

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



**FERNANDO DARÍO CÓRDOBA MUÑOZ
JAMESON SAMIR ZÚÑIGA MUÑOZ**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Radio
Popayán, 2013

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



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

FERNANDO DARÍO CÓRDOBA MUÑOZ
JAMESON SAMIR ZÚÑIGA MUÑOZ

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Radio
Popayán, 2013



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO..... | 1 |
| 1.1 INTRODUCCION | 1 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA | 1 |
| 1.3 OBJETIVOS | 3 |
| 1.3.1 Objetivo General | 3 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO | 3 |
| CAPÍTULO 2..... | 4 |
| TECNOLOGÍA DE EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO..... | 4 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 4 |
| 2.2 GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA LTE..... | 4 |
| 2.3 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA LTE | 5 |
| 2.4 TÉCNICAS DE DUPLEXACIÓN..... | 6 |
| 2.4.1 Duplexación por División de Frecuencia | 6 |
| 2.4.2 Duplexación por División de Tiempo | 6 |
| 2.5 ESTRUCTURA DE TRAMA Y SUBTRAMA..... | 6 |
| 2.5.1 Estructura de trama LTE tipo 1..... | 6 |
| 2.5.2 Estructura de trama LTE tipo 2..... | 7 |
| 2.6 ESTRUCTURA DE RECURSOS DE LTE EN TIEMPO Y FRECUENCIA | 7 |
| 2.7 PREFIJO CÍCLICO..... | 9 |
| 2.8 ESQUEMAS DE MODULACIÓN | 10 |
| 2.9 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL..... | 11 |
| 2.10 TÉCNICAS DE ACCESO PARA LTE..... | 11 |
| 2.10.1 OFDMA | 12 |
| 2.10.1.1 Ventajas de OFDMA..... | 14 |



| | | |
|---|--|----|
| 2.10.2 | SC-FDMA..... | 14 |
| 2.10.2.1 | Ventajas de SC-FDMA | 16 |
| 2.11 | MODELO DE REFERENCIA PARA LTE..... | 16 |
| 2.11.1 | Nivel Físico..... | 17 |
| 2.11.2 | Nivel de Enlace | 17 |
| 2.11.2.1 | Protocolo de convergencia de paquetes de datos | 17 |
| 2.11.2.2 | Control de acceso al medio..... | 18 |
| 2.11.2.3 | Control de enlace radio..... | 18 |
| 2.11.3 | Nivel de Red | 18 |
| 2.11.3.1 | Control de los recursos de radio..... | 18 |
| 2.11.3.2 | Sin acceso de estrato | 18 |
| 2.11.3.3 | Protocolo de internet..... | 18 |
| 2.12 | CANALES EN EL ENLACE DE BAJADA..... | 19 |
| 2.12.1 | Canales Lógicos | 19 |
| 2.12.2 | Canales de Transporte..... | 21 |
| 2.12.3 | Canales Físicos..... | 21 |
| 2.13 | SEÑALES DE SINCRONIZACIÓN | 23 |
| 2.14 | PROCESAMIENTO DEL CANAL COMPARTIDO EN EL ENLACE DE BAJADA | 24 |
| 2.14.1 | Agregador del CRC al bloque de transporte | 25 |
| 2.14.2 | Segmentador a bloque de código y agregación de CRC | 25 |
| 2.14.3 | Codificador de canal..... | 26 |
| 2.14.3.1 | Turbo codificador..... | 27 |
| 2.14.3.2 | Entrelazador..... | 29 |
| 2.14.3.3 | Terminación Trellis..... | 31 |
| 2.14.4 | Adaptador de velocidad | 32 |
| 2.14.5 | Concatenación de bloques de código | 33 |
| 2.14.6 | Modulador y mapeador del canal físico compartido en el enlace de bajada | 33 |
| CAPÍTULO 3..... | | 34 |
| METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN PARA EL ENLACE DE BAJADA DE LTE - SISO - FDD..... | | 34 |



| | | |
|-----------|---|----|
| 3.1 | PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN | 34 |
| 3.1.1 | Formulación del Problema y Plan de Estudios..... | 34 |
| 3.1.1.1 | Adquisición de información sobre el funcionamiento de la tecnología | 35 |
| 3.1.1.1.1 | Transmisor..... | 35 |
| 3.1.1.1.2 | Canal..... | 35 |
| 3.1.1.1.3 | Receptor | 36 |
| 3.1.1.2 | Identificación de los fines de la simulación | 36 |
| 3.1.1.3 | Formulación de los objetivos..... | 37 |
| 3.1.2 | Recolección y Procesamiento de Datos | 37 |
| 3.1.2.1 | Identificación de clase y objetos en el transmisor | 37 |
| 3.1.2.2 | Identificación de las estructuras del transmisor..... | 37 |
| 3.1.2.3 | Identificación de los atributos en el transmisor | 40 |
| 3.1.2.4 | Identificación de procedimientos o métodos en el transmisor | 41 |
| 3.1.2.5 | Identificación de clases y objetos en el canal | 42 |
| 3.1.2.6 | Identificación de estructuras en el canal..... | 42 |
| 3.1.2.7 | Identificación de los atributos del canal..... | 43 |
| 3.1.2.8 | Identificación procedimientos o métodos del canal | 44 |
| 3.1.2.9 | Identificación de las clases y objetos del receptor | 44 |
| 3.1.2.10 | Identificación de las estructuras del receptor | 44 |
| 3.1.2.11 | Identificación de los atributos para el receptor | 46 |
| 3.1.2.12 | Identificación de procedimientos o métodos para el receptor..... | 47 |
| 3.1.3 | Formulación del Modelo de Simulación para el Enlace de Bajada a Nivel Físico de LTE de un Sistema SISO..... | 48 |
| 3.1.3.1 | Bloques internos del transmisor | 48 |
| 3.1.3.1.1 | Codificador | 49 |
| 3.1.3.1.2 | Generador de señales de sincronización | 50 |
| 3.1.3.1.3 | Multiplexor de datos de usuario, señalización y control | 51 |
| 3.1.3.1.4 | Generador de símbolos OFDMA | 51 |
| 3.1.3.1.5 | Generador de tramas FDD | 52 |
| 3.1.3.2 | Bloques internos del canal..... | 52 |



| | | |
|--------------------------------------|---|----|
| 3.1.3.2.1 | Canal multitrayecto | 53 |
| 3.1.3.2.2 | Canal AWGN | 53 |
| 3.1.3.3 | Bloques internos del receptor | 53 |
| 3.1.3.3.1 | Desensamblador de tramas FDD..... | 54 |
| 3.1.3.3.2 | Detector de símbolos OFDMA..... | 55 |
| 3.1.3.3.3 | Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control | 56 |
| 3.1.3.3.4 | Decodificador | 56 |
| 3.1.4 | Parámetros de Evaluación..... | 57 |
| 3.1.4.1 | Tasa de error de bit..... | 58 |
| 3.1.4.2 | Tasa de error de bloque..... | 59 |
| 3.1.4.3 | Throughput | 59 |
| CAPÍTULO 4..... | | 61 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS | | 61 |
| 4.1 | ESCENARIO 1..... | 62 |
| 4.2 | ESCENARIO 2..... | 67 |
| 4.3 | ESCENARIO 3..... | 77 |
| 4.4 | ESCENARIO 4..... | 82 |
| 4.5 | ESCENARIO 5..... | 89 |
| CAPÍTULO 5..... | | 96 |
| TRABAJOS FUTUROS Y CONCLUSIONES..... | | 96 |
| 5.1 | TRABAJOS FUTUROS | 96 |
| 5.2 | CONCLUSIONES..... | 96 |
| REFERENCIAS | | 98 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|---|
| Figura 2.1. Arquitectura de un sistema LTE | 5 |
| Figura 2.2. Estructura de trama tipo 1 | 7 |
| Figura 2.3. Estructura de trama tipo 2 | 7 |
| Figura 2.4. Estructura de recursos tiempo-frecuencia | 8 |
| Figura 2.5. Asignación del prefijo cíclico | 9 |



| | |
|---|----|
| Figura 2.6. Diagramas de constelación | 10 |
| Figura 2.7. Señal OFDM en el dominio de la frecuencia | 11 |
| Figura 2.8. Técnicas de acceso de LTE | 12 |
| Figura 2.9. Proceso Transmisor y receptor OFDMA | 13 |
| Figura 2.10. Esquema general de SC-FDMA | 15 |
| Figura 2.11. Modelo de referencia en niveles de un sistema LTE..... | 17 |
| Figura 2.12. Canales en el enlace de bajada..... | 19 |
| Figura 2.13. Señales de sincronización para una subtrama | 23 |
| Figura 2.14. Procesamiento del canal compartido en el enlace de bajada | 24 |
| Figura 2.15. Segmentador del bloque de transporte después de adicionar el CRC | 26 |
| Figura 2.16. Codificador RSC | 27 |
| Figura 2.17. Codificador turbo para LTE | 28 |
| Figura 2.18. Fase de terminación Trellis del turbo codificador | 31 |
| Figura 2.19. Proceso del adaptador de velocidad | 32 |
| Figura 2.20. Proceso de concatenación de los códigos bloque..... | 33 |
| | |
| Figura 3.1. Diagrama general de la metodología empleada para la simulación..... | 34 |
| Figura 3.2. Codificador de canal | 38 |
| Figura 3.3. Generador de señales de sincronización..... | 39 |
| Figura 3.4. Generador de símbolos OFDMA | 39 |
| Figura 3.5. Generador de trama FDD | 40 |
| Figura 3.6. Estructura del canal multitrayecto | 43 |
| Figura 3.7. Estructura del canal AWGN | 43 |
| Figura 3.8. Desensamblador de trama FDD..... | 45 |
| Figura 3.9. Detector de símbolo OFDMA. | 45 |
| Figura 3.10. Decodificador de canal. | 46 |
| Figura 3.11. Modelo general del sistema. | 48 |
| Figura 3.12. Bloques internos del transmisor..... | 49 |
| Figura 3.13. Bloques internos del codificador..... | 49 |
| Figura 3.14. Generador de señales de sincronización..... | 50 |
| Figura 3.15. Multiplexor de datos de usuario, señalización y control. | 51 |
| Figura 3.16. Generador de símbolos OFDMA..... | 51 |
| Figura 3.17. Generador de tramas FDD..... | 52 |
| Figura 3.18. Bloques internos del canal. | 52 |
| Figura 3.19. Canal multitrayecto. | 53 |
| Figura 3.20. Canal AWGN. | 53 |
| Figura 3.21. Bloques internos del receptor..... | 54 |
| Figura 3.22. Desensamblador de tramas FDD..... | 54 |
| Figura 3.23. Detector de símbolos OFDMA..... | 55 |
| Figura 3.24. Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control. | 56 |
| Figura 3.25. Decodificador..... | 56 |
| Figura 3.26. Respuesta en frecuencia del canal ante el corrimiento Doppler | 58 |



| | |
|---|----|
| Figura 4.1. BLER vs SNR para el escenario 1..... | 63 |
| Figura 4.2. BER vs SNR para el escenario 1..... | 64 |
| Figura 4.3. <i>Throughput</i> vs SNR para el escenario 1..... | 66 |
| Figura 4.4. BLER vs SNR para el escenario 2..... | 68 |
| Figura 4.5. BER vs SNR para el escenario 2..... | 69 |
| Figura 4.6. <i>Throughput</i> vs SNR para el escenario 2..... | 71 |
| Figura 4.7. Espectro de la señal en banda base con un ancho de banda de 5 MHz. | 72 |
| Figura 4.8. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 5 MHz. | 73 |
| Figura 4.9. Espectro de la señal banda base con un ancho de banda de 10 MHz. | 74 |
| Figura 4.10. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 10 MHz. .. | 74 |
| Figura 4.11. Espectro de la señal banda base con un ancho de banda de 15 MHz. | 75 |
| Figura 4.12. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 15 MHz. .. | 76 |
| Figura 4.13. Espectro de la señal banda base con un ancho de banda de 20 MHz. | 76 |
| Figura 4.14. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 20 MHz. .. | 77 |
| Figura 4.15. BLER vs SNR para el escenario 3..... | 79 |
| Figura 4.16. BER vs SNR para el escenario 3..... | 80 |
| Figura 4.17. <i>Throughput</i> vs SNR para el escenario 3..... | 81 |
| Figura 4.18. BLER vs SNR escenario 4..... | 83 |
| Figura 4.19. BER vs SNR escenario 4..... | 84 |
| Figura 4.20. <i>Throughput</i> vs SNR escenario 4..... | 85 |
| Figura 4.21. Constelación para QPSK con una SNR=6 dB..... | 86 |
| Figura 4.22. Constelación para QPSK con una SNR=36 dB..... | 87 |
| Figura 4.23. Constelación para 16QAM con una SNR=6 dB..... | 87 |
| Figura 4.24. Constelación para 16QAM con una SNR=36 dB..... | 88 |
| Figura 4.25. Constelación para 64QAM con una SNR=6 dB..... | 88 |
| Figura 4.26. Constelación para 64QAM con una SNR=36 dB..... | 89 |
| Figura 4.27. BLER vs SNR escenario 5..... | 91 |
| Figura 4.28. BER vs SNR escenario 5..... | 92 |
| Figura 4.29. <i>Throughput</i> vs SNR escenario 5..... | 93 |
| Figura 4.30. Constelación del canal EPA5 y modulación QPSK con una SNR=26 dB..... | 94 |
| Figura 4.31. Constelación del canal ETU300 y modulación 64QAM con una SNR=26 dB.... | 94 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Número de Bloques de Recursos (RB) en función del ancho de banda | 9 |
| Tabla 2.2. Configuración del prefijo cíclico | 10 |
| Tabla 2.3. Modos de operación del canal PDSCH | 22 |
| Tabla 2.4. Parámetros del entrelazador para la turbo codificación | 30 |
| Tabla 4.1. Escenarios de estudio. | 61 |



| | |
|---|----|
| Tabla 4.2. Parámetros generales de configuración del sistema..... | 62 |
| Tabla 4.3. Parámetros para el escenario 1. | 62 |
| Tabla 4.4. SNR, BER y <i>throughput</i> para el escenario 1. | 62 |
| Tabla 4.5. BLER, SNR, BER y <i>throughput</i> para ETU70 y ETU300 del escenario 1. | 63 |
| Tabla 4.6. <i>Throughput</i> para diferentes SNR en el escenario 1..... | 65 |
| Tabla 4.7. Parámetros para el escenario 2. | 67 |
| Tabla 4.8. SNR, BER y <i>throughput</i> para el escenario 2. | 67 |
| Tabla 4.9. Resultados para los anchos de banda de 10, 15 y 20 MHz del escenario 2. | 68 |
| Tabla 4.10. <i>Throughput</i> para diferentes SNR en el escenario 2..... | 70 |
| Tabla 4.11. Máximo <i>throughput</i> teórico y alcanzado para el escenario 2. | 70 |
| Tabla 4.12. Anchos de banda para el escenario 3. | 72 |
| Tabla 4.13. Parámetros para el escenario 3. | 78 |
| Tabla 4.14. Tasa de codificación, SNR, BER y <i>throughput</i> para el escenario 3. | 78 |
| Tabla 4.15. Resultados para la tasa de codificación de 1/2, 2/3 y 5/6 del escenario 3. | 78 |
| Tabla 4.16. Máximo <i>throughput</i> obtenido para el escenario 3..... | 81 |
| Tabla 4.17. Parámetros para el escenario 4. | 82 |
| Tabla 4.18. SNR, BER y <i>throughput</i> para el escenario 4. | 83 |
| Tabla 4.19. Máximo <i>throughput</i> obtenido para el escenario 4..... | 85 |
| Tabla 4.20. Parámetros para el escenario 4. | 90 |
| Tabla 4.21. BLER, SNR, BER y <i>throughput</i> del escenario 5. | 90 |
| Tabla 4.22. Resultados para los canales del escenario 5..... | 90 |
| Tabla 4.23. <i>Throughput</i> para diferentes SNR en el escenario 5..... | 92 |



LISTA DE ACRONIMOS

| | |
|--------------|--|
| 3GPP | Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (<i>3rd Generation Partnership Project</i>) |
| 4G | Cuarta Generación (<i>Fourth Generation</i>) |
| AWGN | Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (<i>Additive White Gaussian Noise</i>) |
| BCCH | Canal de Control de Difusión (<i>Broadcast Control Channel</i>) |
| BCH | Canal de Difusión (<i>Broadcast Channel</i>) |
| 16QAM | Modulación en Amplitud y Cuadratura de 16 niveles (<i>16 Quadrature Amplitude Modulation</i>) |
| 64QAM | Modulación en Amplitud y Cuadratura de 64 niveles (<i>64 Quadrature Amplitude Modulation</i>) |
| BER | Tasa de Error de Bits (<i>Bit Error Rate</i>) |
| BLER | Tasa de Error de Bloque (<i>Block Error Rate</i>) |
| CCCH | Canal de Control común (<i>Common Control Channel</i>) |
| CP | Prefijo Cíclico (<i>Cyclic Prefix</i>) |
| CQI | Indicador de Calidad de Canal (<i>Channel Quality Indicator</i>) |
| CRC | Verificación de Redundancia Cíclica (<i>Cyclic Redundancy Check</i>) |



| | |
|----------------|---|
| CS-RS | Señales de Referencia para Celdas Específicas (<i>Cell-Specific Reference Signals</i>) |
| DC | Corriente Continua (<i>Direct Current</i>) |
| DCCH | Canal de Control Dedicado (<i>Dedicated Control Channel</i>) |
| DFT | Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>) |
| DL-SCH | Canal Compartido en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Shared Channel</i>) |
| DTCH | Canal de Tráfico Dedicado (<i>Dedicated Traffic Channel</i>) |
| DS | Dispersión de Retardo (<i>Delay Spread</i>) |
| DwPTS | Intervalo de Tiempo Piloto en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Pilot Time Slot</i>) |
| eNodoB | Nodo B evolucionado (<i>Evolved Node B</i>) |
| EPA5 | Peatonal Extendido 5 Hz (<i>Extended Pedestrian 5 Hz</i>) |
| ETU70 | Urbano Típico Extendido 70 Hz (<i>Extended Typical Urban 70 Hz</i>) |
| E-UTRAN | Red de Acceso Radio Terrestre UMTS Evolucionada (<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>) |
| EPC | Núcleo de Red de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet Core</i>) |
| EPS | Sistema de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet System</i>) |



| | |
|--------------|---|
| EVA70 | Vehicular Extendido 70 Hz (<i>Extended Vehicular 70 Hz</i>) |
| FDD | Duplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Duplexing</i>) |
| FDMA | Acceso Múltiple por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Multiple Access</i>) |
| FEC | Corrección de Errores hacia Adelante (<i>Forward Error Correction</i>) |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>) |
| GP | Periodo de Guarda (<i>Guard Period</i>) |
| GRIAL | Grupo de Radio e InALámbricas |
| HARQ | Solicitud de Repetición Automática Híbrida (<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>) |
| IDFT | Transformada Discreta de Fourier Inversa (<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>) |
| IFFT | Transformada Rápida de Fourier Inversa (<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>) |
| IMS | Subsistema de Multimedia del Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol Multimedia Subsystem</i>) |
| ICI | Interferencia Interportadora (<i>Intercarrier Interference</i>) |
| IP | Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>) |
| ISI | Interferencia Entre Símbolos (<i>Inter Symbol Interference</i>) |
| ITU | Unión Internacional de Telecomunicaciones |



(International Telecommunications Union)

| | |
|--------------|--|
| LAN | Red de Área Local <i>(Local Area Network)</i> |
| LTE | Evolución a Largo Término <i>(Long Term Evolution)</i> |
| MAC | Control de Acceso al Medio <i>(Medium Access Control)</i> |
| MBSFN | Red de Frecuencia Única de Difusión Multimedia <i>(Multimedia Broadcast Single Frequency Network)</i> |
| MCCH | Canal de control multidifusión <i>(Multicast Control Channel)</i> |
| MCH | Canal de Multidifusión <i>(Multicast Channel)</i> |
| MIMO | Entradas Múltiples y Salidas Múltiples <i>(Multiple Input and Multiple Output)</i> |
| MMSE | Mínimo Error Cuadrático Medio <i>(Minimum Mean Square Error)</i> |
| MTCH | Canal de tráfico multidifusión <i>(Multicast Traffic Channel)</i> |
| NAS | Sin Acceso de Estrato <i>(Non Access Stratum)</i> |
| OFDM | Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal <i>(Orthogonal Frequency Division Multiplex)</i> |
| OFDMA | Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal <i>(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)</i> |
| PAPR | Relación de Potencia Pico a Promedio <i>(Peak to Average Power Ratio)</i> |
| PBCH | Canal Físico de difusión |



(Physical Broadcast Channel)

| | |
|---------------|---|
| PCCH | Canal de Control de Aviso o Notificación <i>(Paging Control Channel)</i> |
| PCH | Canal de Aviso o notificación <i>(Paging Channel)</i> |
| PDCCH | Canal de Control Físico en el Enlace de Bajada <i>(Physical Downlink Control Channel)</i> |
| PDCP | Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos <i>(Packet Data Convergence Protocol)</i> |
| PDU | Unidades de Datos de Protocolo <i>(protocol data unit)</i> |
| PDN-GW | Pasarela de Red de Paquete de Datos <i>(Packet Data Network Gateway)</i> |
| PMCH | Canal Físico de Multidifusión <i>(Physical Multicast Channel)</i> |
| PSS | Señal de Sincronización Primaria <i>(Primary Synchronization Signal)</i> |
| QoS | Calidad de Servicio <i>(Quality of Service)</i> |
| QPP | Permutación Polinomial Cuadrática <i>(Quadratic Permutation Polinomials)</i> |
| QPSK | Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura <i>(Quadrature Phase Shift Keying)</i> |
| RB | Bloque de Recursos <i>(Resource Block)</i> |
| RCN | Controlador de la Red Radio <i>(Radio Network Controller)</i> |
| RE | Elementos de Recursos |



(Resource Elements)

| | |
|----------------|---|
| RI | Interfaz Radio <i>(Radio Interface)</i> |
| RLC | Control del Enlace Radio <i>(Radio Link Control)</i> |
| RM | Adaptador de Velocidad <i>(Rate Matching)</i> |
| RRC | Control de los Recursos Radio <i>(Radio Resource Control)</i> |
| RS | Señal de Referencia <i>(Reference Signal)</i> |
| RSC | Convolutacional Sistemático Recursivo <i>(Recursive Systematic Convolutional)</i> |
| SAE | Evolución de la Arquitectura de los Sistemas Celulares <i>(Service Architecture Evolution)</i> |
| SC-FDMA | Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única <i>(Single Carrier - Frequency Division Multiple Access)</i> |
| SISO | Entrada Única - Salida Única <i>(Single Input Single Output)</i> |
| SNR | Relación Señal a Ruido <i>(Signal to Noise Ratio)</i> |
| SSS | Señal de Sincronización Secundaria <i>(Secondary Synchronization Signal)</i> |
| TB | Bloque de Transporte <i>(Transport Block)</i> |
| TDD | Duplexación por División de Tiempo <i>(Time Division Duplexing)</i> |
| TDMA | Acceso Múltiple por División de Tiempo |



(Time Division Multiple Access)

| | |
|--------------|--|
| TTI | Intervalo de Tiempo de Transmisión <i>(Transmission Time Interval)</i> |
| UE | Equipo de Usuario <i>(User Equipment)</i> |
| UMTS | Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal <i>(Universal Mobile Telecommunications System)</i> |
| UpPTS | Intervalo de Tiempo Piloto para el Enlace de Subida <i>(Uplink Pilot Time Slot)</i> |



CAPÍTULO 1

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 INTRODUCCION

En los últimos años el crecimiento del número de usuarios de telefonía móvil ha sido considerable lo cual ha incentivado el desarrollo de nuevas tecnologías como lo es: Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*), la cual representa un paso hacia la Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) en sistemas de comunicaciones móviles. Esta tecnología tiene como objetivos: incrementar las velocidades de transmisión de datos, operar con diferentes anchos de banda y en diferentes bandas de frecuencia, lograr una mayor eficiencia espectral, interoperar con tecnologías anteriores y con otro tipo de tecnologías móviles, garantizar Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), reducir los costos para el operador por despliegue, operación y mantenimiento, y reducir los tiempos de latencia en procesamiento. LTE brinda servicios de datos por conmutación de paquetes con velocidades de acceso a la información comparables a las entregadas por las Redes de Área Local (LAN, *Local Area Network*) y mucho más altas que las ofrecidas por generaciones anteriores de sistemas de comunicaciones móviles [1].

