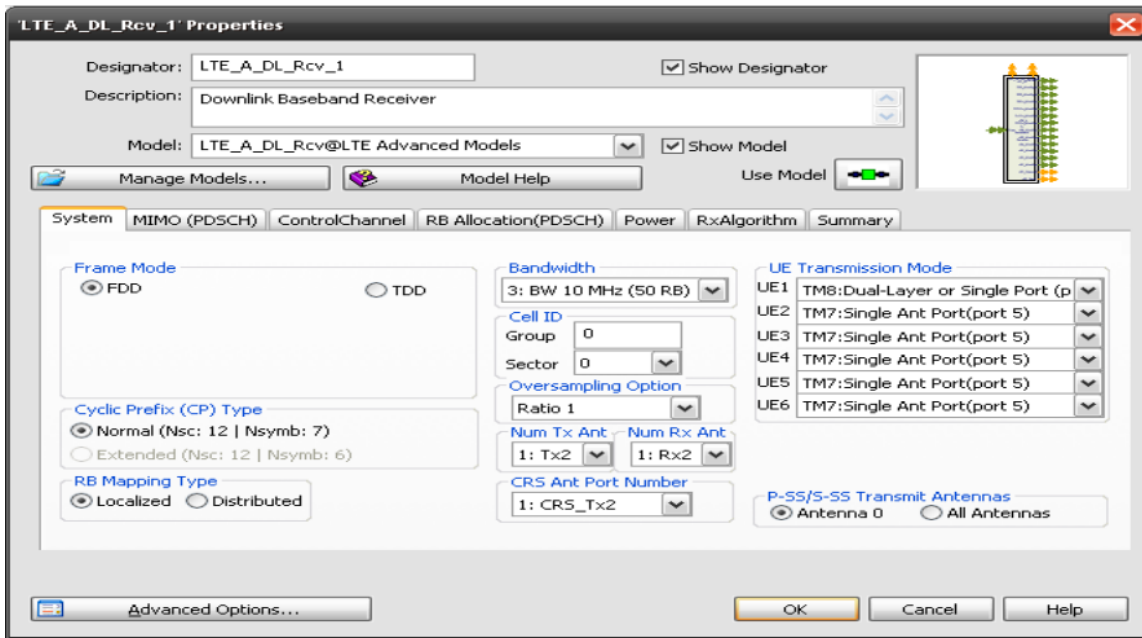


Figura A.14. Propiedades del Receptor.

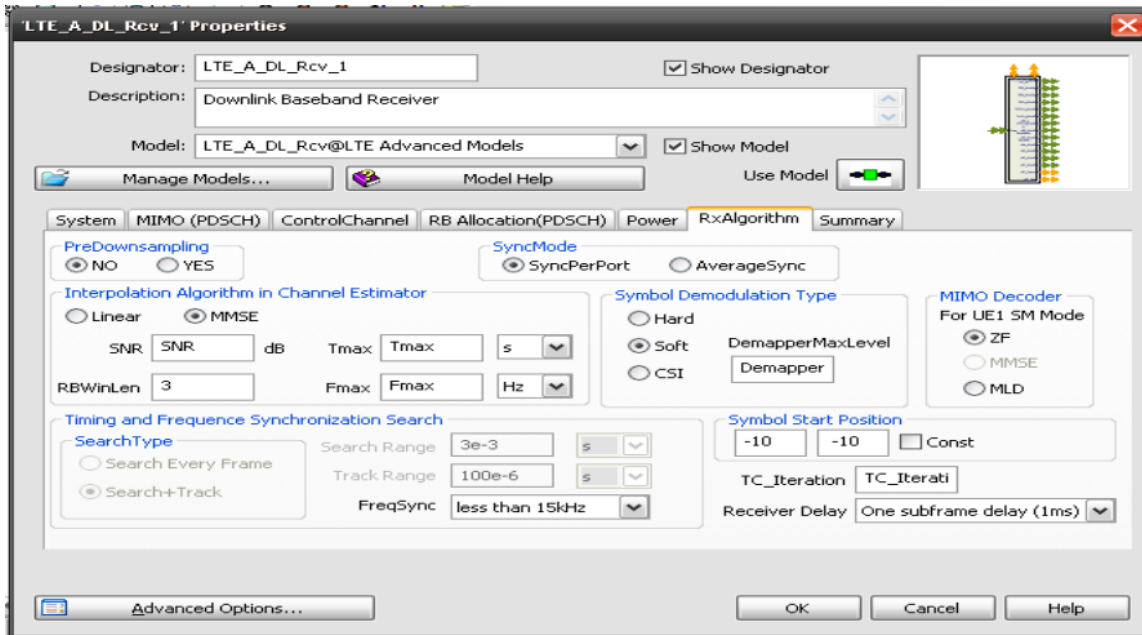


Figura A.15. Propiedades del Receptor, Pestaña de Algoritmo de Recepción.



A.4. CONFIGURACION DE MEDIDAS DE DESEMPEÑO

Para medir el *Throughput*, se configura la interfaz que presenta la Figura A.16 donde se establece el rango de sub-tramas a las cuales se les va a medir el *throughput*.

