

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FISICO DEL ENLACE DE BAJADA DE  
LTE CON MIMO**



**Soraya Patricia Paredes Cerón  
Jhonnier Alberto Sánchez Dorado**

*Universidad del Cauca*  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT  
Popayán  
2015**

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FISICO DEL ENLACE DE BAJADA DE  
LTE CON MIMO**



**Soraya Patricia Paredes Cerón  
Jhonnier Alberto Sánchez Dorado**

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

**Directora:**

**Ing. Claudia Milena Hernández Bonilla**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT  
Popayán  
2015**

# Agradecimientos

A mi Padre Dios, quien me dio la inspiración y fortaleza para superar toda dificultad y llevar a buen término este trabajo, quien me ha guiado para lograr todas las metas que alguna vez creí imposibles, pero que hoy, gracias a sus bendiciones y amor inigualable se hacen realidad. A mi madre Isabel Dorado quien con su esfuerzo, amor, confianza y apoyo incondicional hizo posible esta meta. A mis hermanas, Andrea Albornoz Dorado y Carolina Sánchez Dorado, por su constante apoyo y motivación. A mi compañera de camino Susana Bonilla, quien estuvo en los momentos difíciles y que con su esfuerzo y motivación me ayudó a no rendirme y a cumplir este logro. A Claudia Milena Hernández, por la orientación en todo este proceso. A mis amigos y compañeros de carrera, testigos del esfuerzo, por su amistad y compañerismo, por todos los gratos momentos vividos. Finalmente a mis maestros, aquellos que marcaron cada etapa de mi camino universitario para formarme como profesional.

*Jhonnier Alberto Sánchez Dorado*

Agradezco a Dios por permitir este logro y ver su presencia, en el apoyo, el amor incondicional de mi madre. A mi familia por ser mi inspiración, a mi compañero por su compromiso y consolidar esta gran meta. Para ti mi María Belén y Andrés con todo mi amor.

*Soraya Patricia Paredes Cerón*

# CONTENIDO

Capítulo 1 .....	1
1      PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO .....	1
1.1    INTRODUCCIÓN AL ENLACE DE BAJADA DE LTE CON MIMO.....	1
1.2    MOTIVACIÓN .....	2
1.3    OBJETIVOS.....	2
1.3.1    Objetivo General .....	2
1.3.2    Objetivos Específicos .....	2
1.4    ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO.....	3
Capítulo 2 .....	5
2      FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	5
2.1    INTRODUCCIÓN .....	5
2.2    TECNOLOGÍA DE EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO .....	6
2.2.1    Aspectos generales de LTE .....	6
2.2.2    Frecuencias LTE .....	8
2.2.3    Arquitectura general de LTE.....	8
2.2.4    Red de acceso evolucionada E-UTRAN.....	12
2.2.5    Interfaz radio LTE.....	13
2.2.6    Procesamiento hacia la capa física de la Interfaz radio en el enlace de bajada 20	
2.2.7    Capa física de la Interfaz radio.....	26
2.2.8    Métricas de evaluación del sistema .....	36
2.3    TÉCNICA MULTI-ANTENA MIMO.....	38
2.3.1    Aspectos generales de las técnicas multi-antena .....	38
2.3.2    Tipos de ganancia en los sistemas MIMO .....	39
2.3.3    Formulación de las estructuras MIMO .....	40
2.3.4    Capacidad MIMO .....	42
2.3.5    Procesamiento general de la capa física .....	42
2.3.6    Canal de comunicación .....	47
Capítulo 3 .....	51

3	ADAPTACIÓN Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MODELADO Y SIMULACIÓN .....	51
3.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	51
3.2	DISEÑO DE ESTUDIO.....	52
3.3	MODELO CONCEPTUAL .....	54
3.3.1	En el transmisor .....	54
3.3.2	En el Canal.....	55
3.3.3	En Recepción.....	55
3.4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	56
Capítulo 4	.....	57
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	57
4.1	INTRODUCCIÓN .....	57
4.2	ESCENARIO 1 .....	57
4.2.1	Análisis de la BER.....	58
4.2.2	Análisis de la BLER.....	60
4.2.3	Análisis del <i>Throughput</i> .....	61
4.3	ESCENARIO 2 .....	64
4.3.1	Análisis de la BER modulación 16QAM.....	65
4.3.2	Análisis de la BLER modulación 16QAM.....	67
4.3.3	Análisis del <i>Throughput</i> , modulación 16QAM.....	68
4.3.4	Análisis de la BER modulación 64QAM.....	69
4.3.5	Análisis de la BLER, modulación 64QAM.....	71
4.3.6	Análisis del <i>Throughput</i> , modulación 64QAM.....	72
4.4	ESCENARIO 3.....	74
4.4.1	Análisis de BER con ancho de banda de 15MHz.....	75
4.4.2	Análisis de la BLER, ancho de banda 15 MHz .....	77
4.4.3	Análisis Del <i>Throughput</i> Ancho De Banda 15 MHz.....	78
4.4.4	Análisis De La BER, Ancho De Banda 20 MHz .....	79
4.4.5	Análisis De La BLER, ancho de banda 20 MHz.....	80
4.4.6	Análisis del <i>Throughput</i> , ancho de banda 20 MHz.....	81
4.5	ESCENARIO 4.....	82
4.5.1	Análisis de la BER, ancho de banda 15MHz y 20MHz.....	83

4.5.2	Análisis de la BLER, ancho de banda 15MHz y 20MHz.....	84
4.5.3	Análisis del <i>throughput</i> , ancho de banda 15MHz y 20MHz.....	85
Capítulo 5	.....	87
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	87
5.1	CONCLUSIONES .....	87
5.2	TRABAJOS FUTUROS .....	88
REFERENCIAS	.....	89

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Dominios de circuitos y de paquetes.....	6
Figura 2.2 Arquitectura a alto nivel de un sistema LTE .....	9
Figura 2.3 Torre de protocolos de la interfaz aire del sistema LTE.....	14
Figura 2.4 Mapeo de los canales físicos a las capas más altas .....	20
Figura 2.5 Esquema simplificado de codificación de canal en LTE .....	21
Figura 2.6 Codificador convolucional con tasa de 1/3 .....	23
Figura 2.7 Esquema básico de un Codificador Convolucional.....	25
Figura 2.8 Ejemplo del espectro para 6 subportadoras .....	27
Figura 2.9 Esquema general de inserción de prefijo cíclico .....	28
Figura 2.10 Proceso Transmisor y receptor OFDM.....	29
Figura 2.11 Esquema general de SC-FDMA.....	31
Figura 2.12 Estructura de trama tipo 1.....	33
Figura 2.13 Estructura de trama Tipo 2.....	34
Figura 2.14 Recursos de Transmisión de LTE .....	34
Figura 2.15 Diagramas de constelación.....	36
Figura 2.16 Representación general de modos de acceso .....	38
Figura 2.17 Modelo simplificado de un sistema MIMO .....	41
Figura 2.18 Procesamiento general de la capa física.....	43
Figura 2.19 Mapeo de capas de una palabra código (CW, Codeword) para dos y cuatro puertos de antena.....	45
Figura 2.20 Mimo con precodificación.....	45
Figura 3.1 Metodología de Simulación.....	51
Figura 3.2 Diseño de estudio global.....	54
Figura 3.3 Esquema general del enlace de bajada LTE .....	54
Figura 3.4 Proceso en el transmisor LTE con MIMO.....	55
Figura 3.5 Proceso en el receptor LTE .....	56
Figura 3.6 Diseño del modelo de simulación en SystemVue®.....	56
Figura 4.1 Gráfica BER vs SNR, con diferentes tasas de codificación .....	58

Figura 4.2 Gráfica BER vs SNR, con diferentes tasas de codificación .....	59
Figura 4.3 Gráfica BLER vs SNR, con diferentes tasas de codificación .....	60
Figura 4.4 Gráfica BLER vs SNR, con diferentes tasas de codificación .....	61
Figura 4.5 Gráfica <i>throughput</i> vs SNR, con diferentes tasas de codificación .....	62
Figura 4.6 Gráfica <i>throughput</i> vs SNR, con diferentes tasas de codificación .....	63
Figura 4.7 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto .....	65
Figura 4.8 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto .....	66
Figura 4.9 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto .....	67
Figura 4.10 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto .....	67
Figura 4.11 Gráfica <i>throughput</i> vs SNR para diferentes canales multitrayecto, con MIMO 2X2.....	68
Figura 4.12 Gráfica <i>throughput</i> vs SNR para diferentes canales multitrayecto con MIMO 4X4.....	69
Figura 4.13 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 2X2 .....	70
Figura 4.14 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 4X4 .....	71
Figura 4.15 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 2X2.....	71
Figura 4.16 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 4X4.....	72
Figura 4.17 Gráfica <i>throughput</i> vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 2X2 .....	73
Figura 4.18 Gráfica <i>throughput</i> vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 4X4 .....	74
Figura 4.19 BER vs SNR Escenario 3.....	76
Figura 4.20 BLER vs SNR para el escenario 3 .....	77
Figura 4.21 <i>Throughput</i> vs SNR escenario 3 .....	78
Figura 4.22 BER vs SNR escenario 3.....	80
Figura 4.23 BLER vs SNR para el escenario 3 .....	81
Figura 4.24 <i>Throughput</i> vs SNR escenario 3 .....	82
Figura 4.25 BER vs SNR escenario 4 .....	84
Figura 4.26 BLER vs SNR escenario 4 .....	85
Figura 4.27 <i>Throughput</i> vs SNR escenario 4 .....	86

# LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Evolución de las especificaciones de UTMS .....	7
Tabla 2.2 Espectro radioeléctrico en Colombia .....	8
Tabla 2.3 Modos de operación del canal PDSCH .....	19
Tabla 2.4 Bloques de Recursos según Ancho de Banda .....	35
Tabla 2.5 Perfiles de retardo de propagación para los modelos de canal LTE <sup>27</sup> .....	48
Tabla 2.6 Escenarios de propagación para los modelos de canal LTE Peatonal, Vehicular y Urbano típico.....	49
Tabla 2.7 Frecuencias Doppler definidas por LTE para los modelos de canal <sup>27</sup> .....	49
Tabla 3.1 Escenario de simulación 1 .....	52
Tabla 3.2 Escenario de simulación 2 .....	53
Tabla 3.3 Escenario de simulación 3 .....	53
Tabla 3.4 Escenario de simulación 4 .....	53
Tabla 4.1 Parámetros de configuración escenario 1 .....	57
Tabla 4.2 Parámetros de configuración con modulación 16QAM.....	64
Tabla 4.3 Parámetros de configuración con modulación 16QAM.....	64
Tabla 4.4 Parámetros de configuración para el escenario 3.....	75
Tabla 4.5 Valores obtenidos con los parámetros del escenario 3 .....	75
Tabla 4.6 SNR, BER, BLER, THROUGHPUT escenario 3.....	79
Tabla 4.7 Configuración de parámetros para el escenario 4 .....	83
Tabla 4.8 SNR, BER, BLER, <i>Throughput</i> para escenario 4.....	83

# LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>16 QAM</b>	<i>16 Quadrature Amplitude Modulation,</i> Modulación en Amplitud y Cuadratura de 16 niveles.
<b>3G</b>	<i>3rd Generation,</i> Tercera Generación.
<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project,</i> Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación.
<b>4G</b>	<i>4th Generation,</i> Cuarta Generación.
<b>64 QAM</b>	<i>64 Quadrature Amplitude Modulation,</i> Modulación en Amplitud y Cuadratura de 64 niveles.
<b>AWS</b>	<i>Advanced Wireless Services,</i> servicios inalámbricos avanzados.
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate,</i> Tasa de Error de Bit.
<b>BLER</b>	<i>Block Error Rate,</i> Tasa de Error de Bloque.
<b>BS</b>	<i>Base Station,</i> Estación Base.
<b>CP</b>	<i>Cyclic Prefix,</i> Prefijo Cíclico.
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check,</i> Chequeo de Redundancia Cíclico.
<b>CQI</b>	<i>Channel Quality Indication,</i> Indicador de Calidad del Canal.
<b>DwPTS</b>	<i>Downlink Pilot Time Slot,</i> Intervalo de Tiempo Piloto del Enlace de Bajada.
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access,</i> Acceso Radio Universal Terrestre Evolucionado.

<b>EPA</b>	<i>Extended Peatonal A,</i> Peatonal Extendido A.
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i> Núcleo de Paquetes Evolucionado.
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System,</i> Sistema de Paquetes Evolucionado.
<b>ETU</b>	<i>Extended Typical Urban,</i> Urbano Típico Extendido,
<b>EVA</b>	<i>Extended Vehicular A,</i> Vehicular Extendido A.
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplexing,</i> Duplexación por División de Frecuencia.
<b>HARQ</b>	<i>Hybrid Autimatic Repeat reQuest,</i> Hibrido de Petición de Repetición Automática.
<b>HSS</b>	<i>Home Subscriber Servise,</i> Servidor de Suscriptor Local.
<b>IDFT</b>	<i>Inverse Discrete Fourier Transform,</i> Transformada Inversa de Fourier Discreta.
<b>IFFT</b>	<i>Inverse Fast Fourier Transform,</i> Transformada Inversa de Fourier Rápida.
<b>IMS</b>	<i>IP Multimedia Subsystem,</i> Subsistema Multimedia IP.
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol,</i> Protocolo de Internet.
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union,</i> Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution,</i> Evolución a Largo Término.
<b>MCS</b>	<i>Modulation and Coding Schemes,</i> Esquemas de Modulación y Codificación.
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output,</i> Múltiples Entradas Múltiples Salidas.

<b>MISO</b>	<i>Multiple Input Single Output,</i> Múltiples Entradas Única Salida.
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity,</i> Entidad de Gestión de Movilidad.
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing,</i> Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access,</i> Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>PDSCH</b>	<i>Physical Downlink Shared Channel,</i> Canal Físico Compartido en el Enlace de Bajada.
<b>P-GW</b>	<i>Packet Data Serving Gateway,</i> Pasarela de Servicio de Paquetes de Datos.
<b>PMI</b>	<i>Precoding Matrix Indicator,</i> Indicador de Matriz de Precodificación.
<b>PRB</b>	<i>Physical Resource Block,</i> Bloque de Recurso Físico.
<b>PUCCH</b>	<i>Physical Uplink Control Channel,</i> Canal Físico de Control en el Enlace de Subida.
<b>PUSCH</b>	<i>Physical Uplink Shared Channel,</i> Canal Físico Compartido en el Enlace de Subida.
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitud Modulation,</i> Modulación de Amplitud y Cuadratura.
<b>QoS</b>	Quality of Service, Calidad de Servicio.
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying,</i> Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network,</i> Red de Acceso Radio.
<b>RB</b>	<i>Resource Block,</i> Bloque de Recurso.
<b>RI</b>	<i>Rank Indicator,</i> Indicador de Rango.

<b>RS</b>	<i>Reference Signal,</i> Señal de Referencia.
<b>RSC</b>	<i>Recursive Systematic Convolutional,</i> Codificadores Convolucionales Sistemáticos Recursivos.
<b>SAE</b>	<i>System Architecture Evolution,</i> Evolución de la Arquitectura del Sistema.
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access,</i> Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única.
<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway,</i> Pasarela de Servicio.
<b>SIM</b>	<i>Suscriber Identity Module,</i> Módulo de Identidad de Suscriptor.
<b>SISO</b>	<i>Single Input and Single Output,</i> Única Entrada Única Salida.
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio,</i> Relación Señal a Ruido.
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplexing,</i> Duplexación por División de Tiempo.
<b>TTI</b>	<i>Transmission Time Interval,</i> Intervalo de Tiempo de Transmisión.
<b>UE</b>	<i>User Equipment,</i> Equipo de Usuario.
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunicatios System,</i> Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
<b>UpPTS</b>	<i>Uplink Pilot Time Slot,</i> Intervalo de Tiempo Piloto del Enlace de Subida





# Capítulo 1

## 1 PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.1 INTRODUCCIÓN AL ENLACE DE BAJADA DE LTE CON MIMO

La evolución de los sistemas de comunicación móvil celular ha sido un tema de interés desde que se iniciaron los primeros experimentos con radio transmisión a larga distancia en 1890 [1]. Sin embargo, desde la definición formal de sistemas de Tercera Generación (3G, *3rd Generation*) hecha por la Unión Internacional de Telecomunicaciones Sector Radio (ITU-R, *International Telecommunications Union Radiocommunication Sector*) y con el objetivo de crear una entidad de colaboración entre diferentes asociaciones de telecomunicaciones, en 1998 se conformó el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3G Partnership Project*), dentro del cual se inició a trabajar en la definición de una red básica y una arquitectura de servicio para aplicación mundial de especificaciones en tecnologías móviles de 3G [2].

Motivado por la creciente demanda de servicios móviles con mayores velocidades de transmisión de datos y Calidad de Servicio (QoS, *Quality Of Service*), en 2008, 3GPP trabajó en dos proyectos paralelos: Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) y Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*). LTE/SAE, o también conocido como Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*), se basa en la especificación denominada *Release 8* [3], la cual tiene como objetivo definir una arquitectura más plana y sencilla soportada sobre el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), que proporcione alto rendimiento, bajo costo y menor latencia, así como interoperabilidad sin ruptura entre tecnologías de radio acceso diferentes [4].

Dentro del enlace de bajada, LTE utiliza la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*), la cual, entre sus múltiples ventajas, permite alcanzar una mayor velocidad de transmisión o eficiencia espectral, en comparación a redes 3G, gracias a su manejo de diversidad multiusuario [5]. Por otro lado, LTE permite incorporar el uso de sistemas de antenas de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Out*), con el objetivo de alcanzar mayores velocidades de transmisión de datos, entre 150 Mbps y 300 Mbps [6], que dependen directamente de la configuración del esquema MIMO, la modulación, la tasa de codificación y el ancho de banda del canal.

En el presente trabajo de grado, se realiza un estudio del desempeño a nivel físico del enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO, a partir de la configuración de un modelo



de simulación, por medio de la herramienta *SystemVue®* de *Agilent Technologies®*<sup>1</sup>. Tal configuración es realizada considerando diferentes esquemas de modulación, anchos de banda, tasa de codificación de canal para diferentes modelos de canal y modo Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*)

## 1.2 MOTIVACIÓN

En el enlace de bajada del sistema LTE se introduce MIMO en sus diferentes configuraciones, obteniendo una mayor eficiencia espectral lo que a su vez implica mejorar la velocidad de transmisión gracias a la multiplexación de señales para conseguir transportar más datos en un canal determinado. Una manera de evidenciar dicho avance y la integración dentro del sistema, es mostrar a través de simulación el desempeño alcanzado en el enlace de bajada cuando se utiliza MIMO, por lo cual es importante realizar el análisis de las métricas de desempeño a nivel físico entre las cuales se encuentran: relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*), tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*), tasa de error de bloque (BLER, *Block Error Rate*) y el *Throughput*<sup>2</sup>.

Los resultados de este trabajo de grado serán de utilidad para la comunidad académica e investigativa en el área de sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas. Se tendrá, además, un referente y mayor conocimiento sobre el uso de la técnica MIMO y los resultados que trae consigo en el desempeño del sistema. Estos resultados podrán ser socializados dentro de cursos electivos ofrecidos por el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, aportando a la fundamentación y formación de los futuros Ingenieros de esta Facultad.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo General

Analizar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO en modo de Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*).

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar el enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO por medio de la aplicación y adaptación de la Metodología para la Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones.

---

<sup>1</sup> <http://www.agilent.com>

<sup>2</sup> La métrica *Throughput*, corresponde a la cantidad máxima de información permitida a través de un canal por unidad de tiempo sin errores.



- Simular el enlace de bajada de un sistema LTE a nivel físico para los modelos de canal extendido de la ITU, teniendo en cuenta las especificaciones del Release 8 del 3GPP en FDD.
- Evaluar el desempeño a nivel físico<sup>3</sup> del enlace de bajada de un sistema LTE<sup>4</sup> que emplee MIMO 2x2 y 4x4 teniendo en cuenta las especificaciones del *Release 8* del 3GPP en modo FDD.

#### **1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO**

El trabajo de grado está organizado de la siguiente manera:

El capítulo 2, expone las bases teóricas necesarias para la realización de este trabajo. Presenta los conceptos básicos y requerimientos de un sistema LTE, explicando el funcionamiento del enlace de bajada de LTE según lo contemplado en el Release 8. Se muestra una descripción general de la arquitectura de LTE, ahondado en la red de radio acceso y la interfaz radio, como componentes centrales para esta investigación. De igual forma, se presentan aspectos clave de la capa física de la red de radio acceso de LTE, así como conceptos relevantes de modos de radio acceso, sistemas multi-antena MIMO y técnicas de transmisión en el enlace de bajada con MIMO.

En el capítulo 3, se presenta la metodología de desarrollo escogida para obtener el modelo de la simulación de este trabajo de grado, analizando aspectos como la definición del sistema, formulación del modelo, selección de la herramienta de simulación.

En el capítulo 4, se evalúa y analiza el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE con MIMO en los escenarios de simulación planteados, adicionalmente se realiza una comparación del desempeño entre la configuración de MIMO y un sistema SISO.

En el capítulo 5, se establecen las conclusiones del trabajo de grado y las líneas futuras.

---

<sup>3</sup> Las métricas de evaluación del desempeño a nivel físico estarán en función de la BER, BLER, *Throughput* y SNR.

<sup>4</sup> LTE está definido para trabajar con modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM codificación de canal turbo 1/3, adaptación dinámica de enlace y ancho de banda flexible.





## Capítulo 2

### 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo y acelerado en el uso de dispositivos inalámbricos y el surgimiento de nuevas tecnologías a nivel mundial, ha llevado a las diferentes organizaciones de la industria de comunicaciones móviles a incorporar en sus servicios tecnologías más eficientes que les permitan alcanzar mayor competitividad. En ese sentido, se han presentado diversas propuestas, con el fin de satisfacer la creciente demanda de las comunicaciones inalámbricas, que ahora exigen no sólo manejo de comunicaciones por voz, sino también soporte para acceso a internet de alta velocidad y servicios multimedia de alta calidad, entre otros. Es así como, tras un proceso de varios años, surgen los sistemas de comunicación móvil de Cuarta Generación (4G, *4th Generation*), con una de las tecnologías más recientes dentro de este ámbito, conocida más comúnmente como LTE. Esta tecnología presenta una arquitectura cuyo núcleo está basado en el protocolo IP, permitiendo el escalamiento hacia servicios con soporte para tráfico de datos a altas velocidades, y enfrentando limitaciones propias de sistemas basados en conmutación de circuitos, como la baja eficiencia en las rutas de transmisión de los datos y la incapacidad en el manejo de múltiples sistemas de radio acceso. LTE contempla, además, el uso de sistemas multi-antenas MIMO, con el objetivo de proveer mejor desempeño de la señal y tasas de transmisión de datos más altas, gracias a que supone la adición de una nueva dimensión espacial que puede aprovechar la formación de canales estadísticamente independientes originados por el multi-trayecto, mitigando el efecto del mismo, lo cual incrementaría sustancialmente la eficiencia espectral.

De esta forma, el estudio sobre el comportamiento en los enlaces de subida y de bajada de un sistema LTE, ha captado la atención de varias investigaciones, buscando analizar su desempeño bajo ciertas configuraciones. Es así como algunos trabajos han realizado evaluaciones del sistema a nivel físico, tomando en cuenta, por ejemplo, las variaciones de movilidad en el ambiente de usuario [7], o diversos escenarios de cobertura de antena [8], con el fin de determinar su influencia en la velocidad de transmisión en los canales de subida y bajada. Así mismo, existen investigaciones que se han orientado hacia el análisis de un sistema LTE en acoplamiento con sistemas multi-antena MIMO, algunos apoyándose en el uso también de otras tecnologías de transmisión y recepción [9], y otros realizando un estudio comparativo del desempeño con sistemas mono-antena [10-12].

Similar a varios de los trabajos mencionados y como se presentó en secciones anteriores, en esta investigación se busca analizar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada



de un sistema LTE con MIMO. De esta manera, en este capítulo se exponen las bases teóricas necesarias para la realización de este trabajo. En ese sentido, se presentan los conceptos básicos y requerimientos de un sistema LTE, explicando el funcionamiento del enlace de bajada de LTE según lo contemplado en el Release 8. Se muestra una descripción general de la arquitectura de LTE, ahondado en la red de radio acceso y la interfaz radio, como componentes centrales para esta investigación. De igual forma, se presentan aspectos clave de la capa física de la red de radio acceso de LTE, así como conceptos relevantes de modos de radio acceso, sistemas multi-antena MIMO y técnicas de transmisión en el enlace de bajada con MIMO.

## 2.2 TECNOLOGÍA DE EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO

### 2.2.1 Aspectos generales de LTE

LTE corresponde, en realidad, al nombre de uno de los proyectos emprendidos dentro del 3GPP. Este proyecto, iniciado a finales del 2004, ha tenido como objetivo determinar la evolución a largo término del Sistema Universal de Telefonía Móvil (UMTS, *Universal Mobile Telephone System*)<sup>5</sup> y sus componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante conmutación de paquetes, sin necesidad de algún elemento para el manejo de servicios de circuitos conmutados [5]. En las tecnologías inalámbricas previas a LTE, como el Sistema Global para Móviles (GSM, *Global System for Mobile*) y el Servicio General de Radio Paquetes (GPRS, *General Packet Radio Service*), los servicios de telefonía y mensajería son soportados por el dominio de circuitos, y en GPRS y UMTS se adiciona un dominio de paquetes para el transporte de paquetes de datos. En LTE, el manejo de todos estos servicios es soportado completamente sobre el protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) (Ver Figura 2.1) [13].

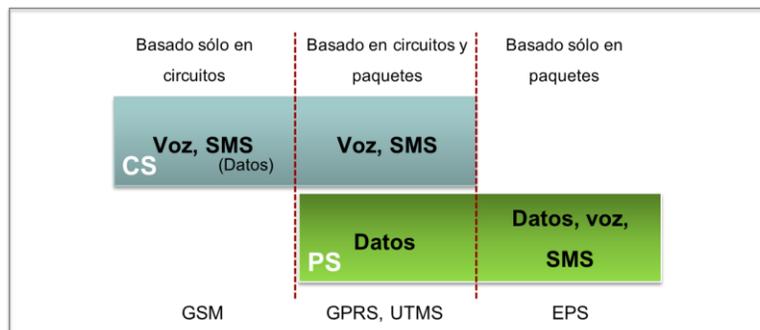


Figura 2.1 Dominios de circuitos y de paquetes

<sup>5</sup> UMTS fue también un proyecto del 3GPP que estudió varias tecnologías candidatas antes de seleccionar el Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (W-CDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*) para la Red de Radio Acceso (RAN, *Radio Access Network*). Actualmente, los términos UMTS y W-CDMA suelen usarse de forma indistinta.



La Red de Radio Acceso (RAN, *Radio Access Network*) para LTE tiene dos componentes principales que corresponden al Radio Acceso Terrestre Evolucionado del UTMS (E-UTRA, *Evolved UTMS Terrestrial Radio Access*) y la Red de Radio Acceso Terrestre Evolucionada del UTMS (E-UTRAN, *UTMS Terrestrial Radio Access Network*), que se abordarán con mayor profundidad en las siguientes secciones. Existe, además, un proyecto paralelo del 3GPP denominado Evolución de Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*), el cual define un nuevo núcleo de red de sólo paquetes basado en el protocolo IP (*all-IP*), conocido como Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*). La combinación entre el EPC y la RAN evolucionada (E-UTRA más E-UTRAN) constituyen el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*). Dependiendo del contexto, cualquiera de los términos LTE, E-UTRA, E-UTRAN, SAE, EPC, y EPS pueden ser utilizados para describir todo o parte del sistema<sup>6</sup>. El nombre del sistema completo más utilizado suele ser LTE/SAE o simplemente LTE [4].

El objetivo del proyecto SAE al definir un núcleo de red basado netamente en el protocolo IP (*all-IP*), radica en simplificar el núcleo de red híbrido, basado en dominio de paquetes (*Packet-Switched*) y dominio de circuitos (*Circuit-Switched*), de los sistemas de tecnologías previas. En esta nueva arquitectura simplificada, el núcleo de red de sólo paquetes es una parte esencial para alcanzar las principales directrices planteadas para LTE, como son, menor retardo en términos del establecimiento de conexiones y latencia de transmisión, aumento en las tasas de transmisión de datos, reducción de costo de transmisión por bit, mejoramiento de la eficiencia espectral, mayor flexibilidad en el uso del espectro, interoperabilidad sin ruptura entre tecnologías de radio acceso diferentes y consumo de batería razonable en las terminales móviles [14]. Estos requerimientos son inferidos desde las especificaciones del sistema, las cuales son escritas por el 3GPP.

Release	Liberación funcional	Principales características de UTMS en el Release
Rel-99	Marzo 2000	▪ W-CDMA basado en requerimientos del IMT-2000 (FDD y TDD)
Rel-4	Marzo 2001	▪ TD-SCDMA (TDD)
Rel-5	Junio 2002	▪ HSDPA
Rel-6	Marzo 2005	▪ HSUPA (E-DCH)
Rel-7	Diciembre 2007	▪ HSPA + (64QAM enlace de bajada, MIMO, 16QAM enlace de subida). ▪ Estudio de factibilidad de LTE y SAE.
Rel-8	Diciembre 2008	▪ Ítem de trabajo LTE: Interfaz de aire OFDMA/SC-FDMA. ▪ Ítem de trabajo SAE: Nuevo núcleo de red IPS. ▪ Mejoras adicionales de HSPA.

**Tabla 2.1** Evolución de las especificaciones de UTMS<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Aunque el término EPS constituye la denominación formal, en este trabajo, así como en la mayoría de bibliografía, se tomará el término LTE para hacer referencia al sistema completo.

<sup>7</sup> Tomado de [4] A. Technologies and M. Rumney, *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*: Wiley Publishing, 2013.



Tales especificaciones son contenidas en diferentes versiones de documentos que reflejan la adición de nuevas características sobre cada tecnología. La versión estable para LTE corresponde al *Release 8*, finalizada en 2008. La Tabla 2.1 sintetiza la evolución de las especificaciones de UTMS hacia LTE.

### 2.2.2 Frecuencias LTE

Para la implantación de LTE se han establecido las frecuencias 800Mhz, 1800Mhz y 2600 Mhz. Entre estas, lo ideal desde el punto de vista técnico es utilizar las frecuencias bajas que permiten dar mayor cobertura en interiores y minimizan los costos de despliegue [15]. La Tabla 2.2 muestra los espectros radioeléctricos LTE para los operadores de telefonía móvil en Colombia [16].