En el presente trabajo de grado se evaluó y analizó la operación y el desempeño de los diferentes esquemas de modulación, tasas de codificación, la técnica de transmisión a nivel físico en banda base de LTE en el enlace de bajada, ante diferentes modelos de canal en un sistema de Única Entrada y Única Salida (SISO, *Single Input and Single Output*) por medio de simulación, usando la herramienta *SystemVue*[®] de *Agilent Technologies*[®] ¹ [2], el cual es un software comercial con bloques que permiten dar cumplimiento a las especificaciones del *Release 8* del 3GPP y permite modificar parámetros con el fin de obtener la Tasa de Errores de Bit (BER, *Bit Error Rate*), la Tasa de Errores de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) y el *throughput*² en diferentes condiciones del sistema.

1.2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

LTE busca hacer un uso eficiente de los recursos radio para cumplir con los requerimientos necesarios para soportar múltiples servicios con calidad. LTE es un estándar establecido por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) especificado en el *Release 8*, en el cual uno de los

¹ <http://agilent.com>

² Cantidad máxima de información permitida a través de un canal por unidad de tiempo sin errores.



objetivos principales fue crear una arquitectura mucho más plana y sencilla, definida por el 3GPP como Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*), la cual está soportada totalmente en el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), con un número limitado de nodos e interfaces que permiten disminuir los tiempos de señalización y procesamiento entre nodos [3]. Además la tecnología LTE cuenta con un planificador de paquetes (*Packet Scheduler*) que cumple con funciones de asignación dinámica de recursos, balanceo de carga, gestión de movilidad (*Mobility Management*) y la capacidad de adaptarse rápidamente a las condiciones variables del canal radio por medio de la selección de diferentes esquemas de modulación y codificación. LTE hace uso en el enlace de bajada de la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), la cual permite que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras sean asignados a distintos usuarios, o en otras palabras, la posibilidad de contar con varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información [4]. LTE hace uso en el enlace de subida de la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*), la cual permite mantener en el dominio de la frecuencia la ortogonalidad entre los usuarios de una misma celda y de esta manera controlar la cantidad de interferencia generada dentro de ella [5]. Cabe destacar también que LTE opera con anchos de banda variables que van desde 1.25 hasta 20 MHz y velocidades de transmisión de datos teóricos de hasta 100 Mbps para el enlace de bajada y 50 Mbps en el enlace de subida con un ancho de banda de 20 MHz. LTE emplea modulaciones tales como Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*), Modulación en Amplitud y Cuadratura de 16 niveles (16 QAM, *16 Quadrature Amplitude Modulation*), Modulación en Amplitud y Cuadratura de 64 niveles (64 QAM, *64 Quadrature Amplitude Modulation*), codificación turbo, y sistemas de antenas de Entradas Múltiples y Salidas Múltiples (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), logrando de esta manera incrementar la eficiencia espectral y la capacidad del sistema [3].

Teniendo en cuenta la importancia que tiene LTE en comunicaciones móviles, surge la necesidad de realizar un análisis del desempeño del enlace de bajada de LTE, y por lo tanto se propuso el trabajo de grado “Análisis de Desempeño a Nivel Físico del Enlace de Bajada de LTE”.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el desempeño a nivel físico y en banda base del enlace de bajada de la tecnología LTE basada en un sistema de antenas de Única Entrada y Única Salida (SISO, *Single Input Single Output*)?



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

El objetivo principal del trabajo de grado fue analizar el desempeño a nivel físico de la tecnología LTE para el enlace de bajada en un sistema de Única Entrada y Única Salida (SISO) en modo de Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*).

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el funcionamiento y los distintos parámetros asociados a los diferentes esquemas de modulación y codificación y la técnica de transmisión asociada a LTE en el enlace de bajada.
- Evaluar el desempeño a nivel físico en banda base del enlace de bajada de un sistema LTE para diferentes modelos de canal teniendo en cuenta las especificaciones del *Release 8* del 3GPP en modo FDD.

1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

Capítulo 2: en este capítulo se hace una descripción de las principales características de LTE, su arquitectura, canales de transporte, esquemas de modulación, codificación, el nivel físico y sus diferentes técnicas de transmisión.

Capítulo 3: en este capítulo se aplica y se adapta una metodología para la evaluación de un modelo conceptual del sistema, teniendo en cuenta las especificaciones del *Release 8* del 3GPP.

Capítulo 4: en este capítulo se presenta y analiza de forma detallada los resultados obtenidos mediante la simulación.

Capítulo 5: en este capítulo se presentan las conclusiones referentes a la evaluación y análisis del desempeño del enlace de bajada de LTE y se plantean las futuras líneas de investigación derivadas del trabajo realizado.

ANEXOS

Anexo A: en este anexo se presentan las tablas especificadas en el 3GPP como: la longitud de la ventana para el prefijo cíclico normal, los esquemas de modulación y los parámetros de los canales multitrayecto.



CAPÍTULO 2

TECNOLOGÍA DE EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO

2.1 INTRODUCCIÓN

El gran avance de las tecnologías inalámbricas ha hecho que a través del tiempo se busque reducir los costos, optimizar el desempeño y brindar la mejor calidad de servicio. La tecnología de Evolución a Largo Término (LTE) que se basa en el *Release 8* (R8) del 3GPP, ha realizado muchas mejoras para ser más competitiva con las demás tecnologías, tales como incrementar las velocidades de transmisión de datos, operar con diferentes anchos de banda y en diferentes bandas de frecuencia, lograr una mayor eficiencia espectral, reducir los tiempos de latencia en procesamiento y disminuir los costos con el uso de una arquitectura mucho más plana y sencilla, soportada totalmente en el Protocolo de Internet (IP).

El presente capítulo muestra los aspectos generales de la tecnología LTE, haciendo énfasis en el nivel físico del enlace de bajada, tema en que se centra este trabajo de grado.

2.2 GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA LTE

El primer paso hacia la creación de LTE fue en noviembre de 2004, cuando el 3GPP TSG RAN³ organizó una reunión en la que se presentaron unas 40 contribuciones con ideas tales como mejorar la calidad de servicio (QoS), flexibilidad en el uso de las bandas de frecuencia, arquitectura simplificada con interfaces abiertas, bajo consumo de energía, etc. Para diciembre de 2004 se creó un tema de estudio referido a “Evolved UTRA and UTRAN”, evolución hacia una tecnología de acceso de alta velocidad de transmisión de datos, baja latencia y optimizada para la transmisión de paquetes. En junio de 2006 TR 25.912 que recomendaba las especificaciones para E-UTRA y E-UTRAN con técnica de acceso radio OFDMA en el enlace de bajada y SC-FDMA en el enlace de subida, planificador de paquetes y simplificación de la arquitectura UTRAN. A finales de 2008 el 3GPP se centró en finalizar el *Release 8* y específico LTE [5].

LTE busca lograr una mayor eficiencia espectral, velocidades pico de transmisión de datos de 100 Mbps en el enlace de bajada y 50 Mbps en el enlace de subida, un tiempo de ida y

³ Grupo de Especificaciones Técnicas para la Red de Acceso Radio (TSG RAN, *Technical Specification Group Radio Access Network*). Grupo responsable de la definición de las funciones, requerimientos e interfaces de la red UTRA / E-UTRA en sus dos modos: FDD y TDD.

vuelta menor a 10 ms, mejorar la capacidad y la cobertura del sistema, el nivel de movilidad y seguridad, y proporcionar anchos de banda variables desde 1.25 MHz a 20 MHz.

2.3 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA LTE

La arquitectura completa de la tecnología LTE se denomina Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) con un cambio importante ya que se elimina el nodo denominado Controlador de la Red Radio (RCN, *Radio Network Controller*) cuyas funciones son implementadas en el eNodoB⁴, lo cual reduce retardos y optimiza la red. Esta arquitectura de red en general la componen cuatro dominios importantes: servicios, la nueva red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*), el nuevo dominio de conmutación de paquetes de la red llamado Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) y los Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*) [12], como se muestra en la figura 2.1.

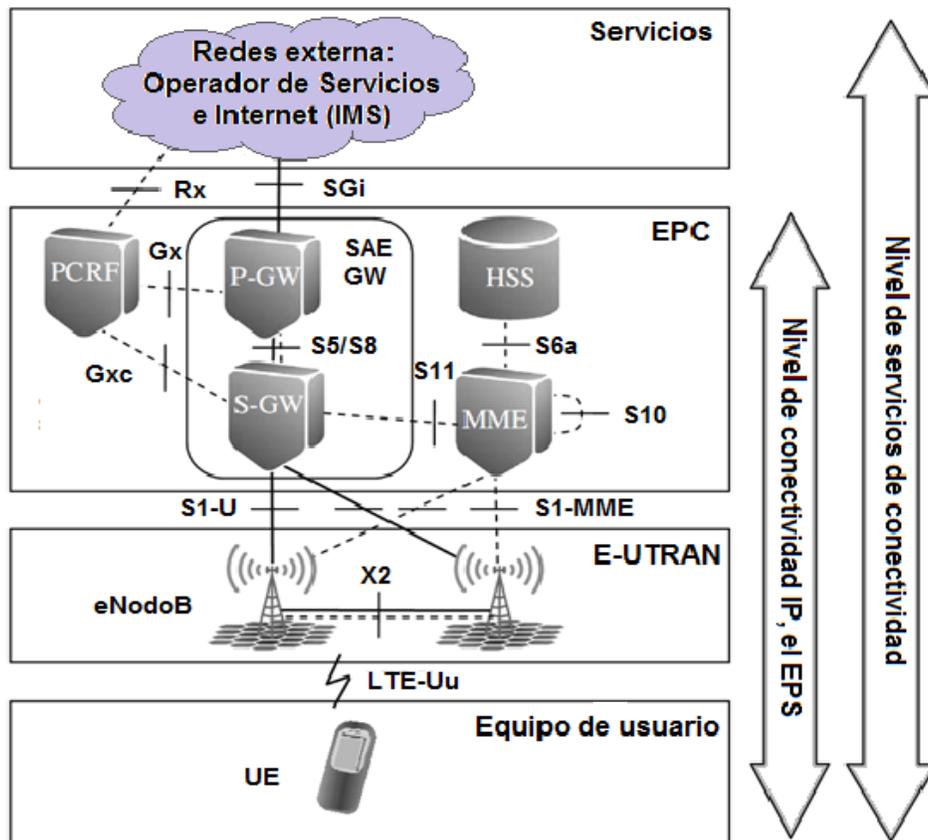


Figura 2.1. Arquitectura de un sistema LTE [5].

⁴ eNodoB. Es la estación base de la red LTE



Es importante resaltar que la interconexión de los diferentes equipos físicos tanto de la red de transporte EPC como de la red de acceso E-UTRAN, se realiza mediante conmutación de paquetes para obtener una mayor velocidad de datos. Dentro de la arquitectura de la red LTE aparecen muchas interfaces pero la más importante para el desarrollo de este trabajo de grado es la denominada LTE Uu o simplemente interfaz radio LTE, por su utilización a nivel físico tanto en el enlace de subida como en el de bajada. Esta interfaz permite la transmisión de información por el canal radio entre el eNodeB y los UE.

2.4 TÉCNICAS DE DUPLEXACIÓN

Para establecer una comunicación es necesario que esta se produzca en dos direcciones a la vez, es decir que la estación base sea capaz de recibir y enviar información en el mismo instante. Este fenómeno se conoce como duplexación

2.4.1 Duplexación por División de Frecuencia

En el esquema de Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) se designa dos canales de frecuencia en la comunicación uno para el enlace de subida y otro para el enlace de bajada.

2.4.2 Duplexación por División de Tiempo

En la Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) se utiliza la misma banda de frecuencia para transmisión y recepción, alternando cada transmisión en el tiempo [3]. Dependiendo de la duplexación a utilizar, LTE presenta 2 tipos de estructura de trama.

2.5 ESTRUCTURA DE TRAMA Y SUBTRAMA

2.5.1 Estructura de trama LTE tipo 1

La figura 2.2 muestra la estructura de trama LTE tipo 1 la cual contiene 10 subtramas de 1ms. Cada subtrama está compuesta de dos intervalos de tiempo de 0.5 ms cada uno para un total de 20 intervalos de tiempo (slots) y una duración de 10 ms. En cada intervalo de tiempo se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM con una separación entre subportadoras de 15KHz; siete símbolos en el caso de prefijo cíclico (PC, *Cyclic Prefix*) normal, o seis si el prefijo cíclico es extendido, con una duración por símbolo $T_s = 66.7\mu s$ [3]. Por otra parte, permite interoperar y coexistir con el Sistema de Telecomunicaciones Móvil Universal (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*).

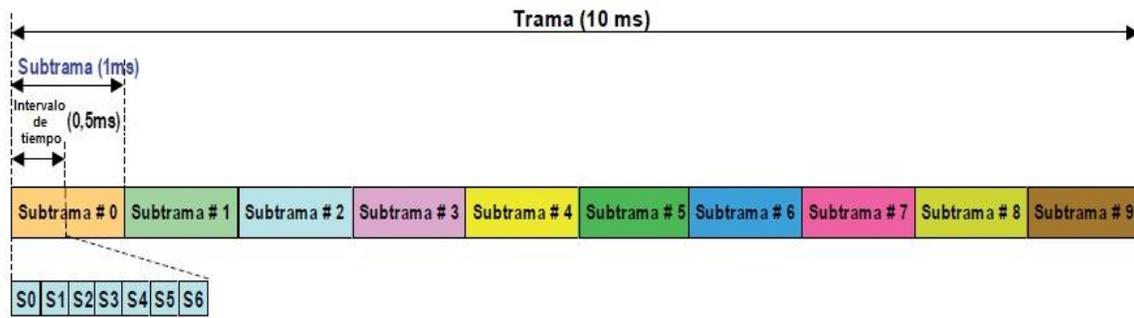


Figura 2.2. Estructura de trama tipo 1 [3].

Por otra parte LTE utiliza espaciamiento de subportadora reducido para la Red de Frecuencia Única de difusión Multimedia (MBSFN, *Multimedia Broadcast Single Frequency Network*), donde la separación entre subportadoras es de 7.5KHz, se transmiten 3 símbolos OFDMA por intervalo de tiempo y emplea un prefijo cíclico extendido de 33.33 μ s.

2.5.2 Estructura de trama LTE tipo 2

La figura 2.3 muestra la estructura de trama LTE tipo 2 la cual contiene 10 subtramas cada una de duración 1 ms y es diseñada para funcionar en modo TDD. La estructura de trama LTE tipo 2 tiene tres intervalos: Intervalo de Tiempo Piloto para el Enlace de Bajada (DwPTS, *Downlink Pilot Time Slot*), Periodo de Guarda (GP, *Guard Period*) y el Intervalo de Tiempo Piloto para el Enlace de Subida (UpPTS, *Uplink Pilot Time Slot*) para los cuales no se entrará en detalle ya que el propósito de este trabajo de grado es utilizar la estructura de trama tipo 1.

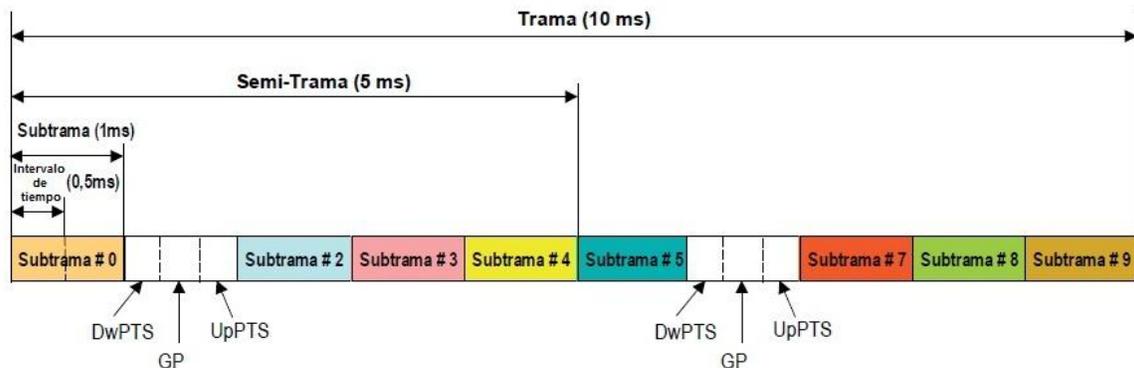


Figura 2.3. Estructura de trama tipo 2 [3].

2.6 ESTRUCTURA DE RECURSOS DE LTE EN TIEMPO Y FRECUENCIA

Los recursos en el dominio del tiempo y la frecuencia se subdividen de acuerdo con la siguiente estructura:



En el dominio del tiempo la duración de una trama radio es de 10 ms (estructura de trama de tipo 1, ver sección 2.5.1). En el dominio de la frecuencia, los recursos se agrupan en unidades de 12 subportadoras separadas 15 KHz, ocupando así un total de 180 kHz [6]; de tal manera que 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos y una duración de un intervalo de tiempo se denomina un Bloque de Recursos (RB, *Resource Blocks*). Los Bloques de Recursos (RB) 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 subportadora en el dominio de la frecuencia. Un Bloque de Recursos (RB) se compone por lo tanto de 84 Elementos de Recursos (RE) para el caso de prefijo cíclico normal como se muestra en la figura 2.4, y 72 elementos de recursos en el caso del prefijo cíclico extendido [7].

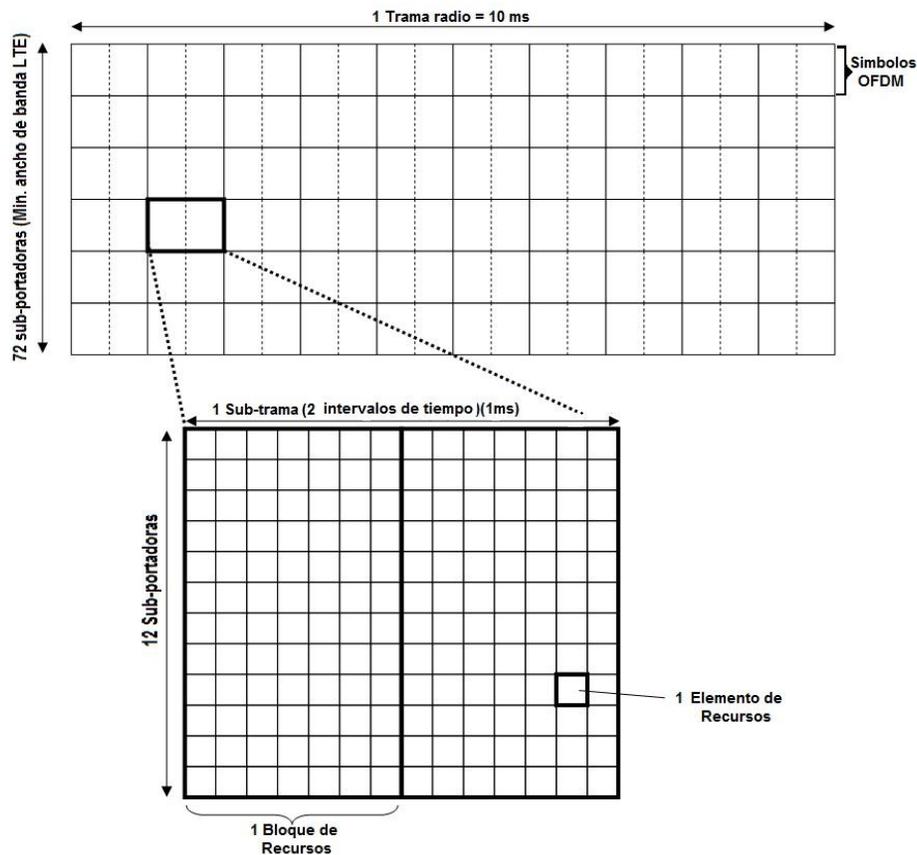


Figura 2.4. Estructura de recursos tiempo-frecuencia [7].

El número de subportadoras es 12 veces el número de Bloques de Recursos (RB) más uno, ya que hay que considerar la subportadora Corriente Continua (DC, *Direct Current*), la cual se utiliza como mecanismo de ajuste y sincronización en frecuencia en el receptor.

La tabla 2.1 muestra el número de bloques de recursos en un sistema LTE el cual depende del ancho de banda del canal.

| Ancho de banda de canal [MHz] | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|------------------------------------|-----|----|----|----|----|-----|
| Número de Bloques de Recursos (RB) | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

Tabla 2.1. Número de Bloques de Recursos (RB) en función del ancho de banda [8].

2.7 PREFIJO CÍCLICO

El prefijo cíclico es una copia de la última parte del símbolo OFDM en el intervalo de guarda o separación que se coloca en cada símbolo transmitido con el fin, de hacer que la cola de un símbolo no se traslape con el próximo símbolo, evitando de esta manera la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*) como se muestra en la figura 2.5. El prefijo cíclico tiene una duración de aproximadamente $5 \mu s$ para el prefijo cíclico normal y aproximadamente $17 \mu s$ para el prefijo cíclico extendido [5].