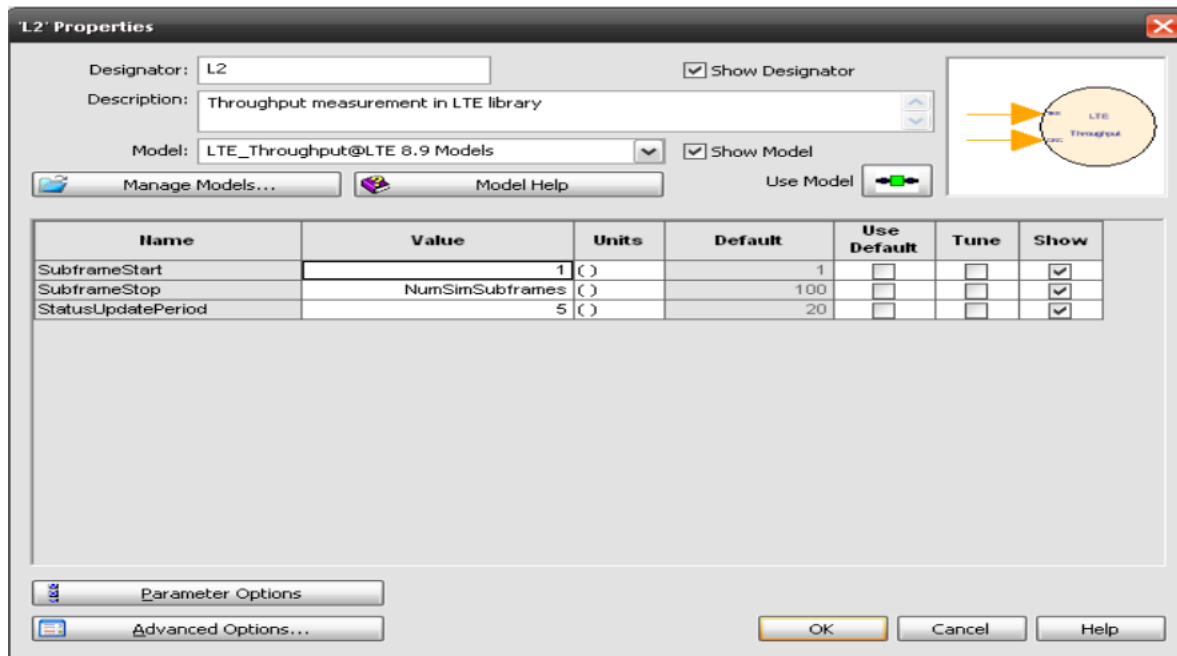


Figura A.16. Propiedades del Bloque de la Medida de Throughput.

Para realizar la medida de BER se configuran los parámetros de transmisión que muestra la interfaz de la Figura A.17, los cuales son: dirección del enlace, el modo de transmisión, la carga, esquema de modulación, número de antenas transmisoras, ancho de banda, la asignación de los bloques de recurso, retardo de trama, a partir de que sub-trama se empieza a medir y en cual se acaba la medida de BER.

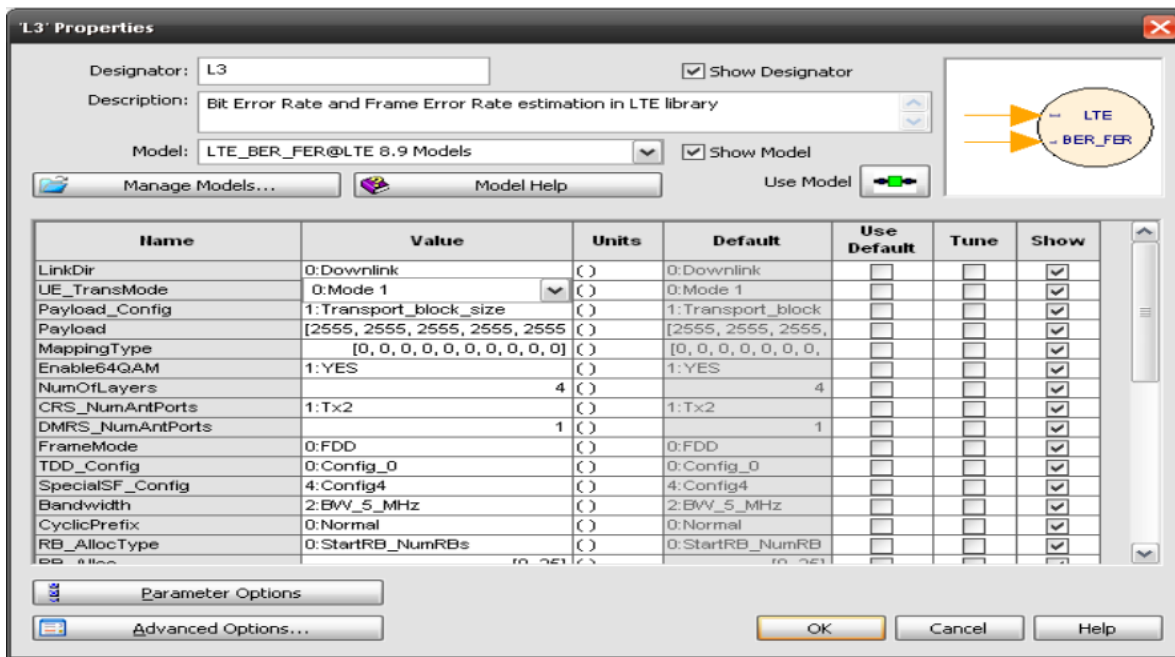


Figura A.17. Propiedades del Bloque de Medida de BER.

A.5. AYUDAS ON-LINE

- <https://www.youtube.com/watch?v=rkJJdg8Zwso>
- <https://www.youtube.com/watch?v=4xp0PcOvy8g&list=PLDE850A159DC74CB0&index=1>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ho8vZM-H8dY>
- <https://www.youtube.com/watch?v=1HXktjNvJT0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=MvBLuqTryy0&list=PLDE850A159DC74CB0&index=32>