Operación	Lanzamiento LTE	Espectro LTE
Avantel	08/2014	AWS <sup>8</sup>
Claro	02/2014	2600Mhz
DirecTv	07/2014	2600 TDD
Movistar	12/2013	AWS
Tigo	12/2013	AWS
ETB	10/2014	AWS
UNE	06/2012	2600Mhz

Tabla 2.2 Espectro radioeléctrico en Colombia<sup>9</sup>

### 2.2.3 Arquitectura general de LTE

Como se sugirió en la sección 2.2.1, los elementos fundamentales de un sistema LTE se definen como el radio acceso terrestre E-UTRA y la red de radio acceso E-UTRAN. El primero, hace referencia a la interfaz de aire que incluye el equipo de usuario (UE, *User Equipment*) o dispositivo móvil, mientras que el segundo incluye al Controlador de Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*) y a la estación base, conocida también como eNodo B (eNB, *Evolved Node B*)[4]. De esta manera, estos elementos, así como la red troncal evolucionada de conmutación de paquetes EPC, definida dentro SAE, se convierten en los componentes determinantes de la arquitectura de una red de comunicaciones móviles basada en especificaciones del sistema LTE [5]. En la Figura 2.2 se muestra la arquitectura descrita, que corresponde a una presentación a alto nivel de sus componentes.

<sup>8</sup> AWS corresponde a 1700 Mhz para el enlace ascendente y 2100Mhz para el enlace descendente.

<sup>9</sup> Tomado de [16] "LTE Deployment Status Latin America," in *49 LTE networks in 17 countries* <http://www.4gamericas.org/>, 2015.

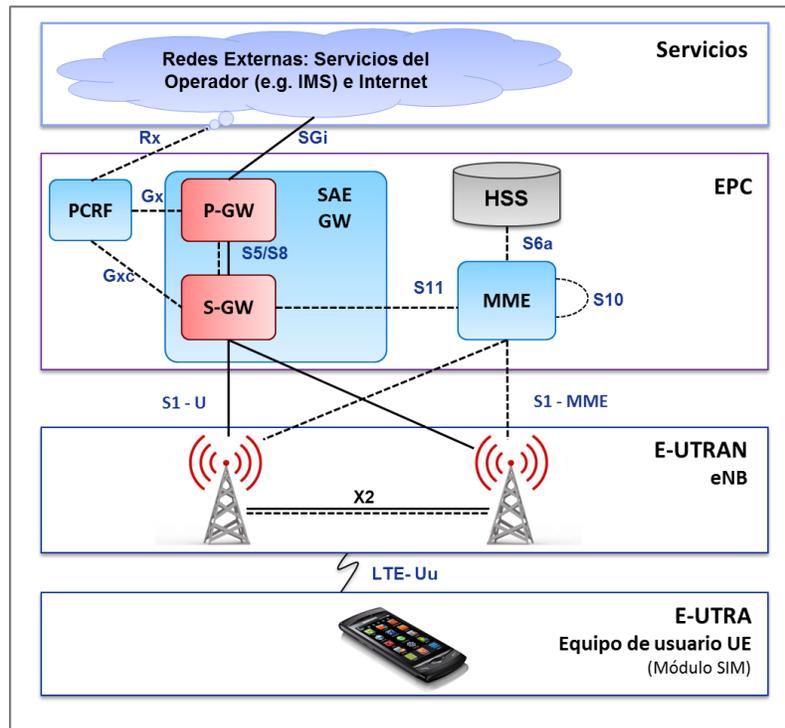


Figura 2.2 Arquitectura a alto nivel de un sistema LTE<sup>10</sup>

Como se observa en la Figura 2.2, cada componente del sistema puede conectarse con otro a través de diferentes interfaces, las cuales están estandarizadas con el fin de permitir la interoperabilidad entre múltiples compañías de telecomunicaciones [14]. Así mismo, se aprecia que, en colaboración, el EPC y el EUTRAN facilitan la transferencia de paquetes entre el UE y redes externas como Internet o plataformas de servicios IP multimedia<sup>11</sup>. Las conexiones entre un UE y una red externa incluyen la utilización de un conjunto de Servicios Portadores EPS (*EPS Bearer Service*), por medio de los cuales se gestiona el enrutamiento del tráfico de paquetes entre las redes externas y el UE. De igual forma, E-UTRAN utiliza el Portador de Radio Acceso (E-RAB, *E-UTRAN Radio Access Bearer*) para apoyar la transferencia de paquetes. Un portador constituye un flujo de paquetes IP con una Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) definida entre la red externa y el UE, y en forma transparente al EPC [5, 14].

Un aspecto adicional sobre el diseño del sistema LTE es la separación entre el manejo datos de usuario (tráfico entrante o saliente), conocido como *Plano de Usuario*, y la

<sup>10</sup> Tomado de [17] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*: Wiley, 2009.

<sup>11</sup> La prestación de servicios IP multimedia es permitida gracias a un conjunto de elementos asociados al Subsistema IP Multimedia (IMS, *IP Multimedia Subsystem*) incluido en las redes externas y siendo éste responsable de la señalización, a nivel de aplicación, asociada a estos servicios [5] R. A. Comes and F. Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*: Fundación Vodafone España, 2010.



señalización del sistema, denominada también *Plano de Control*. Esta separación permite el escalamiento de los recursos de transmisión de manera independiente [13]. En la Figura 2.2 las interfaces que facilitan el proceso de plano de usuario se representan a través de una línea continua, mientras que aquellas que apoyan el plano de control se muestran mediante líneas punteadas.

A continuación, se discuten en forma general los componentes principales de la arquitectura de un sistema LTE presentada.

### **2.2.3.1 Equipo de usuario UE**

El UE se conforma por un dispositivo móvil (ME, Mobile Equipment) más un Módulo de Suscripción del Usuario (SIM, Subscriber Identity Module). Este último corresponde a una aplicación que gestiona la información necesaria para realizar la conexión a la red y la utilización de sus servicios, de acuerdo al tipo de suscripción del usuario con la compañía de telecomunicaciones, y se materializa en una tarjeta inteligente, que consiste sólo de un circuito integrado<sup>12</sup>. La SIM permite identificar a un usuario independientemente del dispositivo que utilice, por lo que la separación entre SIM y ME permite que un usuario cambie de terminal conservando su identidad [5]. Por otro lado, la conexión entre el UE y la red de acceso E-UTRAN se hace a través de una interfaz conocida como Interfaz Radio, la cual es tratada en más profundidad en la sección 2.2.5.

### **2.2.3.2 Red de Acceso Evolucionada E-UTRAN**

La red de acceso de LTE, E-UTRAN, consiste en una red de eNodoBs (eNB *Evolved Node B*), o estaciones base, interconectados entre sí. Un eNodoB incorpora la inteligencia requerida para implementar las funciones y protocolos relacionados con la gestión del acceso radio, necesarios para realizar el envío de datos y su control. Los eNBs de la red de acceso proveen conectividad entre los diferentes elementos de la red troncal EPC y los UE [5]. Esta comunicación, como se verá más adelante, es establecida gracias a la existencia de diferentes tipos de interfaces.

De esta manera, se entiende que la gestión y control en la transmisión de datos entre un eNBs y el UE se lleva a cabo propiamente dentro de la red de acceso E-UTRAN, por lo que el estudio del rendimiento de los enlaces de subida y de bajada a nivel físico se relaciona directamente con este componente de la arquitectura. En ese sentido, detalles de la red E-UTRAN, como elemento clave en el propósito de esta investigación, serán presentados en la sección 2.2.4.

---

<sup>12</sup> Los términos SIM y tarjeta inteligente suelen utilizarse indistintamente.



### 2.2.3.3 Núcleo de Paquetes Evolucionado EPC

El núcleo de paquetes evolucionado EPC tiene como función principal el control sobre la transferencia de paquetes desde o hacia el UE y sobre el establecimiento de servicios portadores. Como se contempla en la Figura 2.2, el EPC se compone de cuatro nodos lógicos, a saber, Pasarela de Redes de Paquetes de datos (P-GW, *PDN Gateway*), Pasarela de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*), Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*) y Servidor de Suscripciones (HSS, *Home Subscriber Server*) [14].

El nodo P-GW, es el punto de interconexión entre el EPC y las redes externas PDN (PDN, *Packet Data Network*) y se encarga del enrutamiento de paquetes desde y hacia ellas, así como de la ubicación de direcciones IP requeridas por el usuario y el control de políticas y funciones de carga, decidiendo el tratamiento otorgado a los flujos de datos de acuerdo al QoS asociado al perfil de suscripción del usuario [1, 13, 14]. Como apoyo a estas funciones, dentro del P-GW reside la Función de Esfuerzo y Control de Políticas (PCEF, *Policy Control Enforcement Function*), la cual se encarga de gestionar la carga basada en flujo. Esta función es controlada, a su vez, por otra rutina denominada Función de Políticas y Reglas de Carga (PCRF, *Policy and Charging Rules Function*) que, además, gestiona los servicios portadores EPS de la red LTE mediante el envío de reglas de uso que determinan la operación del PCEF [13].

Por su parte, el nodo S-GW corresponde al punto de conexión entre la red de radio acceso y el EPC. Cada usuario registrado en la red LTE tiene asociado una entidad S-GW que se encarga del enrutamiento (en subida o en bajada) de paquetes IP, entre el eNB al que está conectado el UE y una o varias entidades P-GW [5]. En ese sentido, una pasarela S-GW estará siempre conectada a otras pasarelas P-GW. Adicionalmente, la S-GW, constituye el punto de anclaje para la movilidad intra-LTE, es decir, la transferencia de servicio entre eNBs<sup>13</sup>, y además para la movilidad entre la red LTE y otros accesos 3GPP [18]. Así mismo, el S-GW permite el almacenamiento temporal de paquetes de datos hacia el UE, en caso de que los terminales se encuentren en modo reposo [5].

Por otro lado, así como las funciones propias del plano de usuario en EPC son tratadas por las pasarelas S-GW y P-GW, los procesos propios del plano de control recaen sobre el nodo MME. Éste nodo maneja la señalización relacionada a la movilidad y seguridad para el acceso de las terminales a través de la red de acceso E-UTRAN hacia la red [13]. Cada terminal registrada en la red LTE tiene asociada una entidad MME, que se encarga también de controlar la señalización necesaria para la gestión de los servicios portadores EPS y además del rastreo y localización de las terminales cuando se encuentren en modo reposo. Todas estas funciones proporcionadas por MME son soportadas por protocolos

---

<sup>13</sup> La transferencia de servicio entre estaciones base suele ser conocida también como *Handover* o *Traspaso*.



conocidos como protocolos NAS (NAS, *Non Access Stratum*), los cuales se ejecutan entre el UE y el MME [5].

Finalmente, el nodo HSS consiste, básicamente, en una base de datos que contiene la información relacionada a la suscripción del usuario. Proporciona, además, funciones de soporte y gestión de movilidad, configuración de llamadas y sesiones, autenticación de usuarios y autorización de acceso [13].

El diseño del EPC, proporciona un servicio de conectividad IP mediante una arquitectura de red que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. El alcance de este diseño ofrece la posibilidad de acceder a servicios a través de otras redes de acceso tanto 3GPP (UTRAN<sup>14</sup> y GERAN<sup>15</sup>) como fuera del ámbito del 3GPP (e.g. CDMA2000, Mobile WiMAX, redes 802.11), soportándose a través de un conjunto de interfaces del EPC que lo conectan tanto a otros componentes de la arquitectura como a redes externas [5].

## **2.2.4 Red de acceso evolucionada E-UTRAN**

### **2.2.4.1 Arquitectura de E-UTRAN**

Como se mencionó en la sección 2.2.3.2, la red de acceso evolucionada es conformada por un único elemento que integra toda su funcionalidad, sin llegar a contar con equipos controladores adicionales. Este elemento es el eNB [5]. Como se ilustra en la Figura 2.2, los eNBs facilitan la comunicación entre el EPC y el UE mediante la utilización de diferentes interfaces. La arquitectura de E-UTRAN es detallada en las especificaciones técnicas TS 36.300 y TS 36.401 del 3GPP [3].

De esta manera, dentro de la arquitectura de E-UTRAN la comunicación entre eNBs es facilitada por una interfaz conocida como X2. Bajo el plano de usuario, esta interfaz proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario, aunque no garantiza su entrega ni el soporte de control de errores o de flujo. Sin embargo, dentro del plano de control, la interfaz X2 ofrece una gestión más eficiente en el uso de recursos radio y un soporte en los mecanismos de control de tráfico de paquetes IP y de datos de usuario desde un eNB a otro [18].

Así mismo, un eNB se conecta al EPC por medio de otra interfaz denominada S1. De manera más específica, esta interfaz se desglosa en dos interfaces diferentes, S1-U (*S1 User Plane*) y S1-MME, que sustentan, respectivamente, el plano de usuario y el plano de control. La interfaz S1-U, proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre los eNBs y la pasarela S-GW, sin garantía de entrega ni soporte a mecanismos de

<sup>14</sup> UTRAN, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*

<sup>15</sup> GERAN, *GSM EDGE Radio Access Network*



control de errores ni de control de flujo. Por su parte, S1-MME, también conocida como S1-C (*S1 Control Plane*), se utiliza para soportar un conjunto de funciones y procedimientos de control entre eNBs y la entidad MME de la red troncal EPC [18].

Por otro lado, existe también otra interfaz que permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los UE. Se trata de la interfaz E-UTRAN Uu, también denominada LTE Uu o simplemente interfaz radio LTE. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operación de la interfaz radio se implementan en el eNB [5]. En este sentido, la interfaz radio es utilizada a nivel físico tanto en el enlace de bajada como en el de subida, por lo cual constituye un elemento importante en el propósito de esta investigación y será tratado con mayor profundidad en la siguiente sección.

### **2.2.5 Interfaz radio LTE**

Con el fin de permitir la interconexión, el envío de tráfico y señalización entre el terminal móvil UE y los eNBs, la interfaz radio soporta tres tipos de mecanismos de transferencia de información en el canal radio, éstos son, difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada. El primero, permite a los UE identificar información específica de la red de acceso y del EPC y conocer sus parámetros básicos de operación. El segundo, con el apoyo de los servicios portadores RAB, proporciona soporte para el envío de tráfico IP, entre eNBs y UE, y su optimización. El último, facilita el establecimiento de una conexión de control dedicada entre el eNB y el UE con el objetivo de poder gestionar el uso de los servicios portadores RAB y la señalización con la red troncal [5]. Estas funciones de gestión y envío de paquetes IP entre el eNB y el UE a través de la interfaz radio, se sustentan en una torre de protocolos descritas en la siguiente sección.

#### **2.2.5.1 Protocolos en la Interfaz radio**

En la Figura 2.3, se muestra la torre de protocolos que soporta los procesos de la interfaz radio. Esta torre se forma específicamente por una capa física, una capa de enlace y una capa de red. Estas capas o niveles, como ilustra la figura, se dividen a su vez en subniveles de protocolos que sustentan las operaciones del plano de usuario y del plano de control. A continuación, se describen los aspectos más relevantes de cada uno de los niveles antes mencionados.

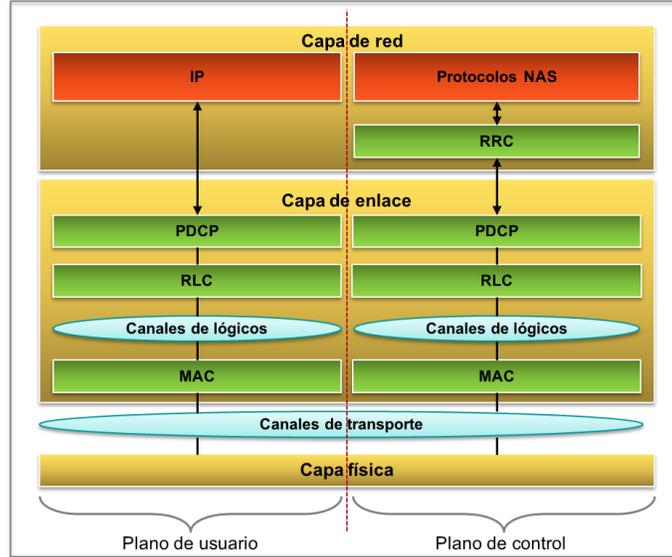


Figura 2.3 Torre de protocolos de la interfaz aire del sistema LTE<sup>16</sup>

#### 2.2.5.1.1 Nivel físico o Capa física

El nivel físico o capa física de la interfaz radio de LTE es el encargado del proceso real de transferencia a través del canal radio. Realiza funciones de codificación de canal, modulación/demodulación, procesamiento relacionado con las técnicas de transmisión multi-antena y transformación de la señal a los recursos físicos apropiados de frecuencia y tiempo [5]. El nivel físico cubre la transmisión que se realiza desde el eNB hacia el UE, en enlace de bajada, y desde el UE hacia el eNB, en enlace de subida. Para ello, el nivel físico soporta, respectivamente, dos técnicas de acceso múltiple, OFDMA y SC-FDMA [4], cuyos fundamentos básicos serán tratados en la sección 2.2.7.1.

#### 2.2.5.1.2 Nivel de enlace o Capa de enlace

El nivel de enlace se divide en 3 subniveles que sustentan su funcionalidad, como son, Control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control), Control del Radio Enlace (RLC, *Radio Link Control*) y Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*) [5]. A continuación se presenta una descripción breve de cada uno de ellos.

#### Control de acceso al medio MAC

Esta capa, siendo la más baja del nivel de red, se encarga de controlar el acceso ordenado y priorizado de los usuarios al canal radio. Dentro de sus funciones se

<sup>16</sup> Basado en [5] R. A. Comes and F. Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*: Fundación Vodafone España, 2010.



encuentran también la multiplexación y demultiplexación de paquetes derivados de sus capas vecinas, física y RLC. La comunicación de la capa con el nivel físico inferior se realiza mediante canales de transporte, mientras utiliza canales lógicos para la conexión con la capa superior RLC. Adicionalmente, en este nivel se incorporan mecanismos de re-transmisión y control de errores [14].

### **Control del Radio Enlace RLC**

La capa RLC establece un envío fiable de los paquetes provenientes del PDCP, implementando procedimientos de segmentación, concatenación, re-ensamble y ordenamiento, con el fin de controlar la aparición de posibles errores y la gestión del tamaño de los datos de acuerdo a la capacidad indicada por la capa MAC [14].

### **Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos PDCP**

El nivel PDCP es el encargado de la compresión y descompresión de las cabeceras de paquetes IP, facilitando la entrega y recepción ordenada de los mismos, y la detección de posibles duplicados. Así mismo, proporciona mecanismos de cifrado para garantizar la seguridad e integridad de los datos y soporta, además, funciones de re-ordenamiento y entrega en los procesos de transferencia de servicio entre eNBs (*Handover*) [5].

#### **2.2.5.1.3 Nivel de red o Capa de red**

La capa o nivel de red destaca la separación de protocolos de acuerdo al plano de usuario y el plano de control. Así pues, se distinguen el Control de Recursos de Radio (RRC, *Radio Resource Control*) y el conjunto protocolos NAS, que operan dentro del plano de control, y los protocolos IP desenvueltos en el plano de usuario [5].

### **Control de Recursos de Radio RRC**

Esta capa permite establecer y gestionar una conexión de control entre el eNB y el UE. Dentro de sus funciones más relevantes están la gestión de servicios portadores, el soporte a funciones de movilidad, difusión de información de parámetros del sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida [14].

### **Protocolos NAS**

Los protocolos NAS toman lugar a lo largo de la entidad de red MME en EPC y el UE. Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. Las principales funciones de los protocolos NAS corresponden a autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS [5].



### **2.2.5.2 Canales radio en el enlace de bajada**

La interrelación entre las diferentes capas de protocolos de la interfaz radio se logra a partir del establecimiento de canales radio que facilitan esta comunicación tanto en enlace de subida como en enlace de bajada. En aras de proporcionar flexibilidad y permitir diversos esquemas para la transmisión de datos, las especificaciones de E-UTRAN introdujeron varios tipos de canales correspondientes a los canales lógicos, canales de transporte y canales físicos [18]. Algunos de estos canales pueden ser considerados como canales de control, para la transferencia de datos del plano de control, o canales de tráfico, para la transferencia de información del plano de usuario. El sistema LTE no contempla el uso de canales de tráfico dedicados, sino compartidos. Es decir, sólo se establecen cuando un UE debe recibir datos destinados a él y, además, existe la posibilidad de establecer enlaces punto a punto (entre un UE y la red) o punto multipunto (entre la red y múltiples UE, es decir una conexión tipo Multicast) [5].

De acuerdo al propósito de esta investigación, en las siguientes sub-secciones se presenta brevemente cada uno de los canales radio relacionados al enlace de bajada.

#### **2.2.5.2.1 Canales lógicos**

Los canales lógicos facilitan la comunicación entre la capa RLC y la capa MAC del nivel de enlace. Estos canales corresponden a los servicios de transferencia de datos ofrecidos por los protocolos de la interfaz radio a las capas superiores y se utilizan para determinar el tipo de información transmitida por la interfaz radio [5, 18]. A continuación se describe cada uno de ellos para el enlace descendente.

##### **Canal de Tráfico Dedicado (DTCH, Dedicated Traffic Channel)**

El DTCH es un canal bidireccional punto a punto, utilizado entre un UE determinado y el eNB, que soporta la transmisión de datos de usuario, la cual incluye los datos propiamente dichos así como la señalización a nivel de aplicación de flujo de datos [18].

##### **Canal de Tráfico Multidifusión (MTCH, Multicast Traffic Channel)**

El MTCH es un canal de datos punto a multipunto, utilizado para transmitir datos desde el eNB a un grupo de usuarios [18].

##### **Canal de Control de aviso o Notificación (PCCH, Paging Control Channel)**

El PCCH es un canal común de enlace de bajada que transfiere información de notificación a usuarios presentes en la celda de radio [18]. Se utiliza para informar a los UE sobre llamadas entrantes y de algún posible cambio en la información del sistema [19].



### ***Canal de Control de Difusión (BCCH, Broadcast Control Channel)***

El BCCH es un canal descendente utilizado por el eNB para difundir información sobre las condiciones del sistema (identificación del operador, identificación de la celda, información de celdas vecinas) a los UE presentes en su área de cobertura [5].

### ***Canal de Control Común (CCCH, Common Control Channel)***

El CCCH es un canal bidireccional utilizado para intercambiar información de control cuando no se ha establecido una asociación confirmada entre el eNB y el UE [19]. Normalmente, este canal es usado en las primeras fases del establecimiento de la comunicación [18].

### ***Canal de Control Dedicado (DCCH, Dedicated Control Channel)***

El DCCH es un canal bidireccional punto a punto utilizado para intercambiar información de control entre el eNB y un UE cuando la conexión se haya establecido [18].

### ***Canal de Control Multidifusión (MCCH, Multicast Control Channel)***

El canal MCCH es utilizado para enviar información de control desde el eNB a un grupo de usuarios que reciben servicios de multidifusión [5].

#### ***2.2.5.2.2 Canales de Transporte***

Los canales de transporte son establecidos entre la capa MAC y la capa física. Éstos describen cómo y con qué características son transferidos los datos sobre la interfaz radio y se encarga de multiplexar diferentes canales lógicos en un canal de transporte [5]. Dentro de los canales de transporte se describe aspectos como la protección de los datos contra errores de transmisión, el tipo de codificación de canal, el tamaño de los paquetes de datos enviados sobre la interfaz radio, entre otros [18]. A continuación se presentan los canales de transporte asociados al enlace de bajada.

### ***Canal de Aviso o Notificación (PCH, Paging Channel)***

El canal PCH asigna los recursos de forma dinámica en canales de control y tráfico e informa a los UE sobre las actualizaciones realizadas mediante el sistema de información [5].

### ***Canal de Difusión (BCH, Broadcast Channel)***

El canal BCH, asociado al canal BCCH, se encarga de notificar los parámetros necesarios a los UE para que accedan al sistema dentro de toda el área de cobertura del eNB [18].

### ***Canal Compartido para el enlace de bajada (DL-SCH, Downlink Shared Channel)***

El canal DL-SCH se encarga de llevar información de usuario y señalización. Soporta, además, procesos relacionados con la Solicitud de Repetición Automática Híbrida (HARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*), así como la adaptación dinámica del enlace e



implementación de mecanismos de recepción discontinua en el UE para incrementar la eficiencia de energía [5].

#### ***Canal de Multidifusión (MCH, Multicast Channel)***

El canal MCH se encarga de transportar los servicios y mensajes de control de multidifusión en el enlace de bajada [19].

#### **2.2.5.2.3 Canales Físicos**

Los canales físicos son la implementación real de los canales de transporte sobre la interfaz radio, permitiendo establecer los mecanismos físicos de transmisión y recepción de la información de datos y control a través del enlace radio [2]. Éstos se encargan de transportar información hacia los UE dentro del área de cobertura de un eNB como también de los mecanismos de señalización y control que facilitan la transmisión eficiente de la información [5]. A continuación se presentan los canales físicos relacionados al enlace de bajada.

#### ***Canal Físico Indicador de Repetición Automática Híbrida (PHICH, Physical HARQ Indicator Channel)***

El canal PHICH lleva información de notificaciones relativas al estado del mecanismo de HARQ [18].

#### ***Canal Físico de Control del Enlace de Bajada (PDCCH, Physical Downlink Control Channel)***

El canal PDCCH informa a los UE los bloques de recurso que tiene asignados para el envío de información en el enlace ascendente. En ese sentido, el canal PDCCH transporta información de asignación de recursos para los canales de aviso (PCH) y de tráfico compartido (DL-SCH) y sobre los mecanismos de retransmisión HARQ [5].

#### ***Canal Físico Indicador del Formato de Control (PCFICH, Physical Control Format Indicator Channel)***

El canal PCFICH informa al UE sobre el número de símbolos OFDM usados por el canal PDCCH [18].

#### ***Canal Físico de Difusión (PBCH, Physical Broadcast Channel)***

El canal PBCH transmite información de identificación y control a todos los UE dentro del área de cobertura de un eNB. La información básica transportada corresponde al ancho de banda del sistema, estructura del canal PHICH y el número de trama actual [19].

#### ***Canal Físico de Multidifusión (PMCH, Physical Multicast Channel)***

El canal PMCH envía información del sistema de multidifusión a varios UE dentro del área de cobertura de un eNB [18].



### **Canal Físico Compartido en el Enlace de Bajada (PDSCH, Physical Downlink Shared Channel)**

Normalmente, el canal PDSCH transmite información de usuario y también de señalización de las capas superiores [18]. En ese sentido, el PDSCH contiene la información entregada por la capa MAC mediante el canal de transporte DL-SCH [5]. Además de los datos de usuario, este canal también transporta información común para todos los usuarios, complementando así al canal PBCH y, adicionalmente, también multiplexa el canal de transporte PCH [19].

El canal PDSCH sólo se asigna al usuario cuando éste tiene algo que recibir en el enlace descendente y como resultado de la gestión de recursos realizada por dicho enlace.

Los esquemas de modulación soportados en el canal PDSCH corresponden a QPSK, 16QAM y 64QAM. Así mismo, se utilizan turbo códigos de tasa 1/3 para la codificación de canal. Adicionalmente, este canal se mapea en los dominios de frecuencia y tiempo utilizando los denominados Bloques de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Blocks*), cuya visión general se presenta en la sección 2.2.7.3.3.

Existen siete modos de operación del canal PDSCH, descritos en la Tabla 2.3.

Operación	Características Principales
<b>Modo 1</b>	Transmisión por una única antena en el eNB
<b>Modo 2</b>	Diversidad en transmisión
<b>Modo 3</b>	Multiplexado espacial en bucle abierto
<b>Modo 4</b>	Multiplexado espacial en bucle cerrado
<b>Modo 5</b>	MIMO para esquemas multiusuario
<b>Modo 6</b>	Conformación de haz con realimentación desde el terminal móvil para indicar qué tipo de pre-codificación debe utilizarse en el proceso de conformación de haz.
<b>Modo 7</b>	Conformación de haz sin realimentación. En este caso el eNB determina el esquema de pre-codificación apropiado para la conformación de haz a partir, por ejemplo de los ángulos de llegada de canales del enlace ascendente.

**Tabla 2.3** Modos de operación del canal PDSCH<sup>17</sup>

#### **2.2.5.2.4 Mapeo entre canales radio**

En la Figura 2.4 se representa el mapeo entre los canales lógico, de transporte y físicos presentados arriba. Debido a las restricciones y características propias de cada canal de transporte, no todas las combinaciones son permitidas. Como se observa, los canales de lógicos pueden beneficiarse de varias opciones de mapeo hacia los canales de transporte. Por su parte, existen canales físicos que no llevan información desde las capas superiores, y están orientados a propósitos propios de la capa física.

<sup>17</sup> Tomado de [5] Ibid.

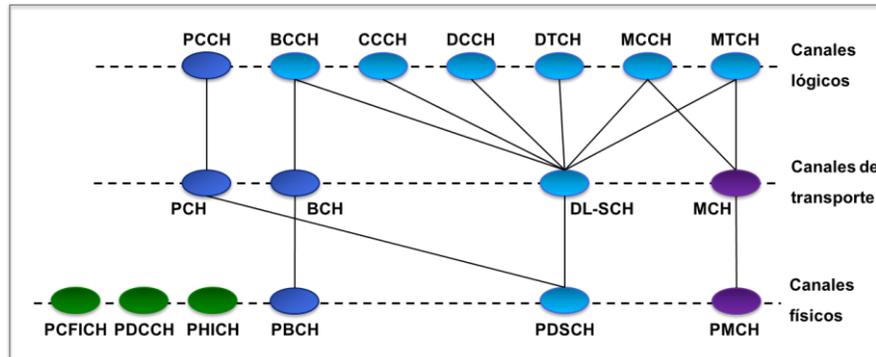


Figura 2.4 Mapeo de los canales físicos a las capas más altas<sup>18</sup>

### 2.2.6 Procesamiento hacia la capa física de la Interfaz radio en el enlace de bajada

Como se vio anteriormente, los canales de transporte proporcionan una interfaz entre la capa MAC y la capa física. De esta manera, los flujos de datos y control salientes y entrantes de la capa MAC son codificados o decodificados, respectivamente, para ofrecer servicios de transporte y control sobre el enlace radio de transmisión [20]. En ese sentido, el proceso de codificación tiene como objetivo incrementar la confiabilidad en la transmisión a través de un canal no ideal o ruidoso [21]. Así pues, las técnicas aplicadas para este proceso hacen lo posible por detectar y corregir algunos errores introducidos por el canal, por medio de la adición de información redundante a los datos transmitidos [21].