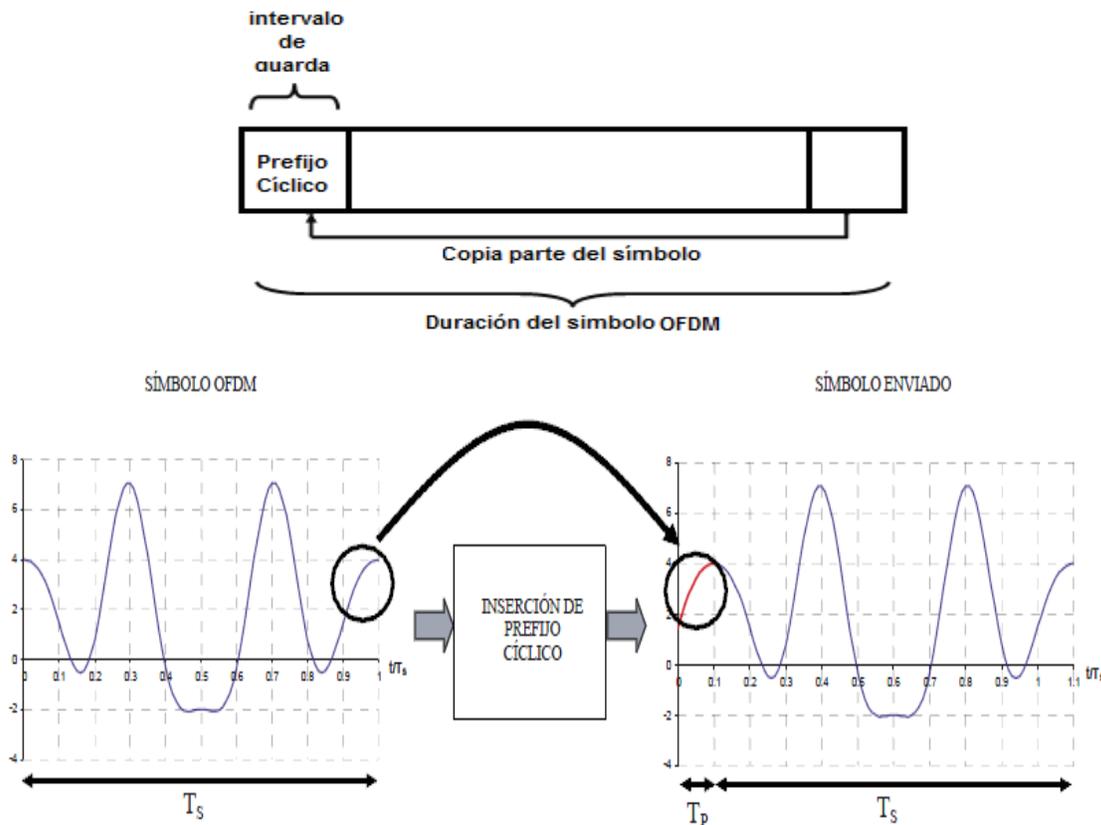


Figura 2.5. Asignación del prefijo cíclico [3].



La tabla 2.2 muestra las formas de trabajar con el prefijo cíclico en el enlace de bajada.

| Configuración | | Número de portadoras por bloque de recursos | Número de símbolos para el enlace de bajada |
|---------------------------|------------------------------|---|---|
| Prefijo cíclico normal | $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ | 12 | 7 |
| Prefijo cíclico extendido | $\Delta f = 15 \text{ kHz}$ | | 6 |
| | $\Delta f = 7.5 \text{ kHz}$ | 24 | 3 |

Tabla 2.2. Configuración del prefijo cíclico [9].

2.8 ESQUEMAS DE MODULACIÓN

La tecnología LTE hace uso de esquemas de modulación: QPSK, 16-QAM y 64-QAM, tanto el enlace de bajada como en el de subida. Con QPSK, 16QAM y 64QAM se modulan 2, 4 y 6 bits por símbolo respectivamente, logrando mayor eficiencia espectral a medida que se aumenta el orden de modulación.

La figura 2.6 muestra los diagramas de constelación generados por estos tres tipos de modulaciones.

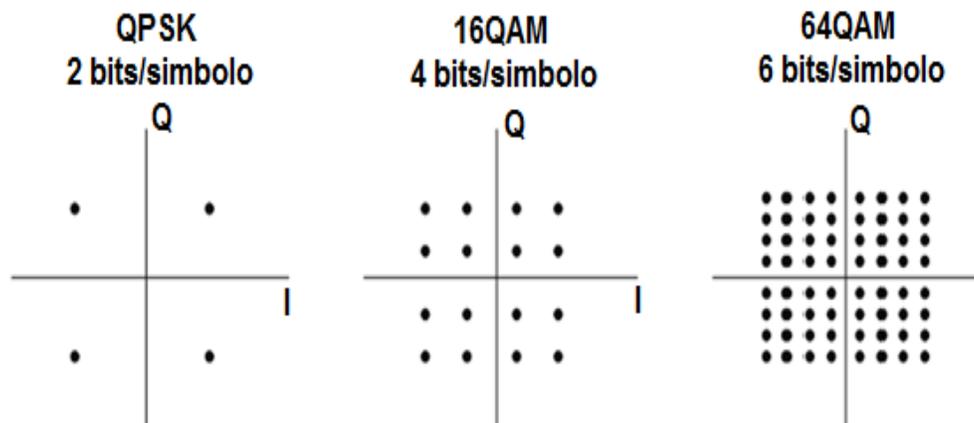


Figura 2.6. Diagramas de constelación [5].

Los esquemas de modulación que utiliza LTE se aplican sobre los canales: Físico Compartido del Enlace de Bajada (PDSCH, *Downlink Shared Channel*), Canal Físico de Multifusión (PMCH, *Physical Multicast Channel*). Para el Canal Físico de Difusión (PBCH, *Physical Broadcast Channel*) se aplica únicamente modulación QPSK [5]. El mapeo de la modulación toma dígitos binarios 1 o 0, como entrada y produce un símbolo en banda

base de valor complejo de la forma $x = I + jQ$ a la salida como se puede ver en el anexo A [9].

2.9 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL

La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplex*) hace uso de un conjunto de múltiples frecuencias, dividiendo el ancho de banda del canal en subportadoras de banda estrecha. Estas subportadoras se caracterizan por ser ortogonales entre sí, permitiendo de esta forma el uso eficiente del espectro. OFDM ofrece diversidad en frecuencia y es robusta frente al fenómeno de multitrayectoria, por lo cual no requiere de ecualizador en recepción. La señal OFDM se muestra en la figura 2.7 y su estructuración matemática en [10].

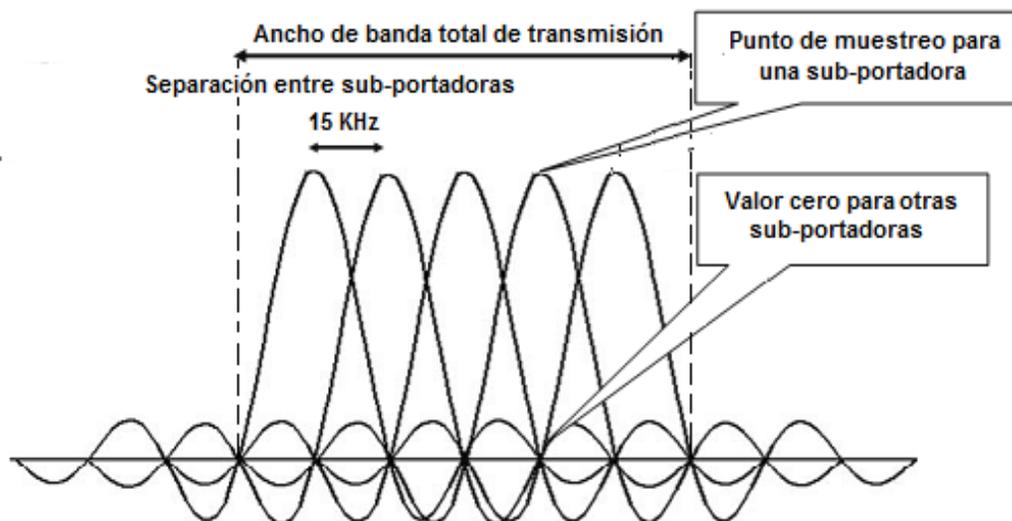


Figura 2.7. Señal OFDM en el dominio de la frecuencia [5].

2.10 TÉCNICAS DE ACCESO PARA LTE

La tecnología LTE establece enlaces radio usando la interfaz de comunicaciones llamada Interfaz Radio (IR, *Radio Interface*), la cual brinda mecanismos que proporcionan protección a la información entre el móvil y la estación base. La interfaz radio LTE utiliza dos técnicas de transmisión una por cada enlace; en el enlace de subida utiliza SC-FDMA y en el enlace de bajada OFDMA.

La figura 2.8 muestra la comparación de la señal OFDMA y SC-FDMA en frecuencia, en el cual OFDMA subdivide el ancho de banda disponible en múltiples subportadoras mientras SC-FDMA utiliza una sola portadora para todo el ancho de banda disponible de allí el nombre de portadora simple.

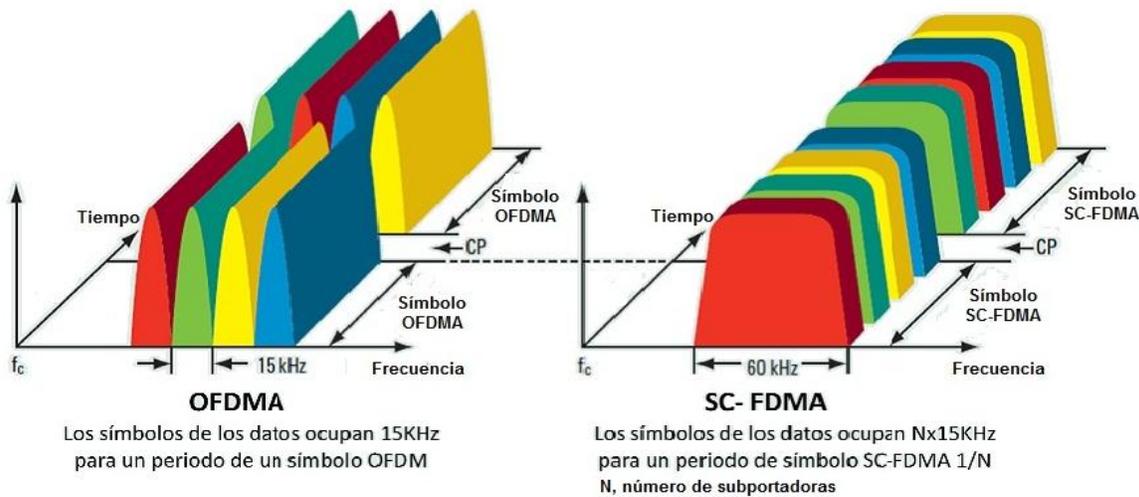


Figura 2.8. Técnicas de acceso de LTE [11].

A continuación se explica las técnicas de transmisión para el enlace de bajada y el enlace de subida de LTE, teniendo en cuenta que el tema de interés de este trabajo de grado es el enlace de bajada por lo tanto se profundizará en la técnica OFDMA.

2.10.1 OFDMA

La Técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) se basa en la técnica de transmisión OFDM. Esta técnica de acceso subdivide el ancho de banda disponible para la transmisión de señales en múltiples subportadoras de banda estrecha, ordenadas en forma ortogonal y separadas entre sí 15KHz proporcionando robustez frente a los desvanecimientos rápidos [7].

El espectro en OFDMA se agrupa para formar diferentes conjuntos de frecuencia, los cuales se conocen como subcanales. OFDMA distribuye subportadoras a los diferentes usuarios al mismo tiempo, de manera que múltiples usuarios pueden transmitir datos simultáneamente a través de diferentes subcanales mejorando considerablemente el desempeño y la eficiencia espectral del sistema [7]. Con base en la información sobre las condiciones del canal de cada usuario, OFDMA presenta un mecanismo de asignación flexible que hace posible asignar subportadoras de manera dinámica dependiendo del tráfico y las condiciones del canal de cada usuario.

OFDMA permite el manejo eficiente del espectro ya que el uso de canales ortogonales elimina las bandas de guardas y evita la Interferencia Interportadora (ICI, *Inter-carrier Interference*), además utiliza procesamiento digital de señales a través de la Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) y Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) calculadas con el algoritmo Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) para que la señal se

transforme del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa para finalmente ser demodulada [12]. En el proceso de demodulación se requiere tener una alta sincronización en tiempo y frecuencia entre transmisor y receptor, por lo que cualquier desfase de la señal producirá que las portadoras pierdan su ortogonalidad, generando interferencia entre portadoras y por lo tanto ISI. Para mitigar este efecto OFDMA hace uso del prefijo cíclico.

La figura 2.9 muestra el proceso del transmisor y receptor de OFDMA, el primer bloque en el transmisor está conformado por un conversor serie a paralelo el cual permite que la información salga en paralelo y sea modulada con esquemas QPSK, 16QAM o 64QAM en el bloque modulador, luego viene el bloque de Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) el cual pasa la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, este bloque es seguido por la adición de prefijo cíclico el cual permite eliminar la interferencia intersimbólica en recepción y tiene una duración de aproximadamente 5 μ s. Para el receptor se hace el proceso inverso con la diferencia que se utiliza un ecualizador en el dominio de la frecuencia.

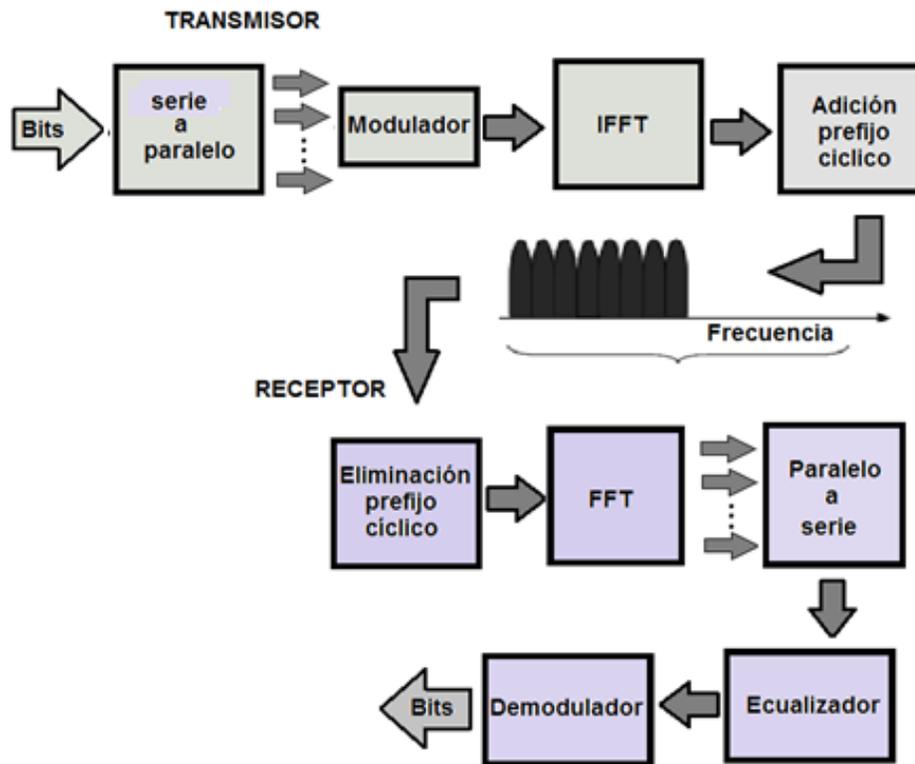


Figura 2.9. Proceso Transmisor y receptor OFDMA [5].



2.10.1.1 Ventajas de OFDMA

- **Diversidad multiusuario**

OFDMA permite la asignación de subportadoras a usuarios de forma dinámica en intervalos de tiempo muy cortos gracias al Planificador de Paquetes (*Packet Scheduler*) consiguiendo mayor eficiencia espectral y permitiendo un uso más eficiente de los recursos.

- **Diversidad en frecuencia**

El uso de OFDMA permite asignar subportadoras no contiguas a un mismo usuario manteniendo la independencia del canal, lo que se conoce como diversidad en frecuencia en la transmisión de dicho usuario en canales selectivos en frecuencia.

- **Robustez frente al multitrayecto**

El resultado del multitrayecto se refleja en interferencia intersimbólica que se presenta en la señal. OFDMA combate este problema utilizando el prefijo cíclico que sirve como tiempo de guarda para eliminar la ISI.

- **Flexibilidad a la banda asignada**

La asignación dinámica de subportadoras en OFDMA hace que cada usuario obtenga la velocidad de transmisión de datos necesaria de acuerdo al servicio que está utilizando.

- **Eficiencia espectral**

Debido al mínimo espaciado entre subportadoras es posible tener un alto grado de utilización de la banda asignada, ya que en otras técnicas diferentes a OFDM existen bandas de guarda entre portadoras lo que disminuye la eficiencia espectral.

2.10.2 SC-FDMA

El Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA), se utiliza en el enlace de subida de LTE y presenta características similares a OFDM con la diferencia que emplea en el transmisor el módulo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), para convertir los datos de los símbolos que están en el dominio de tiempo al dominio de la frecuencia y en el receptor emplea el módulo de la Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT) la cual hace la transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo como se muestra en la figura 2.10. SC-FDMA tiene una baja Relación Potencia Pico

a Promedio⁵ (PAPR, *Peak to Average Power Ratio*) por lo que se considera óptima para el enlace de subida ya que en los equipos de usuario es limitada la energía y con esto se garantiza un consumo bajo de energía.

La figura 2.10 muestra el esquema general de transmisión - recepción SC-FDMA. El primer bloque en el transmisor es un conversor serie a paralelo, el cual permite que el flujo serie de alta velocidad se convierta en múltiples flujos paralelos de baja velocidad, cada uno de los cuales es modulado con esquemas QPSK, 16QAM o 64QAM por el bloque modulador, posterior al cual aparece un bloque DFT el cual realiza la precodificación y así reducir los valores pico de potencia instantánea y mejorar la relación PAPR, luego la señal se ubica en una parte específica de la banda de frecuencias de operación del sistema por medio de un mapeo de muestras de la salida de la DFT sobre un rango de frecuencias adyacentes por medio del bloque mapeador de subportadoras. Finalmente la señal entra al bloque de la IFFT, el cual hace la transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, seguido por la adición de prefijo cíclico, la cual permite mitigar los efectos de la multitrayectoria en recepción. El receptor realiza el proceso inverso adicionando un equalizador para compensar efectos del canal.

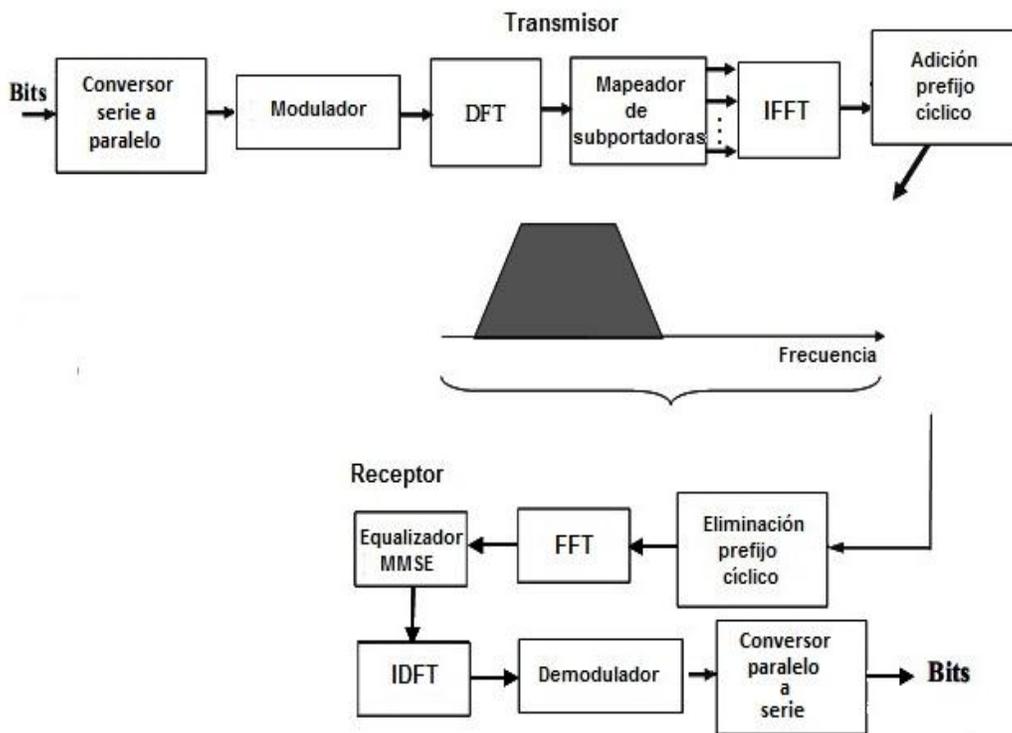


Figura 2.10. Esquema general de SC-FDMA [5].

⁵ Medida del rango dinámico de la amplitud de entrada de la señal, el cual se produce un alto valor cuando las subportadoras se interfieren constructivamente.



2.10.2.1 Ventajas de SC-FDMA

- La tecnología SC-FDMA permite utilizar los mismos bloques de procesamiento que OFDM y la misma asignación de recursos en tiempo y frecuencia.
- Un símbolo se transmite sobre varias subportadoras. Si una subportadora sufre desvanecimiento profundo, la información se puede recuperar de otras subportadoras (diversidad en frecuencia).
- Asignación de ancho de banda de forma flexible, según los requerimientos de transmisión del UE y la Calidad de Servicio (QoS).
- Alta eficiencia espectral.
- Facilita el diseño del amplificador de potencia del terminal móvil, permitiendo un menor valor de PAPR y un mayor tiempo de vida de la batería del terminal.

2.11 MODELO DE REFERENCIA PARA LTE

El modelo de referencia de LTE está formado por tres niveles: nivel físico, nivel de enlace y nivel de red los cuales están especificados en el 3GPP [13]. Además al nivel 2 lo conforman tres subniveles: Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), Control del Enlace de Radio (RLC, *Radio Link Control*) y Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*). El nivel 3 lo conforma el subnivel Control de los Recursos Radio (RRC, *Radio Resource Control*), los protocolos IP y Sin Acceso de Estrato (NAS, *Non Access Stratum*).

En la figura 2.11 se muestra los tres niveles y su interconexión, en el cual existen dos planos uno de usuario y otro de control. El plano de usuario utiliza en el nivel 3 el protocolo IP a diferencia del plano de control que utiliza el protocolo NAS y el subnivel RRC.