El proceso de *codificación de canal* es una combinación de detección y corrección de errores, segmentación, turbo codificación, adaptación de tasa y concatenación [20]. Normalmente, como resultado del procesamiento en los canales de transporte, se obtiene una palabra código que será procesada por la capa física. En la Figura 2.5 se presenta la cadena del proceso de codificación de canal realizada en los canales de transporte DL-SCH y PCH<sup>19</sup>, los cuales, como se vio en la sección anterior, son mapeados al canal físico PDSCH.

<sup>18</sup> Tomado de [14] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2011.

<sup>19</sup> Este modelo es aplicable también al canal de transporte MCH.

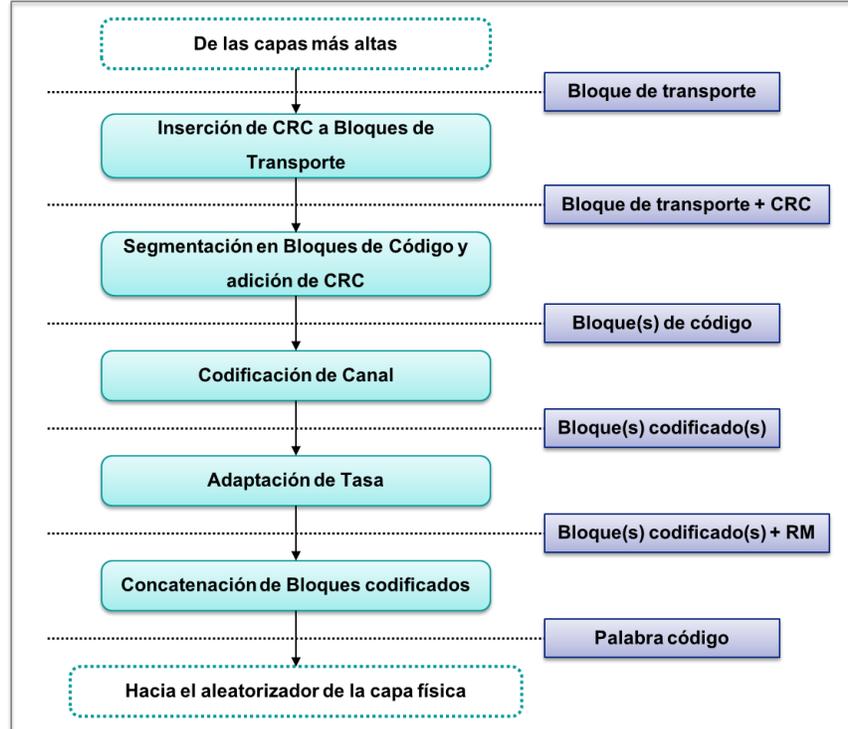


Figura 2.5 Esquema simplificado de codificación de canal en LTE<sup>20</sup>

A continuación se presenta una descripción general de cada uno de los elementos de esta cadena.

### 2.2.6.1 Inserción de código CRC

En cada Intervalo de Tiempo de Transmisión TTI, la capa física recibe un cierto número de bloques de transporte para la transmisión. Como se observa en la Figura 2.5, en el primer paso del procesamiento, a cada bloque de transporte se añade un *Código de Redundancia Cíclica* (CRC, *Cyclic Redundancy Check*) de 24 bits, usado por el extremo receptor para detectar errores de transmisión [18].

### 2.2.6.2 Segmentación en bloques de código

En el paso de *Segmentación en Bloques de Código*, el bloque de transporte es dividido en *bloques de código* más pequeños, cuyo tamaño debe coincidir con los tamaños soportados en el paso de codificación de canal. En LTE, el tamaño de los bloques de código es limitado por un número máximo de 6144 bits. En este sentido, si un bloque de transporte junto con su código CRC excede este tamaño máximo, se aplica la

<sup>20</sup> Tomado de [21] B. Furht and S. A. Ahson, *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*: CRC Press, 2009.



segmentación. Con el propósito de detectar errores en recepción, la segmentación incluye también el cálculo y adición de otro código CRC de 24 bits [22].

### 2.2.6.3 Codificación de canal

En la *Codificación de Canal*, como su nombre lo indica, se realiza propiamente la codificación de los bloques de código. Así pues, los bloques son protegidos por un esquema robusto de codificación y su tamaño es adaptado para asegurarse de que el paquete codificado coincida con el tamaño del canal físico [18]. En LTE, se han escogido dos técnicas diferentes para la codificación de canal que corresponden a la *codificación convolucional*, para canales de control, y la *turbo codificación*<sup>21</sup> para canales de tráfico. Al final del proceso de codificación se obtiene como resultado una secuencia de bits conocida como bloque codificado [21].

En las siguientes subsecciones se presenta una visión general de las dos técnicas de codificación de canal seleccionadas por LTE, no sin antes exponer algunos conceptos necesarios para entender el proceso de codificación presentado en cada una de ellas.

#### 2.2.6.3.1 Tasa de codificación

La tasa de codificación especifica la relación que existe entre los bits que entran a un codificador y los salientes. Suele expresarse de la forma  $k/n$ , siendo  $n$  el número de bits que salen por cada  $k$  bits que entra [21]. A manera de ejemplo, si en el proceso de codificación se tiene una tasa de codificación de  $1/2$ , a la salida del codificador se tendría la mitad de bits que a su entrada.

#### 2.2.6.3.2 Codificación Convolucional

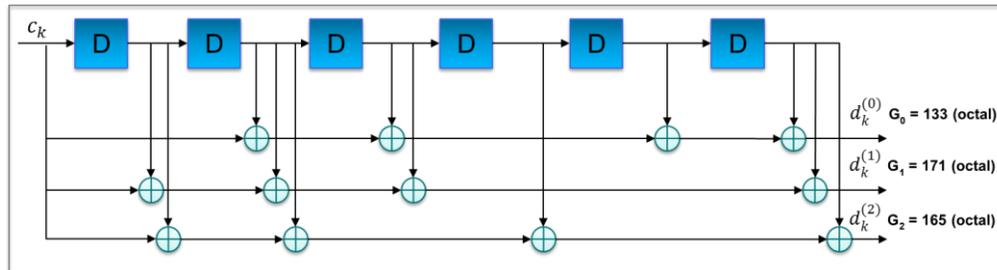
El proceso de codificación convolucional introduce la redundancia haciendo uso de un *registro de movimientos o memoria*. En este tipo de codificación, el codificador, de acuerdo a la tasa de codificación, acepta bloques de  $k$  bits de la secuencia de bits de información entrante y produce una secuencia codificada de  $n$  bits. Sin embargo, en un codificador convolucional las  $n$  salidas en cualquier unidad de tiempo no dependen únicamente de las  $k$  entradas sino también de  $m$  bloques de entrada, o estados, previos. Es así como en la codificación convolucional se dice que se tiene una memoria con orden  $m$ . De esta manera, en cada instante de tiempo,  $k$  bits de información entran a la memoria y, así mismo, los últimos  $k$  bits son borrados. Así, el conjunto de bits de salida del codificador corresponde a una combinación lineal del contenido de la memoria. Las combinaciones lineales son definidas por medio de  $n$  secuencias generadoras  $G = [g_0, g_1, \dots, g_{n-1}]$ , donde  $g_l = [g_{l,0}, g_{l,1}, \dots, g_{l,m}]$  [14].

<sup>21</sup> La codificación de canal para DL-SCH, PCH y MCH se basa en el esquema de Turbo codificación [18] P. Lescuyer and T. Lucidarme, *Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*: Wiley Publishing, 2008..

Adicionalmente, se define una restricción de longitud de código (*Constraint length*)  $K$ , la cual indica el número de bits de información que afecta a los bits codificados resultantes o, en otras palabras, indica en cuántos ciclos de codificación tiene influencia un bit sobre los bits de salida [23].

Finalmente, en el extremo receptor, un proceso de decodificación permite recuperar la secuencia original de bits de datos. Este proceso es usualmente realizado a través de un algoritmo denominado algoritmo Viterbi, el cual tiene la ventaja de calcular la máxima probabilidad de decodificación [21].

En LTE, los canales de control son codificados con un código convolucional con tasa de codificación  $k/n$  de  $1/3$ , una restricción de longitud  $K$  de 7 y número de estado  $m$  de 6, tal como se ve en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Codificador convolucional con tasa de  $1/3$ <sup>22</sup>

Como se observa, las secuencias generadoras usadas son las que se ven en la ecuación ( 2.1 ), o en su notación octal en la ecuación ( 2.2 ).

$$g_0 = [1011011], g_1 = [11111001], g_2 = [1110101] \quad (2.1)$$

$$g_0 = [133](oct), g_1 = [171](oct), g_2 = [165](oct) \quad (2.2)$$

### 2.2.6.3.3 Turbo codificación

La turbo codificación en LTE está basada en dos componentes codificadores de ocho estados, que son los Codificadores Convolucionales Sistemáticos Recursivos (RSC, *Recursive Systematic Convolutional*), y un entrelazador de código interno.

La secuencia original de bits de entrada es codificada por el primer codificador RSC. La entrada al segundo codificador RSC, corresponde a una versión entrelazada de la secuencia original. De esta forma, la secuencia codificada resultante es el resultado de combinar la secuencia de información de bits, o bits sistemáticos, con dos secuencias de

<sup>22</sup> Tomado de [20] T. S. G. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding," 3GPP TS 36.212 V8.8.0 Release 8, 2009.



bits de paridad<sup>23</sup>. Así pues, por cada bit de entrada se obtienen tres bits de salida, uno sistemático y dos de paridad. Por lo tanto, aun cuando la tasa de codificación por cada codificador RSC es de 1/2, la tasa del sistema completo corresponde a 1/3 [21].

Finalmente, se lleva a cabo una operación de terminación Trellis para forzar a los codificadores a regresar al estado inicial después de codificar un bloque de transporte. Una vez todos los bits de información son codificados los bits encolados de la memoria de cada codificador RSC son adicionados a los bits de información codificados. Los bits encolados son usados para terminar el proceso de uno de los codificadores RSC mientras el otro se encuentra deshabilitado [22].

Por otro lado, la función de transferencia para los codificadores RSC es dada por la ecuación ( 2.3 ) [20].

$$G(D) = \left[ 1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right], \quad g_0(D) = 1 + D^2 + D^3, \quad g_1(D) = 1 + D + D^3 \quad (2.3)$$

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

Al iniciar la codificación de los bits de entrada, la memoria de cada codificador RSC debe ser inicializada a valores cero. La salida del turbo codificador, finalmente se define como en las ecuaciones ( 2.4 ), ( 2.5 ) y ( 2.6 ), donde  $k = 0, 1, \dots, K - 1$ , siendo  $K$  la longitud de la secuencia de entrada.

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

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

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

Los bits de entrada del turbo codificador son denotados por  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{K-1}$  y los bits de salida del primero y segundo componente codificador 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, que son también los bits de entrada del segundo componente, son denotados por  $x'_0, x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_{K-1}$  [20].

La estructura del turbo codificador es ilustrada en la Figura 2.7.

---

<sup>23</sup> Los códigos de paridad se usan en Telecomunicaciones para detectar, y en algunos casos corregir, errores en la transmisión. Para ello se añade un bit extra llamado bit de paridad a los  $n$  bits que forman el carácter original. Este bit de paridad se determina de forma que el número total de bits 1 a transmitir sea par (código de paridad par) o impar (código de paridad impar).

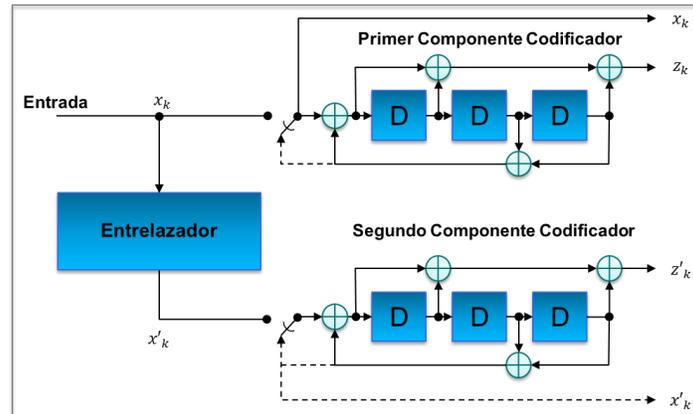


Figura 2.7 Esquema básico de un Codificador Convolutivo

#### 2.2.6.4 Adaptación de Tasa

Como se mencionó en secciones anteriores, en LTE, como en cualquier sistema de comunicación inalámbrica, la calidad de la señal recibida depende, entre otros factores, de la pérdida de ruta, la presencia de señales de interferencia, la sensibilidad del receptor y fenómenos de propagación multi-camino. Todos estos fenómenos que son inherentes a los entornos inalámbricos, pueden causar fuertes variaciones en la calidad de la señal recibida. Una de las técnicas de LTE para compensar estas variaciones y garantizar la calidad del servicio (QoS) de cada UE, maximizando el rendimiento del sistema, es la adaptación de ciertos parámetros como la tasa de codificación del canal. Las técnicas de adaptación requieren cierta realimentación del receptor con el fin de adaptar adecuadamente la señal transmitida a las condiciones del canal. En ese sentido, el UE es responsable de medir y reportar periódicamente la calidad instantánea del canal de uno o más bloques de recursos al transmisor, por medio de los indicadores de calidad del canal (CQI, *Channel Quality Indicator*). De esta manera, el esquema de codificación puede ser dinámicamente modificado para adecuarse a las condiciones instantáneas del canal por cada usuario. El esquema de codificación puede ser cambiado por el transmisor para adaptar la señal transmitida a las condiciones variantes del canal, tanto en el dominio de tiempo como de frecuencia [21].

En la fase de *Adaptación de Tasa*, con la ayuda del proceso HARQ de la capa MAC, se adapta la tasa de codificación de canal, es decir, la robustez a errores de transmisión, basado en la información reportada por la entidad receptora, conforme al número de elementos de recurso disponibles en el bloque de recursos asignado para la transmisión para cada UE [18]. Tras este proceso, a partir de los bits de los bloques de código entregados por la codificación de canal, se extrae el conjunto exacto de bits codificados que será transmitido en un TTI determinado [1].



### **2.2.6.5 Concatenación de bloques codificados**

Finalmente, las salidas de la fase de adaptación de tasa son concatenadas secuencialmente por cada bloque de código [20]. El resultado, conocido como *palabra código*, es la versión codificada del bloque de transporte original a ser transmitido [21].

### **2.2.7 Capa física de la Interfaz radio**

El papel principal de la capa física consiste en traducir los datos a una señal confiable para que sea transmitida a través de la interfaz radio entre el eNB y el UE [14]. Como se mencionó en la sección 2.2.5.1.1, la capa física soporta dos tipos de esquemas de acceso múltiples, que son, OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente.

De igual forma, en esta capa los espectros pareado y no pareado son soportados al usar Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*), respectivamente. En ese sentido, la interfaz radio es descrita en los dominios de tiempo y de frecuencia, teniendo entonces que la estructura de la trama define la trama, el slot y el símbolo en el dominio de tiempo. Así pues, existen dos tipos de estructuras de trama definidas, a saber, Tipo 1 para FDD y Tipo 2 para TDD. A pesar de que los enlaces de subida y de bajada utilizan esquemas de acceso múltiple diferentes, ambos comparten la misma estructura de trama [4].

Cada uno de estos elementos de la capa física se presenta a continuación.

#### **2.2.7.1 Técnicas de acceso al medio**

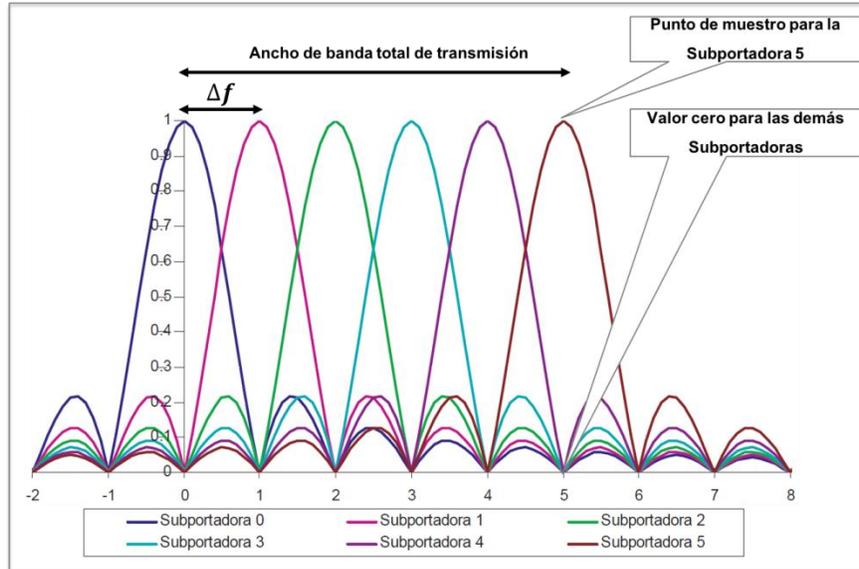
La regulación de la colocación de datos en los medios es conocida como control de acceso al medio. Existen diferentes técnicas de control que definen y gestionan la forma en que los usuarios comparten los medios. Entre ellas se encuentran las técnicas de acceso múltiple las cuales permiten a un número determinado de usuarios conectados a un mismo medio, transmitir y recibir información compartiendo su capacidad. A continuación, se presenta una descripción básica de las técnicas de acceso múltiple especificadas para el sistema LTE. En primer lugar, se exponen los fundamentos de la técnica de transmisión OFDM (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), como método base para las técnicas de acceso OFDMA y SC-FDMA, las cuales se describen posteriormente. De estas dos últimas, considerando el interés de este trabajo, se enfatizará en OFDMA por estar directamente relacionada con el enlace de bajada de LTE.

##### **2.2.7.1.1 Aspectos básicos de OFDM**

###### **Definición de OFDM**

OFDM es una técnica de transmisión que consiste en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de sub-portadoras, cercanas y ortogonales entre sí, dividiendo el ancho

de banda del canal en sub-canales de velocidad menor a la velocidad total de transmisión del sistema. Cada sub-canal es modulado individualmente por medio de esquemas como PSK o QAM. La propiedad de ortogonalidad ofrecida por OFDM, garantiza un uso eficiente del espectro al permitir que los sub-canales se traslapen sin interferirse, ayudando a la transmisión simultánea de símbolos sin perder la capacidad de separación de los mismos en recepción [24]. Así, en OFDM se define un conjunto de  $k$  sub-portadoras ortogonales, tal como se muestra en la Figura 2.8, donde  $k = 6$ .



**Figura 2.8** Ejemplo del espectro para 6 subportadoras

Dichas sub-portadoras se encuentran espaciadas a una distancia  $\Delta f$  en el dominio de frecuencias, la cual se define como en la ecuación ( 2.7 ).

$$\Delta f = 1/T_s \quad (2.7)$$

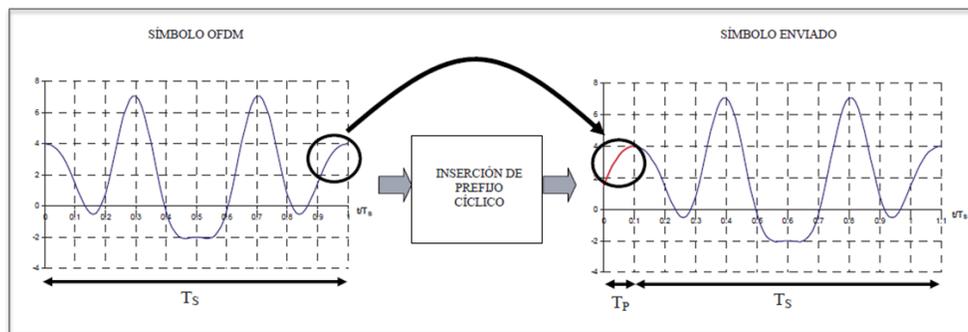
De esta manera, la propiedad de ortogonalidad entre sub-portadoras se consigue precisamente gracias a la relación existente entre la separación de las mismas  $\Delta f$  y su duración temporal  $T_s$ . Como se observa en la Figura 2.8, para cada frecuencia múltiplo de  $1/T_s$  únicamente existe contribución espectral de una de las sub-portadoras, mientras que el resto presentan nulos [5].

Fundamentos matemáticos de OFDM se presentan en el Anexo A de este trabajo.

### **Concepto de Prefijo Cíclico**

En un sistema de comunicaciones inalámbrico la propagación de la señal se ve afectada por diferentes fenómenos que varían según el entorno del terminal móvil receptor. Estos fenómenos, como por ejemplo la presencia de reflexiones y la difracción por obstáculos,

ocasionan que la señal se replique en diferentes señales, cada una tomando un trayecto diferente, de tal manera que cada réplica pueda recorrer mayor distancia que la correcta, induciendo errores de recepción al llegar en diferentes instantes de tiempo y con diferentes amplitudes y fases. Esta propagación multi-trayectoria trae dos efectos negativos relevantes, como son la interferencia intersimbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*) relacionada con las diferentes réplicas de la portadora y la interferencia entre sub-portadoras, que traen como consecuencia la pérdida de ortogonalidad entre sub-portadoras [5]. Con el objetivo de combatir estos efectos, los símbolos largos en OFDM permiten la incorporación de un periodo de guarda entre cada símbolo, con el fin de eliminar la interferencia entre ellos debido al retardo de propagación multi-camino. De este modo, un símbolo puede ser cíclicamente extendido en el periodo de guarda, al copiar su parte final al inicio del mismo para crear el denominado Prefijo Cíclico (CP, *Cyclic Prefix*), extendiendo la transmisión de cada símbolo hasta una duración total  $T_p + T_s$ , siendo  $T_p$  el tiempo del prefijo cíclico y  $T_s$  el tiempo de símbolo, como se muestra en la Figura 2.9. Así, si el periodo de guarda es mayor al retardo de propagación en el canal radio y si se incorpora el CP en el símbolo, la interferencia entre símbolos puede llegar a eliminarse completamente [4].



**Figura 2.9** Esquema general de inserción de prefijo cíclico

### **Proceso general de OFDM**

La implementación práctica de un sistema OFDM está basada en principalmente en la Transformada Rápida de Fourier<sup>24</sup> (FFT, *Discrete Fourier Transform*) y su operación inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*), con el objetivo de transformar una señal en el dominio de tiempo a una señal en el dominio de frecuencia y viceversa [17]. Como se muestra en la Figura 2.10, la señal de entrada de un sistema OFDM corresponde a un flujo serial de datos que son mapeados a un formato en paralelo formando símbolos de  $n$  bits de longitud de acuerdo a esquemas de modulación, tales como PSK o QAM. En el formato mapeado se tienen símbolos ortogonales entre sí a los que se les asignará una

<sup>24</sup> La naturaleza periódica de las señales permite también un espectro discreto de Fourier, permitiendo usar la Transformada Discreta (DFT, *Discrete Fourier Transform*) y su inverso (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*).



sub-portadora por medio de la IFFT. La IFFT genera múltiples portadoras a diferentes frecuencias ortogonales dividiendo el ancho de banda disponible entre un número  $N$  de sub-portadoras. El flujo de datos en paralelo sujeta al proceso IFFT constituye la modulación OFDM. La IFFT convierte un número de puntos de datos complejos de longitud  $N$  en una señal en el dominio del tiempo de igual número de puntos. Después de la modulación OFDM, los datos son nuevamente convertidos a un formato serial y se agrega el prefijo cíclico en cada símbolo OFDM para suprimir la interferencia intersimbólica. La señal OFDM se pasa por un conversor Digital/Analógico para producir una señal análoga en banda base, la cual es modulada en radio frecuencia para ser transmitida por el canal radio. En el receptor se lleva a cabo el proceso inverso al transmisor, es decir, se realiza la conversión a banda base, la señal recibida se pasa por un conversor Analógico/Digital. Posteriormente se lleva a cabo un proceso de sincronización, que permite obtener la trama correcta y la duración del símbolo OFDM, para discriminar adecuadamente entre el fragmento correspondiente al CP y los datos propios de la señal recibida [17]. Y seguidamente, el prefijo cíclico es removido del símbolo OFDM y el proceso FFT es aplicado para transformar la señal periódica en el dominio del tiempo en su equivalente espectro de frecuencia. Esto es hecho para encontrar la forma de onda equivalente, generada por una suma de componentes sinusoidales ortogonales. Las portadoras son subsecuentemente desintercaladas, decodificadas con el algoritmo apropiado y demapeadas para dar un estimativo de los datos originales [17, 25].

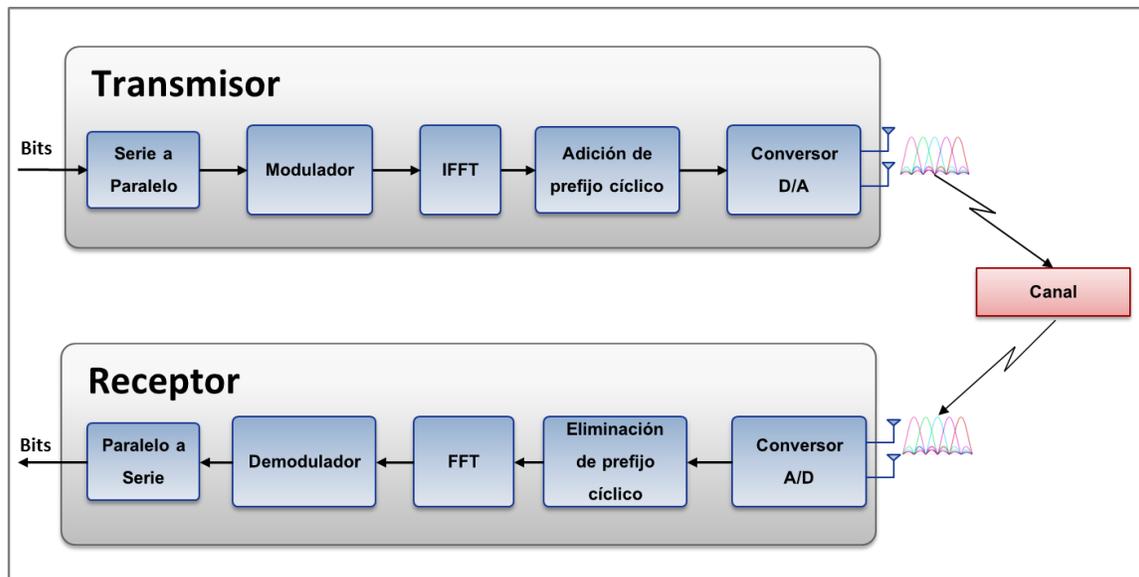


Figura 2.10 Proceso Transmisor y receptor OFDM<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Tomado de [17] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*: Wiley, 2009.



### **2.2.7.1.2 Técnica de acceso múltiple OFDMA para el enlace descendente en LTE**

La técnica de acceso múltiple OFDMA, como una variante de la técnica OFDM, surge al considerar la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las sub-portadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en sub-portadoras distintas [5]. En ese sentido, en un eNB transmisor los usuarios pueden ser ubicados básicamente en cualquiera de las sub-portadoras en el dominio de frecuencia.

Naturalmente, como en OFDM, el principio transmisor de un sistema OFDMA es el uso de sub-portadoras mutuamente ortogonales, de tal manera que el instante de muestreo de una sub-portadora, significa un valor de 0 para las demás. En LTE el espacio  $\Delta f$  entre sub-portadoras es de 15kHz, independientemente del ancho de banda de transmisión. De esta forma, teniendo en cuenta que la ubicación de los usuarios no se realiza sobre una sub-portadora individual sino sobre un bloque de recursos compuesto por 12 sub-portadoras, resulta un ancho de banda de ubicación mínimo de 180kHz [17].

Por otro lado, el uso de OFDMA conduce a diferentes ventajas, algunas se mencionan a continuación. Mediante OFDMA, la asignación de sub-portadoras a usuarios se lleva a cabo dinámicamente, pudiéndose cambiar en períodos cortos de tiempo dicha asignación, lo que conduce a una mayor eficiencia espectral al seleccionar para cada sub-portadora aquel usuario con mejor relación señal a ruido. Así mismo, es posible asignar a un mismo usuario sub-portadoras no contiguas, suficientemente separadas como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia [5]. Por otro lado, OFDMA ofrece técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, lo cual, sumado a la utilización del CP, permite lidiar con los efectos de distorsión e interferencia intersimbólica originados por la propagación multi-trayectoria [17]. Adicionalmente, esta técnica de acceso múltiple permite la adecuación simple de la velocidad de transmisión de los diferentes usuarios, en función de los requerimientos de servicio de cada uno, sin modificación alguna en el proceso de modulación. Del mismo modo, al subdividir la banda total en un conjunto elevado de sub-portadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar recursos a cada uno, lo que resulta útil para acomodar servicios con diferentes requerimientos de calidad. De otra parte, OFDMA aprovecha el ancho de banda asignado, gracias a la utilización de un espaciado mínimo entre las diferentes sub-portadoras utilizadas, sin que ello afecte a la recuperación de la señal transmitida [5].

### **2.2.7.1.3 Técnica de acceso múltiple SC-FDMA para el enlace ascendente en LTE**

A pesar de las múltiples virtudes ofrecidas por OFDMA, existen algunas desventajas dentro de esta técnica que limitan su utilización para el enlace ascendente. La forma de

las ondas en OFDMA presenta fluctuaciones muy pronunciadas de la envolvente, resultando en un factor de cresta o PAPR (PAPR, *Peak-to-Average-Power Ratio*) muy elevado. El PAPR es un factor que mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media. Las señales con un alto PAPR, es decir, con una potencia instantánea transmitida significativamente superior a la potencia media, requieren amplificadores de potencia altamente lineales para evitar la distorsión por la intermodulación excesiva. El resultado, es una baja eficiencia y un aumento en el consumo de batería de los terminales móviles. Otro problema al utilizar OFDMA en la transmisión de subida es el asociado al desplazamiento en la frecuencia de las sub-portadoras respecto de su frecuencia de referencia, originado entre las terminales que transmiten simultáneamente. Esto se traduce en una cierta pérdida de ortogonalidad y la consiguiente interferencia entre sub-portadoras.

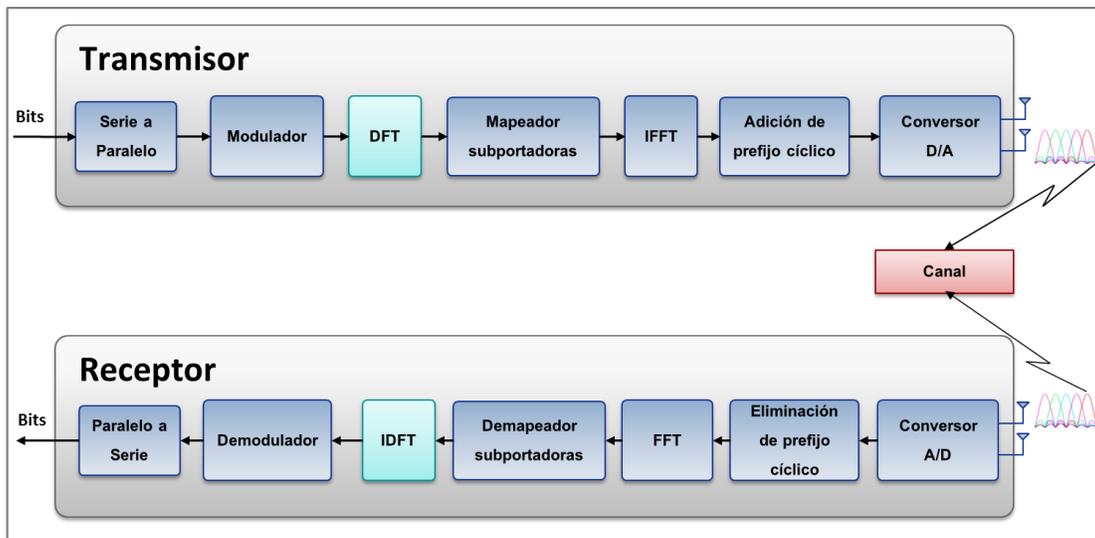


Figura 2.11 Esquema general de SC-FDMA<sup>26</sup>

Para lidiar con las limitaciones mencionadas, 3GPP estableció para el enlace ascendente en el sistema LTE, la técnica de acceso múltiple SC-FDMA, la cual puede considerarse como una versión pre-codificada de OFDMA. En su forma básica, el sistema SC-FDMA utiliza en los transmisores diferentes frecuencias ortogonales (sub-portadoras) para transferir símbolos de información. Sin embargo, tales símbolos se transmiten secuencialmente, uno por vez, en las sub-portadoras y no en paralelo como en OFDMA [26]. En tal sentido, los símbolos en el dominio del tiempo, modulados mediante un esquema QAM o PSK, pasan por un bloque DFT en el transmisor que convierte los símbolos al dominio de la frecuencia, esparciéndolos en todas las sub-portadoras que ocupan el ancho de banda destinado al usuario. Esta operación es deshecha en el

<sup>26</sup> Tomado de [17] Ibid.



receptor, por lo que también se añade un bloque IDFT que no existía en OFDM (Ver Figura 2.11). Haciendo esta operación de pre-codificación se logra un importante objetivo que es la reducción de PAPR con respecto a OFDMA, debido a la naturaleza de portadora única de la señal resultante, que es introducida al amplificador de alta potencia antes de la transmisión.

De otra parte, cabe remarcar que SC-FDMA adiciona también un CP a la transmisión para prevenir la interferencia intersimbólica y simplificar el diseño del receptor. Sin embargo, esta adición se realiza periódicamente por bloques de símbolos y no al final de cada símbolo, pues, en el dominio de tiempo, la tasa de símbolos en SC-FDMA es más rápida que en OFDMA. Así pues, en el receptor es necesario ejecutar un ecualizador por bloques de símbolos hasta encontrar el CP correspondiente que prevenga la propagación de la interferencia intersimbólica [17].

En cuanto a las especificaciones de parámetros para LTE, en SC-FDMA el bloque de recurso para generar la señal en el dominio de frecuencia es definida utilizando los mismos valores usados en el enlace de bajada con OFDMA, es decir, se basa en un espaciado entre sub-portadoras  $\Delta f$  de 15kHz. De esta forma, incluso, si la transmisión real, por su nombre, es en una sola portadora, la fase de generación de la señal se realiza en el ámbito de sub-portadoras. En la forma más simple, el recurso mínimo de ubicación utiliza 12 sub-portadoras, obteniendo un ancho de banda igual a 180kHz, como en OFDMA [17].

### **2.2.7.2 Técnicas de Duplexación**

Se conoce como fenómeno de duplexación a la capacidad que tiene una estación base de crear canales bidireccionales para enviar y recibir información sobre la misma porción del espectro [27]. En LTE se consideran básicamente dos variantes descritas a continuación.

#### **2.2.7.2.1 Duplexación por División de Frecuencia FDD**

El esquema de FDD divide el ancho de banda entre el enlace de subida y el enlace de bajada. De este modo, se requieren dos canales separados para minimizar la interferencia, uno para transmisión y otro para recepción [27].

#### **2.2.7.2.2 Duplexación por División de Tiempo TDD**

El esquema TDD ofrece un único canal para ser usado por el enlace de subida y el enlace de bajada, por lo que se requieren tiempos de guarda entre un proceso y otro. Así mismo, permite asignar dinámicamente diferente ancho de banda carga y descarga, según el tráfico de datos [27].

### 2.2.7.3 Estructura de la trama

En el dominio de tiempo, los recursos físicos del sistema LTE se estructuran siguiendo dos posibles estructuras de trama, las cuales se presentan a continuación. Al final de esta subsección se describe, además, la relación entre el dominio físico y el dominio de frecuencias de los recursos físicos para LTE.

#### 2.2.7.3.1 Estructura de trama FDD Tipo 1

La Figura 2.12 muestra la estructura de trama Tipo 1, la cual es utilizada en sistemas que utilizan duplexación por FDD y es aplicable tanto en enlace descendente como en enlace ascendente y, además, es interoperable con UMTS.

En esta estructura, cada trama tiene una duración de 10ms, y está compuesta por 20 intervalos de tiempo, llamados *slots*, de 0.5 ms de duración. Así pues, la unión de dos slots forma una sub-trama cuya duración es de 1 ms. En cada slot se pueden transmitir seis o siete símbolos OFDM con una duración de 66.7 $\mu$ s bajo una separación entre subportadoras de 15kHz [4]. Cuando en un slot se transmiten 7 símbolos, el PC se conoce como *PC normal* y tiene una duración de 4.7 $\mu$ s, salvo para el primer símbolo que tiene un PC de 5.2 $\mu$ s. Si por el contrario, en un slot se transmiten 6 símbolos, el PC se conoce como *PC extendido*, tomando una duración de 16.67 $\mu$ s [5].

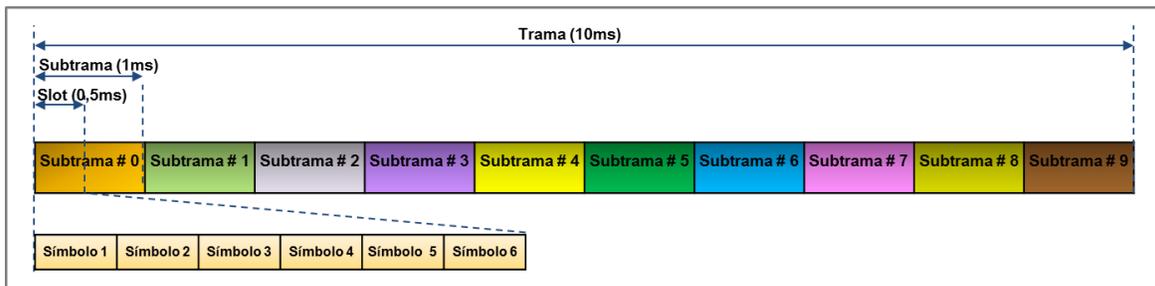


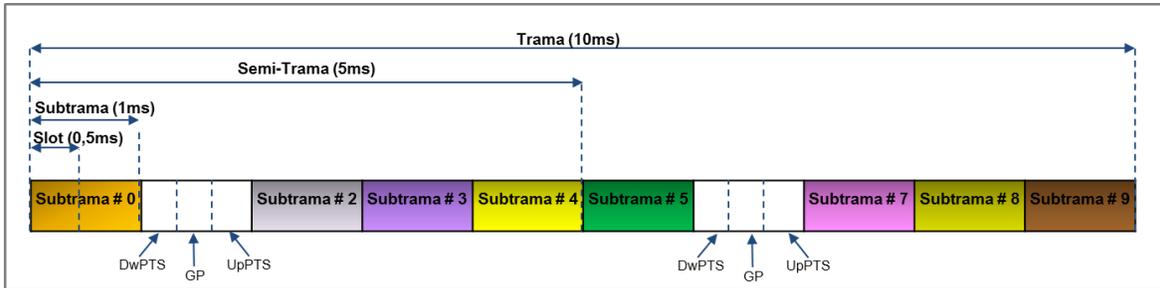
Figura 2.12 Estructura de trama tipo 1<sup>27</sup>

#### 2.2.7.3.2 Estructura de trama TDD Tipo 2

La Figura 2.13 muestra la estructura de trama Tipo 2, la cual ha sido diseñada para operar en duplexación TDD. Como en la estructura Tipo 1, la estructura Tipo 2 contiene 10 subtramas cada una de duración 1 ms. Esta estructura de trama maneja, además, tres campos especiales que son, Intervalo de Tiempo Piloto para el Enlace de Bajada (DwPTS, *Downlink Pilot Time Slot*), Periodo de Guarda (GP, *Guard Period*) e Intervalo de Tiempo Piloto para el Enlace de Subida (UpPTS, *Uplink Pilot Time Slot*), ofreciendo mayor

<sup>27</sup> Tomado de [5] R. A. Comes and F. Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*: Fundación Vodafone España, 2010.

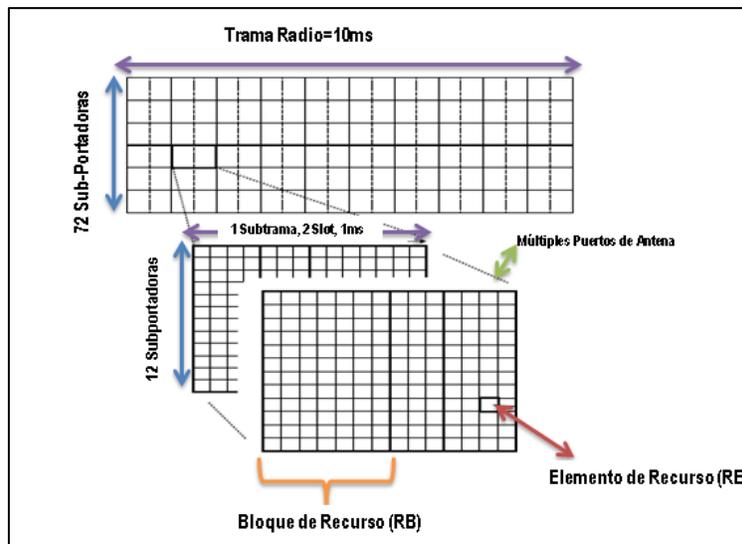
flexibilidad al facilitar la sincronización en la transición entre los enlaces descendente y ascendente [4, 5].



**Figura 2.13** Estructura de trama Tipo 2<sup>28</sup>

Tomando en cuenta que el estudio de esta investigación se enfoca en la estructura de trama Tipo1, la estructura Tipo 2 no será abordada en detalle.

### 2.2.7.3.3 Bloque de Recursos Físicos



**Figura 2.14** Recursos de Transmisión de LTE

Un Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*) corresponde al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Como se mencionó en la sección 2.2.7.1.2, un PRB ocupa, en el dominio de frecuencia, 180kHz de banda, equivalente a doce sub-portadoras equi-espaciadas por 15kHz, y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de CP utilizada, como se

<sup>28</sup> Tomado de [5] Ibid.



presentó anteriormente. En el dominio de tiempo, la duración de un PRB es igual a 0.5ms, es decir la duración de un slot (Ver Figura 2.14) [5].

Los PRB poseen una unidad más pequeña denominada Elementos de Recursos (RE, *Resource Elements*), que consiste en un símbolo OFDMA en el dominio del tiempo y una sub-portadora en el dominio de la frecuencia. En ese sentido, un PRB se compone de 84 RE para el caso de prefijo cíclico normal y 72 RE en el caso del prefijo cíclico extendido [14].

Por otro lado, cabe remarcar que el número de sub-portadoras es 12 veces el número de PRB más uno, considerando la sub-portadora de Corriente Continua (DC, *Direct Current*), que se utiliza como mecanismo de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor [5].

El número de bloques de recursos físicos disponible en el sistema depende del ancho de banda de canal, tal como se indica en la Tabla 2.4.

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

Tabla 2.4 Bloques de Recursos según Ancho de Banda

#### 2.2.7.4 Esquemas de modulación

La modulación es el proceso mediante el cual una señal portadora se modifica en función de una señal moduladora para ser transmitida y de esta forma mejorar la resistencia frente al ruido e interferencia [28]. La tecnología LTE utiliza esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM, modulando 2, 4 y 6 bits por símbolo respectivamente, llevando, en teoría, a una mayor eficiencia espectral a medida que aumenta el orden de modulación. En la Figura 2.15 se puede apreciar las constelaciones que definen, por un lado, las amplitudes de la componente en fase (I) y cuadratura (Q) asociadas a cada símbolo o punto, y por otro la correspondencia entre símbolos y grupo de bits [5].

Con el objeto de incrementar la velocidad de transmisión resultaría conveniente incrementar el número de bits por símbolo de la modulación empleada a base de utilizar constelaciones con más símbolos. Sin embargo, ante unas condiciones determinadas de Relación Señal a Ruido<sup>29</sup> (SNR, *Signal to Noise Ratio*) en el canal, el empleo de modulaciones de orden elevado ocasiona un peor comportamiento en términos de probabilidad de error de bit, ya que al existir más símbolos en la constelación y encontrarse más próximos, es más fácil que, debido al ruido, se detecte erróneamente un

<sup>29</sup> Un término que se utiliza para cuantificar la cantidad de ruido presente en alguna señal dada es la relación señal/ruido. Es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido [29] W. Bolton, *Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas*: Marcombo, 1995..

símbolo en lugar de otro. En resumen, es importante considerar que para emplear satisfactoriamente modulaciones con un número elevado de símbolos, es preciso disponer de buenas condiciones de relación SNR [5].

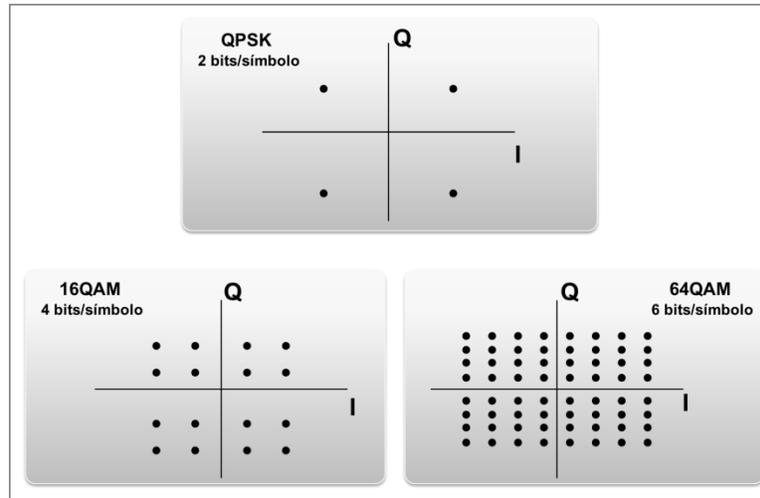


Figura 2.15 Diagramas de constelación<sup>30</sup>

## 2.2.8 Métricas de evaluación del sistema

La mayoría de resultados de simulaciones de sistemas LTE, disponibles en la literatura, se presentan en función de tres métricas de desempeño, conocidas como BLER, BER y Throughput, las cuales se describen a continuación.

### 2.2.8.1 BLER (Block Error Rate)

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 ( 2.8) [30].

$$BLER = \frac{\sum_{i=1}^k (1 - C_i)}{\sum_{i=1}^k 1}, \quad (2.8)$$

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.

<sup>30</sup> Tomado de [17] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*: Wiley, 2009.



### 2.2.8.2 BER (Bit Error Rate)

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 ( 2.9) [31].

$$BER = \frac{\text{Numero de bis errados}}{\text{Numero de bits transmitidos}}. \quad (2.9)$$

### 2.2.8.3 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 ( 2.10) [30].

$$\text{Throughput} = \sum_{i=1}^k TBS \times C_i, \quad (2.10)$$

Donde  $k$  representa la cantidad de sub-tramas transmitidas y  $C$  el valor de CRC. El Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) dado en bits por segundo, se calcula mediante la ecuación ( 2.11). Para el *throughput* teórico se usa la ecuación ( 2.12), siendo 1000 el recíproco de 1ms.

$$TBS = \frac{12 \times 14 \times RBs \times \log_2 M \times CR' \times nA}{1ms}, \quad (2.11)$$

$$\text{Throughput}_t = \frac{12 \times 14}{1ms} \times \log_2 M \times CR \times RBs \times nA, \quad (2.12)$$

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.
- $nA$ , el orden de MIMO, el cual es:
  - 1, para SISO
  - 2, para MIMO 2X2
  - 4, para MIMO 4X4.

## 2.3 TÉCNICA MULTI-ANTENA MIMO

### 2.3.1 Aspectos generales de las técnicas multi-antena

Al agregar antenas adicionales a un sistema radio se obtiene la posibilidad de mejorar el rendimiento debido a que las señales emitidas serán replicadas en otras señales que tomarán diferentes rutas físicas. Uno de los mecanismos para aprovechar las réplicas originadas por la propagación multi-camino consiste en poner en uso las diferencias en las rutas, introducidas al separar las antenas (*separación espacial*), a través del uso de la multiplexación espacial o *beamforming*. Este tipo de mecanismos suelen conocerse como técnicas Multi-Antena [4]. Así, considerando un número de antenas en recepción suficientemente separadas, se puede conseguir a la salida de los canales formados entre las antenas transmisoras y las antenas receptoras, réplicas de la señal transmitida, las cuales, al combinarlas, permiten conseguir una nueva señal con un mayor nivel de potencia instantánea y, de este modo, recuperar finalmente la señal de información modulada en mejores condiciones de relación potencia de señal a potencia de ruido [5]. De esta manera, en la operación multi-antena, la relación entre las antenas se convierte en una variable a tratar, afectando la relación entre las rutas que toman las señales, la cual suele ser referida como *correlación* [4].

Hay cuatro formas de hacer uso del canal de radio, conocidas como Única Entrada Única Salida (SISO, *Single Input Single Output*), Única Entrada Múltiples Salidas (SIMO, *Single Input Multiple Output*), Múltiples Entradas Única Salida (MISO, *Multiple Input Single Output*) y Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*). El modo de operación de cada una varía una vez se introduzca más de una antena y, dado el caso, en teoría, puede adicionarse cualquier número de antenas [4]. La Figura 2.16 muestra, a nivel general, la estructura de los modos de acceso al canal radio. Por simplicidad, se representa cada uno mediante sólo una o dos antenas.

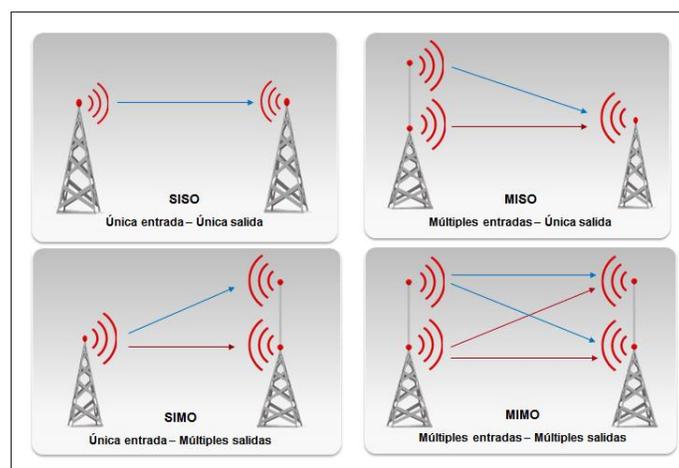


Figura 2.16 Representación general de modos de acceso



La utilización de una sola antena en el transmisor y otra en el receptor, SISO, es el modo de acceso al canal radio más básico y tradicional en las comunicaciones inalámbricas. Mientras este método explota el pre-procesamiento y la decodificación de los datos transmitidos y recibidos, respectivamente, en el dominio de tiempo o de frecuencia, el uso de antenas adicionales, bien sea en el eNB o en el UE, abre una dimensión espacial extra para la pre-codificación y detección de las señales. Los métodos de procesamiento de espacio-tiempo involucrados en las técnicas multi-antena, explotan esta nueva dimensión con el objetivo de mejorar el rendimiento de los enlaces en términos de una o más métricas posibles, tales como la tasa de error, la tasa de datos de transmisión, el área de cobertura y la eficiencia espectral [14].

En el escenario de una estación base capacitada para múltiples antenas que se comunica con un UE de una sola antena, los enlaces de subida y de bajada, son referidos como SIMO y MISO, respectivamente. Por el contrario, si se tiene un terminal móvil con múltiples antenas, se tiene un enlace completo MIMO. Las técnicas SIMO y MISO, que describen, de manera respectiva, la diversidad en recepción y en transmisión, pueden ser incluidas como casos especiales de MIMO, sin embargo, cabe mencionar que la utilización simultánea de éstas no es igual a MIMO, pues pueden haber varios transmisores y receptores involucrados pero aun así solo habría un flujo de datos. Para incrementar la capacidad espectral, la operación de MIMO se basa en la multiplexación espacial, en la cual varios flujos de datos de entrada se transmiten simultáneamente [4]. Por otra parte, un enlace multi-antena punto a punto entre un eNB y un solo UE se conoce como MIMO Único Usuario (SU-MIMO, *Single User MIMO*), mientras que la comunicación simultánea de varios UEs con un eNB común, usando los mismos recursos en los dominios de tiempo y frecuencia, se conoce como MIMO Multi-Usuario (MU-MIMO, *Multi-User MIMO*) [14].

### **2.3.2 Tipos de ganancia en los sistemas MIMO**

Los canales radio de propagación multi-antena se asocian a tres ventajas, que se refieren a la ganancia por diversidad, ganancia de la estructura de antenas<sup>31</sup> y ganancia por multiplexación espacial [14], las cuales se describen, brevemente, a continuación.

#### **2.3.2.1 Ganancia por diversidad**

El principio de la diversidad es proporcionar al receptor múltiples versiones de una misma señal transmitida. Cada de una de estas versiones es definida como una rama de diversidad. Si cada rama varía independientemente, la probabilidad de que ocurra un desvanecimiento simultáneamente en todas ellos disminuye drásticamente. Por lo tanto, la diversidad ayuda a estabilizar el enlace a través del robustecimiento del canal, llevando a mejorar el rendimiento en términos de la tasa de error [32].

---

<sup>31</sup> Referida normalmente en la bibliografía como *Array gain*.



De esta manera, teniendo en cuenta que el desvanecimiento puede tomar lugar en tiempo, frecuencia y espacio, las técnicas de diversidad pueden, similarmente, ser explotadas en cada uno de estos dominios. Naturalmente, las técnicas de diversidad por tiempo y frecuencia incurrir en pérdida en tiempo o ancho de banda para permitir la introducción de redundancia. En contraste, la diversidad espacial no sacrifica tiempo ni ancho de banda, al hacer uso de múltiples antenas en ambos lados del enlace [32].

La ganancia por diversidad corresponde a la mitigación del efecto del desvanecimiento multi-camino y normalmente es expresada en términos del incremento de la pendiente de la curva de la tasa de error como una función de la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) [14, 32].

### **2.3.2.2 Ganancia de la estructura de antenas**

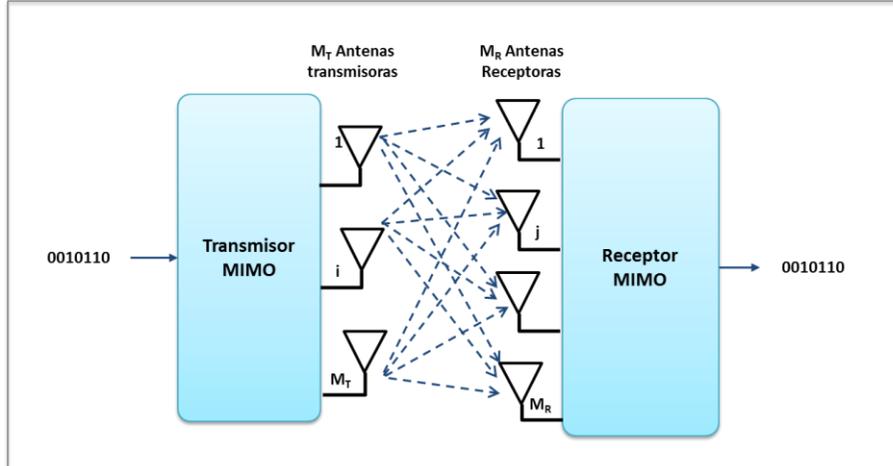
La ganancia de la estructura de antenas proporciona información sobre el aumento de potencia que resulta de explotar la información del estado del canal en el transmisor o, simplemente, del modelo del canal. Esta ganancia denota el mejoramiento en la SNR que resulta de un efecto de combinación coherente de las señales de información. Tal combinación puede ser realizada a través del procesamiento espacial en las antenas receptoras y/o un pre-procesamiento espacial en las antenas receptoras [33].

### **2.3.2.3 Ganancia por multiplexación espacial**

Mientras la ganancia por diversidad está fundamentalmente relacionada a mejorar las estadísticas de la SNR instantánea en un desvanecimiento de canal, las ganancias por vector y por multiplexación espacial están relacionadas a la geometría y a la teoría de los espacios de vectores. En ese sentido, la diversidad por multiplexación espacial se refiere a la capacidad de enviar múltiples flujos de datos en paralelo, con el objetivo de aumentar la velocidad de transmisión. Esta multiplexación ofrecida por MIMO no trae costos de expansión de ancho de banda, sin embargo, sí conlleva gasto de antenas adicionales y a complejidad computacional [14].

## **2.3.3 Formulación de las estructuras MIMO**

La Figura 2.17 muestra el modelo simplificado de un sistema MIMO con  $M_T$  antenas transmisoras y  $M_R$  antenas receptoras.



**Figura 2.17** Modelo simplificado de un sistema MIMO<sup>32</sup>

Este sistema puede formularse como se ve en la ecuación ( 2.13) [5].

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_{i,j}(\tau, t) * s_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, M_R \quad (2.13)$$

Donde  $y_i(t)$  es la señal recibida en el extremo receptor por la  $i$ -ésima antena,  $h_{i,j}(\tau, t)$  es la respuesta impulsional<sup>33</sup> del canal móvil en el instante  $t$  entre la antena transmisora  $j$ -ésima y la antena receptora la  $i$ -ésima y  $s_j(t)$  es la señal de entrada a la antena transmisora  $j$ -ésima. La respuesta impulsional  $h_{i,j}(\tau, t)$  es la de un sistema lineal variante en el tiempo, y dada la naturaleza indeterminada y variable del escenario móvil, es también una señal aleatoria.

Por otro lado, como es usual en sistemas de ecuaciones lineales, la formulación anterior puede representarse también de una forma más compacta a través de una representación matricial, la cual surge más naturalmente del sistema representado en la Figura 2.17 [5, 14]. En ese sentido, se define una matriz de canales de dimensiones  $M_R \times M_T$  con  $M_R M_T$  enlaces, como en la ecuación ( 2.14)

<sup>32</sup> Tomado de [14] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*: Wiley, 2011.

<sup>33</sup> La respuesta impulsional es generalmente una señal de corta duración en el dominio del tiempo que permite predecir lo que la salida del sistema en el dominio del tiempo.



$$\begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \dots & h_{1,M_T}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \dots & h_{2,M_T}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{M_R,1}(\tau, t) & h_{M_R,2}(\tau, t) & \dots & h_{M_R,M_T}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

De esta manera, resulta como en la ecuación ( 2.15).

$$y(t) = H(\tau, t) * s(t) \quad (2.15)$$

Donde:

$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M_T}(t)]^T$ , es un vector uni-dimensional de  $M_T$  elementos que contiene las señales de entrada  $s_i(t)$  con  $i = 1, 2, \dots, M_T$  a cada una de las  $M_T$  antenas transmisoras.

$y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_{M_R}(t)]^T$ , es un vector unidimensional de  $M_R$  elementos que contiene las  $M_R$  salidas de cada una de las  $M_R$  antenas receptoras.

El superíndice  $T$  indica transpuesta y  $*$  corresponde al operador de convolución.

De este modo, simplificando  $y(t) = y$ ,  $H(\tau, t) = H$  y  $s(t) = s$ , se obtiene la fórmula general para la representación MIMO como en la ecuación ( 2.16).

$$y = H * s + n \quad (2.16)$$

Siendo  $n = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_{M_R}(t)]^T$  el vector unidimensional de ruido aditivo de  $M_R$  componentes no correlacionados, donde cada uno representa la contribución de ruido sobre la antena receptora correspondiente [14].

### 2.3.4 Capacidad MIMO

Como resultado de la ganancia por diversidad espacial, se consigue mejorar la capacidad del canal resultante, aumentando linealmente la SNR, a la entrada del receptor, conforme al número de antenas. Teóricamente, esta capacidad, medida en bits/s, está definida con base en la expresión introducida por Shannon, como se presenta en la ecuación ( 2.17) [34].

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2.17)$$

Como se observa, la capacidad o máxima velocidad de transmisión  $C$  para una banda  $B$  que se podría conseguir libre de errores, crece sólo de modo logarítmico con la SNR.

### 2.3.5 Procesamiento general de la capa física

La Figura 2.18 presenta el procesamiento general de la capa física de la interfaz radio.