El plano de usuario, es el encargado del envío de la información de usuario (paquetes IP generados por el UE o destinados a él). El plano de control, es el encargado de transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el UE, y que permiten un correcto funcionamiento del sistema [3].

2.11.1 Nivel Físico

Este nivel permite la conexión entre la interfaz radio con el resto de los niveles para que accedan a la información. Además entre sus funciones están la codificación de canal, modulación y mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo.

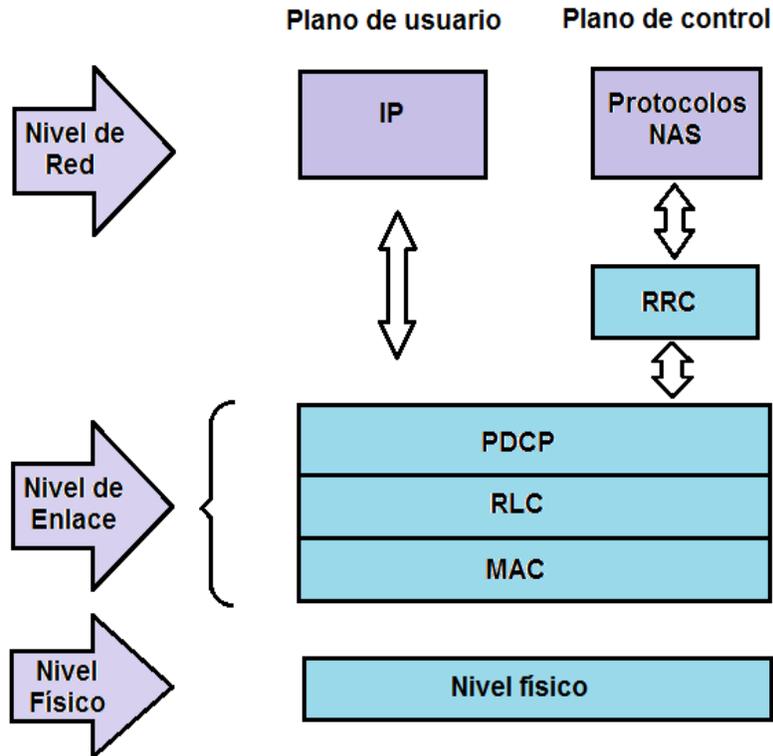


Figura 2.11. Modelo de referencia en niveles de un sistema LTE [3].

2.11.2 Nivel de Enlace

Este nivel permite que la información se transmita libre de errores, entrega ordenada de tramas y control de flujo. Se divide en tres sub-niveles:

2.11.2.1 Protocolo de convergencia de paquetes de datos

Este subnivel en el plano de usuario se encarga de compresión y descompresión de encabezados, transferencia de datos de usuario en la interfaz radio, entrega en secuencia de las Unidades de Datos de Protocolo (PDU, *protocol data unit*), cifrado y descifrado, detección de paquetes duplicados en el traspaso (*handover*) y en el plano de control se encarga de la protección de los paquetes, cifrado de datos y señalización [14].



2.11.2.2 Control de acceso al medio

Este sub-nivel se encarga de controlar el acceso a la red en el enlace de subida y de bajada a través mecanismos de corrección de errores mediante procedimientos de retransmisión, multiplexación y demultiplexación de la información, ordenamiento de los paquetes, selección del formato de transporte a utilizar por parte de la capa física y adición de bits de información [12]. El Control de Acceso al Medio (MAC) opera en el plano de usuario y en el plano de control.

2.11.2.3 Control de enlace radio

Este subnivel se encarga de la segmentación de los paquetes IP recibidos de los niveles superiores para adaptar su tamaño a las capacidades de transmisión de la interfaz radio, la transferencia de paquetes de datos sin pérdidas, corrección y detección de errores, concatenación y recuperación de la información [15]. El Control de Enlace Radio (RLC) opera en el plano de usuario y en el plano de control.

2.11.3 Nivel de Red

Este nivel permite gestionar las funcionalidades a nivel de red direccionamiento y enrutamiento, lo conforman el subnivel RRC y los protocolos IP y NAS:

2.11.3.1 Control de los recursos de radio

Este subnivel se encarga de la seguridad, movilidad, traspaso (*handover*), gestión de QoS y establece, mantiene y libera la conexión RRC entre el equipo de usuario y E-UTRAN [16]. El Control de los Recursos de Radio (RRC) opera en el plano de control.

2.11.3.2 Sin acceso de estrato

Este protocolo se encarga de la autenticación del UE, control de seguridad, movilidad de los UE, gestión de sesiones para establecer y mantener la conectividad IP entre el UE y la Pasarela de Red de Paquete de Datos⁶ (PDN-GW, *Packet Data Network Gateway*). El protocolo Sin Acceso de Estrato (NAS) opera en el plano de control [14].

2.11.3.3 Protocolo de internet

Este protocolo se encarga del transporte de paquetes desde el origen hasta el destino en la comunicación. El protocolo de Internet (IP) opera en el plano de usuario.

⁶ Enrutador de borde entre el EPS y las redes de paquetes de datos externas, el cual asigna la dirección IP al UE.

2.12 CANALES EN EL ENLACE DE BAJADA

Los datos generados en niveles superiores son transportados en canales lógicos, luego en canales de transporte y finalmente son mapeados en canales físicos en el nivel físico. Los canales lógicos se dividen en: canales de tráfico y canales de control. Los canales de transporte se dividen en: canales de transporte, dedicados y comunes. Conversión de canales lógicos a canales de transporte suceden en el subnivel MAC.

La gráfica 2.12 muestra los canales lógicos, de transporte y físicos en el enlace de bajada de LTE.

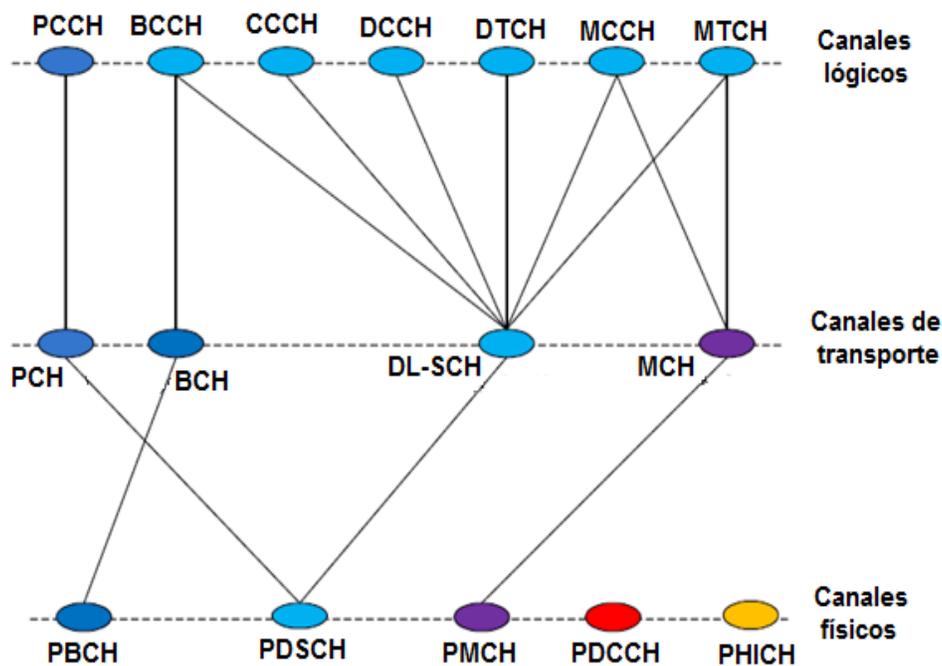


Figura 2.12. Canales en el enlace de bajada.

2.12.1 Canales Lógicos

A continuación se describen los canales lógicos los cuales se utilizan para describir el tipo de información que se transmite a través de la interfaz radio:

- **Canal de control dedicado**

El Canal de Control Dedicado (DCCH, *Dedicated Control Channel*), es un canal punto a punto destinado a transferir información de control entre la red (eNodeB) y un terminal móvil una vez que se dispone de una conexión a nivel de RRC [3].



- **Canal de tráfico multidifusión**

Canal de Tráfico Multidifusión (MTCH, *Multicast Traffic Channel*), es un canal punto multipunto utilizado para transmitir información desde el eNodoB a un grupo de usuarios [3].

- **Canal de control de difusión**

Canal de Control de Difusión (BCCH, *Broadcast Control Channel*), es un canal de control que utiliza el eNodoB para transmitir a los terminales móviles bajo su área de cobertura información sobre el sistema (la identificación del operador y la celda, configuración de los canales comunes de control o como acceder al sistema) [3].

- **Canal de control de aviso o notificación**

Canal de Control de Aviso o Notificación (PCCH, *Paging Control Channel*), es un canal que utiliza la red (eNodoB) para llamar a terminales móviles de los que se conoce cual es su área de localización pero no la celda o eNodoB en la que están ubicados [3].

- **Canal de control común**

El Canal de Control Común (CCCH, *Common Control Channel*), es un canal que permite la comunicación entre el eNodoB y el terminal móvil cuando todavía no se ha establecido una conexión a nivel de RRC. Se utiliza para enviar información de control en la fase inicial del establecimiento de la conexión [5].

- **Canal de tráfico dedicado**

El Canal de Tráfico Dedicado (DTCH, *Dedicated Traffic Channel*), es un canal punto a punto destinado a transferir información entre la red (eNodoB) y un terminal móvil determinado. Puede ser utilizado para transferir información de usuario así como señalización a nivel de aplicación asociada a un flujo de datos de usuario [5].

- **Canal de control multidifusión**

Canal de Control Multidifusión⁷ (MCCH, *Multicast Control Channel*), es un canal punto multipunto utilizado para transmitir información de control desde la red (eNodoB) a un grupo de usuarios que reciben servicios MBMS [3].

⁷ Es el envío de la información en una red a múltiples destinos simultáneamente.



2.12.2 Canales de Transporte

A continuación se describen los canales de transporte los cuales se encargan de definir las características de la información que es transmitida por la interfaz radio:

- **Canal de difusión**

El Canal de Difusión (BCH, *Broadcast Channel*), es un canal encargado de notificar los parámetros necesarios para que los dispositivos accedan al sistema (identificación del operador) en toda el área de cobertura de la celda [3].

- **Canal compartido para el enlace de bajada**

El Canal Compartido para el Enlace de Bajada (DL-SCH, *Downlink Shared Channel*) es un canal encargado de llevar información de usuario y señalización, soporta Solicitud de Repetición Automática Híbrida (HARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*), adaptación dinámica del enlace e implementa mecanismos de recepción discontinua en el equipo de usuario para conseguir incrementar la eficiencia de energía.

- **Canal de aviso o notificación**

El Canal de Aviso o notificación (PCH, *Paging Channel*) es un canal que realiza asignación de recursos de forma dinámica en canales de control y tráfico e informa a los equipos de usuario de las actualizaciones realizadas mediante el sistema de información.

- **Canal de multidifusión**

Canal de Multidifusión (MCH, *Multicast Channel*) es un canal encargado de transportar servicios de multidifusión en el enlace de bajada.

2.12.3 Canales Físicos

A continuación se describen los canales físicos los cuales se utilizan para transportar la información destinada a los usuarios situados en la zona de cobertura del correspondiente eNodoB, así como de los mecanismos de señalización y control que posibilitan una transmisión eficiente de la información [3]:

- **Canal físico de control del enlace de bajada**

Canal Físico de Control del Enlace de Bajada (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*) es un canal que transporta información de control específica para el UE (control de acceso).



- **Canal físico de difusión**

El Canal Físico de Difusión (PBCH) es un canal que se utiliza para transmitir información de identificación y control a todos los usuarios dentro del área de cobertura [16].

- **Canal físico de multidifusión**

Canal Físico de Multidifusión (PMCH) es un canal utilizado para enviar información a varios usuarios dentro del área de cobertura.

- **Canal físico indicador de repetición automática híbrida**

El Canal Físico Indicador de HARQ (PHICH, *Physical HARQ Indicator Channel*) es un canal utilizado para informar el estado de Solicitud de Repetición Automática Híbrida (HARQ)

- **Canal físico compartido en el enlace de bajada**

El Canal Físico Compartido del Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*), es un canal que se utiliza para el transporte de información de usuario, permite alta velocidad de transmisión de datos y soporta esquemas de modulación QPSK, 16QAM y 64 QAM. [3].

El canal PDSCH presenta siete modos de operación que son descritos en la tabla 2.3.

| Operación | Características Principales |
|------------------|--|
| Modo 1 | Transmisión por una única antena en el eNodoB |
| Modo 2 | Diversidad en transmisión |
| Modo 3 | Multiplexación espacial en lazo abierto |
| Modo 4 | Multiplexación espacial en lazo cerrado |
| Modo 5 | MIMO para esquemas multiusuario |
| Modo 6 | 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. |
| Modo 7 | Conformación de haz sin realimentación. En este caso el eNodoB 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 de subida. |

Tabla 2.3. Modos de operación del canal PDSCH [3].

2.13 SEÑALES DE SINCRONIZACIÓN

En el enlace de bajada de LTE se utilizan dos tipos de señales de sincronización, la señal de sincronización primaria (PSS, *Primary Synchronization Signal*) y la señal de sincronización secundaria (SSS, *Secondary Synchronization Signal*). La PSS realiza la sincronización temporal a nivel de subtrama y la SSS realiza la sincronización temporal a nivel de trama [8].

Las señales de sincronización o símbolos piloto juegan un papel muy importante, ya que evita la interferencia interportadora y permiten al equipo de usuario mitigar los errores de amplitud, fase, sincronización en frecuencia y tiempo en la señal recibida, que puede atribuirse a error de banda plana introducida por el canal radio. Las señales de referencia están asignadas uniformemente cada seis subportadoras en el dominio de la frecuencia y cada dos símbolos por intervalo de tiempo en el dominio del tiempo, es decir la señal de referencia primaria está ubicada en el primer símbolo de un intervalo de tiempo y la señal de referencia secundaria generalmente se ubica en el quinto símbolo de un intervalo de tiempo. A partir de estas referencias el equipo de usuario puede compensar y minimizar así la probabilidad de errores de demodulación.

La figura 2.13, muestra la ubicación de las señales de referencia primaria y secundaria dentro de una subtrama, la cual está compuesta por dos Bloques de Recursos (RB) [9].

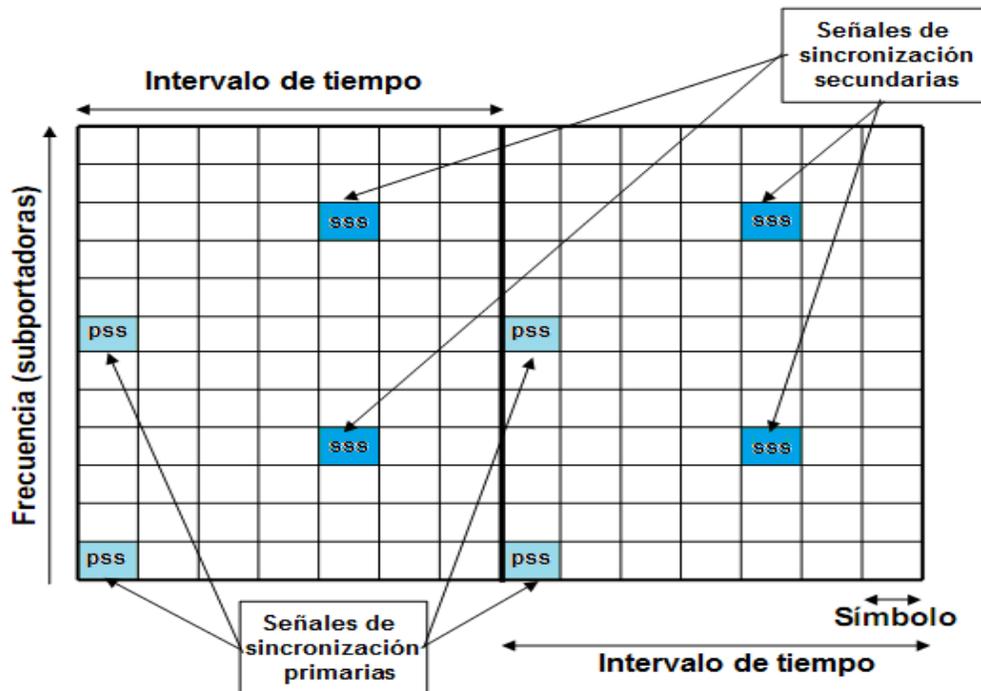


Figura 2.13. Señales de sincronización para una subtrama [3].



Para profundizar sobre el tema relacionado a las señales de sincronización utilizadas en el enlace de bajada de LTE se recomienda consultar las siguientes referencias [9] y [17].

2.14 PROCESAMIENTO DEL CANAL COMPARTIDO EN EL ENLACE DE BAJADA

La figura 2.14 muestra el procesamiento del canal de transporte DL-SCH, el cual presenta los siguientes pasos: agregador de CRC en el bloque de transporte, segmentador a bloque de código, codificador de canal, adaptador de velocidad, concatenador del bloque de código, modulador y mapeador.

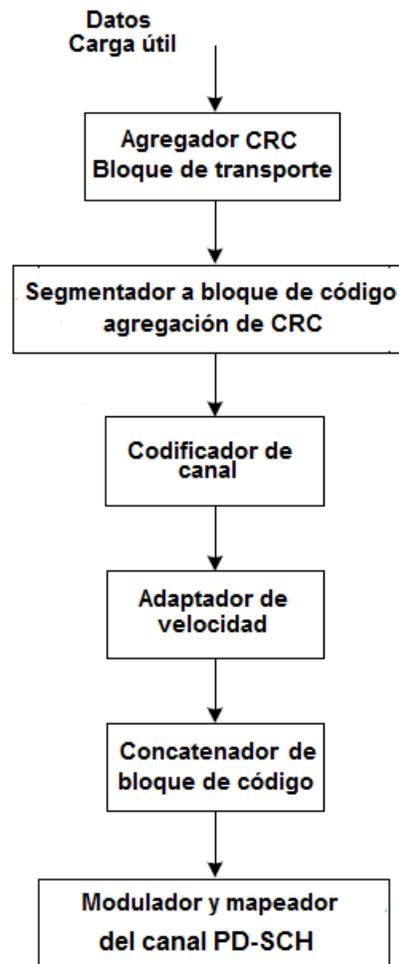


Figura 2.14. Procesamiento del canal compartido en el enlace de bajada [17].

A continuación se hace una descripción de cada uno de los bloques que intervienen en el proceso del canal de transporte.



2.14.1 Agregador del CRC al bloque de transporte

La detección de errores en los canales de transporte en recepción lo proporciona el uso del CRC y los bits de paridad que se adjuntan al bloque de transporte y son generados por los polinomios de la ecuación 2.1 y 2.2, los cuales son polinomios para un CRC de longitud $L=24$ [10]:

$$g_{CRC24A}(D) = [D^{24} + D^{23} + D^{18} + D^{17} + D^{14} + D^{11} + D^{10} + D^7 + D^6 + D^5 + D^4 + D^3 + D^1 + 1] \quad (2.1)$$

$$g_{CRC24B}(D) = [D^{24} + D^{23} + D^6 + D^5 + D + 1] \quad (2.2)$$

La ecuación 2.3 muestra el polinomio para un CRC de longitud $L=16$.

$$g_{CRC16}(D) = [D^{16} + D^{12} + D^5 + 1] \quad (2.3)$$

La ecuación 2.4 muestra el polinomio para un CRC de longitud $L=8$.

$$g_{CRC8}(D) = [D^8 + D^7 + D^4 + D^3 + D + 1] \quad (2.4)$$

Los polinomios utilizados por el canal de transporte DL-SCH para calcular el CRC son:

- Bloque de transporte CRC: CRC 24A
- Código bloque CRC : CRC 24B

Para cada bloque de transporte procedente del nivel 2 se calcula el CRC y se adiciona a este con el fin de verificar la integridad de los datos en el receptor.

2.14.2 Segmentador a bloque de código y agregación de CRC

Si la secuencia de bits de entrada del bloque de transporte es mayor que el tamaño máximo del bloque de código (6144 bits), se lleva a cabo la segmentación de la secuencia de bits de entrada y se añade una secuencia adicional CRC igual a 24 bits (CRC24B). Si la secuencia de bits de entrada de segmentación del código bloque es inferior a 40 bits, se añaden bits de relleno y una secuencia adicional CRC de 24 bits a cada segmento resultante [18]. Los tamaños de los bloques deben coincidir con el conjunto de tamaños de bloque de código soportados por el codificador turbo, como se muestra en la figura 2.15 y se calcula mediante la ecuación 2.5 [19].

$$C = \left\lceil \frac{B}{(Z - L)} \right\rceil \quad (2.5)$$

Dónde:

- C, número de bloques de código.
- B, tamaño del bloque de transporte.
- Z, tamaño máximo del bloque de código.
- L, longitud del CRC.

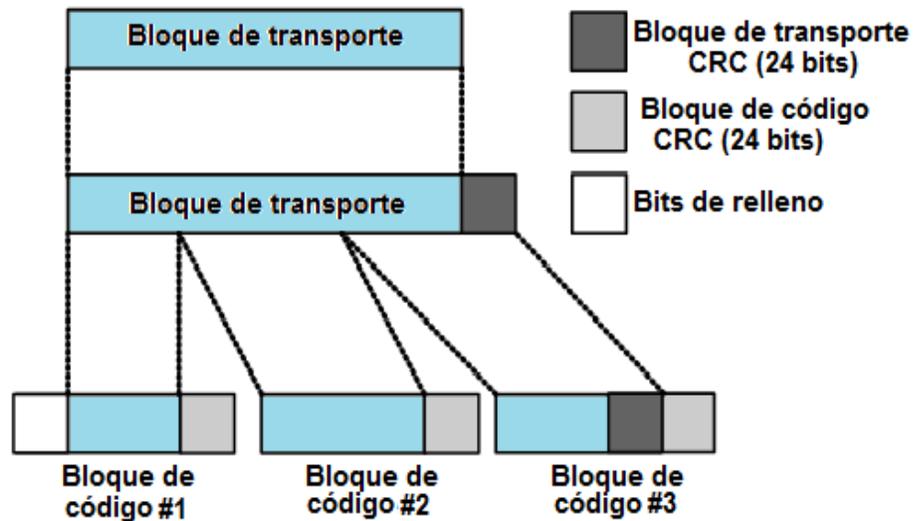


Figura 2.15. Segmentador del bloque de transporte después de adicionar el CRC [20].