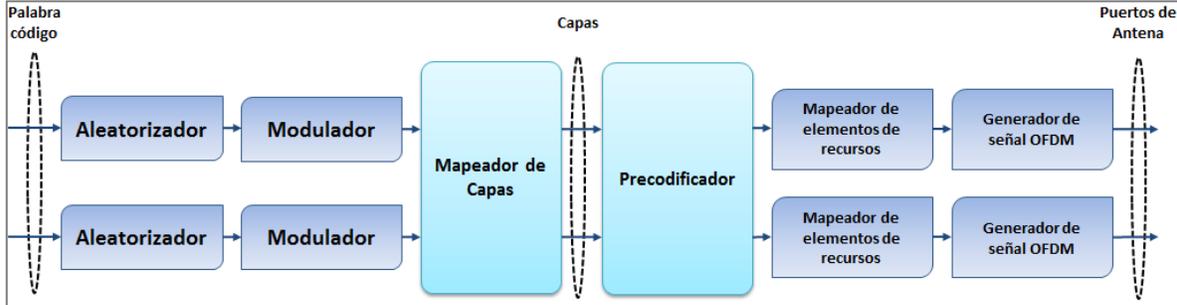


Figura 2.18 Procesamiento general de la capa física<sup>34</sup>

### 2.3.5.1 Aleatorizador

Aleatorización en el enlace descendente implica que los bloques de bits de la palabra código, entregados por la capa de transporte, son multiplicados por una secuencia de bits aleatorios mediante la operación XOR u OR exclusiva [36]. La aleatorización de los bits de información utilizando diferentes secuencias para cada celda garantiza que las señales interferentes de celdas vecinas estén aleatorizadas, lo que permite aprovechar al máximo el proceso de codificación que se ha aplicado en el procesamiento de canal de transporte [1].

### 2.3.5.2 Modulador

Para cada palabra código, el bloque de bits aleatorizados se modulan según los esquemas descritos en la sección 2.2.7.4.

### 2.3.5.3 Mapeador de Capas

En el caso de diversidad de transmisión, una palabra código se transmite a partir de dos a cuatro puertos de antena. El número de capas es igual al número de puertos de antena. Al número de símbolos de modulación por capa  $M_{\text{Símbolo}}^{\text{capa}}$  para 2 y 4 puertos de antena está dada por las ecuaciones ( 2.18) y ( 2.19) respectivamente.

$$M_{\text{Símbolo}}^{\text{capa}} = \frac{M_{\text{Símbolo}}^{(0)}}{2}, v = 2) \quad (2.18)$$

$$M_{\text{Símbolo}}^{\text{capa}} = \frac{M_{\text{Símbolo}}^{(0)}}{4}, v = 4 \quad (2.19)$$

<sup>34</sup> Tomado de [35] T. S. G. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation," 3GPP TS 36.211 V8.9.0 Release 8, pp. 53-54, 2010.



Donde  $M_{\text{Simbolo}}^{(0)}$  representa la totalidad de símbolos de modulación dentro de la palabra código. Para el caso de dos puertos de antena, los símbolos de modulación de una palabra código es mapeada a 2 capas ( $v = 2$ ) como se muestran en las ecuaciones ( 2.20), ( 2.21) y ( 2.22)

$$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(2i) \quad (2.20)$$

$$x^{(1)}(i) = d^{(0)}(2i + 1) \quad (2.21)$$

$$i = 0, 1, \dots (M_{\text{Simbolo}}^{\text{capa}} - 1) \quad (2.22)$$

Para el caso de cuatro puertos de antena, los símbolos de modulación de una palabra código es mapeada a 4 capas ( $v = 4$ ) como se muestran en las ecuaciones ( 2.23), ( 2.24), ( 2.25) y ( 2.26).

$$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(4i) \quad (2.23)$$

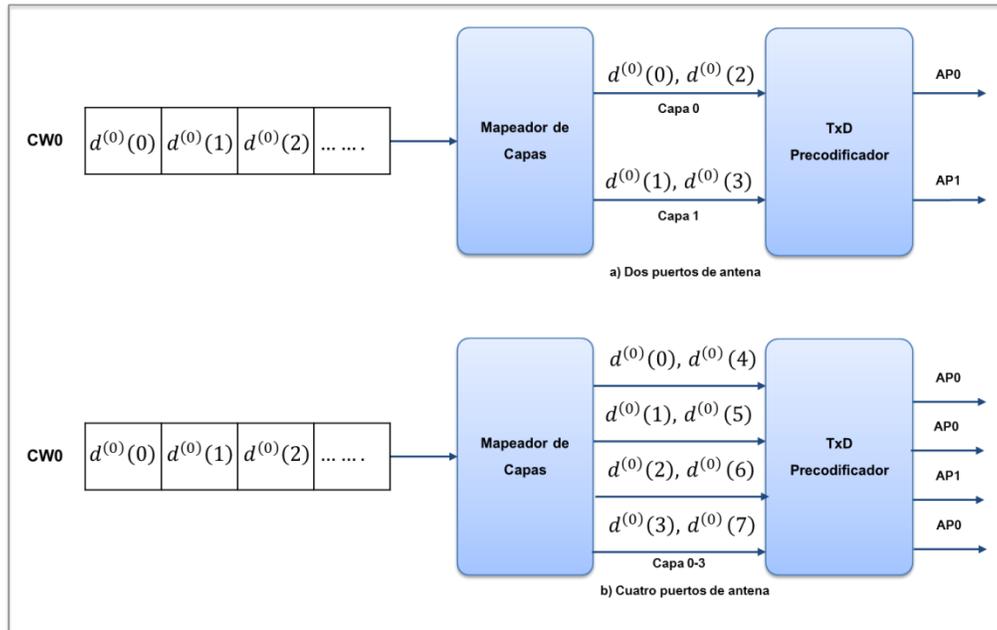
$$x^{(1)}(i) = d^{(0)}(4i + 1) \quad (2.24)$$

$$x^{(2)}(i) = d^{(0)}(4i + 2) \quad (2.25)$$

$$x^{(3)}(i) = d^{(0)}(4i + 3) \quad (2.26)$$

$$i = 0, 1, \dots (M_{\text{Simbolo}}^{\text{capa}} - 1) \quad (2.27)$$

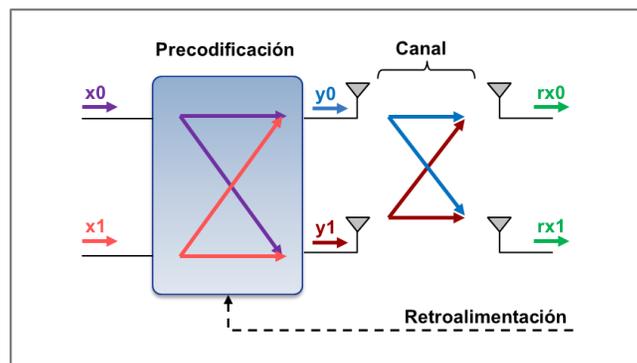
Para el caso de Diversidad de Transmisión, el mapeo de capas de la palabra código para dos y cuatro puertos de antena se muestran en la Figura 2.19. Para dos puertos de antena (dos capas), los pares numerados ( $d^{(0)}(0), d^{(0)}(2), \dots$ ) y los impares numerados ( $d^{(0)}(1), d^{(0)}(3), \dots$ ) son símbolos de modulación de la palabra código que se asignan a las capas 0 y 1 respectivamente. En el caso de cuatro puertos de antena, 1/4 de los símbolos de modulación de una palabra código son mapeados a una determinada capa según la ecuación 2.10 [22].



**Figura 2.19** Mapeo de capas de una palabra código (CW, Codeword) para dos y cuatro puertos de antena

### 2.3.5.4 Precodificador

Como se observa en la Figura 2.20, al añadir precodificación el transmisor tiene conocimiento de las condiciones actuales del canal, por lo que puede combinar con efectividad las capas antes de la transmisión con el fin de ecualizar la recepción de la señal a través de múltiples antenas de recepción. Se han especificado esquemas de precodificación para aplicaciones de multiplexado espacial y de diversidad en transmisión [35].



**Figura 2.20** Mimo con precodificación

La precodificación se basa en conceptos de modelado de canales de transmisión con la condición de permitir que múltiples canales se transmitan simultáneamente al sistema



MIMO. La especificación LTE define un conjunto de complejas matrices de ponderación para combinar las capas antes de la transmisión utilizando configuraciones de hasta 4x4 antenas [35]. Para una combinación 2x2, la matriz de ponderación,  $W$ , se multiplica por las capas de entrada para generar las señales precodificadas que se transmitirán.

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ y^{(1)}(i) \end{bmatrix} = w(i) \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ x^{(1)}(i) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Aquí,  $x^{(q)}(i)$  son las capas de entrada antes de la precodificación ( $q = 0,1$ ) e  $y^{(q)}(i)$  son las señales precodificadas aplicadas a cada antena de transmisión. La matriz de precodificación más sencilla mapea cada capa a una única antena dedicada a transmitir esa capa, sin acoplamiento a otras antenas. En este caso, la matriz de ponderación, definida con el índice del libro de códigos 0 (ver libros de códigos para diferentes puertos de antena en Anexo B), se convierte en:

$$w(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Lo que produce los siguientes datos transmitidos:

$$y^{(0)}(i) = \frac{1}{2} x^{(0)}(i) \quad (2.30)$$

$$y^{(1)}(i) = \frac{1}{2} x^{(1)}(i) \quad (2.31)$$

Una segunda matriz de precodificación, definida con el índice del libro de códigos 1, proporciona una combinación lineal de las sumas y diferencias de las dos capas de entrada respectivamente. La matriz de ponderación para el libro de códigos 1 es:

$$w(i) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Lo que produce los siguientes datos transmitidos:

$$y^{(0)}(i) = \frac{1}{2} x^{(0)}(i) + \frac{1}{2} x^{(1)}(i) \quad (2.33)$$

$$y^{(1)}(i) = \frac{1}{2} x^{(0)}(i) - \frac{1}{2} x^{(1)}(i) \quad (2.34)$$

Esta selección de libro de códigos permite transmitir una parte de cada capa de señal a través de cada antena y, según las condiciones del canal, proporcionar cierta flexibilidad



al intentar mejorar y ecualizar la SNR en cada receptor MIMO. La especificación LTE para la precodificación de transmisiones de multiplexado espacial incluye un total de cuatro matrices de libro de códigos para dos configuraciones de antena de transmisión y 16 matrices de libro de códigos para cuatro sistemas de antena de transmisión. La selección correcta de la matriz de precodificación óptima requiere un conocimiento de las condiciones actuales del canal en el transmisor. Las condiciones del canal se suministran mediante retroalimentación del receptor MIMO, lo que crea un sistema de bucle cerrado. Para una transmisión de enlace descendente precodificada LTE, el terminal móvil o los equipos de usuario (UE) medirán las características del canal y determinarán el índice de matriz de precodificación (PMI), el indicador de calidad del canal (CQI) y/o el índice de rango (RI). Esta información se enviará a la estación base (eNB), que modificaría la selección de libro de códigos de precodificación para mejorar el rendimiento general del sistema [23].

### **2.3.5.5 Mapeador de bloques de recursos**

El mapeo de un bloque de recursos transforma los símbolos que serán transmitidos en cada antena a los elementos de recurso del conjunto de bloques de recursos asignados por el planificador MAC para la transmisión de los bloques de transporte [36]. Posteriormente, se genera la señal OFDM para cada antena y se transmite por el canal radio.

### **2.3.6 Canal de comunicación**

Un canal de comunicación es el medio por el cual se envía información desde el transmisor hacia el receptor. La transmisión de las ondas radioeléctricas está asociada principalmente con un medio aleatorio que es sensible a diferentes efectos negativos de propagación. De esta manera, se hace necesario analizar con métodos estadísticos que permitan describir satisfactoriamente las variaciones de los parámetros de propagación en el tiempo y en el espacio. Estos métodos estadísticos ayudan a definir diferentes modelos de canal, como los canales multitrayecto, modelos Rayleigh, gaussiana, Rice, entre otros [37].

De acuerdo al propósito de esta investigación, a continuación se presentan sólo las características básicas de propagación para los canales multitrayecto, sin embargo, en el Anexo C se exponen las propiedades fundamentales de algunas otras distribuciones de probabilidad utilizadas para los estudios de propagación.

#### **2.3.6.1 Características de propagación de canales 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 ( 2.35).



$$h(\tau, t) = \sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j(2\pi f_{D,p}t + \varphi_p)} \delta(\tau - \tau_p) \quad (2.35)$$

Donde

$$\delta(\tau - \tau_p) = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau = \tau_p \\ 0 & \text{otros valores} \end{cases} \quad (2.36)$$

$a_p$ ,  $f_{D,p}$ ,  $\varphi_p$  y  $\tau_p$  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  $\alpha_p$  como denota la ecuación (2.37)

$$f_{D,p} = \frac{vf_c \cos(\alpha_p)}{c}. \quad (2.37)$$

Cuando se tiene en cuenta un canal móvil con multitrayectoria la propagación de las señales se ve afectada por la dispersión de retardo y de frecuencia, las cuales se describen a continuación.

### 2.3.6.1.1 Dispersión de retardo

La dispersión de retardo se refiere al tiempo que pasa entre la llegada del trayecto directo y la última componente significativa de la señal multitrayecto. La Tabla 2.5 describe la dispersión del retardo para 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*) evidenciando el número de trayectos, retardo de propagación RMS y el retardo máximo definidos por el 3GPP LTE para una baja, media y alta dispersión de retardo. La Tabla 2.6 describe de forma detallada los parámetros de los modelos de canal LTE [38].

Modelo	Numero de trayectos	Retardo de propagación RMS	Retardo máximo
EPA	7	45 ns	410 ns
EVA	9	357 ns	2510 ns
ETU	9	991 ns	5000 ns

**Tabla 2.5** Perfiles de retardo de propagación para los modelos de canal LTE<sup>27</sup>



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 2.6** Escenarios de propagación para los modelos de canal LTE Peatonal, Vehicular y Urbano típico<sup>35</sup>

### 2.3.6.1.2 La dispersión de frecuencia

La dispersión de frecuencia (corrimiento *Doppler*) es 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 las cuales indican la separación de estos ecos de la señal. La Tabla 2.7 describe dichas frecuencias y su relación con la velocidad del móvil.

	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

**Tabla 2.7** Frecuencias Doppler definidas por LTE para los modelos de canal<sup>27</sup>

<sup>35</sup> Tomado de [39] T. S. G. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception " 3GPP TS 36.101 V 8.26.0 Release 8, pp. 143 - 144, 2015.





## Capítulo 3

### 3 ADAPTACIÓN Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MODELADO Y SIMULACIÓN

Este capítulo presenta los pasos para seguir la aplicación de una metodología de simulación. Se identifican ocho fases para la correcta aplicación de la simulación, estos pasos están diseñados para construir un modelo conceptual del sistema a simular necesario para cumplir los objetivos propuestos.

La metodología de modelado y simulación adaptada para realizar el análisis del desempeño del enlace de bajada LTE con MIMO, se compone de una serie de etapas mencionadas en *Simulation Methodology- A Practitioner's Perspective*, se modela en la Figura 3.1.

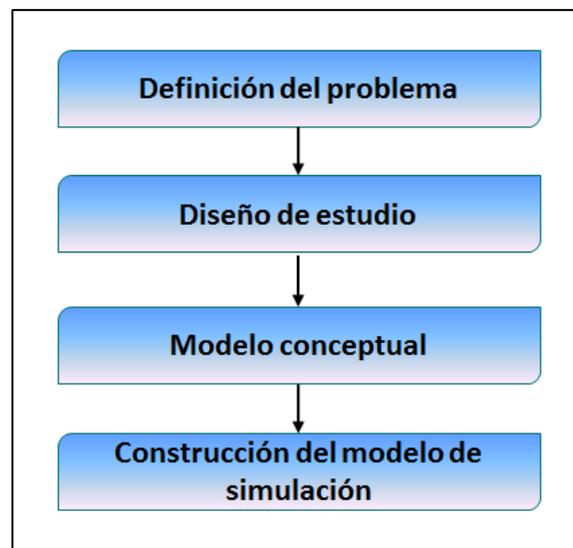


Figura 3.1 Metodología de Simulación

#### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El uso de MIMO en el enlace de bajada de LTE contribuye a mejorar las características de desempeño del sistema, para validar la anterior afirmación es necesario el análisis de desempeño a nivel físico del sistema mediante sus métricas en función de la BER, BLER, *throughput* y la SNR.



El análisis se realizará teniendo en cuenta las especificaciones del 3GPP en el *Release 8*, para el enlace de bajada LTE en FDD.

### 3.2 DISEÑO DE ESTUDIO

MIMO es una tecnología que se refiere al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia, aprovechando la propagación multicamino, permitiendo incrementar la velocidad y la capacidad del sistema. Con base en el problema planteado, se diseñaron escenarios de simulación que son necesarios para describir y evaluar a nivel físico el comportamiento del enlace de bajada LTE con MIMO a nivel físico. Para la implementación de los escenarios se hizo uso de la herramienta *SystemVue®* de *Agilent Technologies®* el cual es un software de simulación, con licencia académica, que cuenta con la tecnología LTE con MIMO basada en las especificaciones del *Release 8*.

#### ESCENARIO 1

Se considera el enlace descendente de LTE con la configuración MIMO 2x2 y 4x4 con modulación QPSK, realizando la variación de la tasa de codificación a 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6, con el objetivo de verificar a que tasa se logra una transmisión fiable en la comunicación de datos, adicional se analizará el comportamiento con el esquema de modulación empleado en el canal EPA5, como se muestra en la Tabla 3.1.

Configuración	Modulación	Tasa de Codificación	Modelo del Canal	Ancho de Banda
MIMO 2X2	QPSK	Variable	EPA5	10 MHz
MIMO 4X4				

Tabla 3.1 Escenario de simulación 1

#### ESCENARIO 2

El escenario 1 permite la evaluación del comportamiento del sistema variando la tasa de codificación, para este escenario se tendrá en cuenta el valor de tasa de codificación que haya entregado mejores resultados, adicionalmente se variará el esquema de modulación y los modelos de canal que se especifican en la Tabla 3.2.



Configuración	Modulación	Tasa de Codificación	Modelo del Canal	Ancho de Banda
<b>MIMO 2X2</b>	16 QAM	Escenario 1	EVA5	10MHz
<b>MIMO 4X4</b>			64 QAM	
	ETU70			
	ETU300			

**Tabla 3.2** Escenario de simulación 2

### ESCENARIO 3

Del escenario 2 se toma el modelo de canal ITU, la tasa de codificación del escenario 1, con un ancho de banda de 15 MHz, la Tabla 3.3 describe el escenario.

Configuración	Modulación	Tasa de Codificación	Modelo del Canal	Ancho de Banda
<b>MIMO 2X2</b>	16 QAM 64 QAM	Escenario 1	Escenario 2	Variable 15MHz – 20MHz
<b>MIMO 4X4</b>				

**Tabla 3.3** Escenario de simulación 3

### ESCENARIO 4

En este escenario se emplea la configuración SISO para efecto de comparación frente a MIMO, se retoma el valor de la tasa de codificación encontrado en el escenario 1, se evaluará el desempeño en los modelos descritos en la Tabla 3.4.

Configuración	Modulación	Tasa de Codificación	Modelo del Canal	Ancho de Banda
<b>SISO</b>	16 QAM	Escenario 1	EVA5	10MHz
			EPA5	
	64 QAM		ETU70	
			ETU300	

**Tabla 3.4** Escenario de simulación 4

Como puede observarse, en todos los escenarios se plantea un estudio que tiene como propósito la interpretación y el análisis de los resultados obtenidos en cada caso. Estos

resultados servirán como pauta para llegar al objetivo planteado en este trabajo de grado. En la Figura 3.2 se muestra el diseño de estudio global empleado.

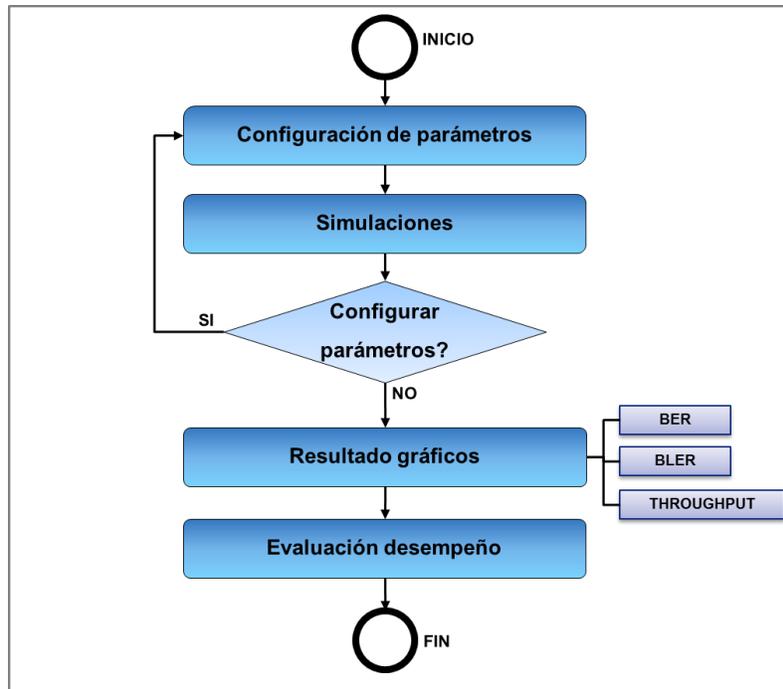


Figura 3.2 Diseño de estudio global

### 3.3 MODELO CONCEPTUAL

Dentro del modelo conceptual se describen en detalle los componentes del sistema que harán parte de la simulación garantizando el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado. Iniciando la descripción, en la Figura 3.3 se tiene en la el modelo general del enlace de bajada de un sistema LTE, se adaptará MIMO teniendo cuenta las características en cada proceso y los elementos que hacen posible la transmisión.

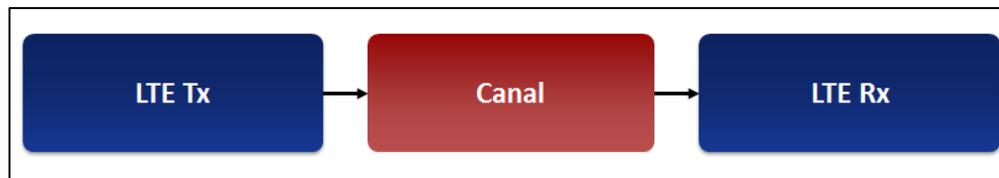


Figura 3.3 Esquema general del enlace de bajada LTE

#### 3.3.1 En el transmisor

Los recursos físicos se representan por una trama en el dominio del tiempo y la frecuencia, en la que cada elemento de recurso corresponde a una subportadora OFDM

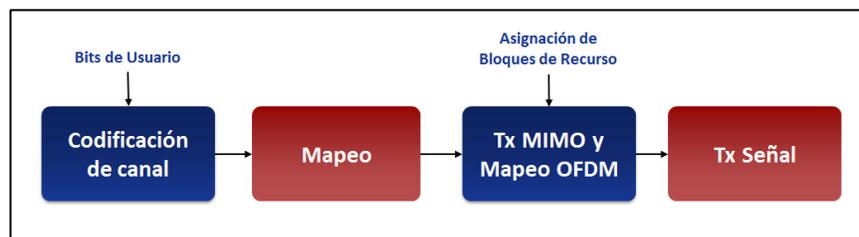


durante un intervalo de símbolo. Se forma entonces un bloque de transporte al cual se le aplica chequeo de redundancia cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*), cada uno se codifica en forma independiente utilizando un codificador turbo.

El proceso de codificación es seguido por la modulación del bloque de transporte a símbolos de modulación compleja, QPSK, 16 QAM ó 64 QAM, posteriormente los símbolos modulados transmitidos, son mapeados a los puertos de antena, este mapeo se realiza dependiendo de los diferentes modos de transmisión.

Finalmente, los símbolos que se deben transmitir se asignan a los elementos de recursos, la información del conjunto de recursos bloque se lleva a cabo el planificador basado en el CQI que es reportado por el usuario.

En la Figura 3.4 se presenta una visión general del proceso en el transmisor.



**Figura 3.4** Proceso en el transmisor LTE con MIMO

### 3.3.2 En el Canal

Para efectos de comparación del retardo de propagación se emplean los canales de la ITU:

- Peatonal Extendido A 5 Hz (EPA5, Extended Peatonal A 5 Hz)
- Urbano Típico Extendido 70 Hz (ETU, Extended Typical Urban 70 Hz)
- Vehicular Extendido A 70 Hz (EVA, Extended Vehicular A 70 Hz)
- Urbano Típico Extendido 300 Hz (ETU, Extended Typical Urban 300 Hz)

Donde 5 Hz, 70 Hz y 300 Hz, corresponden a la máxima frecuencia Doppler.<sup>36</sup>

### 3.3.3 En Recepción

Se identifica la información llevada por el bloque de recursos, basándose en la estimación de canal se puede evaluar la calidad del canal, la cual es útil para la demodulación y el de-mapeo de la señal OFDM. Posteriormente se realiza la comprobación de CRC del bloque decodificado puesto que se debe recuperar la señal original con la menor cantidad de errores posibles. Los parámetros de desempeño a nivel físico evaluados en el receptor

<sup>36</sup> El efecto Doppler se utiliza para los requisitos de rendimiento de la red de acceso terrestre UMTS, la frecuencia Doppler relaciona la velocidad del UE, la frecuencia de portadora y la velocidad de la luz.



para diferentes valores de Relación Señal a Ruido (SNR, Signal to Noise Ratio) y analizar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE para diferentes condiciones de canal de acuerdo a LTE (Release 8) del 3GPP son: BLER, BER y Throughput, como se muestra en la Figura 3.5.

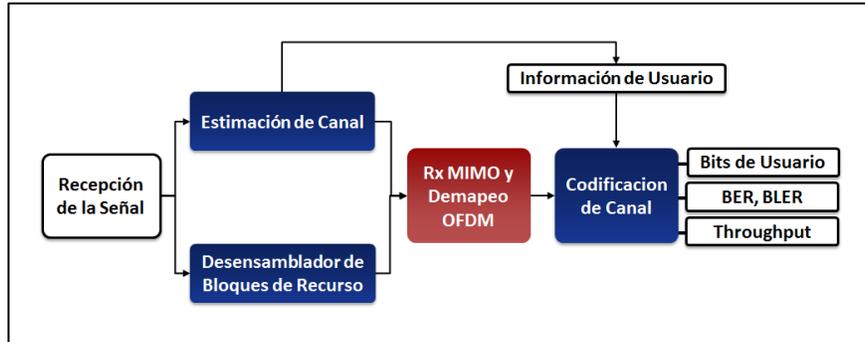


Figura 3.5 Proceso en el receptor LTE

### 3.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

En la Figura 3.6 se presenta el diseño del modelo de simulación realizado en la herramienta SystemVue® de Agilent Technologies®.

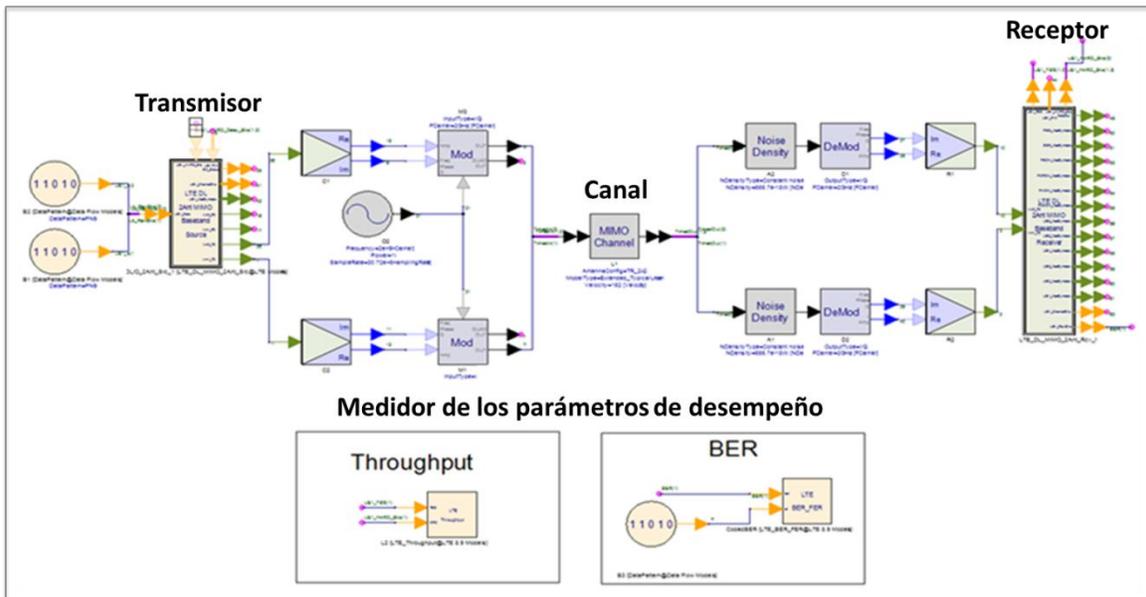


Figura 3.6 Diseño del modelo de simulación en SystemVue®



## Capítulo 4

### 4 ANALISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de desempeño a nivel físico del enlace de bajada del sistema LTE con MIMO, basado en los resultados obtenidos a través de la simulación con el software SystemVue® de Agilent Technologies® del modelo del canal PDSCH, estableciendo parámetros iniciales como la modulación, el ancho de banda, y la tasa de codificación acorde a las especificaciones del Release 8.

Pese a la variedad de posibles análisis, el desarrollo de este trabajo se centra principalmente en el análisis de desempeño a nivel físico, por lo cual se muestran resultados gráficos de BER, BLER y el *Throughput* en función de la  $S_xzNR$ , siendo las métricas que describen el rendimiento del sistema. Adicionalmente se comparará la inclusión de configuraciones MIMO 2X2 y 4X4 con un sistema SISO en el enlace de bajada y se realizarán pruebas variando dichos parámetros iniciales, evidenciando la influencia e importancia de cada uno en el desempeño del sistema LTE.

#### 4.2 ESCENARIO 1

La finalidad de la codificación de canal es mitigar los efectos del ruido y la distorsión introducidos por el medio de propagación y las no linealidades del propio sistema. Teniendo lo anterior como punto de partida, este escenario pretende verificar el mejor desempeño del enlace de bajada de LTE con MIMO en configuración 2X2 y 4X4 realizando la variación de las tasas de codificación de canal. Los parámetros de configuración empleados en el programa se describen en la Tabla 4.1.

Parámetros	Configuración
Modulación	QPSK
Tasas de codificación	1/3, 1/2, 2/3, 5/6
Modelo de canal	EPA5
Ancho de banda	10 MHz

Tabla 4.1 Parámetros de configuración escenario 1

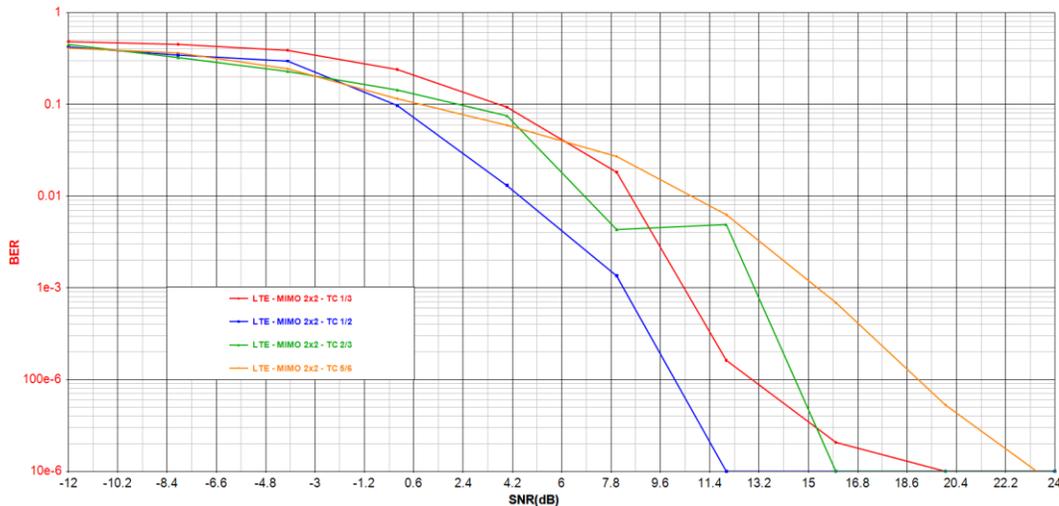


A continuación se realizará el análisis cuantitativo del desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE con MIMO con las métricas indicadas en la introducción de este capítulo.

## 4.2.1 Análisis de la BER

### 4.2.1.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2

La Figura 4.1 muestra los resultados de BER obtenidos para las diferentes tasas de codificación en función de la SNR, cada curva representa el desempeño obtenido dependiendo de la tasa de codificación. En la gráfica se observa que para la tasa de codificación de 2/3, a pesar de tener un comportamiento decreciente, la suavidad de la curva no es la misma que para las demás configuraciones, presentando algunos picos no ideales. Se presume que este comportamiento responde a una falla en la precisión de la herramienta debido a la complejidad que representan las altas tasas de datos en el procesamiento computacional.



**Figura 4.1** Gráfica BER vs SNR, con diferentes tasas de codificación

- En el rango de la SNR que va desde los 0dB hasta los 5dB no se observa un mayor cambio. El valor de la BER alcanzado es alto y se puede determinar que hay pérdidas por bit errados, independiente de la tasa de codificación empleada.
- A partir de la SNR con valor 8dB, la BER alcanzada para las diferentes tasas de codificación de 1/2, 2/3, 1/3 y 5/6 son de  $1.349e-3$ ,  $4.321 e-3$ ,  $0.018$ ,  $0.027$  respectivamente.
- Mientras que el valor de la SNR es de 12dB, con la tasa de codificación de 1/2 se tiene un valor de BER de 0, con las tasas de codificación de 1/3, 2/3 y 5/6 se



alcanza valores de BER de  $162.4e-6$ ,  $4.89 e-3$  y  $6.27e-3$ , con lo cual se puede concluir que empleando la tasa de codificación de  $1/2$  se requiere una SNR pequeña para obtener un buen nivel de BER.

#### 4.2.1.2 Análisis para el esquema MIMO 4X4

Para este esquema se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 4.2.

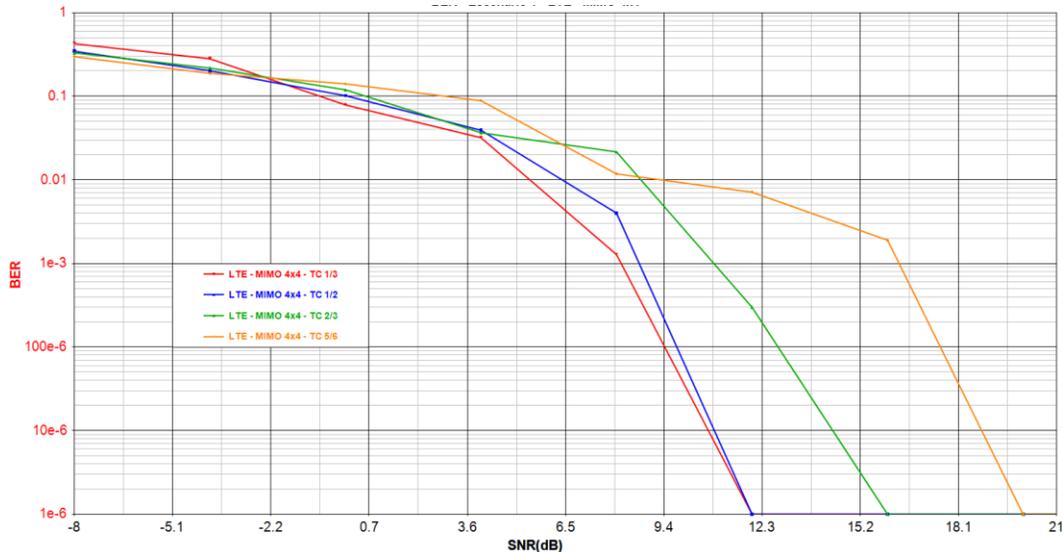


Figura 4.2 Gráfica BER vs SNR, con diferentes tasas de codificación

- En el rango de la SNR que va desde los 0dB hasta los 5dB no se observa un mayor cambio en el valor de la BER alcanzado, variando entre 0.079 y la caída hasta 0.032, lo cual evidencia un valor alto para este parámetro.
- Cuando la SNR es de 8dB, la BER alcanzada para las diferentes tasas de codificación de  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $1/3$  y  $5/6$  son de  $1.27e^{-3}$ ,  $4.001e^{-3}$ , 0.022, 0.016 respectivamente.
- En el valor de 12dB para la SNR, con la tasa de codificación de  $1/2$  y  $1/3$  se tiene un valor de BER de 0, con las tasas de codificación de  $2/3$  y  $5/6$  se alcanza valores de BER de  $12.299e-6$  y  $7.21e-3$ , con estas dos tasas de codificación se alcanza el valor de 0 al llegar a valores de SNR de 16dB y 18dB.

Con respecto a los resultados de BER obtenidos en el escenario de simulación planteado, el emplear configuraciones MIMO 2X2 y MIMO 4X4 sugiere mejoras en el desempeño del sistema, lo cual es evidente puesto que, como se observa, no se requiere una SNR alta para obtener un valor aceptable de la BER. En el esquema MIMO 4X4 se observa un



mejor comportamiento con la tasa de codificación de 1/3, contrario a MIMO 2X2 que se obtiene con la tasa de codificación de canal de 1/2.

#### 4.2.2 Análisis de la BLER

La BLER se refiere a la relación entre el número de bloques de recursos errados sobre el número de bloques recibidos. La codificación y modulación adaptativa debe asegurar una BLER menor a 10%. Entonces, el UE debe estimar el valor de la SNR para luego determinar el CQI que asegure dicho valor de BLER.

##### 4.2.2.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2 y MIMO 4X4

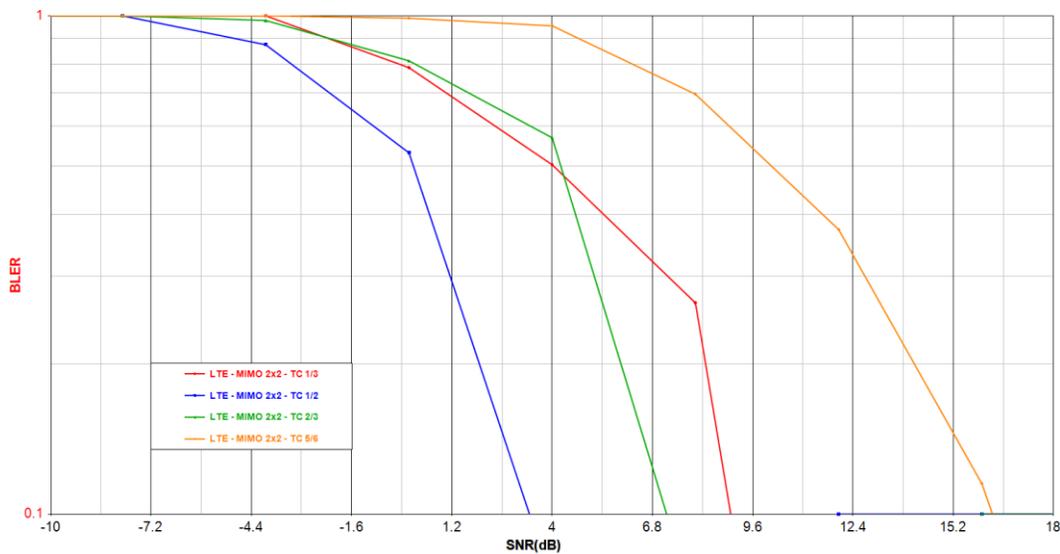


Figura 4.3 Gráfica BLER vs SNR, con diferentes tasas de codificación

- Un valor de BLER de 0.1 se alcanza con la tasa de codificación 1/3, para una SNR de 8dB, este valor también se observa en la tasa de codificación 2/3 con una SNR de aproximadamente 9dB, por último con la tasa de codificación 5/6 se llega al mismo valor de BLER con una SNR de 17dB.

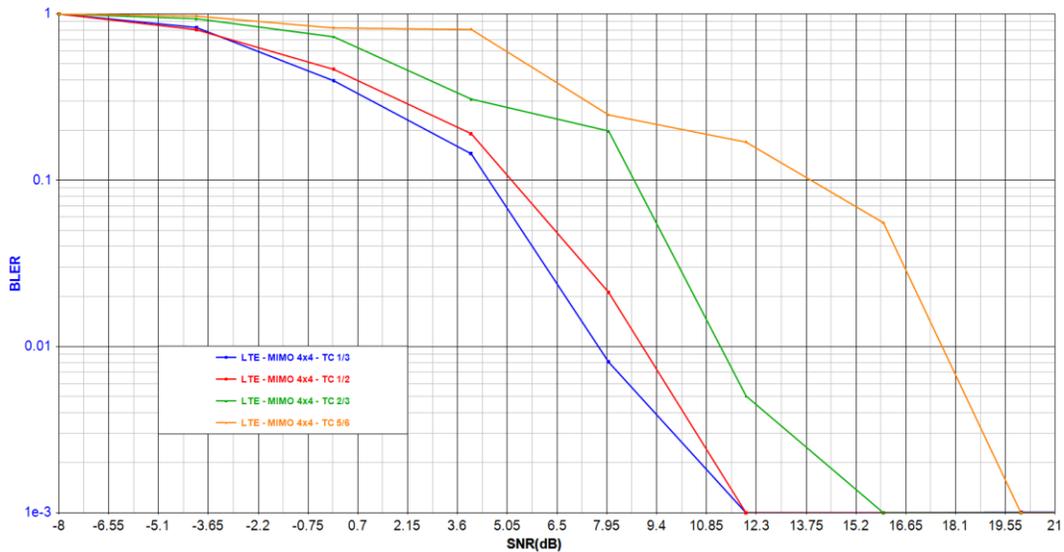


Figura 4.4 Gráfica BLER vs SNR, con diferentes tasas de codificación

- Un valor de BLER de 0.1 se alcanza con la tasa de codificación 1/2, para una SNR de 4dB aproximadamente, este valor también se observa en la tasa de codificación 2/3 con una SNR de aproximadamente 9dB, por último con la tasa de codificación 5/6 se llega al mismo valor de BLER con una SNR de 17dB.

En general la BLER objetivo no es alcanzada con las tasas de codificación empleadas para los diferentes esquemas MIMO utilizados en la simulación, inicia a bajar a medida que la SNR aumenta, sin embargo el tener un esquema MIMO 4x4 permite que los valores de BLER se aproximen al objetivo, con el fin de mantener la velocidad de transmisión a la que se llega con estos valores entregados por la herramienta.

### 4.2.3 Análisis del Throughput

#### 4.2.3.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2

En la Figura 4.5 se presentan el comportamiento obtenido para el Throughput bajo la configuración con MIMO 2x2 para el escenario 1.

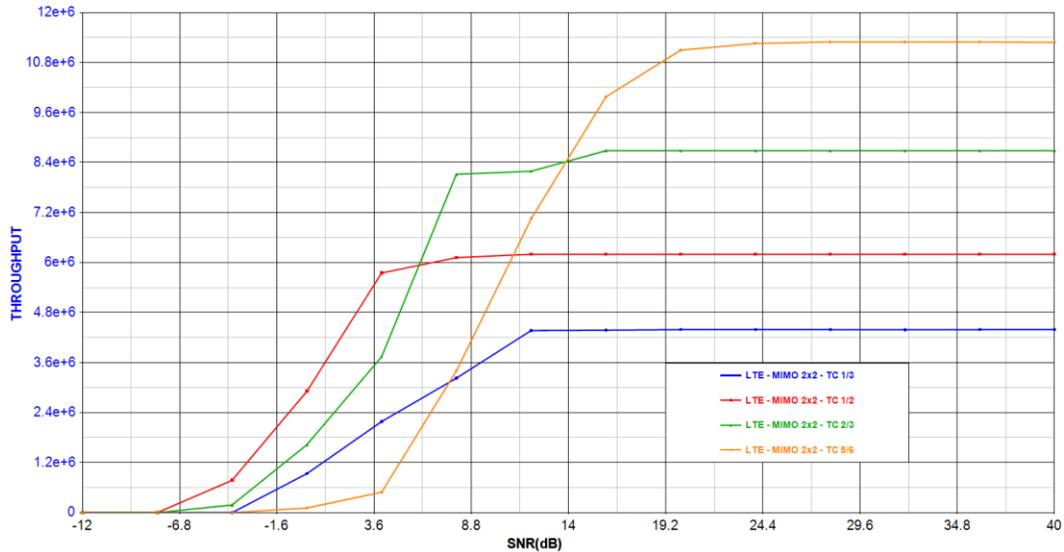


Figura 4.5 Gráfica *throughput* vs SNR, con diferentes tasas de codificación

- Para la tasa de codificación de 1/3 se obtiene un *throughput* de 2.18Mbps cuando se tiene un valor de SNR de 4dB, 6.2Mbps cuando se tiene una SNR de 6dB, a partir de 12dB el valor alcanzado es 4.3Mbps manteniéndose constante hasta una SNR de 43.2dB.
- En la tasa de codificación de 1/2, alcanza un *throughput* de 5.7 Mbps para un valor de SNR igual a 4dB, a partir de la SNR 6dB, el *throughput* tiene su valor máximo de 6.3Mbps el cual es constante.
- En cuanto a la tasa de codificación de 2/3, cuando se tiene un valor de SNR de 4dB el *throughput* tiene un valor de 3.7Mbps. A medida que incrementa la SNR hasta el valor de 48dB se alcanza un valor de 8.6Mbps.
- Con la tasa de codificación 5/6, el *throughput* inicia con un valor de 3.2Mbps cuando se tiene una SNR igual a 8dB, llegando a la SNR de 12dB se tiene un aumento a 8.6Mbps, cuando incrementa la SNR a partir de 20dB hasta los 48dB mantiene un valor constante de 11 Mbps.

Con respecto al *throughput* como indicador de desempeño del sistema bajo la configuración de MIMO 2X2, se puede decir que con la tasa de codificación de 1/2 su valor es mayor que en otras tasas de codificación con un SNR bajo. Si bien el valor máximo obtenido que se logra de 11Mbps, con la tasa de codificación de 5/6, se mantiene constante estos resultados inducen a pensar que el aumento de la SNR mantiene un valor constante al llegar a un punto el esquema MIMO 2X2 aporta a que en dicho sistema se entregue ese valor de *throughput* y no se reduzca.



#### 4.2.3.2 Análisis para el esquema MIMO 4X4

En la Figura 4.6 se presentan el comportamiento obtenido para el Throughput bajo la configuración con MIMO 4x4 para el escenario 1.

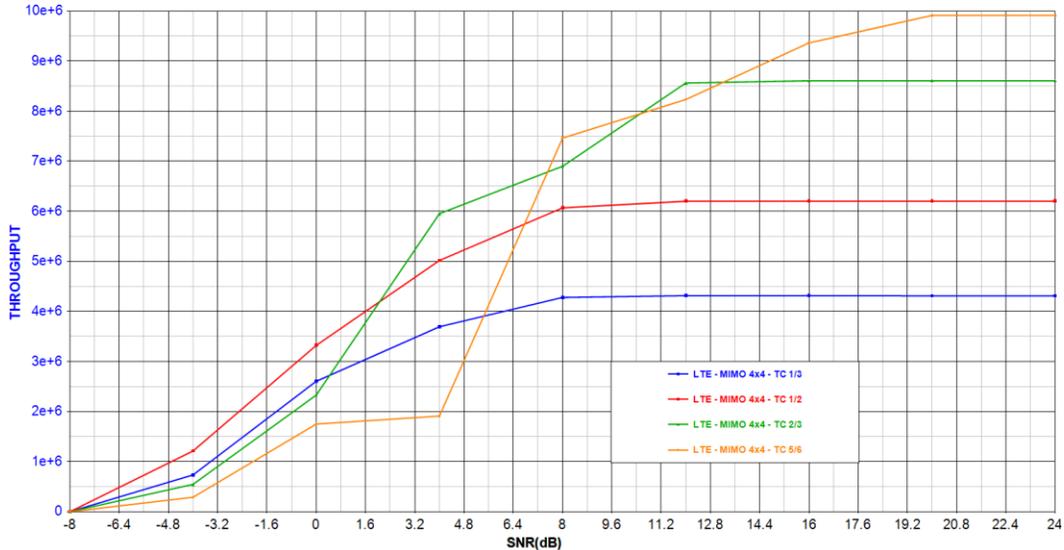


Figura 4.6 Gráfica *throughput* vs SNR, con diferentes tasas de codificación

- Para la tasa de codificación de 1/3 se obtiene un *throughput* de 3.69Mbps cuando se tiene un valor de SNR de 4dB, 4.2Mbps cuando se tiene una SNR de 6dB, a partir de 12dB el valor alcanzado es 4.3Mbps manteniéndose constante hasta una SNR de 43.2dB.
- En la tasa de codificación de 1/2, alcanza un *throughput* de 5.7 Mbps para un valor de SNR igual a 4dB, a partir de la SNR 6dB, el *throughput* tiene su valor máximo de 6.2Mbps el cual es constante.
- En cuanto a las tasa de codificación de 2/3, cuando se tiene un valor de SNR de 4dB el *throughput* tiene un valor de 5.7Mbps, a medida que incrementa la SNR hasta el valor de 48dB se alcanza un valor de 8.6Mbps el cual se mantiene constante.
- Con la tasa de codificación 5/6, el *throughput* inicia con un valor de 1.91Mbps cuando se tiene una SNR igual a 4dB, llegando a la SNR de 12dB se tiene un aumento a 7.6Mbps, cuando incrementa la SNR a partir de 20dB hasta los 48dB mantiene un valor constante de 9.9Mbps.



El *throughput* para esta configuración del esquema MIMO 4X4 no se evidencia un aumento considerable con respecto al esquema MIMO 2X2, sin embargo para las diferentes tasas de codificación se observó un incremento en el valor del *throughput* con un valor de SNR baja, lo cual corresponde a una mejora en el desempeño con el esquema MIMO 4X4.

### 4.3 ESCENARIO 2

En LTE la motivación del uso de varios esquemas de modulación es proporcionar mayores velocidades en datos dentro de un ancho de banda dado, por lo cual en este escenario se emplean las modulaciones 16 QAM y 64 QAM. Adicionalmente para una evaluación del rendimiento del sistema se varían los modelos de canal en modelos de canal de alta, media y baja dispersión, los detalles se muestran en la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3.

Parámetros	Configuración
Modulación	16QAM
Tasas de codificación	1/2
Modelo de canal	EVA5, EPA5, ETU70, ETU300
Ancho de banda	10 MHz

**Tabla 4.2** Parámetros de configuración con modulación 16QAM

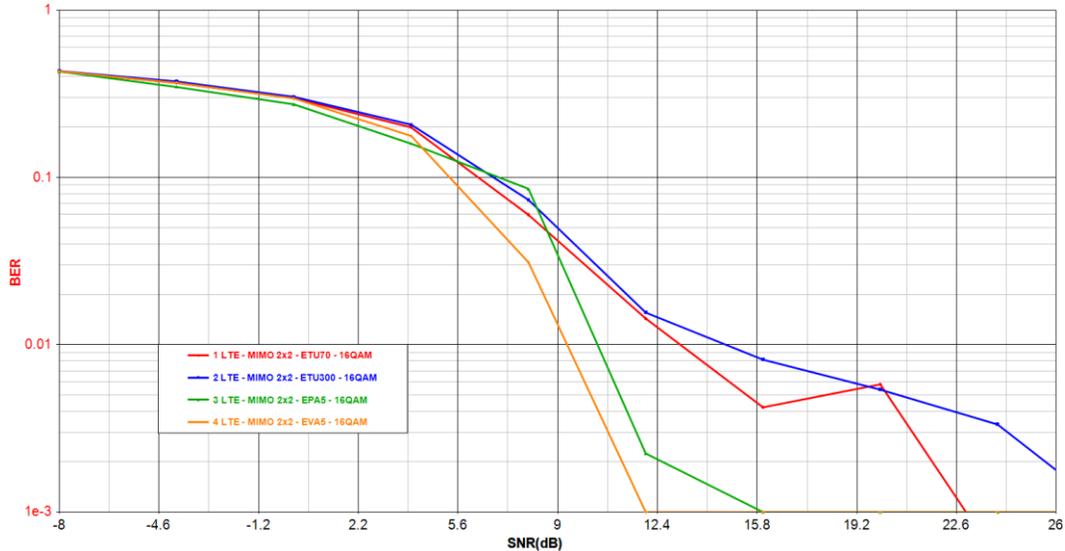
Parámetros	Configuración
Modulación	64QAM
Tasas de codificación	1/2
Modelo de canal	EVA5, EPA5, ETU70, ETU300
Ancho de banda	10 MHz

**Tabla 4.3** Parámetros de configuración con modulación 16QAM



### 4.3.1 Análisis de la BER modulación 16QAM

#### 4.3.1.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2



**Figura 4.7** Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto

- En el rango de la SNR que va desde los 0dB hasta los 8dB no se observa un mayor cambio en el valor de la BER alcanzado puesto que se conserva alto a pesar de la modulación que se está empleando para los distintos canales.
- A partir de la SNR con valor 12dB, la BER alcanzada por el canal EPA5 y EVA5 alcanzan el valor de BER más bajo de  $2.241e^{-3}$  y 0 respectivamente, los canales multitrayecto ETU300 y ETU70 tienen valores de BER bajos, de  $8.148e^{-3}$  para ETU300 y  $4.22e^{-3}$  para ETU70, con una SNR más alta de 16dB.

MIMO funciona mejor bajo entornos de máximo desvanecimiento multitrayecto y máxima dispersión, es muy importante entonces minimizar la correlación entre los diversos puertos de antena en transmisión o recepción aumentando el rendimiento, en la figura 4.7 se evidencia que los canales que presentan mejor desempeño con el arreglo de antenas 2X2 son el EVA5 y el EPA5 puesto que presentan buenos niveles de BER a pesar de que la SNR no tiene un valor alto, por otra parte el esquema de modulación empleado permite mayor robustez al sistema frente a errores.

Los resultados gráficos demuestran que los canales multitrayecto de alta dispersión están expuestos a mayor ruido, y los picos observados no se esperaban en las gráficas, al configurar la herramienta se configuró el valor de correlación media, lo cual pudo afectar el resultado gráfico de los canales de dispersión alta, esta situación también se evidencia en la figura 4.8 a continuación para el esquema MIMO 4X4.



#### 4.3.1.2 Análisis para el esquema MIMO 4X4

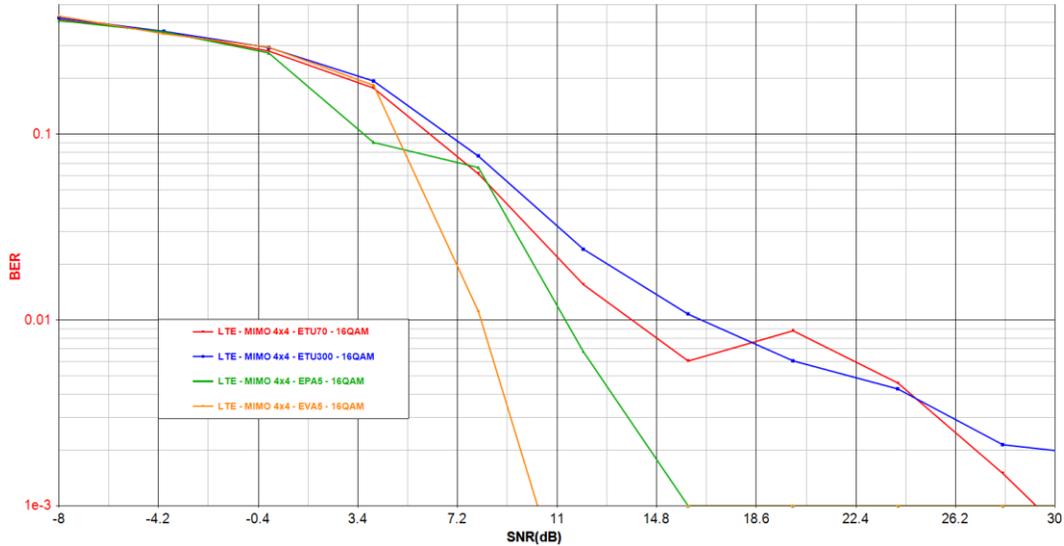


Figura 4.8 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto

- Cuando se tiene una SNR entre 5dB y 10dB se evidencia una mayor caída en el valor de la BER en el canal EVA5 de baja dispersión, al estar con un esquema 4X4, se espera obtener mejores resultados en cuanto a velocidad de transmisión conservando el valor o incrementando el mismo con la misma tasa de BER, con el canal EPA5 se obtiene un valor de BER de  $6.77e-3$ , con una SNR de 12dB.
- Se observan picos en las gráficas que seguramente responden a la precisión de la herramienta ya que no se esperaban, la caída de BER del canal ETU 300 gráficamente se ve más favorable, sin embargo el valor de SNR es más alto con respecto a la Figura 4.7.



### 4.3.2 Análisis de la BLER modulación 16QAM

#### 4.3.2.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2

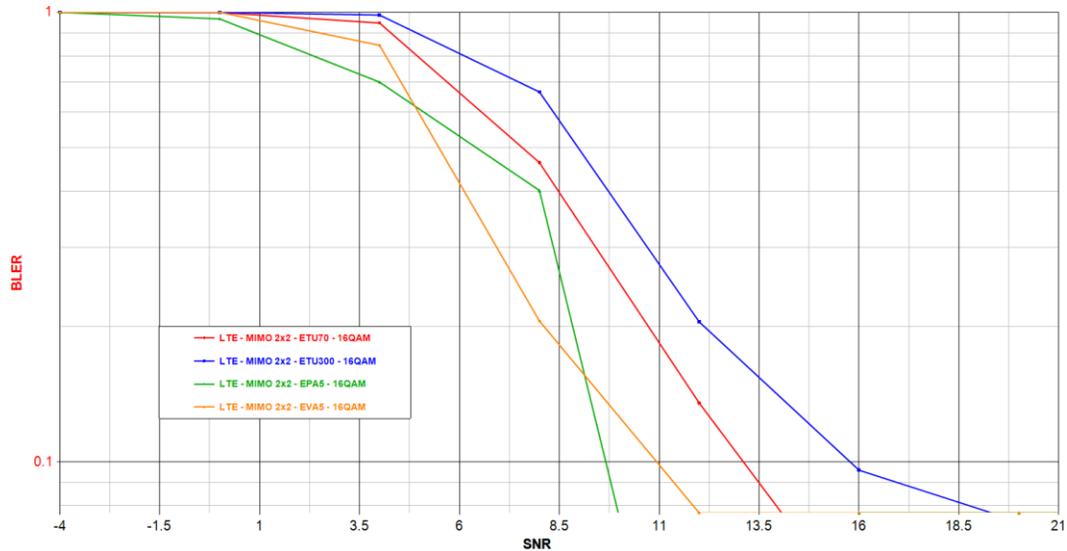


Figura 4.9 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto

- Inicialmente se observa que la transmisión inicia con errores del 100%, en la medida en que la SNR aumenta, se obtienen mejores niveles de BLER sin llegar a la BLER objetivo de 0.1, en adelante la BLER empieza a disminuir, como es el caso del canal EVA5, ETU70 y ETU300 en su orden, a partir de la SNR 13.2dB.

#### 4.3.2.2 Análisis para el esquema MIMO 4X4

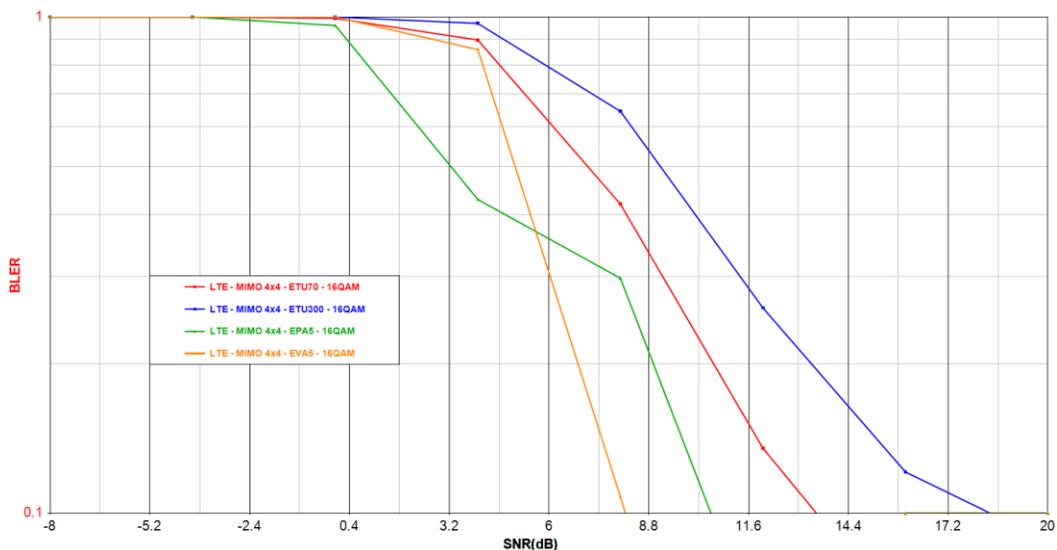


Figura 4.10 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto



- En este esquema MIMO 4X4, se evidencia un mejor desempeño a nivel de BLER para el canal EPA5 tomando un valor de 0.298 conservando una SNR de 8dB.
- Los canales ETU70, ETU300 y EVA5, presentan mayores errores frente al canal EPA 5, con una SNR de 12dB se mantiene el valor de BLER de 0.136, lo que se espera al usar la estructura MIMO 4X4.