2.14.3 Codificador de canal

Durante la transmisión de los símbolos en un canal de comunicaciones pueden producirse cambios en la información debido a la presencia de ruido, interferencia, distorsión generando errores y por ende pérdida de datos. Por lo tanto, antes de enviar la información, se realiza el proceso de codificación de canal de los bits logrando de esta forma que en recepción se pueda detectar y corregir los errores producidos en el canal.

A continuación se muestran los turbo códigos para la codificación de los bits en el canal PDSCH de LTE.

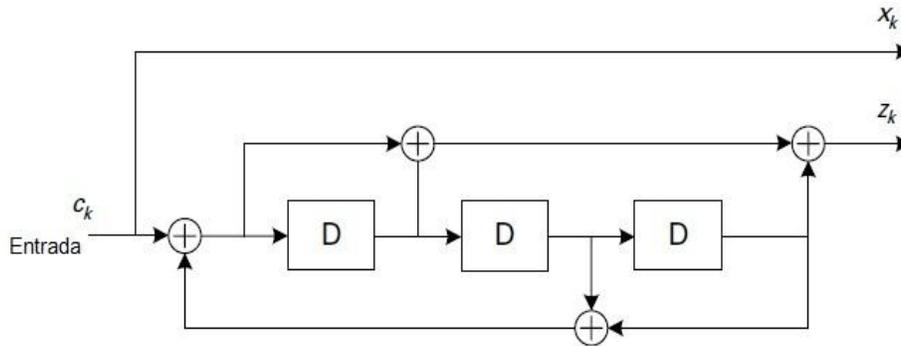


Figura 2.16. Codificador RSC [19].

En la figura 2.16 se muestra un codificador Convolutivo Sistemático Recursivo (RSC, *Recursive Systematic Convolutional*), de donde se obtienen los polinomios generadores presentados en las ecuaciones 2.6 y 2.7.

$$g_0(D) = 1 + D^2 + D^3 \quad (2.6)$$

$$g_1(D) = 1 + D + D^3 \quad (2.7)$$

La característica de sistemático, implica que los bits de información que entran al codificador se transmiten también al canal sin modificación alguna, mientras la característica de recursivo implica que una salida es realimentada a la entrada [10].

2.14.3.1 Turbo codificador

Los turbo códigos se basan en la configuración de dos codificadores convolucionales sistemáticos recursivos en paralelo separados por un entrelazador. Cada codificador convolutivo tiene memoria y por lo tanto sus n salidas en cualquier unidad de tiempo dada, no dependen únicamente de sus k entradas en esa unidad de tiempo, sino también de los m valores previos. Para el esquema definido el número de registros por componente es 3, de manera que se tienen codificadores convolucionales (n,k,m) de $(2, 1, 3)$ [10].

La turbo codificación utilizada en el sistema LTE emplea un Código Convolutivo Concatenado en Paralelo (PCCC, *Parallel Concatenated Convolutional Code*) con dos componentes codificadores de 8 estados y tasa de codificación 1/2 [19]. La figura 2.17 muestra que a la entrada del sistema los bits de información son codificados por ambos codificadores Convolucionales Sistemáticos Recursivos (RSC). El primero de ellos los recibe en su orden original, mientras que el segundo los recibe intercambiados por acción del

entrelazador. Por cada bit de entrada se obtienen 3 bits de salida, uno sistemático y dos de paridad, es decir es un codificador de tasa de código 1/3.

La función de transferencia para los componentes codificadores se muestra en la ecuación 2.8:

$$G(D) = \begin{bmatrix} 1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Donde los polinomios generadores $g_0(D)$ y $g_1(D)$ están dados por las ecuaciones 2.6 y 2.7 respectivamente, $g_0(D)$ es la realimentación a la entrada del codificador, $g_1(D)$ es el polinomio que realimenta la salida y 1 representa la salida sistemática del codificador Convolutivo Sistemático Recursivo (RSC).

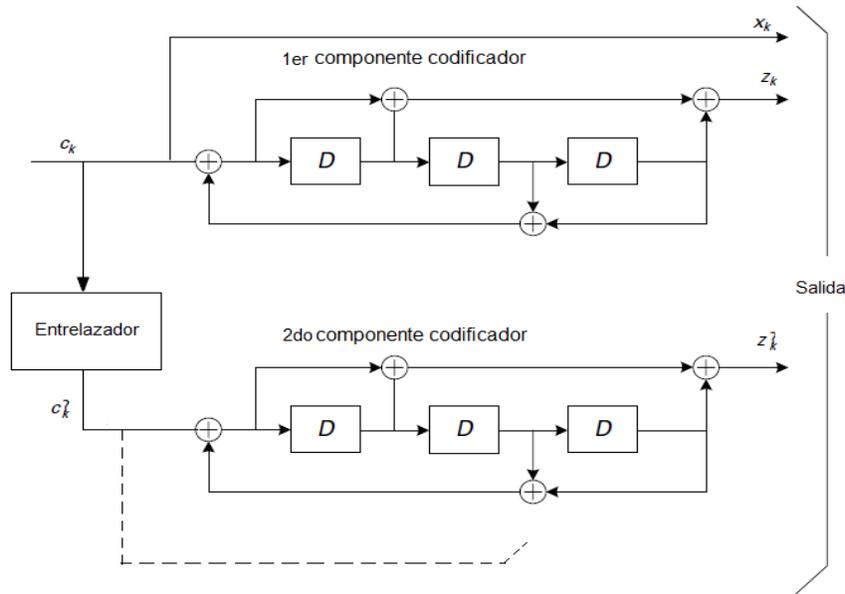


Figura 2.17. Codificador turbo para LTE [19].

El valor inicial de los registros de desplazamiento de los componentes codificadores de 8 estados se configura a ceros antes de comenzar a codificar los bits de entrada. Por lo tanto la salida del turbo codificador está dada por las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11.

- Salida sistemática del primer componente del codificador turbo.

$$d_k^{(0)} = x_k = c_k \tag{2.9}$$

- Primer bit de paridad, obtenido del primer componente.



$$d_k^{(1)} = z_k \quad (2.10)$$

- Segundo bit de paridad, obtenido del segundo componente.

$$d_k^{(2)} = z'_k \quad (2.11)$$

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

Los bits de entrada al decodificador turbo se representan por $c_0, c_1, c_2, c_3, \dots, c_{K-1}$ y los bits de salida del primero y segundo componente codificador son $z_0, z_1, z_2, z_3, \dots, z_{K-1}$ y $z'_0, z'_1, z'_2, z'_3, \dots, z'_{K-1}$, respectivamente. Los bits de salida del entrelazador se denotan por $c'_0, c'_1, \dots, c'_{K-1}$, y se establecen como los bits de entrada del segundo codificador.

2.14.3.2 Entrelazador

El entrelazado es un proceso de reorganización del orden de una secuencia de datos. La inversa de este proceso se llama desentrelazado que restaura la secuencia recibida a su orden original. Para los turbo códigos, un entrelazado está ubicado entre los dos codificadores convolucionales en paralelo y su función principal es proporcionar aleatoriedad a las secuencias de entrada para evitar errores recurrentes entre los dos códigos. Puesto que ambos codificadores reciben los mismos bits de entrada pero en diferente orden el carácter sistemático de estos hacen que la salida de un codificador sea redundante a la del otro. La turbo codificación puede ser aumentada a través de una eliminación selectiva de bits llamada perforación (*puncturing*) [21].

LTE utiliza un Entrelazador de Permutación Polinomial Cuadrática (QPP, *Quadratic Permutation Polynomials*), donde los bits de entrada al entrelazador se denotan como C_0, C_1, \dots, C_{K-1} , siendo $k - 1$ el número de bits de entrada y los bits de salida se expresan como $C'_0, C'_1, \dots, C'_{K-1}$. La relación entre los bits de entrada y de salida se basa en la expresión matemática que se muestra en la ecuación 2.12 [17].

$$c'_i = c_{\Pi(i)} \quad (2.12)$$

Donde $i = 0, 1, \dots, (k - 1)$

La relación entre el índice de salida i y el índice de entrada $\Pi(i)$ satisface la forma cuadrática de la ecuación 2.13.

$$\Pi(i) = (f_1 \cdot i + f_2 \cdot i^2) \bmod k \quad (2.13)$$



Los parámetros f_1 y f_2 dependen del tamaño del bloque K y se resumen en la tabla 2.4.

| i | K_i | f_1 | f_2 |
|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 40 | 3 | 10 | 48 | 416 | 25 | 52 | 95 | 1120 | 67 | 140 | 142 | 3200 | 111 | 240 |
| 2 | 48 | 7 | 12 | 49 | 424 | 51 | 106 | 96 | 1152 | 35 | 72 | 143 | 3264 | 443 | 204 |
| 3 | 56 | 19 | 42 | 50 | 432 | 47 | 72 | 97 | 1184 | 19 | 74 | 144 | 3328 | 51 | 104 |
| 4 | 64 | 7 | 16 | 51 | 440 | 91 | 110 | 98 | 1216 | 39 | 76 | 145 | 3392 | 51 | 212 |
| 5 | 72 | 7 | 18 | 52 | 448 | 29 | 168 | 99 | 1248 | 19 | 78 | 146 | 3456 | 451 | 192 |
| 6 | 80 | 11 | 20 | 53 | 456 | 29 | 114 | 100 | 1280 | 199 | 240 | 147 | 3520 | 257 | 220 |
| 7 | 88 | 5 | 22 | 54 | 464 | 247 | 58 | 101 | 1312 | 21 | 82 | 148 | 3584 | 57 | 336 |
| 8 | 96 | 11 | 24 | 55 | 472 | 29 | 118 | 102 | 1344 | 211 | 252 | 149 | 3648 | 313 | 228 |
| 9 | 104 | 7 | 26 | 56 | 480 | 89 | 180 | 103 | 1376 | 21 | 86 | 150 | 3712 | 271 | 232 |
| 10 | 112 | 41 | 84 | 57 | 488 | 91 | 122 | 104 | 1408 | 43 | 88 | 151 | 3776 | 179 | 236 |
| 11 | 120 | 103 | 90 | 58 | 496 | 157 | 62 | 105 | 1440 | 149 | 60 | 152 | 3840 | 331 | 120 |
| 12 | 128 | 15 | 32 | 59 | 504 | 55 | 84 | 106 | 1472 | 45 | 92 | 153 | 3904 | 363 | 244 |
| 13 | 136 | 9 | 34 | 60 | 512 | 31 | 64 | 107 | 1504 | 49 | 846 | 154 | 3968 | 375 | 248 |
| 14 | 144 | 17 | 108 | 61 | 528 | 17 | 66 | 108 | 1536 | 71 | 48 | 155 | 4032 | 127 | 168 |
| 15 | 152 | 9 | 38 | 62 | 544 | 35 | 68 | 109 | 1568 | 13 | 28 | 156 | 4096 | 31 | 64 |
| 16 | 160 | 21 | 120 | 63 | 560 | 227 | 420 | 110 | 1600 | 17 | 80 | 157 | 4160 | 33 | 130 |
| 17 | 168 | 101 | 84 | 64 | 576 | 65 | 96 | 111 | 1632 | 25 | 102 | 158 | 4224 | 43 | 264 |
| 18 | 176 | 21 | 44 | 65 | 592 | 19 | 74 | 112 | 1664 | 183 | 104 | 159 | 4288 | 33 | 134 |
| 19 | 184 | 57 | 46 | 66 | 608 | 37 | 76 | 113 | 1696 | 55 | 954 | 160 | 4352 | 477 | 408 |
| 20 | 192 | 23 | 48 | 67 | 624 | 41 | 234 | 114 | 1728 | 127 | 96 | 161 | 4416 | 35 | 138 |
| 21 | 200 | 13 | 50 | 68 | 640 | 39 | 80 | 115 | 1760 | 27 | 110 | 162 | 4480 | 233 | 280 |
| 22 | 208 | 27 | 52 | 69 | 656 | 185 | 82 | 116 | 1792 | 29 | 112 | 163 | 4544 | 357 | 142 |
| 23 | 216 | 11 | 36 | 70 | 672 | 43 | 252 | 117 | 1824 | 29 | 114 | 164 | 4608 | 337 | 480 |
| 24 | 224 | 27 | 56 | 71 | 688 | 21 | 86 | 118 | 1856 | 57 | 116 | 165 | 4672 | 37 | 146 |
| 25 | 232 | 85 | 58 | 72 | 704 | 155 | 44 | 119 | 1888 | 45 | 354 | 166 | 4736 | 71 | 444 |
| 26 | 240 | 29 | 60 | 73 | 720 | 79 | 120 | 120 | 1920 | 31 | 120 | 167 | 4800 | 71 | 120 |
| 27 | 248 | 33 | 62 | 74 | 736 | 139 | 92 | 121 | 1952 | 59 | 610 | 168 | 4864 | 37 | 152 |
| 28 | 256 | 15 | 32 | 75 | 752 | 23 | 94 | 122 | 1984 | 185 | 124 | 169 | 4928 | 39 | 462 |
| 29 | 264 | 17 | 198 | 76 | 768 | 217 | 48 | 123 | 2016 | 113 | 420 | 170 | 4992 | 127 | 234 |
| 30 | 272 | 33 | 68 | 77 | 784 | 25 | 98 | 124 | 2048 | 31 | 64 | 171 | 5056 | 39 | 158 |
| 31 | 280 | 103 | 210 | 78 | 800 | 17 | 80 | 125 | 2112 | 17 | 66 | 172 | 5120 | 39 | 80 |
| 32 | 288 | 19 | 36 | 79 | 816 | 127 | 102 | 126 | 2176 | 171 | 136 | 173 | 5184 | 31 | 96 |
| 33 | 296 | 19 | 74 | 80 | 832 | 25 | 52 | 127 | 2240 | 209 | 420 | 174 | 5248 | 113 | 902 |
| 34 | 304 | 37 | 76 | 81 | 848 | 239 | 106 | 128 | 2304 | 253 | 216 | 175 | 5312 | 41 | 166 |
| 35 | 312 | 19 | 78 | 82 | 864 | 17 | 48 | 129 | 2368 | 367 | 444 | 176 | 5376 | 251 | 336 |
| 36 | 320 | 21 | 120 | 83 | 880 | 137 | 110 | 130 | 2432 | 265 | 456 | 177 | 5440 | 43 | 170 |
| 37 | 328 | 21 | 82 | 84 | 896 | 215 | 112 | 131 | 2496 | 181 | 468 | 178 | 5504 | 21 | 86 |
| 38 | 336 | 115 | 84 | 85 | 912 | 29 | 114 | 132 | 2560 | 39 | 80 | 179 | 5568 | 43 | 174 |
| 39 | 344 | 193 | 86 | 86 | 928 | 15 | 58 | 133 | 2624 | 27 | 164 | 180 | 5632 | 45 | 176 |
| 40 | 352 | 21 | 44 | 87 | 944 | 147 | 118 | 134 | 2688 | 127 | 504 | 181 | 5696 | 45 | 178 |
| 41 | 360 | 133 | 90 | 88 | 960 | 29 | 60 | 135 | 2752 | 143 | 172 | 182 | 5760 | 161 | 120 |
| 42 | 368 | 81 | 46 | 89 | 976 | 59 | 122 | 136 | 2816 | 43 | 88 | 183 | 5824 | 89 | 182 |
| 43 | 376 | 45 | 94 | 90 | 992 | 65 | 124 | 137 | 2880 | 29 | 300 | 184 | 5888 | 323 | 184 |
| 44 | 384 | 23 | 48 | 91 | 1008 | 55 | 84 | 138 | 2944 | 45 | 92 | 185 | 5952 | 47 | 186 |
| 45 | 392 | 243 | 98 | 92 | 1024 | 31 | 64 | 139 | 3008 | 157 | 188 | 186 | 6016 | 23 | 94 |
| 46 | 400 | 151 | 40 | 93 | 1056 | 17 | 66 | 140 | 3072 | 47 | 96 | 187 | 6080 | 47 | 190 |
| 47 | 408 | 155 | 102 | 94 | 1088 | 171 | 204 | 141 | 3136 | 13 | 28 | 188 | 6144 | 263 | 480 |

Tabla 2.4. Parámetros del entrelazador para la turbo codificación [17].

2.14.3.3 Terminación Trellis

Al momento de finalizar la codificación de canal del bloque de bits a transmitir es necesario colocar en cero los valores de los registros de desplazamiento del codificador turbo, en este proceso los bits necesarios para la terminación trellis en el codificador dependen del estado de los componentes codificadores y son muy difíciles de predecir. Además, incluso si los bits de terminación para uno de los componentes codificadores se encuentran, el otro componente codificador no puede ser conducido al estado de todo ceros con los mismos bits de terminación. La razón de esto es la presencia del entrelazador entre los codificadores constituyentes [19].

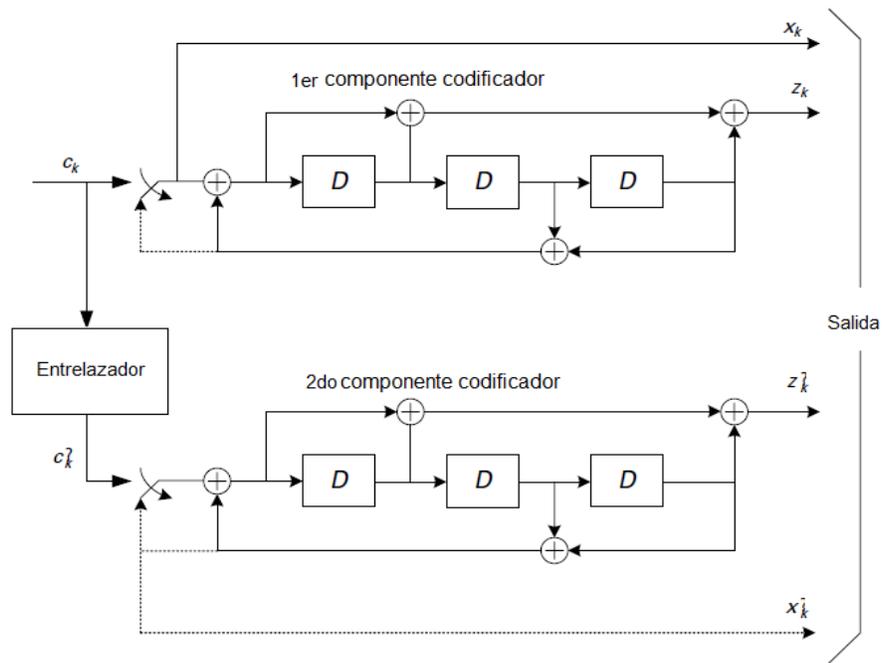


Figura 2.18. Fase de terminación Trellis del turbo codificador [19].

Por lo tanto, se realiza la operación suma módulo 2 aprovechando la realimentación del sistema que en este caso se convierte en la entrada como se muestra en la figura 2.18 donde se representa este proceso en líneas punteadas con el siguiente paso: se toman los últimos bits de información del registro de desplazamiento donde, los primeros tres bits se utilizan para terminar el primer componente codificador mientras que el segundo componente codificador está desactivado y los tres últimos bits se utilizan para terminar el segundo componente codificador mientras que el primer componente codificador está deshabilitado. Los bits de terminación Trellis se denotan por las ecuaciones 2.14a, 2.14b y 2.14c.

$$d_K^{(0)} = x_K, d_{K+1}^{(0)} = z_{K+1}, d_{K+2}^{(0)} = x'_K, d_{K+3}^{(0)} = z'_{K+1} \quad (2.14a)$$

$$d_K^{(1)} = z_K, d_{K+1}^{(1)} = x_{K+2}, d_{K+2}^{(1)} = z'_K, d_{K+3}^{(1)} = x'_{K+2} \quad (2.14b)$$

$$d_K^{(2)} = x_{K+1}, d_{K+1}^{(2)} = z_{K+2}, d_{K+2}^{(2)} = x'_{K+1}, d_{K+3}^{(2)} = z'_{K+2} \quad (2.14c)$$

2.14.4 Adaptador de velocidad

La finalidad del proceso del adaptador de velocidad (RM, *Rate Matching*) es ajustar el tamaño del bloque de código a los recursos físicos asignados. El primer paso consiste en un entrelazado de los bits de paridad en el bloque de código proporcionado a la salida del codificador turbo, este entrelazado mitiga los efectos de los error que pueden aparecer en los canales radio, debido a los efectos de desvanecimiento. En el lado del receptor se hace una operación desentrelazado doble para recuperar los códigos bloque originales. El resultado del proceso de entrelazado se almacena en los bits sistemáticos, mientras que el resto de bits resultan de la combinación de los bits de paridad en la memoria elástica (*buffer*) circular, donde además se aplica un proceso de perforación (*puncturing*) para disminuir la velocidad efectiva acorde al esquema de codificación y modulación correspondiente al nivel del indicador de calidad del canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) [18]. El proceso de adaptador de velocidad se muestra en la figura 2.19.

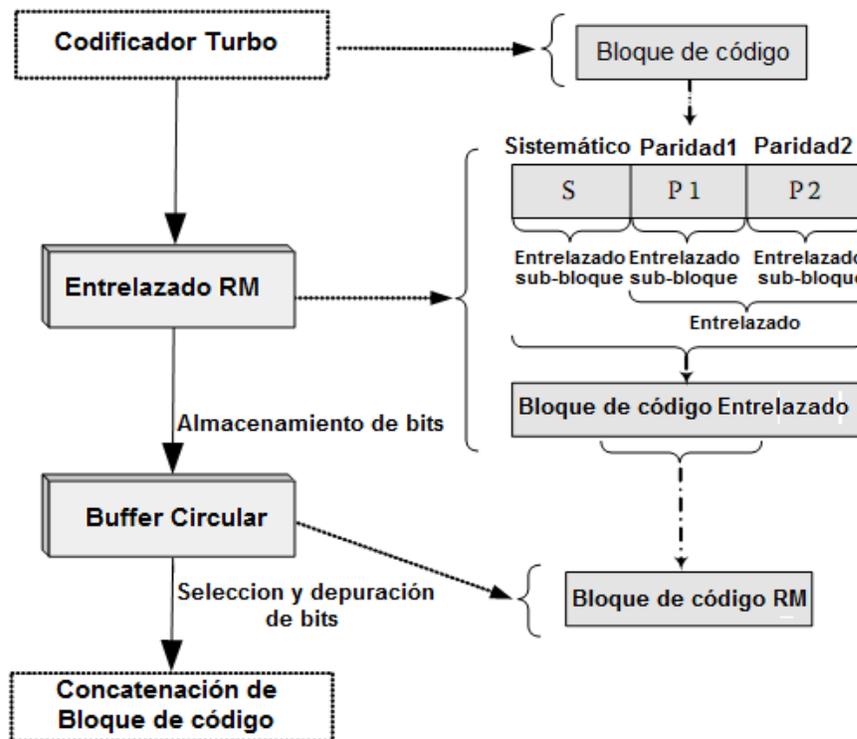


Figura 2.19. Proceso del adaptador de velocidad [8].

En este proceso se agregan 12 bits de cola, distribuidos de forma uniforme en cada uno de los tres flujos, lo que resulta bloques de tamaño $K_s=K+4$, donde K es el tamaño del entrelazador QPP.

2.14.5 Concatenación de bloques de código

Este proceso consiste en la concatenación secuencial de los diferentes bloques de código a la salida del adaptador de velocidad como muestra la figura 2.20.

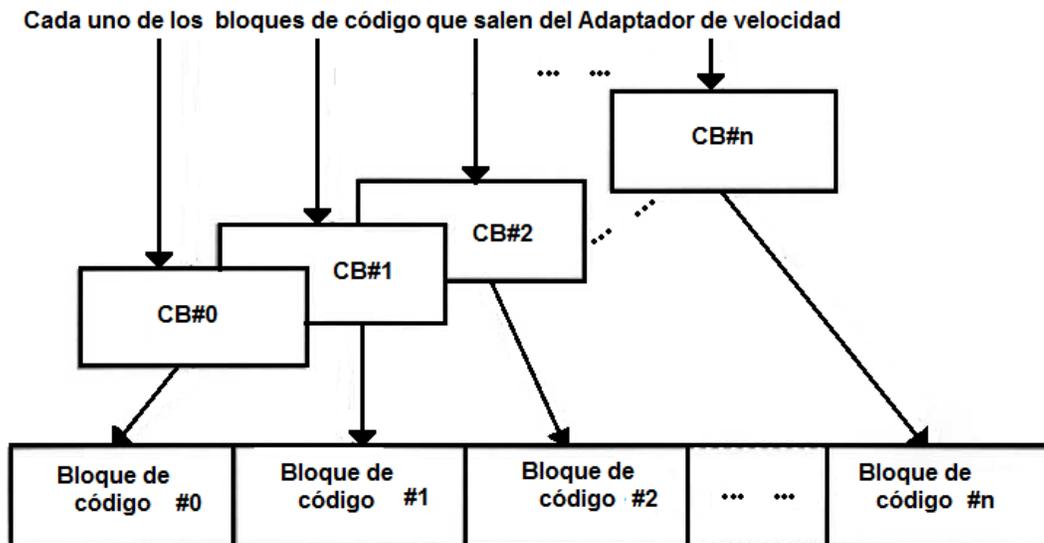


Figura 2.20. Proceso de concatenación de los códigos bloque [8].

2.14.6 Modulador y mapeador del canal físico compartido en el enlace de bajada

En la modulación del canal PD-SCH los datos de entrada se mapean en símbolos OFDMA, lo que significa que modulan a cada una las subportadoras individuales. Esta modulación puede ser: QPSK, 16QAM o 64QAM. El proceso de modulación es el de mapear los grupos de 2, 4 o 6 bits en las componentes real e imaginaria que corresponden al número complejo en la constelación. Cada constelación tiene una robustez propia con respecto a la relación SNR mínima que puede tolerar para una demodulación correcta. Estos números complejos corresponden a una representación en el dominio de la frecuencia y para trasladarlos al dominio del tiempo es necesario aplicar la transformada inversa de Fourier.



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN PARA EL ENLACE DE BAJADA DE LTE - SISO - FDD.

En este capítulo se presenta la adaptación y aplicación de la metodología para evaluar el desempeño del sistema LTE - SISO - FDD en el enlace de bajada, teniendo en cuenta los objetivos de la simulación, el plan de pruebas, el proceso de desarrollo y análisis de la simulación. La metodología seleccionada es la de simulación de equipos de telecomunicaciones [22].

3.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN

La figura 3.1 muestra un diagrama general de la metodología utilizada para desarrollar una simulación que permita el análisis del enlace de bajada de LTE - SISO - FDD.

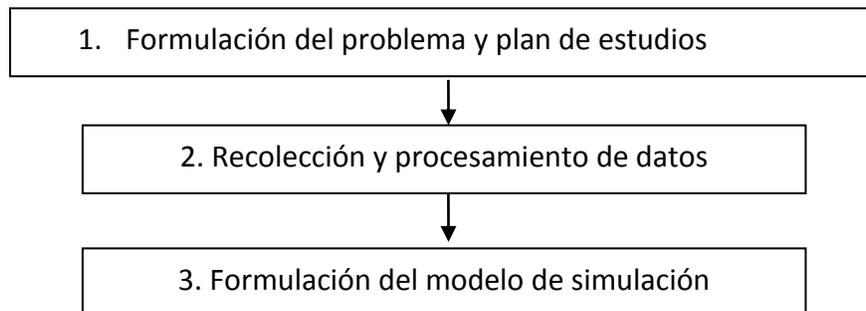


Figura 3.1. Diagrama general de la metodología empleada para la simulación.

A continuación se realiza una descripción de cada etapa.

3.1.1 Formulación del Problema y Plan de Estudios

Los objetivos que se plantean en la formulación del problema y plan de estudios para el desarrollo de la simulación, son necesarios para obtener los resultados deseados.

Para llegar a la correcta formulación de los objetivos se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

1. Adquirir información sobre el funcionamiento de la tecnología.
2. Identificar los fines de la simulación.



3. Formular los objetivos específicos.

3.1.1.1 Adquisición de información sobre el funcionamiento de la tecnología

En esta sección se adquiere información sobre el funcionamiento general de la tecnología referente al nivel físico del enlace de bajada utilizando el canal PDSCH y teniendo en cuenta el esquema general de un sistema de telecomunicaciones: transmisor, canal, receptor y sus respectivos procesos y variables de cada uno de los subsistemas.

3.1.1.1.1 Transmisor

¿Qué tipo de señal genera el transmisor?

El transmisor ubicado en el eNodeB genera una señal binaria pseudoaleatoria. Esta señal es procesada para formar un conjunto de símbolos OFDMA, los cuales son organizados en tramas para su transmisión a través de un canal inalámbrico afectado por multitrayecto y Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).

¿Qué secuencia tiene la señal en el transmisor?

La señal en el transmisor pasa por los siguientes bloques:

- Codificador de canal.
- Multiplexador de datos de usuario y control.
- Generador de símbolos OFDMA.
- Generador de trama FDD.

¿Qué parámetros intervienen en el procesamiento de la señal?

En el transmisor se define el esquema de modulación QPSK, 16QAM o 64QAM, la tasa de codificación, el ancho de banda y se asignan los Bloques de Recursos (RB).

3.1.1.1.2 Canal

¿Qué tipo de señal se transmite por el canal?

Por el canal se transmite una señal OFDMA, la cual es afectada por AWGN y multitrayectoria.

¿Qué secuencia sigue la señal en el canal?

Se consideran los efectos del canal AWGN y multitrayectoria, para generar la señal a la salida del canal.



¿Qué parámetros intervienen en el procesamiento de la señal?

En el canal se realizan cambios en la señal de acuerdo a las características de los modelos de canal multitrayecto definidos por la ITU y finalmente se adiciona AWGN:

- 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*).

3.1.1.1.3 Receptor

¿Qué señales se reciben en el sistema receptor?

En el receptor se obtiene una señal OFDMA afectada por multitrayecto y AWGN. Luego se ejecuta el proceso inverso a los realizados en el transmisor para recuperar la señal original.

¿Qué secuencia sigue la señal en el receptor?

La señal en el receptor pasa por los siguientes bloques:

- Desensamblador de trama FDD.
- Detector de símbolo OFDMA.
- Demultiplexor de datos de usuario y control.
- Decodificador.

¿Qué parámetros o procesos serán evaluados durante la simulación?

Los parámetros evaluados en el receptor son: diagramas de constelación, BER, BLER y *Throughput* para diferentes valores de Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) para 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.

3.1.1.2 Identificación de los fines de la simulación

El fin del desarrollo de la simulación es evaluar y analizar el desempeño a nivel físico de LTE-SISO-FDD para el enlace de bajada, de acuerdo a la variación de los parámetros del sistema especificados en el *Release 8* del 3GPP para diferentes modelos de canal definidos por la ITU.



3.1.1.3 Formulación de los objetivos

- Evaluar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE para diferentes esquemas de modulación.
- Evaluar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE en diferentes anchos de banda.
- Evaluar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE para diferentes tasas de codificación.
- Evaluar el desempeño a nivel físico del enlace de bajada de LTE, para diferentes modelos de canal definidos por la ITU.

Para evaluar el desempeño se obtienen valores numéricos de los parámetros: BER, BLER y *Throughput* para diferentes valores de SNR.

3.1.2 Recolección y Procesamiento de Datos

En esta sección se hace el estudio del funcionamiento de un sistema general de telecomunicaciones basado en las especificaciones del *Release 8* del 3GPP, para lo cual es importante recolectar información e identificar los módulos y parámetros necesarios para la creación de un modelo de simulación a nivel físico del enlace de bajada de LTE. El análisis de la información se hace de acuerdo a la identificación de:

- Clases y objetos.
- Estructuras.
- Atributos.
- Procedimientos o métodos.

3.1.2.1 Identificación de clase y objetos en el transmisor

En la clase transmisor se identifican los siguientes objetos:

- Codificador.
- Generador de señales de sincronización.
- Generador de símbolos OFDMA.
- Generador de trama FDD.

3.1.2.2 Identificación de las estructuras del transmisor

En el transmisor se identifican las siguientes estructuras a través del análisis orientado a objetos basando en la metodología *Whole-Part* (Todo-Parte) para reducir la complejidad del sistema.



➤ Codificador

La figura 3.2 muestra el codificador, el cual está compuesto por las siguientes estructuras:

- El segmentador de bloque, el cual define la cantidad de bits por bloque de información.
- El codificador CRC, el cual adiciona información para detección de errores en bloques.
- El codificador turbo, el cual es el encargado de adicionar información que permita en el extremo receptor la corrección de errores.
- El adaptador de velocidad, el cual es el encargado de variar la tasa de codificación con el fin de mejorar el desempeño de la transmisión según el estado del canal.
- El aleatorizador, el cual es el encargado de aleatorizar la información con el fin de mejorar el desempeño de la codificación de canal.

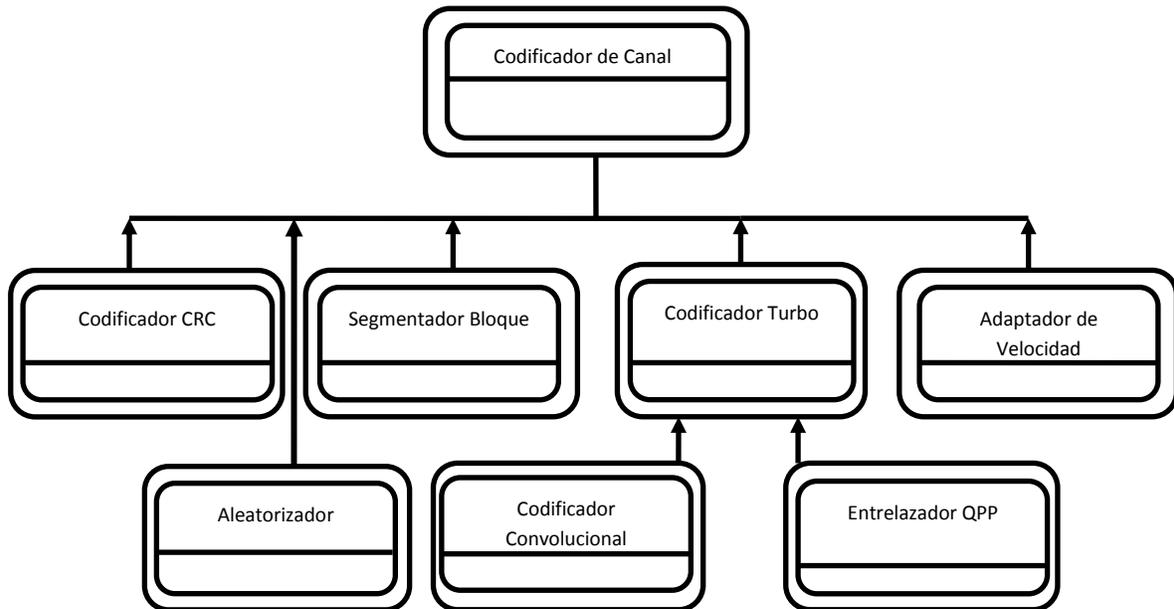


Figura 3.2. Codificador de canal [10].

➤ Generador de señales de sincronización

La figura 3.4 muestra el generador de señales de sincronización, el cual está compuesto de las siguientes estructuras: un generador de señal de sincronización primaria y otro de señal de sincronización secundaria.

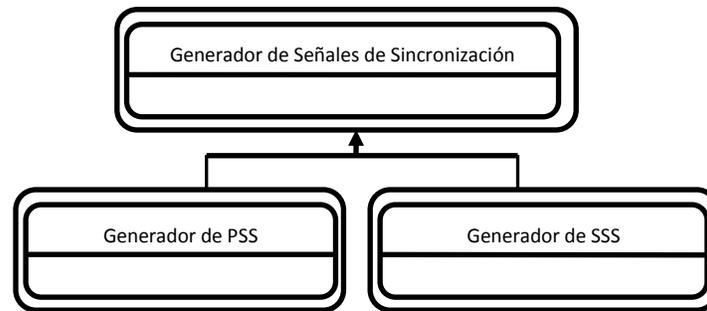


Figura 3.3. Generador de señales de sincronización.

➤ Generador de símbolo OFDMA

La figura 3.4 muestra el Generador de símbolos OFDMA, el cual está compuesto de las siguientes estructuras:

- Conversor serie a paralelo.
- Modulador.
- Módulo de IDFT.
- Adición de prefijo cíclico

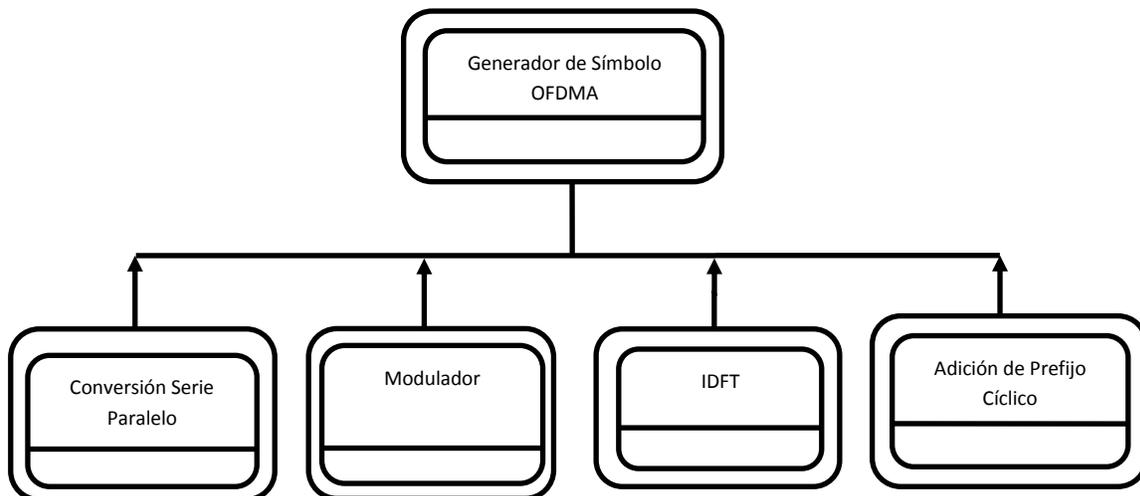


Figura 3.4. Generador de símbolos OFDMA [10].

➤ Generador de trama FDD

La figura 3.5 muestra el generador de trama FDD, el cual está compuesto por las siguientes estructuras:

- Generador de símbolos OFDMA.

- Multiplexor de datos de usuario, señalización y control.
- Multiplexor de intervalos de tiempo.

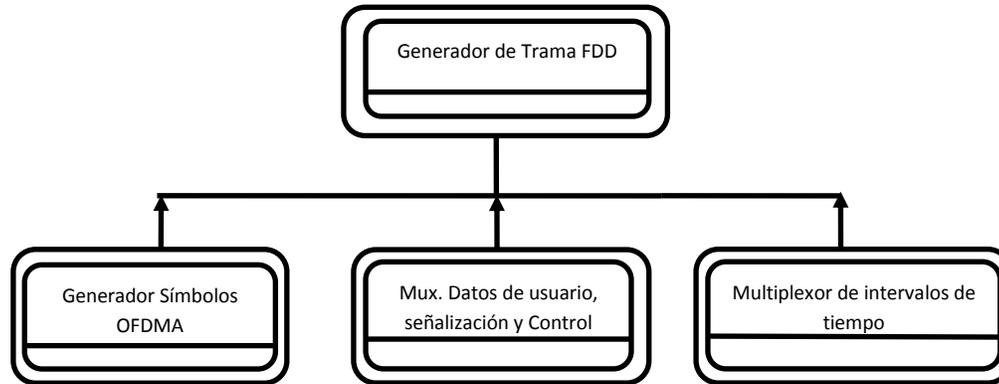


Figura 3.5. Generador de trama FDD [10].

3.1.2.3 Identificación de los atributos en el transmisor

Para identificar los atributos se tienen en cuenta las siguientes preguntas:

- ¿Cómo describir un objeto de forma general?
- ¿Cómo definir un objeto en el dominio del problema?
- ¿Qué es necesario conocer de un objeto?

➤ Identificación de los atributos de los objetos para el codificador de canal

Nombre: tamaño del bloque de transporte.

Descripción: atributo que define la longitud del bloque de transporte.

Nombre: longitud del código CRC.

Descripción: atributo que adiciona el CRC al bloque de transporte LTE.

Nombre: dirección del enlace.

Descripción: atributo que identifica el enlace de bajada o de subida.

Nombre: Id grupo.

Descripción: atributo que identifica el grupo entre 3 existentes.

Nombre: Id de celda.

Descripción: atributo que identifica la celda entre 128.

➤ Identificación de los atributos para la generación de señales de sincronización

Nombre: Id grupo.

Descripción: atributo que identifica el grupo entre 3.

Nombre: Id de celda.



Descripción: atributo que identifica la celda entre 128.

➤ **Identificación de los atributos para la generación de símbolo OFDMA**

Nombre: longitud de prefijo cíclico.

Descripción: atributo que identifica el tipo de prefijo cíclico: normal

Nombre: tipo de modulación.

Descripción: tipo de modulación a utilizar: QPSK, 16QAM o 64QAM.

Nombre: longitud IDFT.

Descripción: atributo que define el número de puntos de la IDFT.

➤ **Identificación de los atributos para la generación de la trama FDD**

Nombre: modo de trama.

Descripción: atributo que identifica la técnica de duplexación de la antena: FDD.

Nombre: ancho de banda.

Descripción: atributo que identifica el ancho de banda: 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz.

3.1.2.4 Identificación de procedimientos o métodos en el transmisor

➤ **Identificación de los métodos para el codificador de canal**

Nombre: generador CRC.

Descripción: método que adiciona bits de información para la detección de errores en el receptor.

Nombre: segmentador.

Descripción: método que limita el tamaño en bits de los datos que van a ser procesados por los bloques posteriores.

Nombre: codificador.

Descripción: aplica la codificación turbo con una tasa de codificación de 1/3.

Nombre: adaptador de velocidad.

Descripción: método que cambia la tasa de codificación con el objetivo de hacer una transmisión más eficiente.

Nombre: aleatorizador.

Descripción: método que realiza el proceso de aleatorización basado en el Identificador Temporal de Red Radio (RNTI, *Radio Network Temporary Identifier*) con el fin de mejorar el desempeño de la codificación de canal.

➤ **Identificación de los métodos para la generación de las señales de sincronización.**

Nombre: generador de señal PSS.



Descripción: método que proporciona la Identificación de la celda.

Nombre: generador de señal SSS.

Descripción: método que proporciona la identificación del grupo.

➤ **Identificación de los métodos para la generación del símbolo OFDMA**

Nombre: conversión serie - paralelo.

Descripción: método que permite que la información salga en paralelo para ser mapeada con frecuencias ortogonales en el bloque modulador.

Nombre: modulador.

Descripción: método que implementa la modulación en banda base: QPSK, 16QAM o 64QAM.

Nombre: conversor de señal frecuencia - tiempo.

Descripción: método que transforma la señal del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

➤ **Identificación de los métodos para la generación la trama FDD**

Nombre: multiplexor de datos de usuario, señalización y control.

Descripción: método que combina los datos de usuario, señalización y control para generar un símbolo OFDMA.

Nombre: generador de símbolos OFDMA.

Descripción: método que genera un símbolo OFDMA que contiene datos de usuario y control.

Nombre: multiplexor de intervalos de tiempo.

Descripción: método que multiplexa dos intervalos de tiempo para conformar una subtrama.

Nombre: multiplexor de trama FDD.

Descripción: método que multiplexa 10 subtramas para conformar una trama FDD.

3.1.2.5 Identificación de clases y objetos en el canal

La clase canal está compuesta por 2 objetos:

- Canal multitrayecto.
- Canal AWGN.

3.1.2.6 Identificación de estructuras en el canal

A continuación se identifican las estructuras que componen el canal multitrayecto y el canal AWGN:

➤ Canal Multitrayecto

La figura 3.6 muestra el canal multitrayecto, el cual está compuesto por las siguientes estructuras: canal EVA70, EPA5, ETU70 o ETU 300.

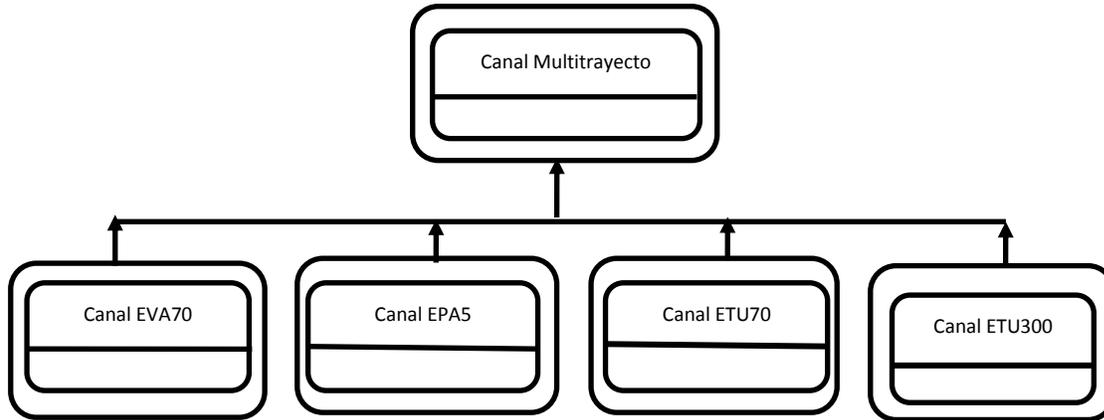


Figura 3.6. Estructura del canal multitrayecto [10].