### 4.3.3 Análisis del *Throughput*, modulación 16QAM

A continuación se presentan las gráficas obtenidas de *throughput* con la modulación especificada para los distintos canales para los esquemas que se muestran en la Figura 4.11 y la Figura 4.12.

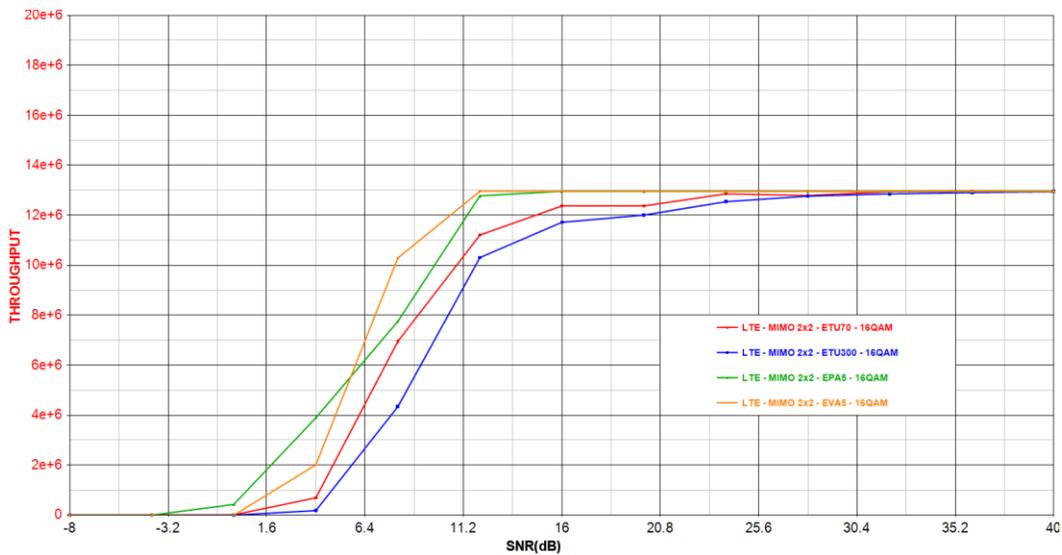


Figura 4.11 Gráfica *throughput* vs SNR para diferentes canales multitrayecto, con MIMO 2X2

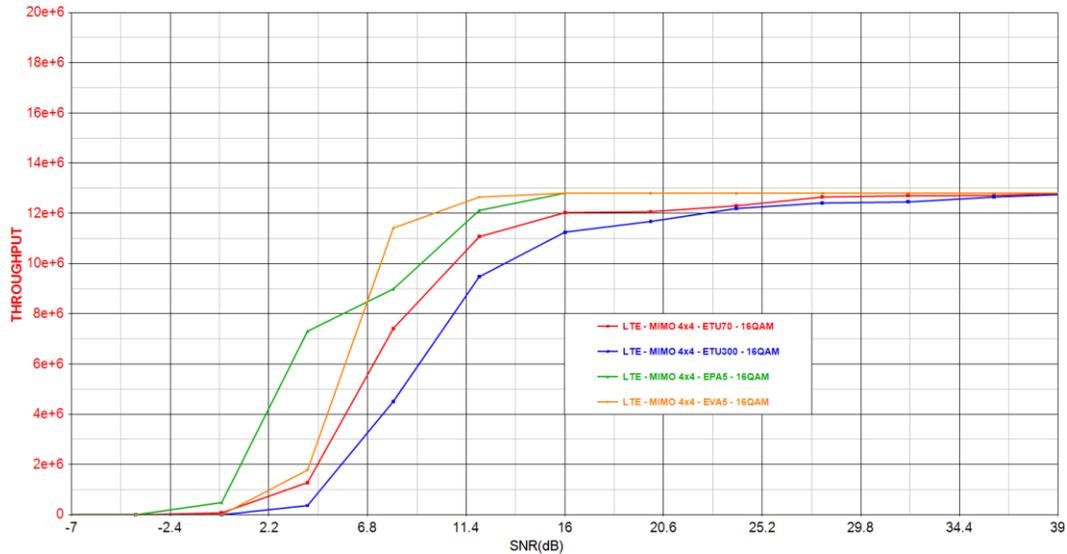


Figura 4.12 Gráfica throughput vs SNR para diferentes canales multitrayecto con MIMO 4X4

- El *throughput* obtenido en los dos esquemas: MIMO 2X2 y MIMO 4X4, fue de 12.81Mbps cuando alcanzan una SNR de 36dB. Por lo que se puede ver en las gráficas el desempeño es el mismo con los dos arreglos de antenas y los canales presentados en la simulación.
- La SNR se incrementa el *throughput* en el sistema, con la modulación empleada se disminuye la cantidad de errores que se pueden recibir, sin embargo el canal EPA5 presenta un mayor incremento en el *throughput* cuando la SNR tiene un valor de 4dB.

#### 4.3.4 Análisis de la BER modulación 64QAM

En la Figura 4.13 se presenta el comportamiento de la BER para varios canales multitrayecto en MIMO 2x2 bajo el esquema de modulación 64QAM.

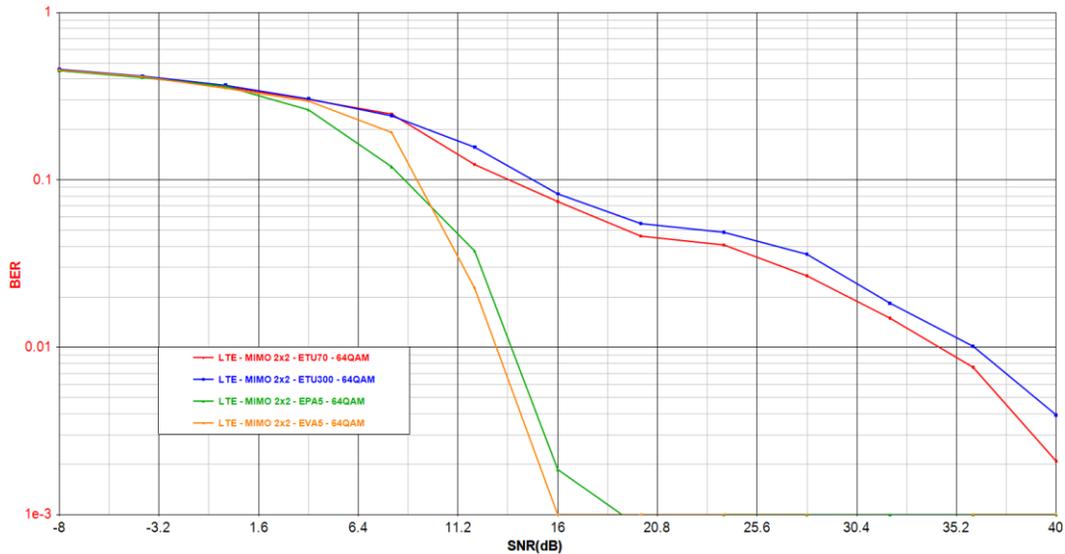


Figura 4.13 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 2X2

- Cuando se tiene una SNR de 11dB se inicia a observar una mayor caída en el valor de la BER en los canales EVA5 y EPA5 de baja dispersión, llegando a valores de 0.023 y 0.038, ya para un valor de SNR 16dB la BER obtenida es 0 y  $1.863e^{-3}$ .
- Los canales ETU70 y ETU300 a medida que aumenta la SNR inician su caída en el valor de la BER, para estos canales al tener un orden de modulación elevado como es el 64QAM, es perjudicial ya que los bits errados que se reciben incrementarían lo cual se evidencia en la caída de la BER a valores bajos en la Figura 4.13.

En la Figura 4.14 se presenta el comportamiento de la BER para varios canales multitrayecto en MIMO 4x4 bajo el esquema de modulación 64QAM. Los resultados gráficos que se observan responden a errores de precisión de la herramienta, además el esquema de modulación al tener en su constelación símbolos más cercanos, aumenta la probabilidad de error en recepción, es necesario entonces el empleo de técnicas de ecualización en la recepción para recibir una señal sin picos como la observada, esto se debe tener en cuenta en diseños para futuros trabajos.

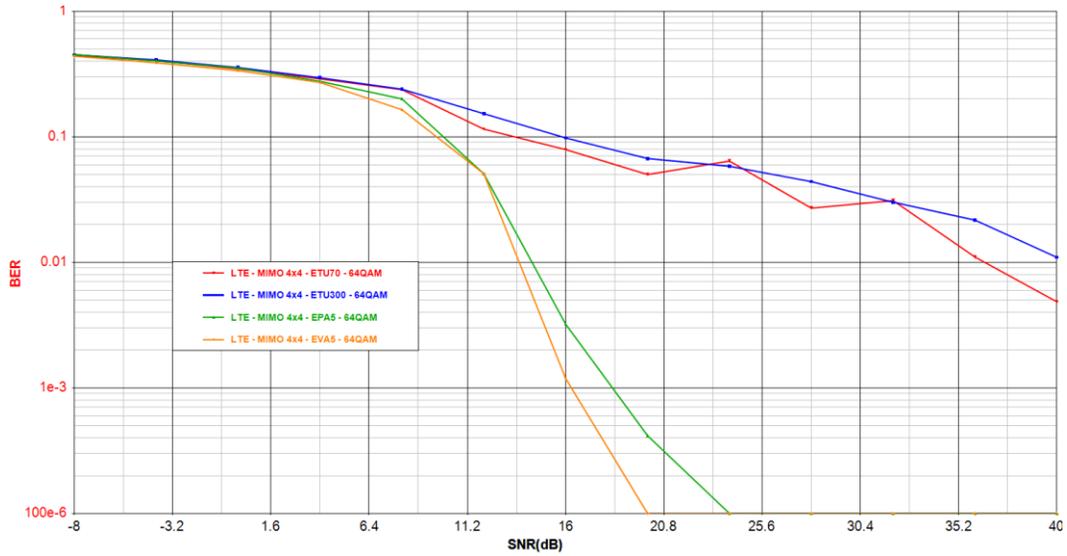


Figura 4.14 Gráfica BER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 4X4

- Teniendo una SNR de 16dB se observa una mejor caída en el valor de la BER en los canales EVA5 y EPA5 de baja dispersión que en los canales ETU300 y ETU70, llegando a valores de  $1.186e^{-3}$  y  $3.21e^{-3}$ .

#### 4.3.5 Análisis de la BLER, modulación 64QAM

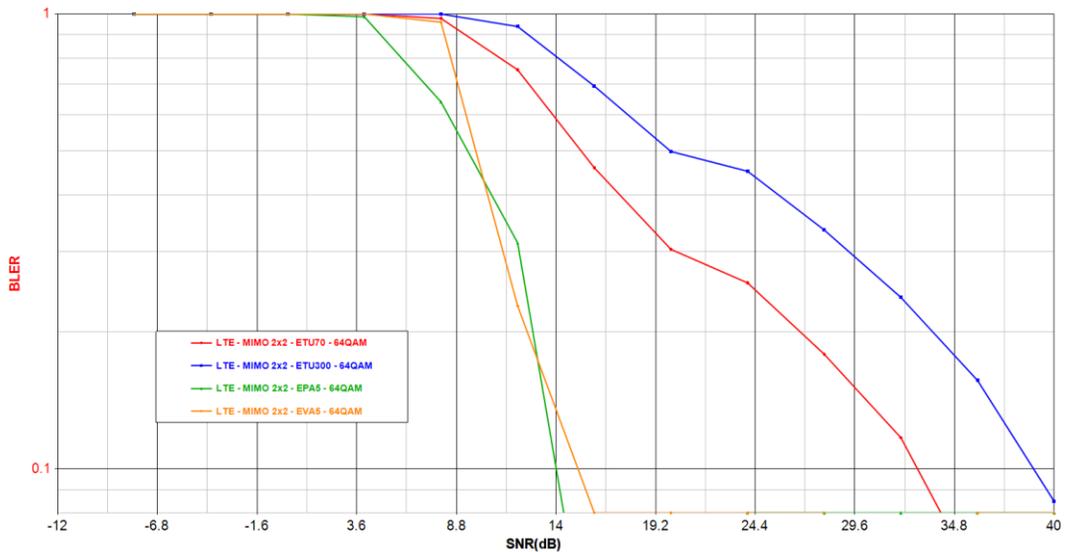


Figura 4.15 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 2X2



- La BLER objetivo para los diferentes canales no se cumple a pesar de emplear un esquema de modulación más elevado por lo cual se hace necesaria una tasa de codificación con mayor redundancia para mejorar el desempeño del sistema.

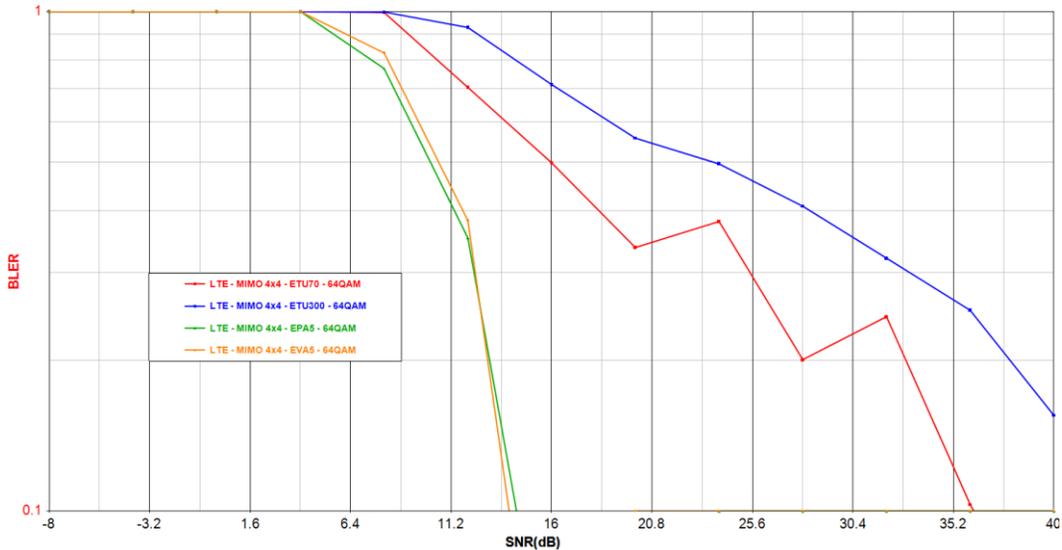


Figura 4.16 Gráfica BLER vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 4X4

- Cuando se emplea el esquema MIMO 4X4, la BLER objetivo para los diferentes canales no se cumple, sin embargo su caída hacia el objetivo inicia con una SNR de 12dB para los canales EPA5 y EVA5, para un valor alto de SNR la tasa de transmisión es mayor y para valores menores es más baja pero más confiable.

#### 4.3.6 Análisis del *Throughput*, modulación 64QAM

##### 4.3.6.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2

En la Figura 4.17 se muestran los resultados obtenidos de *throughput* empleando la modulación 64QAM y variando los diferentes canales multitrayecto de alta, media y baja dispersión.

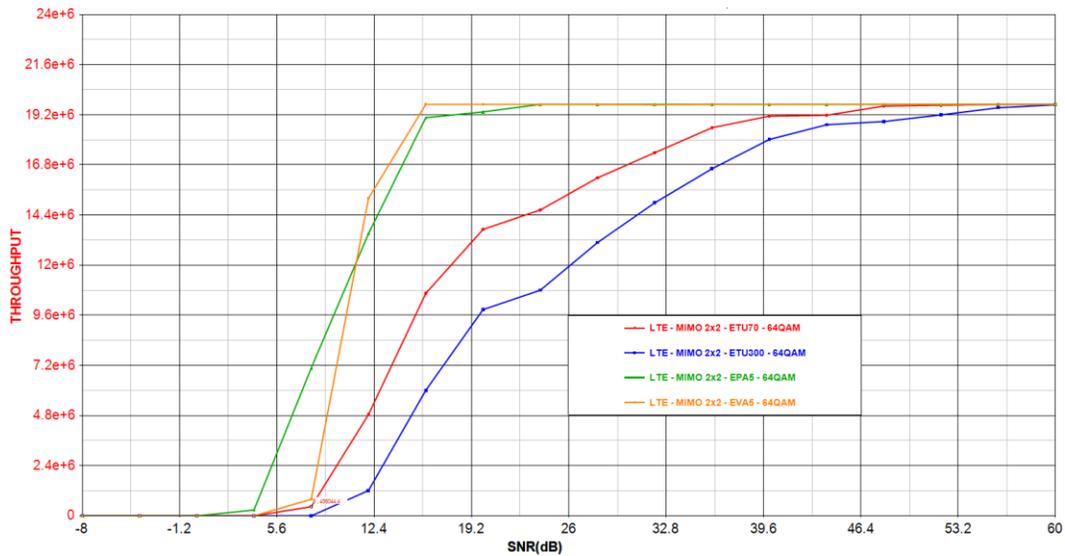


Figura 4.17 Gráfica *throughput* vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 2X2

- El *throughput* a partir de los 12dB empieza a incrementarse de manera considerable, ese aumento en los canales de dispersión baja EPA5 y EVA5 se hace más evidentes teniendo en cuenta que se llega a valores de 15Mbps con EVA5, y 13.5Mbps con EPA5.
- Los canales ETU300 y ETU70 con una SNR de 12dB llegan a un *throughput* 1.21Mbps y 4.85Mbps, cuando la SNR es de 16dB se obtiene valores de *throughput* de 6Mbps para ETU300 10.6Mbps para ETU70, entre tanto para los canales EVA5 y EPA5 el *throughput* alcanzado fue de 19Mbps, a partir de una SNR de 24dB hasta 56dB se conserva ese valor.



#### 4.3.6.2 Análisis para el esquema MIMO 4X4

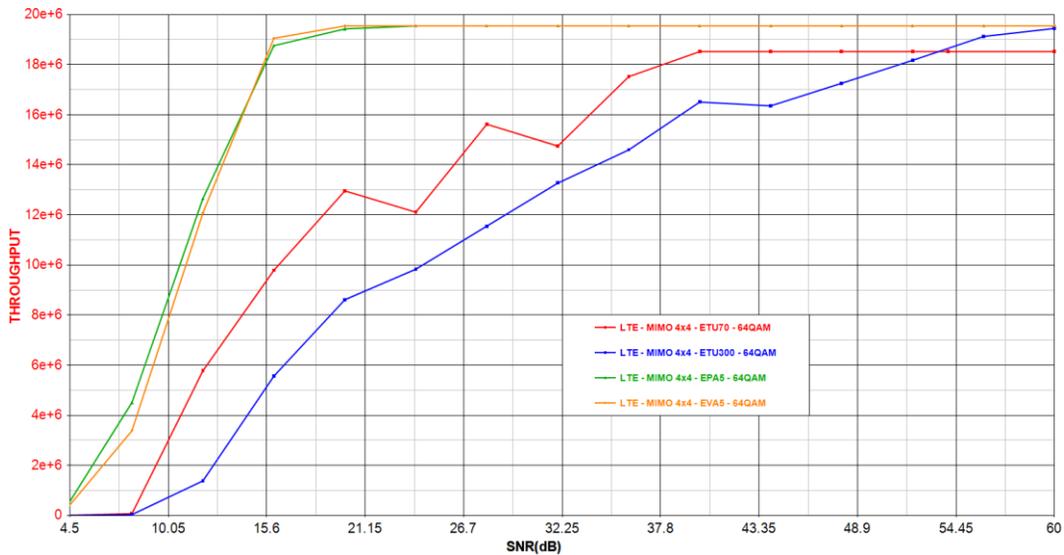


Figura 4.18 Gráfica *throughput* vs SNR para diferentes canales multitrayecto, MIMO 4X4

- El *throughput* a partir de los 16dB empieza a incrementarse de manera considerable, ese aumento en los canales de dispersión baja EPA5 y EVA5 vuelve a ser evidente teniendo en cuenta que se llega a valores de 19Mbps con EVA5, y 18.7Mbps con EPA5.
- Los canales ETU300 y ETU70 con una SNR de 16dB llegan a un *throughput* 16Mbps, cuando la SNR es de 16dB se obtiene valores de *throughput* de 6Mbps para ETU300 y 9.79Mbps para ETU70, entre tanto para los canales EVA5 y EPA5 el *throughput* alcanzado fue de 19Mbps, a partir de una SNR de 32dB hasta 52dB se conserva ese valor. Para los canales ETU300 y ETU70 cuando la SNR tiene el valor de 32dB, se tiene un *throughput* de 14Mbps.

En la Figura 4.18 se observan picos en la respuesta gráfica simulando el esquema MIMO 4X4 en un canal con desvanecimiento multitrayectoria ETU70, ese comportamiento gráfico obedece a la precisión de la herramienta y considera un tratamiento más adecuado en el receptor del sistema.

#### 4.4 ESCENARIO 3

Los objetivos de este escenario fueron verificar cuál de las tasas de codificación planteadas logran una transmisión fiable de la comunicación de datos, y analizar el desempeño del enlace de bajada de LTE con MIMO 2X2 y 4x4 para los parámetros de configuración se detallan en la Tabla 4.4.



Parámetros	Configuración
Modulación	16QAM – 64QAM
Tasas de codificación	1/2
Modelo de canal	EPA5
Ancho de banda	15 MHz – 20MHz

**Tabla 4.4** Parámetros de configuración para el escenario 3

La Tabla 4.5 evidencia el valor SNR donde la BER y *Throughput* cumple con la BLER objetivo.

EPA5				
Esquema	LTE - MIMO2x2 - 15MHz		LTE - MIMO4x4 - 15MHz	
Modulación	16QAM	64QAM	16QAM	64QAM
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR(dB)	4	15.4	3	12.55
BER	0.103	3.15e-3	0.1	0.058
<i>Throughput</i> [Mbps]	9.319	29.95	7.9	15.65

**Tabla 4.5** Valores obtenidos con los parámetros del escenario 3

#### 4.4.1 Análisis de BER con ancho de banda de 15MHz

##### 4.4.1.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2 y MIMO 4x4

La **Figura 4.19** muestra el comportamiento de la BER para diferentes valores de SNR.

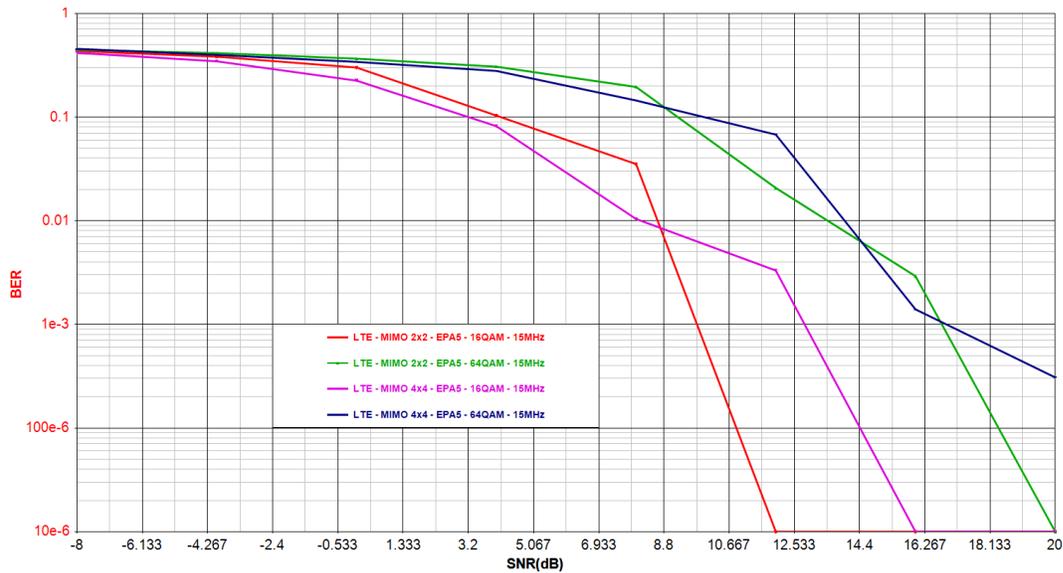


Figura 4.19 BER vs SNR Escenario 3

De acuerdo a la Tabla 4.5 y la Figura 4.19 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BER empieza a disminuir desde un valor de 0.446 en un rango de SNR entre -8 dB y -6 dB.
- El valor de BER tiene las mismas características en el intervalo -8dB a 4dB cuando se considera modulación 64QAM. Al considerar un esquema MIMO 2x2, modulación 16QAM y ancho de banda 15MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 0.103 para una SNR igual a 4dB.
- Considerando el esquema MIMO 2x2 para el enlace de bajada de LTE, modulación 64QAM y ancho de banda 15MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 3.15e-3 para una SNR igual a 15.4dB.
- Con un esquema MIMO 4x4, modulación 16QAM y ancho de banda 15MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 0.1 para una SNR igual a 3dB.
- Al considerar un esquema MIMO 4x4, modulación 64QAM y ancho de banda 15MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 0.058 para una SNR igual a 12.55dB.
- El valor de BER tiene mejor desempeño para una SNR en el intervalo de 3 dB a 4 dB para la modulación 16QAM, el peor desempeño, al comparar 16QAM y 64QAM, se



obtiene con el esquema 64QAM debido a que los símbolos se encuentran muy cercanos aumentando la probabilidad de interferencia.

#### 4.4.2 Análisis de la BLER, ancho de banda 15 MHz

##### 4.4.2.1 Análisis para el esquema MIMO 2x2 y MIMO 4x4

La Figura 4.20 muestra el comportamiento de la BLER para el ancho de banda de 15Mhz.

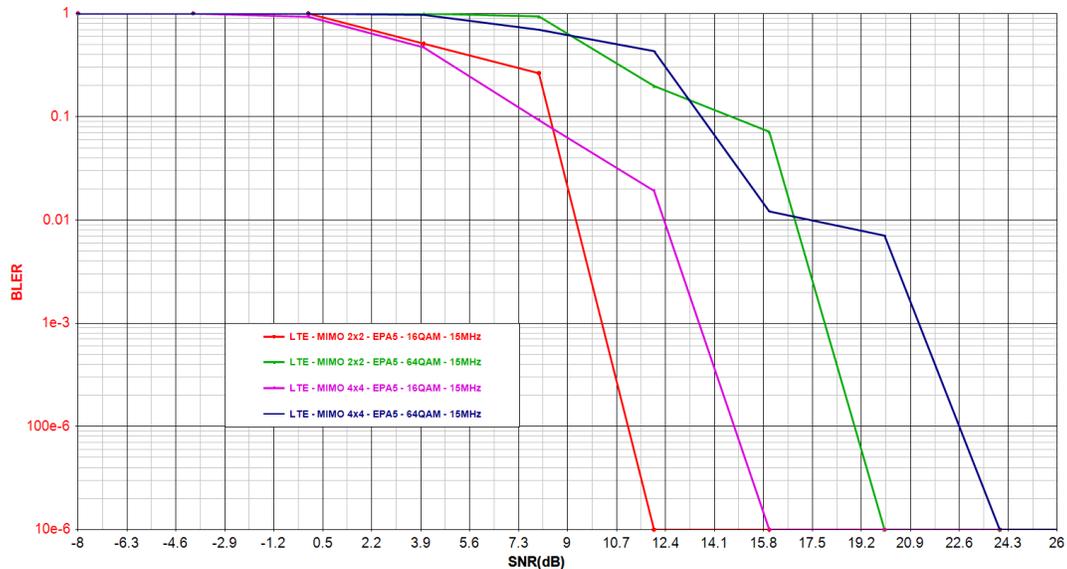


Figura 4.20 BLER vs SNR para el escenario 3

Conforme a la Tabla 4.5 y la Figura 4.20 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER es igual al 100% para un intervalo de -2 dB a 0 dB utilizando las modulaciones 16QAM y 64QAM mostrando que todos los bloques recibidos contienen errores.
- El valor de SNR superior a 0 dB empieza a decrecer hasta llegar a 0 en 12 dB, 16 dB, 20 dB y 24 dB para MIMO2x2 16QAM, MIMO2x2 64QAM, MIMO4x4 16QAM, MIMO4x4 64QAM respectivamente.
- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza con un valor de SNR de 4 dB, 15.4 dB, 3 dB y 12.55 dB para MIMO2x2 16QAM, MIMO2x2 64QAM, MIMO4x4 16QAM, MIMO4x4 64QAM, respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.5.
- A diferencia de la modulación 64AM el esquema de modulación 16QAM necesita menor SNR para obtener la BLER objetivo debido a la cantidad de bits por símbolo que modula.



### 4.4.3 Análisis Del *Throughput* Ancho De Banda 15 MHz

#### 4.4.3.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2 y MIMO 4x4

La Figura 4.21 muestra el *throughput* para el ancho de banda de 15MHz.