➤ Canal AWGN

La figura 3.7 muestra el canal AWGN, el cual no tiene ninguna estructura.

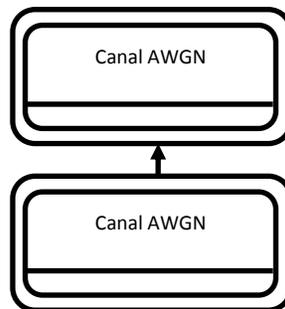


Figura 3.7. Estructura del canal AWGN [10].

3.1.2.7 Identificación de los atributos del canal

Los atributos de cada una de las clases u objetos que conforman el canal son:

➤ Identificación de atributos para el canal multitrayecto

Nombre: tipo de canal multitrayecto.

Descripción: atributo que define el tipo de canal multitrayecto especificados por la ITU: EVA70, EPA5, ETU70 o ETU 300.



➤ Identificación de atributos para el canal AWGN

Nombre: densidad espectral de potencia de ruido.

Descripción: atributo que define el valor de la densidad espectral de potencia de ruido.

3.1.2.8 Identificación procedimientos o métodos del canal

➤ Identificación de métodos para el canal multitrayecto

Nombre: generador del modelo de canal.

Descripción: método que configura parámetros del canal como corrimiento en frecuencia, retardos y atenuaciones relativas especificado por la ITU.

➤ Identificación de métodos para el canal AWGN.

Nombre: generador de AWGN.

Descripción: método que adiciona AWGN.

3.1.2.9 Identificación de las clases y objetos del receptor

En la clase receptor se identifican los siguientes objetos:

- Desensamblador de trama FDD.
- Detector de símbolo OFDMA.
- Decodificador.

3.1.2.10 Identificación de las estructuras del receptor

A continuación se identifican las siguientes estructuras para cada uno de los objetos que componen a la clase receptor:

➤ Desensamblador de trama FDD

La figura 3.8 muestra el desensamblador de trama FDD, el cual está compuesto de las siguientes estructuras:

- Demultiplexor de trama FDD.
- Demultiplexor de intervalos de tiempo.
- Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.
- Sincronizador.

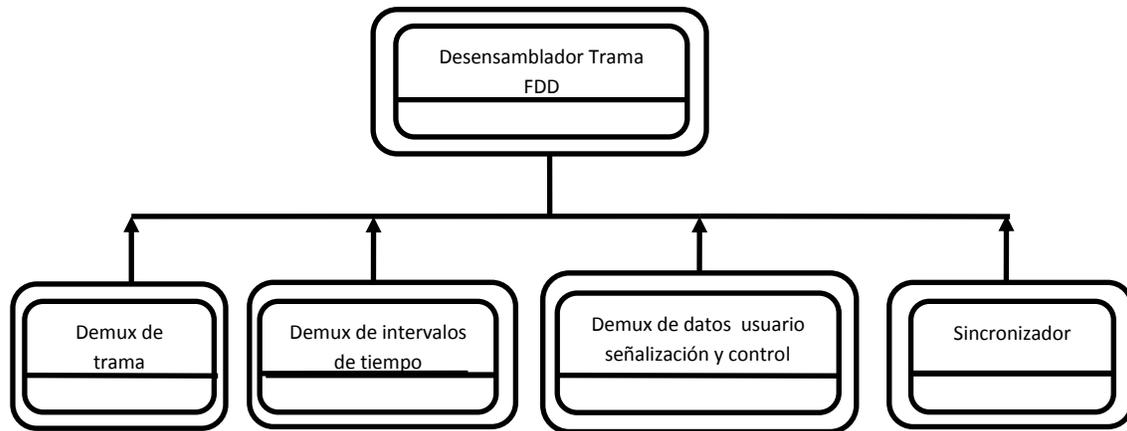


Figura 3.8. Desensamblador de trama FDD.

➤ **Detector de símbolo OFDMA**

La figura 3.9 muestra el detector de símbolo OFDMA, el cual está compuesto de las siguientes estructuras:

- Eliminator de prefijo cíclico.
- Módulo DFT.
- Demodulador.
- Conversor paralelo a serie.

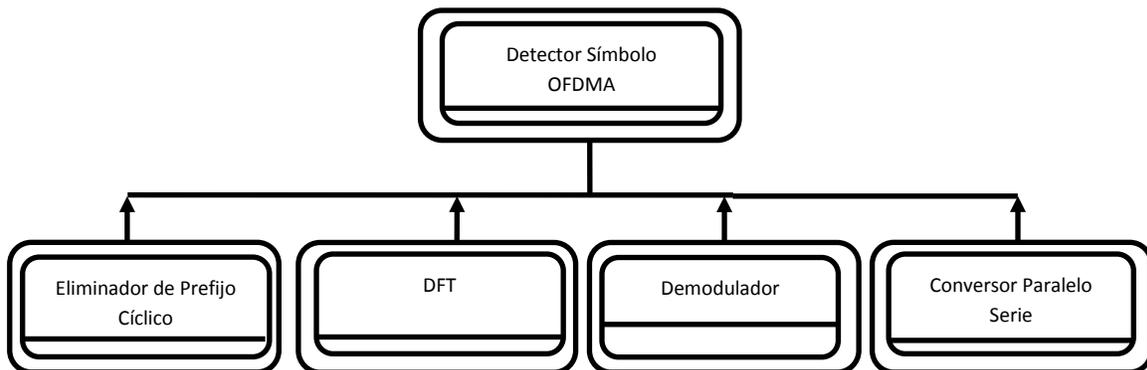


Figura 3.9. Detector de símbolo OFDMA [10].

➤ **Decodificador de canal**

La figura 3.12 muestra el codificador, el cual está compuesto por las siguientes estructuras:

- Verificador de CRC.



- Desegmentador de bloque.
- Decodificador turbo.
- Desadaptador de velocidad.
- Desaleatorizador

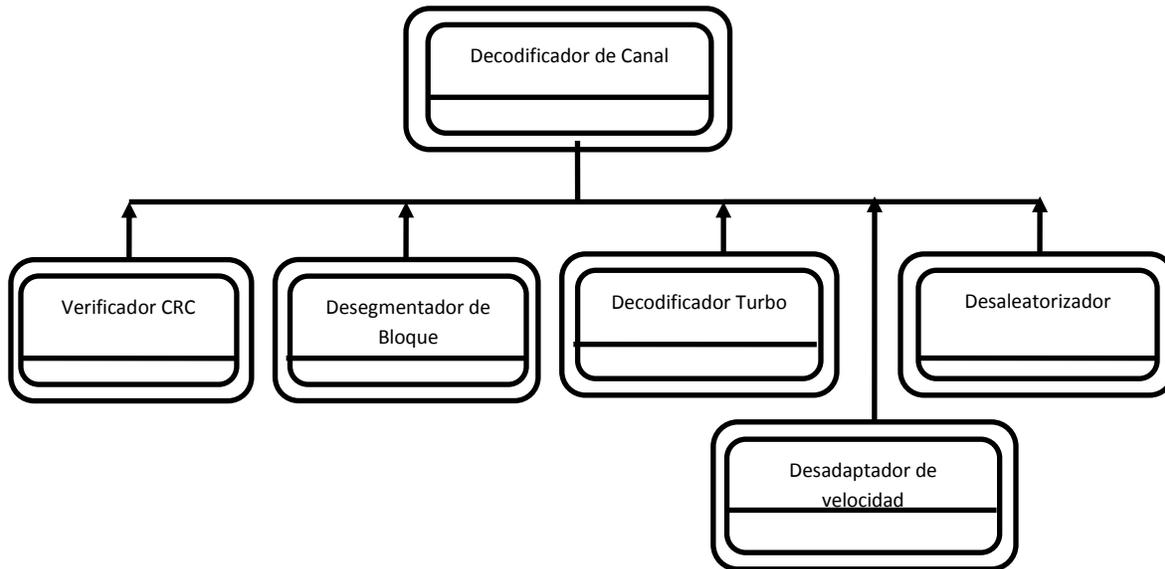


Figura 3.10. Decodificador de canal.

3.1.2.11 Identificación de los atributos para el receptor

A continuación se identifican los atributos para el receptor.

➤ Identificación de los atributos para el desensamblador de la trama FDD

Nombre: modo de trama.

Descripción: atributo que identifica la técnica de duplexación de la antena FDD.

Nombre: ancho de banda.

Descripción: atributo que define el ancho de banda del canal.

Nombre: número de tramas.

Descripción: atributo que define el número de tramas recibidas.

➤ Identificación de los atributos para el detector de símbolo OFDMA

Nombre: número de subportadoras.

Descripción: atributo que define el número de subportadoras dependiendo del ancho de banda del canal.

Nombre: longitud de prefijo cíclico.



Descripción: atributo que identifica el tipo de prefijo cíclico: Normal.

Nombre: longitud de la DFT.

Descripción: atributo que identifica el número de puntos de la DFT, dependiendo del ancho de banda del sistema.

Nombre: tipo de demodulador.

Descripción: atributo que define el tipo de demodulación a utilizar: QPSK, 16QAM o 64QAM.

➤ **Identificación de los atributos para el decodificador de canal**

Nombre: tamaño de bloque.

Descripción: atributo que define la longitud del bloque de transporte de transmisión.

Nombre: longitud del código CRC.

Descripción: atributo que define la longitud del código CRC aplicado al bloque de bits.

Nombre: identificador temporal de red radio.

Descripción: atributo que provee un identificador para el UE dentro del área de cobertura de la celda.

3.1.2.12 Identificación de procedimientos o métodos para el receptor

➤ **Identificación de los métodos para el desensamble de la trama FDD**

Nombre: sincronizador.

Descripción: metodo que sincroniza la información recibida para la demodulación.

Nombre: demultiplexor de trama.

Descripción: metodo que separa tramas para generar intervalos de tiempo.

Nombre: demultiplexor de intervalos de tiempo.

Descripción: método que separa intervalos de tiempo para generar símbolos OFDMA.

Nombre: demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.

Descripción: método que separa los canales de información, señalización y control.

➤ **Identificación de los métodos para la detección del símbolo OFDMA**

Nombre: receptor de señal.

Descripción: método que recibe la señal de los canales de información, señalización y control.

Nombre: Convertir paralelo a serie.

Descripción: método que permite pasar la información de paralelo a serie.

Nombre: Desmapeador.

Descripción: método que recupera la información del canal PDSCH, descartando las portadoras no utilizadas.



Nombre: conversor de señal tiempo-frecuencia.

Descripción: método que transforma una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Nombre: demodulador.

Descripción: método que define el tipo de demodulación: QPSK, 16 QAM y 64QAM.

➤ Identificación de los métodos para el decodificador de canal

Nombre: desaleatorizador.

Descripción: método que realiza el proceso de desaleatorización basado en el identificador temporal de red radio.

Nombre: decodificador de bloque código.

Descripción: método que implementa la decodificación turbo en el canal de transporte.

Nombre: desegmentador de bloque.

Descripción: método que realiza la desegmentación del código bloque en una secuencia de bits.

Nombre: verificador CRC.

Descripción: método que se utiliza para realizar la verificación CRC, para detectar errores en un bloque código.

3.1.3 Formulación del Modelo de Simulación para el Enlace de Bajada a Nivel Físico de LTE de un Sistema SISO.

En la siguiente sección se presenta el modelo de simulación el cual se basa en las especificaciones del *Release 8* del 3GPP y tiene en cuenta los componentes generales de un sistema de telecomunicaciones: transmisor, canal y receptor.

La figura 3.11 muestra los componentes generales de un sistema telecomunicaciones.

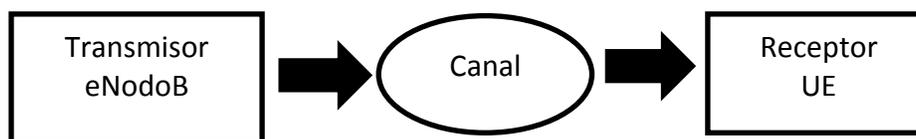


Figura 3.11. Modelo general del sistema.

Cada componente del sistema está constituido por diferentes sub módulos como se muestra a continuación.

3.1.3.1 Bloques internos del transmisor

La figura 3.12 muestra el transmisor, el cual está compuesto por los siguientes bloques:

- Bloque codificador.
- Multiplexor de datos de usuario, señalización y control.
- Generador de Señales de sincronización.
- Generador de símbolos OFDMA.
- Generador de tramas FDD.

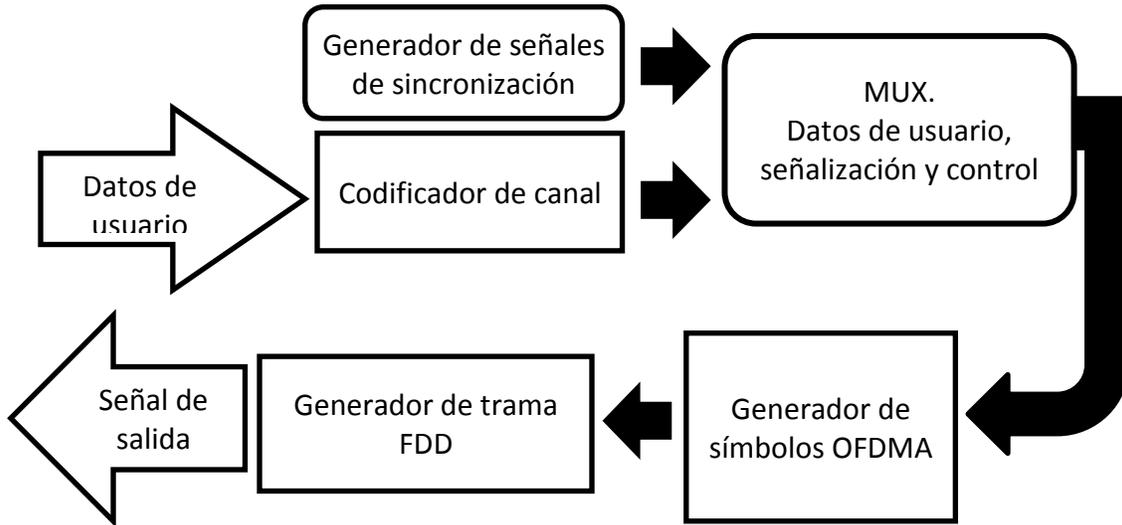


Figura 3.12. Bloques internos del transmisor.

En el transmisor eNodeB se recibe una secuencia de bits aleatoria que se codifica, se modula y se adapta al canal para que por medio de este sea transmitida al receptor.

3.1.3.1.1 Codificador

La figura 3.13 muestra el codificador de canal, el cual está compuesto por los siguientes bloques:

- Codificador de CRC.
- Segmentador de bloque.
- Codificador turbo.
- Adaptador de velocidad.
- Aleatorizador.



Figura 3.13. Bloques internos del codificador.



Señales de entrada y salida:

- **Codificador CRC:** recibe una secuencia de bits pseudoaleatorio de los datos de usuario organizados en bloques de transporte para adicionar 24 bits y posteriormente entregar esta información al segmentador de bloque.
- **Segmentador de bloque:** recibe la señal entregada por el codificador CRC, para segmentar los bloques código y entregarlos al turbo codificador.
- **Turbo codificador:** recibe segmentos de bits producidos por el segmentador de bloque y realiza el proceso de turbo codificación con una tasa de codificación igual a $1/3$.
- **Adaptador de velocidad:** recibe la señal del turbo codificador para adaptar la velocidad y entregarla al aleatorizador.
- **Aleatorizador:** recibe la información del codificador de canal, la aleatoriza con el fin de mejorar el desempeño de la codificación de canal y la entrega al multiplexor de datos de usuario, señalización y control.

3.1.3.1.2 Generador de señales de sincronización

La figura 3.14 muestra el generador de señales, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Generador de PSS.
- Generador de SSS.

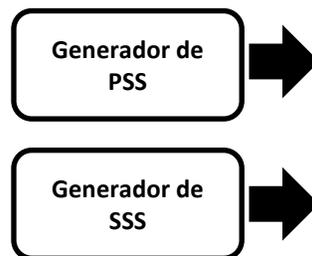


Figura 3.14. Generador de señales de sincronización.

Señales de salida:

El bloque generador de señales de sincronización proporciona una señal PSS y SSS para la sincronización temporal de subtrama y trama respectivamente.

3.1.3.1.3 Multiplexor de datos de usuario, señalización y control

La figura 3.15 muestra el multiplexor de datos de usuario, señalización y control, el cual está compuesto de un solo bloque:

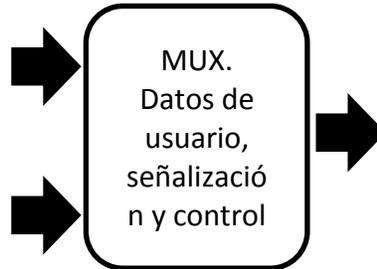


Figura 3.15. Multiplexor de datos de usuario, señalización y control.

Señales de entrada y salida:

El multiplexor recibe los datos de usuario, señalización y control los multiplexa para posteriormente entregarlos al generador de símbolos OFDMA.

3.1.3.1.4 Generador de símbolos OFDMA

La figura 3.16 muestra el generador de símbolos OFDMA, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Conversor serie a paralelo.
- Modulador.
- IDFT.
- Adición de prefijo cíclico.

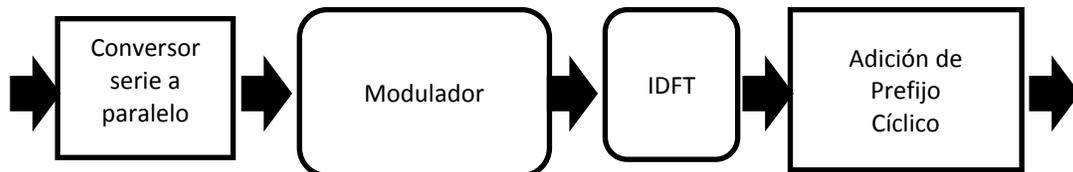


Figura 3.16. Generador de símbolos OFDMA.

Señales de entrada y salida:

- **Conversor serie a paralelo:** recibe la secuencia de bits en serie que proviene del multiplexor y hace la conversión a paralelo para luego ser entregada al mapeador de subportadora.



- **Modulador:** recibe la señal del convertor serial a paralelo y se encarga de aplicar la modulación respectiva: QPSK, 16QAM o 64QAM para entregar la señal resultante a la IDFT.
- **IDFT:** recibe la señal en el dominio de la frecuencia y realiza la conversión al dominio del tiempo.
- **Prefijo cíclico:** recibe los símbolos OFDMA y hace la concatenación del prefijo cíclico normal o extendido para entregarlos al generador de tramas FDD.

3.1.3.1.5 Generador de tramas FDD

En la grafica 3.17 muestra el generador de tramas FDD, el cual está compuesto de un solo bloque:

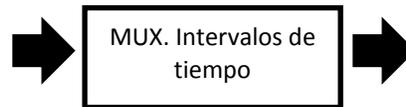


Figura 3.17. Generador de tramas FDD.

Señales de entrada y salida:

- **Multiplexor de intervalos de tiempo:** recibe los símbolos OFDMA, combina los intervalos de tiempo de 0.5 ms para formar una trama de 20 intervalos de tiempo con una duración de 10 ms. Cada intervalo de tiempo se conforma de 7 símbolos OFDMA para prefijo cíclico normal.

3.1.3.2 Bloques internos del canal

La grafica 3.18 muestra el canal de transmisión, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Canal multitrayecto.
- Canal AWGN.



Figura 3.18. Bloques internos del canal.

3.1.3.2.1 Canal multitrayecto

La grafica 3.19 muestra el canal multitrayecto, el cual está compuesto de un solo bloque:



Figura 3.19. Canal multitrayecto.

Señales de entrada y salida:

Recibe la señal del transmisor para agregar efecto multitrayecto a la señal utilizando las características de los modelos de canal: EPA5, EVA70, ETU70 o EPA300, definidos por la ITU y adaptados por el 3GPP para LTE, para luego entregarla al canal AWGN.

3.1.3.2.2 Canal AWGN

La grafica 3.20 muestra el canal AWGN, el cual está compuesto de un solo bloque:

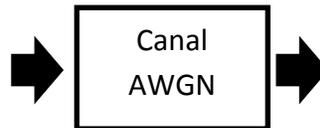


Figura 3.20. Canal AWGN.

Señales de entrada y salida:

El canal AWGN recibe la señal del transmisor, compuesta por tramas FDD, para adicionar ruido blanco y entregar la señal resultante al receptor.

3.1.3.3 Bloques internos del receptor

La figura 3.21 muestra el transmisor, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Desensamblador de trama.
- Detector de señal.
- Detector de símbolo OFDMA.
- Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.
- Decodificador.

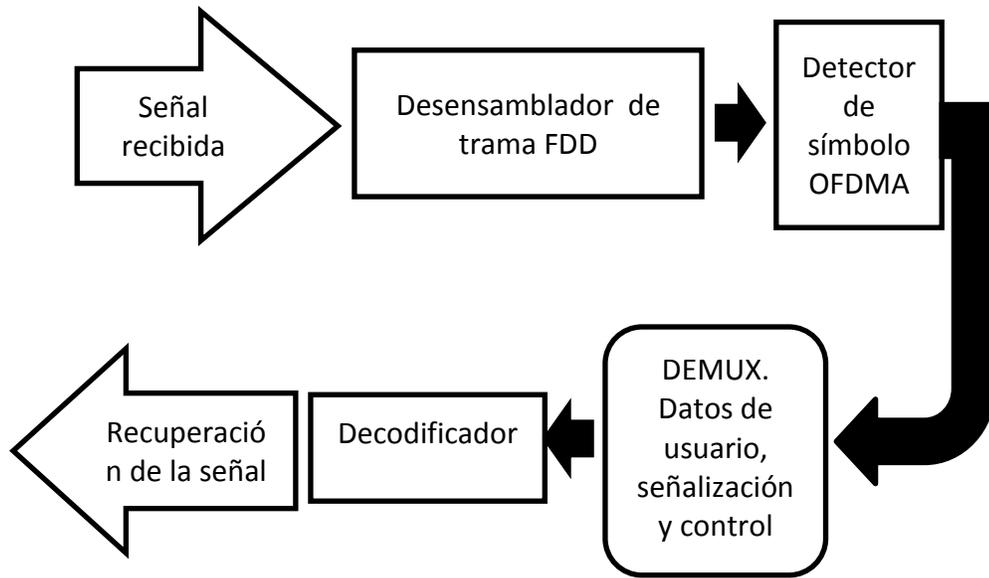


Figura 3.21. Bloques internos del receptor.