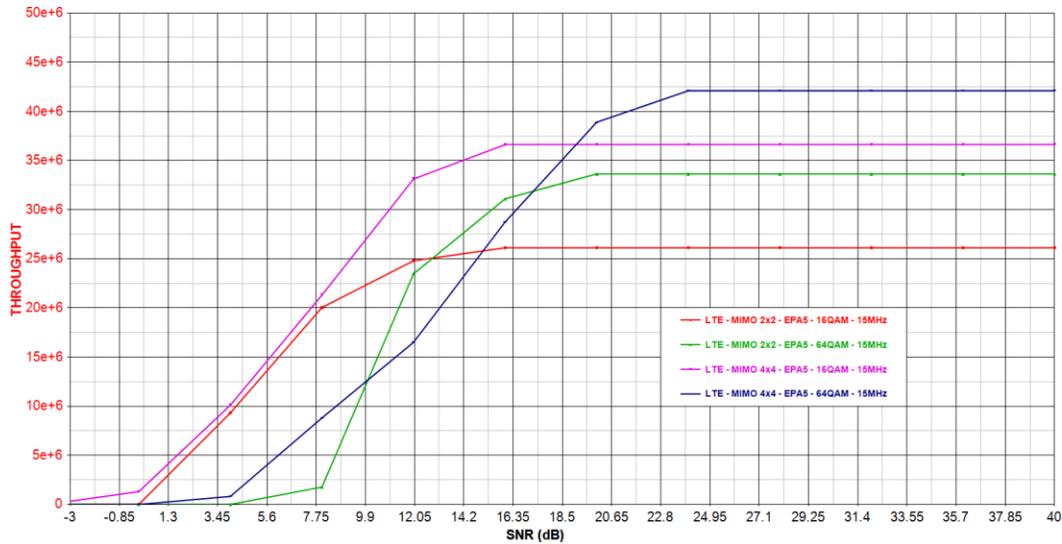


Figura 4.21 *Throughput* vs SNR escenario 3

De la Tabla 4.5 y la Figura 4.21 se observan los siguientes resultados:

- El valor de *throughput* se relaciona con el orden de modulación debido al número de símbolos utilizados por cada una de estas, para este caso 16QAM y 64QAM con 4 y 6 bits por símbolo respectivamente.
- El máximo valor de *throughput* se obtiene con la modulación 64QAM.
- El valor de *throughput* máximo donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es 9.319 Mbps, 29.95 Mbps, 7.9 Mbps y 15.65 Mbps para los sistemas MIMO2x2 16QAM, MIMO2x2 64QAM, MIMO4x4 16QAM, MIMO4x4 64QAM.
- El *throughput* máximo alcanzado en MIMO 2x2 con ancho de banda 15 MHz es igual 26.12 Mbps con SNR igual a 16 y 33.64 Mbps con SNR igual a 20 cuando se considera la modulación 16QAM y 64QAM.



- El *throughput* máximo alcanzado en MIMO 4x4 con ancho de banda 15 MHz es igual 35.62 Mbps con SNR igual a 16 y 42.1 Mbps con SNR igual a 24 cuando se considera la modulación 16QAM y 64QAM.

#### 4.4.4 Análisis De La BER, Ancho De Banda 20 MHz

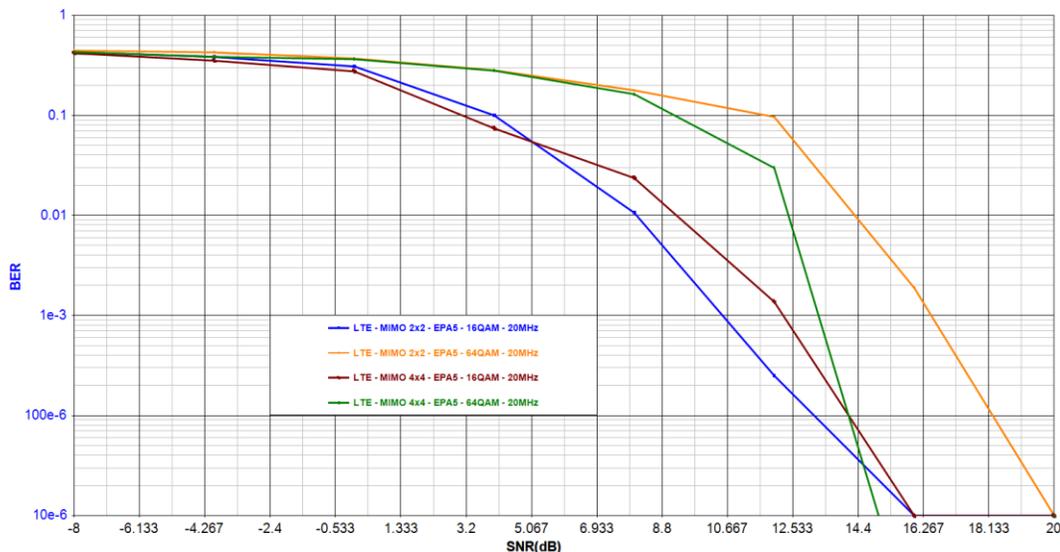
La Tabla 4.6 evidencia el valor SNR, donde la BER y Throughput cumplen con la BLER objetivo.

EPA5				
Esquema	LTE - MIMO2x2 - 20MHz		LTE - MIMO4x4 - 20MHz	
Modulación	16QAM	64QAM	16QAM	64QAM
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR(dB)	9.65	15.84	10.1	14.6
BER	6.45e-3	250e-6	11.4e-3	10.5e-3
Throughput [Mbps]	26.64	35.41	29.15	38.6

**Tabla 4.6** SNR, BER, BLER, THROUGHPUT escenario 3

##### 4.4.4.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2 y MIMO 4x4

La Figura 4.22 muestra el comportamiento de la BER para diferentes valores de SNR.





**Figura 4.22 BER vs SNR escenario 3**

De la Tabla 4.6 y la Figura 4.22 se observan los siguientes resultados:

- Al considerar MIMO 2x2, modulación 16QAM y ancho de banda 20MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $6.45e^{-3}$  para una SNR igual a 9.65dB con modulación 64QAM y ancho de banda 20MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $250e^{-6}$  para una SNR igual a 15.84dB.
- Con el esquema MIMO 4x4, modulación 16QAM y ancho de banda 20MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $11.4e^{-3}$  para una SNR igual a 10.1dB, empleando modulación 64QAM y ancho de banda 20MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $10.5e^{-3}$  para una SNR igual a 14.6 dB.
- El valor de BER tiene mejor desempeño para una SNR en el intervalo de 3.5 dB a 4.5 dB para la modulación 16QAM, el peor desempeño, al comparar 16QAM y 64QAM, se obtiene con el esquema 64QAM debido a que los símbolos se encuentran muy cercanos aumentando la probabilidad de interferencia.

#### **4.4.5 Análisis De La BLER, ancho de banda 20 MHz**

##### **4.4.5.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2 y MIMO 4x4**

La Figura 4.23 muestra el comportamiento de la BLER para el ancho de banda de 20MHz.

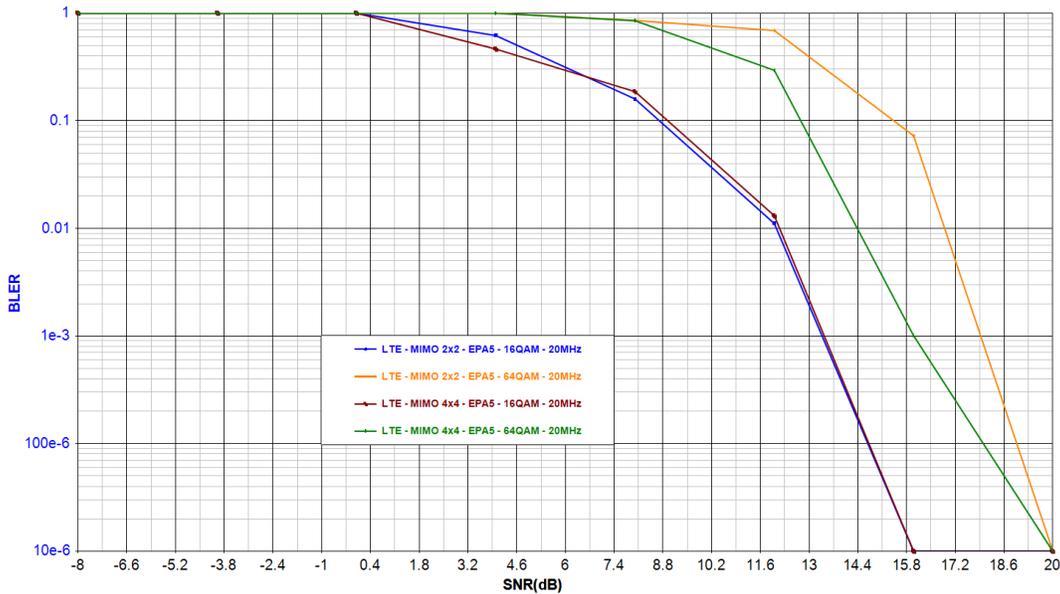


Figura 4.23 BLER vs SNR para el escenario 3

De la Tabla 4.6 y la Figura 4.23 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER es igual al 100% hasta un valor de SNR 0 dB y 4 dB utilizando la modulación 16QAM y 64QAM.
- El valor de BLER decrece hasta 0 a medida que la SNR aumenta en 12 dB y 20dB cuando se utiliza la modulación 16QAM y 64QAM. La BLER objetivo (0.1) se alcanza con un valor de SNR de 9.65 dB, 15.84 dB, 10.1 dB y 14.6 dB para MIMO2x2 16QAM, MIMO2x2 64QAM, MIMO4x4 16QAM, MIMO4x4 64QAM respectivamente como se muestra en la Tabla 4.6.
- A diferencia de la modulación 64AM el esquema de modulación 16QAM necesita menor SNR para obtener la BLER objetivo debido a la cantidad de bits por símbolo que modula.

#### 4.4.6 Análisis del *Throughput*, ancho de banda 20 MHz

##### 4.4.6.1 Análisis para el esquema MIMO 2X2 y MIMO 4x4

La Figura 4.24 muestra el *throughput* para el ancho de banda de 20MHz.

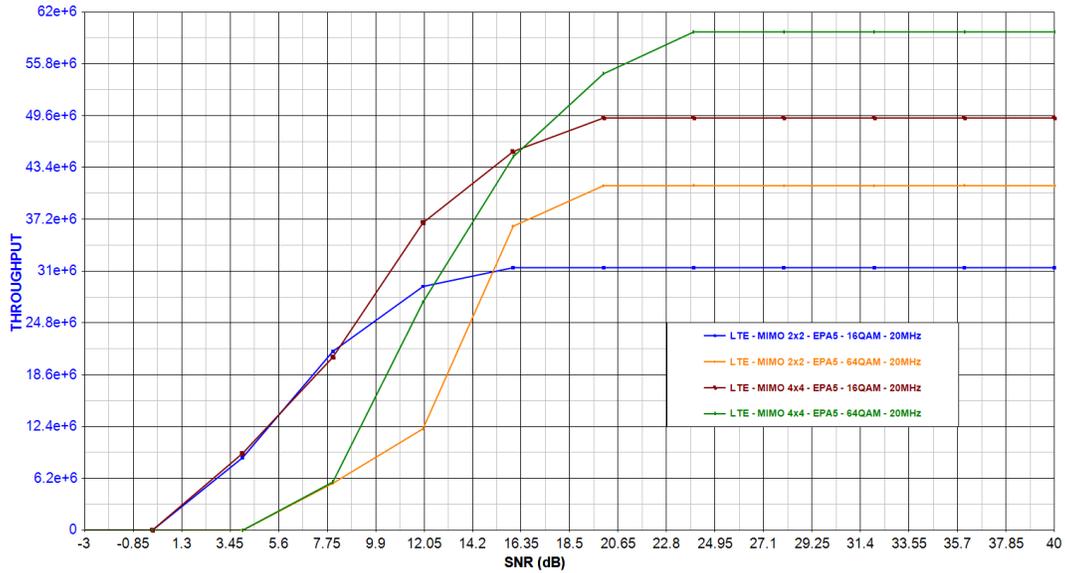


Figura 4.24 Throughput vs SNR escenario 3

De la Tabla 4.6 y la Figura 4.24 se observan los siguientes resultados:

- El máximo valor de *throughput* se obtiene con la modulación 64QAM.
- El valor de *throughput* máximo donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es 26.64 Mbps, 35.41 Mbps, 29.15 Mbps y 38.6 Mbps para los sistemas MIMO2x2 16QAM, MIMO2x2 64QAM, MIMO4x4 16QAM, MIMO4x4 64QAM.
- El *throughput* máximo alcanzado en MIMO 2x2 con ancho de banda 20 MHz es igual 31.42 Mbps con SNR igual a 16 y 41.23 Mbps con SNR igual a 20 cuando se considera la modulación 16QAM y 64QAM respectivamente.
- El máximo *throughput* alcanzado en MIMO 4x4 con ancho de banda 20 MHz es igual 49.32 Mbps con SNR igual a 20 y 59.62 Mbps con SNR igual a 24 cuando se considera la modulación 16QAM y 64QAM respectivamente.

#### 4.5 ESCENARIO 4

Los objetivos de este escenario fueron verificar la tasa de codificación planteada en los escenarios dos y tres para lograr una transmisión fiable de la comunicación de datos, y analizar el desempeño del enlace de bajada de LTE SISO, para los parámetros de configuración se detallan en la siguiente Tabla 4.7.



Parámetros	Configuración
Esquema	SISO
Modulación	16QAM – 64QAM
Tasas de codificación	1/2
Modelo de canal	EPA5
Ancho de banda	15 MHz – 20MHz

Tabla 4.7 Configuración de parámetros para el escenario 4

La Tabla 4.8 muestra el valor SNR donde la BER y Throughput cumple con la BLER objetivo.

EPA5				
Esquema	SISO - 15MHz		SISO - 20MHz	
Modulación	16QAM	64QAM	16QAM	64QAM
BLER objetivo	0.1	0.1	0.1	0.1
SNR(dB)	22.45	21.45	22.45	25.8
BER	4.05e-3	8.3812e-3	1.9e-3	1.88e-3
Throughput [Mbps]	18.86	26.2	24.70	34.62

Tabla 4.8 SNR, BER, BLER, *Throughput* para escenario 4

#### 4.5.1 Análisis de la BER, ancho de banda 15MHz y 20MHz

##### 4.5.1.1 Análisis Esquema SISO

La Figura 4.25 muestra el comportamiento de la BER para diferentes valores de SNR.

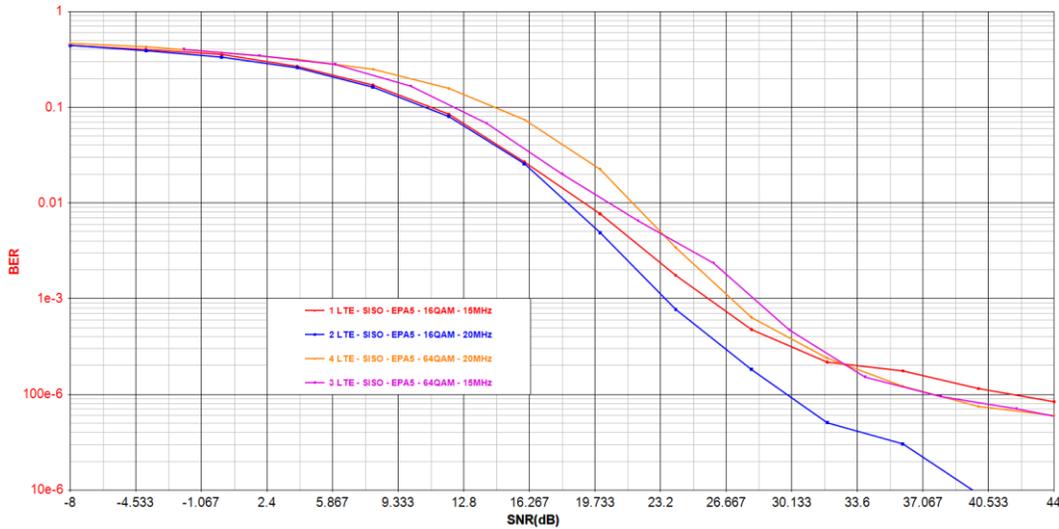


Figura 4.25 BER vs SNR escenario 4

De la Tabla 4.8 y la Figura 4.25 se observan los siguientes resultados:

- El valor de la BER empieza a disminuir desde un valor de 0.444 en un rango de SNR entre -8dB y -2dB, la BER tiene las mismas características en el intervalo -8dB a 5.867dB y -8dB a 16.267 cuando se considera modulación 64QAM y 16QAM.
- Al considerar la modulación 16QAM y ancho de banda 15MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $4.05e^{-3}$  para una SNR igual a 22.45dB.
- Para la modulación 64QAM y ancho de banda 15MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $8.3812e^{-3}$  para una SNR igual a 21.45dB. Con la modulación 16QAM y ancho de banda 20MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $1.9e^{-3}$  para una SNR igual a 22.45dB.
- Por último, con la modulación 64QAM y ancho de banda 20MHz, el valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a  $1.88e^{-3}$  para una SNR igual a 25.8 dB.

#### 4.5.2 Análisis de la BLER, ancho de banda 15MHz y 20MHz

La Figura 4.26 muestra el comportamiento de la BLER en un sistema SISO con diferentes los diferentes anchos de banda.

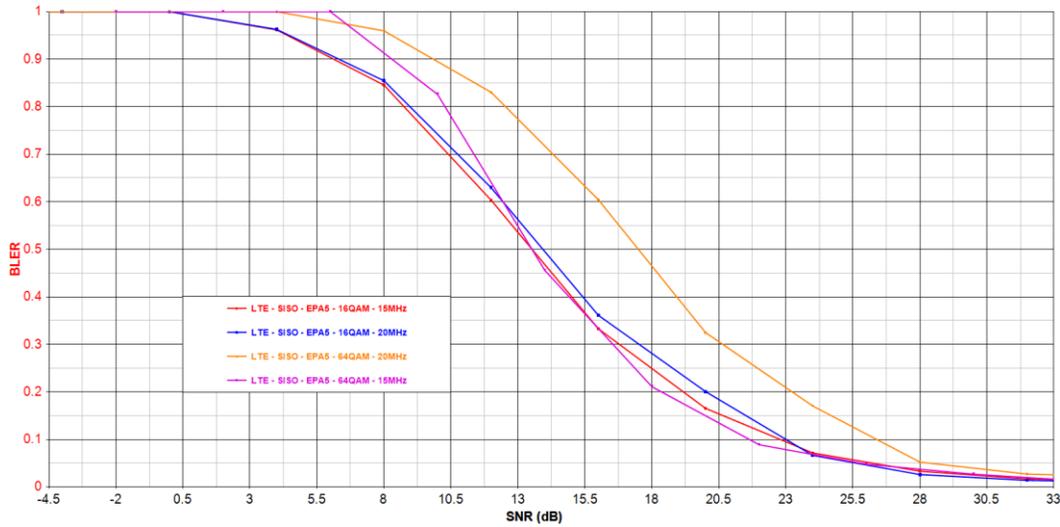


Figura 4.26 BLER vs SNR escenario 4

De acuerdo a la Tabla 4.8 y a la Figura 4.26 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER es igual al 100% hasta un valor de SNR -8 dB y 2.1 dB utilizando la modulación 16QAM y 64QAM.
- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza con un valor de SNR de 22.45 dB, 21.45 dB, 22.45 dB y 25.8 dB para SISO 16QAM, 64QAM con ancho de banda 15MHz y SISO 16QAM, 64QAM con ancho de banda 20MHz como se muestra en la Tabla 4.8.
- A diferencia de las modulaciones 16QAM, 64QAM con un ancho de banda de 15 MHz y 64QAM con 20MHz la modulación 64QAM con 20MHz necesita una mayor SNR para alcanzar la BLER objetivo.

#### 4.5.3 Análisis del *throughput*, ancho de banda 15MHz y 20MHz

La Figura 4.27 muestra el Throughput para el esquema SISO para los diferentes anchos de banda.

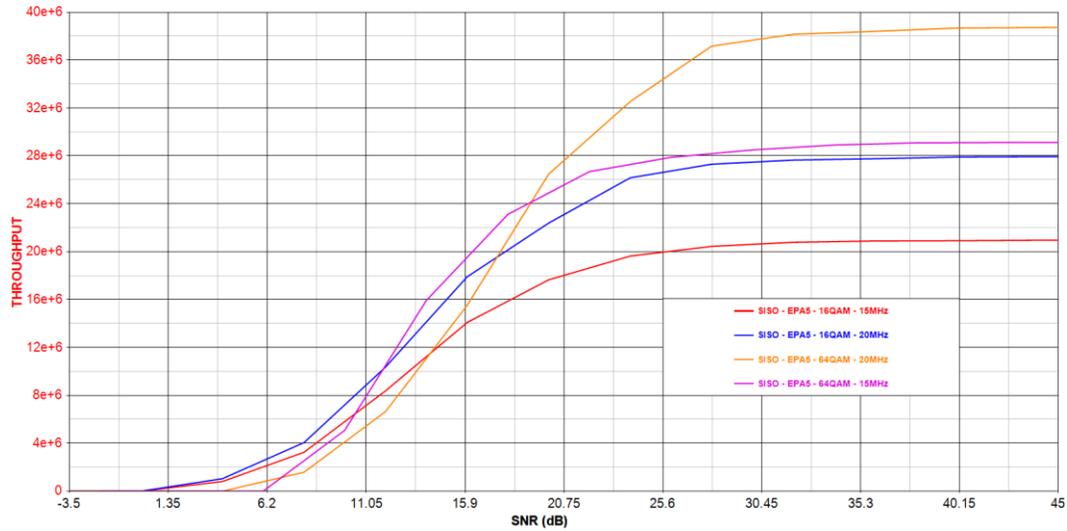


Figura 4.27 Throughput vs SNR escenario 4

De la Tabla 4.8 y la Figura 4.27 se observan los siguientes resultados:

- El máximo valor de *throughput* se obtiene con la modulación 64QAM y ancho de banda 20MHz.
- El valor de *throughput* máximo donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es 18.86 Mbps, 26.2 Mbps, 24.70 Mbps y 34.62 Mbps para los sistemas 16QAM, 64QAM con ancho de banda 15MHz y 16QAM, 64QAM con ancho de banda 20MHz respectivamente.
- El throughput máximo que se alcanzó con una modulación 16QAM y ancho de banda 15MHz y 20MHz es de 20.89 Mbps con SNR igual a 35.3 y 27.9 Mbps con SNR 40 respectivamente.
- El throughput máximo en el escenario 4 es de 38.68 Mbps con SNR igual a 40 se logra con una modulación 64QAM y ancho de banda 20MHz



## Capítulo 5

### 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1 CONCLUSIONES

1. Al evaluar el escenario 1 haciendo uso del esquema de modulación QPSK y tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6, la tasa de 1/2 brinda el mejor desempeño, en términos de BER y BLER, con relación a las otras tasas, proporcionando un valor de BLER muy por debajo de la BLER objetivo. Esto sugiere que una mayor tasa de codificación, junto a un esquema de modulación de bajo orden como QPSK, influye positivamente en el desempeño del sistema en un enlace con modelo de canal multitrayecto, gracias a la adición de bits de redundancia que facilita la detección y corrección de errores.
2. El *throughput* del sistema LTE con MIMO tiende al valor de la tasa máxima de transmisión de datos para valores altos de SNR, es decir cuando la BER es mínima. De esta manera, el *throughput* se incrementa para valores altos de SNR cuando se aumenta el número de antenas en transmisión y recepción. Así, según el análisis realizado en este trabajo de grado, el sistema LTE con MIMO con dos antenas en transmisión y dos antenas en recepción presenta un *throughput* más bajo que el obtenido con cuatro antenas en transmisión y cuatro antenas en recepción con la misma configuración de modulación y ancho de banda. De igual forma, al configurar el sistema LTE con SISO se obtiene un *throughput* más bajo que con cualquier configuración MIMO. Este comportamiento, evidencia que la adición de más antenas a un sistema radio da la posibilidad de mejorar el rendimiento al aprovechar las réplicas de la señal.
3. De acuerdo al estudio realizado en esta investigación, el sistema LTE con MIMO con cuatro antenas en transmisión y recepción, modulación 64-QAM, como el esquema que presentó el mayor rendimiento frente a QPSK y 16QAM, y un ancho de banda 20MHz presenta mejor desempeño en términos del *throughput* para valores altos de SNR, permitiendo transmitir más altas tasas de bit que un sistema con las mismas características pero con un ancho de banda de 15MHz. Esto, sugiere que un mayor ancho de banda configurado para el sistema permite aprovechar los mecanismos de multiplexación y de diversidad propuestos en MIMO.



4. El mejor desempeño con respecto al enlace con modelos de canal multitrayecto se obtuvo haciendo uso del canal multitrayecto EPA5, debido a que es el modelo de canal menos dispersivo, el cual considera una velocidad de desplazamiento promedio del UE de 2.16 Km/h, a diferencia de los modelos de canal ETU70 y ETU300, los cuales consideran una velocidad de desplazamiento de 30.24 Km/h y 129.6 Km/h respectivamente.
5. En el sistema LTE, a parte de los parámetros evaluados en los diferentes escenarios, es importante el CQI en el enlace de bajada ya que asigna al UE los recursos de la red y depende de la capacidad y congestión de la celda, en futuros trabajos en LTE para acercarse a la realidad del desempeño del sistema, será de gran utilidad tener en cuenta este indicador.

## **5.2 TRABAJOS FUTUROS**

1. Realizar un análisis de desempeño a nivel físico para el enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO *release 8* con varios usuarios.
2. Realizar un análisis de desempeño a nivel físico para el enlace de subida de un sistema LTE con MIMO *release 8*.
3. Realizar un análisis de desempeño a nivel físico para el enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO *release 8* en modo TDD.
4. Realizar un análisis de desempeño a nivel físico para el enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO *release 8* en modo trama FDD implementando prefijo cíclico extendido y HARQ.



## REFERENCIAS

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*: Academic Press, 2011.
- [2] I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez, and E. C. Reyes, "The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced," *Phys. Commun.*, vol. 3, pp. 217-244, 2010.
- [3] 3GPP, "Overview of 3GPP Release 8." vol. 2014: 3GPP, 2014.
- [4] A. Technologies and M. Rumney, *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*: Wiley Publishing, 2013.
- [5] R. A. Comes and F. Vodafone, *LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles*: Fundación Vodafone España, 2010.
- [6] L. Harte and C. J. Luck, *UMTS LTE: Network, Services, Technologies, and Operation*: Althos, 2008.
- [7] G. L. López, "Diseño de Implementación de un Simulador en Matlab para el Análisis de las Capas Física y Enlace de LTE," in *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación*. vol. MSc. España: Universidad Rey Juan Carlos, 2012.
- [8] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the long term evolution physical layer," *Proc. of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Scotland*, vol. 27, p. 124, 2009.
- [9] H. Taoka, S. Nagata, K. Takeda, Y. Kakishima, X. She, and K. Kusume, "MIMO And CoMP In LTE Advanced," *NTT Docomo technical Journal*, vol. 12, pp. 20-27, 2010.
- [10] A. Omri, R. Hamila, M. Hasna, R. Bouallegue, and H. Chaieb, "Estimation of highly selective channels for downlink LTE system by a robust neural network," in *Communication in Wireless Environments and Ubiquitous Systems: New Challenges (ICWUS), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-5.
- [11] F. D. Córdoba Muñoz and J. S. Zúñiga Muñoz, "Análisis De Desempeño a Nivel Físico Del Enlace De Bajada De LTE," in *Departamento de Telecomunicaciones*. vol. Ing. Popayán: Universidad del Cauca, 2013.



- [12] G. M. Kebede and O. Olayinka, "Performance Evaluation of LTE Downlink with MIMO Techniques." vol. Ing. Suecia: School of Engineering Bleking Institute of Technology, 2010.
- [13] F. Firmin and M. C. C. 3GPP, "The Evolved Packet Core." vol. 2015: 3GPP, 2010.
- [14] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*: Wiley, 2011.
- [15] F. Telefónica, *La Sociedad de la Información en España 2013: siE[13*, 2014.
- [16] "LTE Deployment Status Latin America," in *49 LTE networks in 17 countries* <http://www.4gamericas.org/>, 2015.
- [17] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*: Wiley, 2009.
- [18] P. Lescuyer and T. Lucidarme, *Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*: Wiley Publishing, 2008.
- [19] J. C. Peñuelas, J. J. O. Bonafé, M. G. Lozano, and A. F. Aguilera, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*: Marcombo, 2012.
- [20] T. S. G. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding," *3GPP TS 36.212 V8.8.0 Release 8*, 2009.
- [21] B. Furht and S. A. Ahson, *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*: CRC Press, 2009.
- [22] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*: Cambridge University Press, 2009.
- [23] A. Dholakia, *Introduction to Convolutional Codes with Applications*: Springer US.
- [24] S. C. Yang, *OFDMA System Analysis and Design*: Artech House, 2010.
- [25] L. Jiménez, J. Parrado, C. Quiza, and C. Suárez, "Modulación multiportadora OFDM," *Revista de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, vol. 6, pp. 30-34, 2001.
- [26] H. G. Myung, L. Junsung, and D. Goodman, "Single carrier FDMA for uplink wireless transmission," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 1, pp. 30-38, 2006.
- [27] J. T. J. Penttinen, *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*: Wiley, 2015.
- [28] J. C. Lotero Castro and G. M. Muñoz Prado, "Análisis de Desempeño de un Sistema MIMO OFDM," in *Departamento de Telecomunicaciones*. vol. Ing Popayán: Universidad del Cauca, 2013.



- [29] W. Bolton, *Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas*: Marcombo, 1995.
- [30] C. P. M. Moreno and M. Y. S. Llantén, "Análisis de Desempeño a Nivel Físico del Enlace de Bajada de LTE-Advanced," in *Departamento de Telecomunicaciones*. vol. Ing Popayan: Universidad del Cauca, 2014.
- [31] S. R. Caprile, *Equisbí: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4*: Sergio R. Caprile.
- [32] C. Oestges and B. Clerckx, *MIMO Wireless Communications: From Real-World Propagation to Space-Time Code Design*: Elsevier Science, 2010.
- [33] L. G. Ordóñez, D. P. Palomar, and J. R. Fonollosa, "On the diversity, multiplexing, and array gain tradeoff in MIMO channels," in *Information Theory Proceedings (ISIT), 2010 IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 2183-2187.
- [34] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423, 1948.
- [35] T. S. G. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation," *3GPP TS 36.211 V8.9.0 Release 8*, pp. 53-54, 2010.
- [36] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*: Elsevier Science, 2010.
- [37] UIT-R, "Distribuciones de probabilidad para establecer modelos de propagación de las ondas radioeléctricas " *Rec. UIT-R P.1057-1* pp. 1-16, 1994-2001.
- [38] K. Fazel and S. Kaiser, *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*: Wiley, 2008.
- [39] T. S. G. 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception " *3GPP TS 36.101 V 8.26.0 Release 8*, pp. 143 - 144, 2015.