3.1.3.3.1 Desensamblador de tramas FDD

La figura 3.22 muestra el desensamblador de tramas FDD, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Sincronizador.
- Demultiplexor de tramas FDD.
- Demultiplexor de intervalos de tiempo.

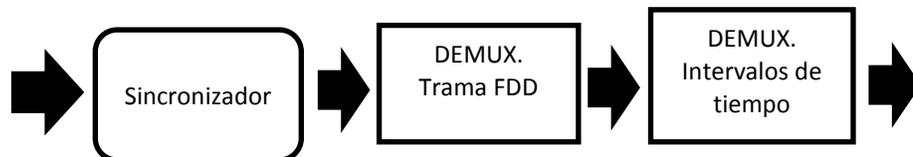


Figura 3.22. Desensamblador de tramas FDD.

Señales de entrada y salida

- **Sincronizador:** recibe la señal del canal de transmisión y realiza el proceso de sincronización en tiempo y frecuencia para entregarla al demultiplexor de tramas FDD.
- **Demultiplexor de Tramas:** recibe las tramas FDD sincronizadas entregadas por el sincronizador y las demultiplexa para obtener los intervalos de tiempo y entregarlos al demultiplexor de intervalos de tiempo.

- **Demultiplexor de intervalos de tiempo:** recibe los intervalos de tiempo obtenidos por el demultiplexor de tramas y entrega símbolos OFDMA al demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.

3.1.3.3.2 Detector de símbolos OFDMA

La figura 3.23 muestra el detector de símbolos OFDMA, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Remoción de prefijo cíclico.
- Demodulador.
- DFT.
- Conversor paralelo a serie.

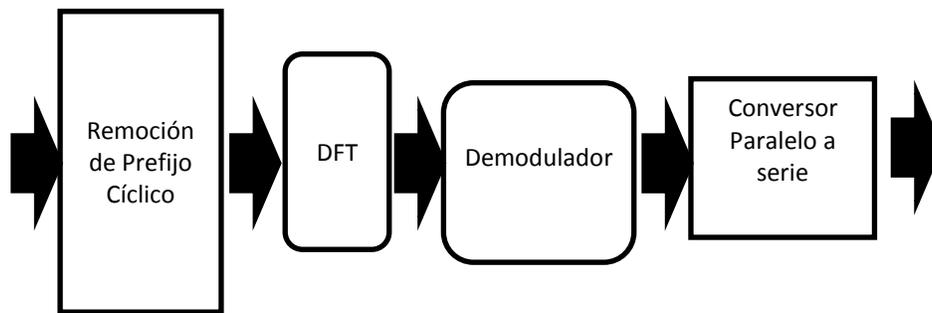


Figura 3.23. Detector de símbolos OFDMA.

Señales de entrada y salida:

- **Remoción de Prefijo cíclico:** recibe la señal que viene del desensamblador de tramas FDD y elimina el prefijo cíclico de los símbolos OFDMA para entregarla a la DFT.
- **DFT:** recibe la señal en el dominio del tiempo para convertirla al dominio de la frecuencia y entregarla al demapeador.
- **Demodulador:** recibe la señal de la DFT y se encarga de aplicar la demodulación respectiva: QPSK, 16QAM o 64QAM, para entregar la señal resultante al conversor paralelo a serie.
- **Conversor paralelo a serie:** recibe los M bits del desmapeador y los entrega al demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.

3.1.3.3.3 Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control

La grafica 3.24 muestra el demultiplexor de datos de usuario, señalización y control, el cual está compuesto de un solo bloque:



Figura 3.24. Demultiplexor de datos de usuario, señalización y control.

Señales de entrada y salida:

El demultiplexor recibe secuencia de bits del conversor serie a paralelo y separa los datos de usuario, señalización y control para entregarlos al desaleatorizador.

3.1.3.3.4 Decodificador

La figura 3.25 muestra el decodificador, el cual está compuesto de los siguientes bloques:

- Desaleatorizador.
- Desadaptador de velocidad.
- Desegmentador de bloque.
- Turbo decodificador.
- Verificador CRC.



Figura 3.25. Decodificador.

Señales de entrada y salida:

- **Desaleatorizador:** Recibe la secuencia de bits codificados del demultiplexor y los reordena para entregarlos al desadaptador de velocidad.



- **Desadaptador de velocidad:** recibe secuencias de bits del desaleatorizador y realiza el proceso de desadaptación en velocidad para entregarlos al turbo decodificador.
- **Turbo decodificador:** recibe la información codificada del desadaptador de velocidad, detecta y corrige errores para entregarlos al desegmentador de bloque.
- **Desegmentador de bloque:** recibe los bits decodificados y reconstruye bloques de transporte mediante la concatenación de secuencias de bits para entregarlos al verificador CRC.
- **Verificador CRC:** recibe la señal del desegmentador de bloque y se encarga de verificar la integridad de la información y entregar la secuencia de bits original.

3.1.4 Parámetros de Evaluación

Para el análisis de desempeño del enlace de bajada de LTE - SISO - FDD, se recurre a hacer la medida de BER, BLER y *Throughput* en función de la SNR, empleando los modelos de canal multitrayecto: EPA5, EVA70, ETU70 o EPA300 y el modelo de canal AWGN, para diferentes anchos de banda, modulación y tasas de codificación.

A continuación se describen los parámetros a tener en cuenta para los modelos de canal especificados.

Para los modelos de canal se define corrimiento *Doppler* (dispersión en frecuencia) bajo, medio y alto, con los valores 5, 70 y 300 Hz respectivamente. Estos modelos también se clasifican según la dispersión de retardo (*Delay spread*)⁸. Para entornos urbanos peatonales de baja dispersión de retardo, se emplea el modelo de canal EPA5, mientras que para entornos urbanos de alta dispersión de retardo se utiliza ETU70 y ETU 300. Además se utiliza el modelo de canal EVA70.

Los parámetros de potencia relativa y el retardo relativo por multitrayecto que se utilizan para la configuración del simulador, se muestran en las tablas A.5, A.6 y A.7 del anexo A. Donde el retardo relativo se calcula considerando el efecto *Doppler* clásico y la respuesta en frecuencia del canal multitrayecto cuando presenta corrimiento *Doppler*, definido por la ecuación 3.1 [23].

$$S(f) \propto \frac{1}{\left(1 - (f/f_D)^2\right)^{0.5}}, \text{ para } f \in (-f_D, f_D) \quad (3.1)$$

⁸ Es una medida del tiempo transcurrido entre la llegada de la primera componente de la señal de trayectoria directa y la última componente significativa del multitrayecto.



Donde f_D , es la frecuencia *Doppler* en Hz

La figura 3.26 muestra la respuesta en frecuencia del canal ante el corrimiento Doppler.

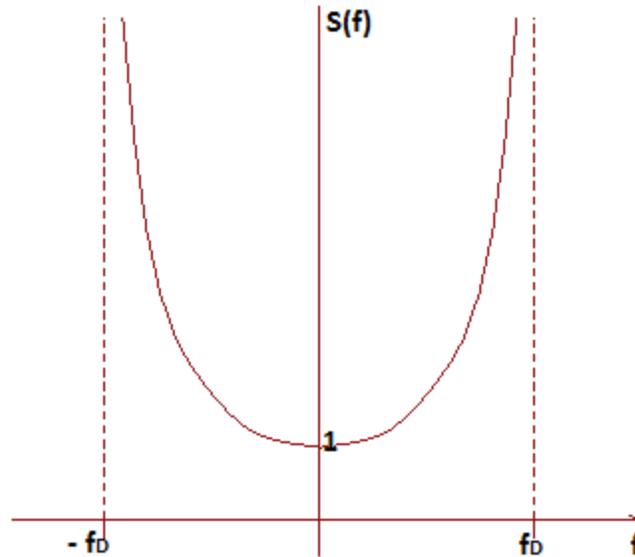


Figura 3.26. Respuesta en frecuencia del canal ante el corrimiento Doppler

La frecuencia *Doppler* depende de la velocidad de desplazamiento del móvil v , como lo define la ecuación 3.2.

$$f_D = \frac{v}{c} f_c \quad (3.2)$$

Donde:

f_c , es la frecuencia portadora en Hz.

c , es la velocidad de la luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s.

f_D , es la frecuencia *Doppler* en Hz.

A continuación se describen los parámetros evaluados para medir el desempeño del enlace de bajada de LTE - SISO - FDD.

3.1.4.1 Tasa de error de bit

Medida de calidad de la información, y se representa como el número de bits recibidos con error sobre el número total de bits transmitidos en un determinado periodo de tiempo, tal como se expresa en la ecuación 3.3.



$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (3.3)$$

3.1.4.2 Tasa de error de bloque

La tasa de error de bloque se define como la relación del número de bloques recibidos con errores sobre el número total de bloques transmitidos. Un bloque con errores se define como un bloque de transporte en el cual se ha detectado errores en la información [24]. La BLER se calcula mediante la ecuación 3.4.

$$\frac{\sum_1^{\text{subtramas}} (1 - CRC)}{\sum_{i=1}^{\text{subtramas}} 1} \quad (3.4)$$

Donde, el valor de CRC puede ser:

- 1, cuando es correcto.
- 0, cuando es incorrecto.

El Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) dado en bits, se calcula mediante la ecuación 3.5.

$$TBS = 12 * 2 * 7 * RBs * \log_2(M) * CR \quad (3.5)$$

Donde:

12, corresponde al número de subportadoras en un RB.

2, el número de intervalos de tiempo en una subtrama.

7, el número de símbolos útiles en 1 intervalo de tiempo.

RBs, indica el número de Bloques de Recursos (RB) asignados al ancho de banda.

M, el orden de modulación.

CR, la tasa de codificación.

3.1.4.3 Throughput

Cantidad máxima de información permitida a través de un canal por unidad de tiempo sin errores. El throughput se define a partir de la ecuación 3.6.



$$\sum_1^{subtramas} TBS * CRC * 1000 \quad (3.6)$$

Donde, el valor de CRC puede ser:

- 1, cuando es correcto.
- 0, cuando es incorrecto.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se hace el análisis del desempeño a nivel físico de la tecnología LTE en el enlace de bajada - sistema SISO a través de 5 escenarios implementados en la herramienta *SystemVue™*, cuya configuración se basa en lo especificado en el *Release 8* del 3GPP y su manejo se describe en el anexo B de [10]. Los resultados de evaluación del desempeño se muestran en figuras que presentan BLER, BER y *throughput* en función de la SNR. Los 5 escenarios mencionados se describen en la tabla 4.1.

La herramienta *SystemVue™* permite implementar el proceso de modulación en banda base⁹ a través de la técnica de envolvente compleja¹⁰. Además la herramienta permite visualizar el espectro de la señal banda base alrededor de la frecuencia definida de operación del sistema (2.5 GHz).

| Escenarios | Descripción |
|--------------------|---|
| Escenario 1 | Considera los diferentes tipos de canal multitrayecto ¹¹ y AWGN. |
| Escenario 2 | Consideran diferentes anchos de banda del canal. |
| Escenario 3 | Consideran diferentes tasas de codificación. |
| Escenario 4 | Consideran diferentes esquemas de modulación. |
| Escenario 5 | Se comparan los canales EVA5 y ETU300 los cuales fueron el de mejor y peor desempeño respectivamente. |

Tabla 4.1. Escenarios de estudio.

La tabla 4.1 muestra los parámetros generales en las simulaciones.

⁹ Señal de valor complejo cuyo espectro se encuentra alrededor de la frecuencia de 0Hz, e indica los cambios de magnitud y fase que deben ocurrir sobre la portadora de radiofrecuencia.

¹⁰ Toma la señal de entrada y la modula en banda base, lo cual significa generar valores complejo de la forma $x = I + jQ$ a la salida.

¹¹ El uso de los modelos de canal multitrayecto implica el uso en conjunto del canal AWGN, el cual permite modificar las condiciones del canal al variar el SNR, y con ello obtener las curvas de desempeño en términos de BER, BLER y *Throughput* en función de SNR. Por lo tanto cuando se habla de canal multitrayecto se omite mencionar canal multitrayecto + AWGN, solo se nombra el canal multitrayecto.



| Parámetros generales de configuración | |
|---------------------------------------|-----------|
| Tipo de sistema | SISO |
| Frecuencia de portadora | 2.5 GHz |
| Número de Usuarios | 1 usuario |
| Número de Tramas | 1000 |
| Tipo de trama | FDD |
| Prefijo cíclico | Normal |

Tabla 4.2. Parámetros generales de configuración del sistema.

4.1 ESCENARIO 1

Análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO con modulación 16QAM y ancho de banda de 15 MHz (75 Bloques de Recursos (RB)), donde se varia el modelo de canal. Se analizan los efectos del canal AWGN y los cuatro tipos de canal multitrayecto: EPA5, EVA70, ETU70 y ETU300. Los parámetros del escenario 1 se muestran en la tabla 4.3.

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

Tabla 4.3. Parámetros para el escenario 1.

El objetivo de este escenario es evaluar y analizar los efectos de los canales multitrayecto y AWGN sobre el desempeño del enlace de bajada, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 4.4 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo de 0.1 especificada por el 3GPP [25].

| Canal | AWGN | EPA5 | EVA70 | ETU70 | ETU300 |
|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------|--------|
| BLER objetivo | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| SNR [dB] | 4 | 19 | 35 | -- | -- |
| BER | 30×10^{-6} | 2×10^{-3} | 40×10^{-6} | -- | -- |
| Throughput [Mbps] | 13 | 11 | 11 | -- | -- |

Tabla 4.4. SNR, BER y *throughput* para el escenario 1.



La tabla 4.5 muestra el valor de BLER más bajo en cada uno de los modelos de canal para los cuales no se alcanzó la BLER objetivo, además muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR teniendo en cuenta la BLER obtenida.

| Canal | ETU70 | ETU300 |
|-------------------|----------------------|------------------------|
| BLER | 0.286 | 0.386 |
| SNR [dB] | 33 | 34.1 |
| BER | 263×10^{-6} | 324.8×10^{-6} |
| Throughput [Mbps] | 9.13 | 7.78 |

Tabla 4.5. BLER, SNR, BER y *throughput* para ETU70 y ETU300 del escenario 1.

La figura 4.1 muestra el comportamiento de la BLER para los canales AWGN y multitrayecto para diferentes valores de SNR.

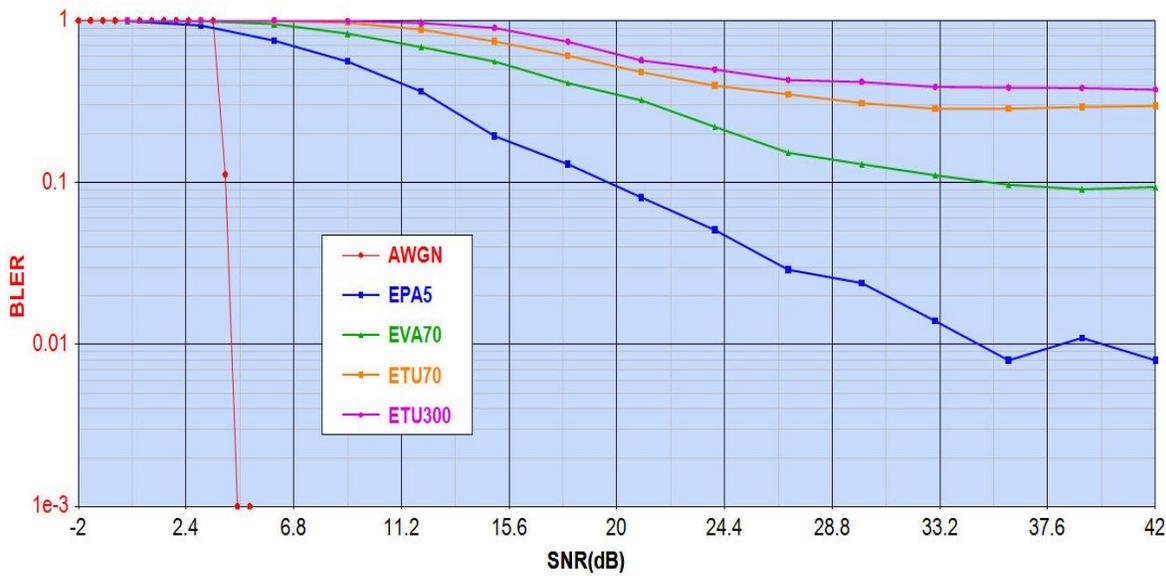


Figura 4.1. BLER vs SNR para el escenario 1.

De las tablas 4.4, 4.5 y la figura 4.1 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER es igual a 100% para una SNR en el intervalo de -2 dB a 1 dB para todos los modelos de canal evaluados, mostrando que todos los bloques recibidos contienen errores.
- El valor de BLER empieza a disminuir para una SNR igual a 3.5 dB hasta alcanzar el valor de BLER igual a 0 para una SNR igual a 4.5 dB, cuando se considera el canal AWGN.



- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 4 dB cuando se considera el canal AWGN.
- El valor de BLER empieza a disminuir en el intervalo SNR de 1 dB a 19 dB, para todos los canales multitrayecto y se alcanza la BLER objetivo (0.1) para una SNR igual a 19 dB cuando se considera el canal multitrayecto EPA5.
- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 35 dB cuando se considera el canal multitrayecto EVA5, como se muestra en la tabla 4.4.
- El valor de BLER tiende a estabilizarse para una SNR mayor a 33 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto ETU70 y ETU300 con valores de BLER iguales a 0.286 y 0.39 respectivamente.
- El valor de BLER tiende a estabilizarse en 0.091 para una SNR mayor a 36 dB cuando se considera el canal multitrayecto EPA5.
- El valor de BLER tiende a estabilizarse en 0.008 para una SNR mayor a 39 dB cuando se considera el canal multitrayecto EVA70.
- El valor de BLER objetivo (0.1) no se alcanza cuando se consideran los canales multitrayecto ETU70 y ETU300, donde se obtiene valores de BLER iguales a 0.286 y 0.386 respectivamente.

La figura 4.2 muestra el desempeño en términos de BER para los canales AWGN y multitrayecto para diferentes valores de SNR.

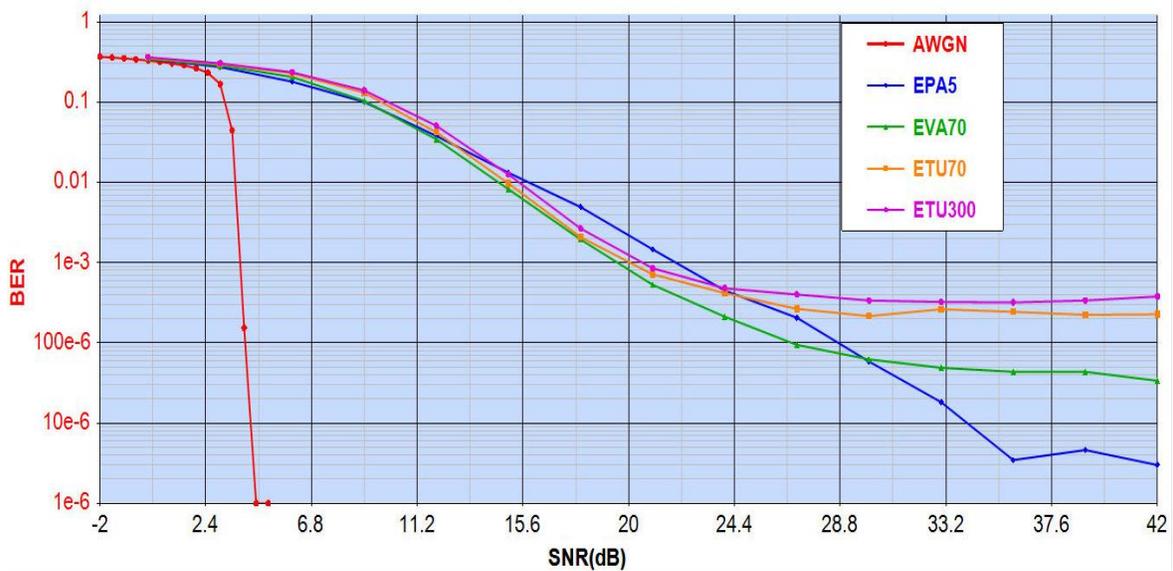


Figura 4.2. BER vs SNR para el escenario 1.

De las tablas 4.4, 4.5 y la figura 4.2 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BER empieza a disminuir desde un valor igual a 0.37 para una SNR igual a -2 dB hasta alcanzar el valor de BER igual a 0 para una SNR igual a 4.5 dB, cuando



se considera el canal AWGN. El valor de BER empieza a disminuir desde una SNR igual a 0 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto.

- El valor de BER tiene las mismas características para una SNR en el intervalo de 4.5 dB a 12 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto EPA5 y EVA70.
- El valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 0.002, para una SNR igual a 19 dB cuando se considera el canal multitrayecto EPA5.
- El valor de BER tiene mejor desempeño para una SNR en el intervalo de 4.5 dB a 12 dB, cuando se considera el canal multitrayecto EVA70 que cuando se consideran los canales multitrayecto EPA5, ETU70 y ETU300.
- El valor de BER es constante desde una SNR igual a 30 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto EVA70, ETU70 y ETU300 a diferencia del canal multitrayecto EPA5 que el valor de BER es constante para una SNR mayor a 42 dB. Este valor se define como BER irreducible [19].
- El valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 40×10^{-6} para una SNR igual a 35 dB cuando se considera el canal multitrayecto EVA70.
- El valor de BER donde no se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 263×10^{-6} para una SNR igual a 33 dB cuando se considera el canal multitrayecto ETU70.
- El valor de BER donde no se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 324.8×10^{-6} para una SNR igual a 34.1 dB cuando se considera el canal multitrayecto ETU300.

La tabla 4.6 muestra los valores de *throughput* alcanzados en los cinco modelos de canal para diferentes SNR.

| Canal \ SNR [dB] | EPA5 | EVA70 | ETU70 | ETU300 |
|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 3 | 0.85 Mbps | 0 Mbps | 0 Mbps | 0 Mbps |
| 4 | 0.95 Mbps | 0.25 Mbps | 0 Mbps | 0 Mbps |
| 12 | 8.2 Mbps | 4.7 Mbps | 1.5 Mbps | 0.25 Mbps |
| 19 | 11 Mbps | 7.5 Mbps | 5.4 Mbps | 3 Mbps |
| 24 | 12.18 Mbps | 9.72 Mbps | 7.71 Mbps | 6.61 Mbps |
| 35 | 12.74 Mbps | 11 Mbps | 9.13 Mbps | 7.78 Mbps |

Tabla 4.6. *Throughput* para diferentes SNR en el escenario 1.

La figura 4.3 muestra el *throughput* para diferentes valores de SNR en los cuatro modelos de canal.

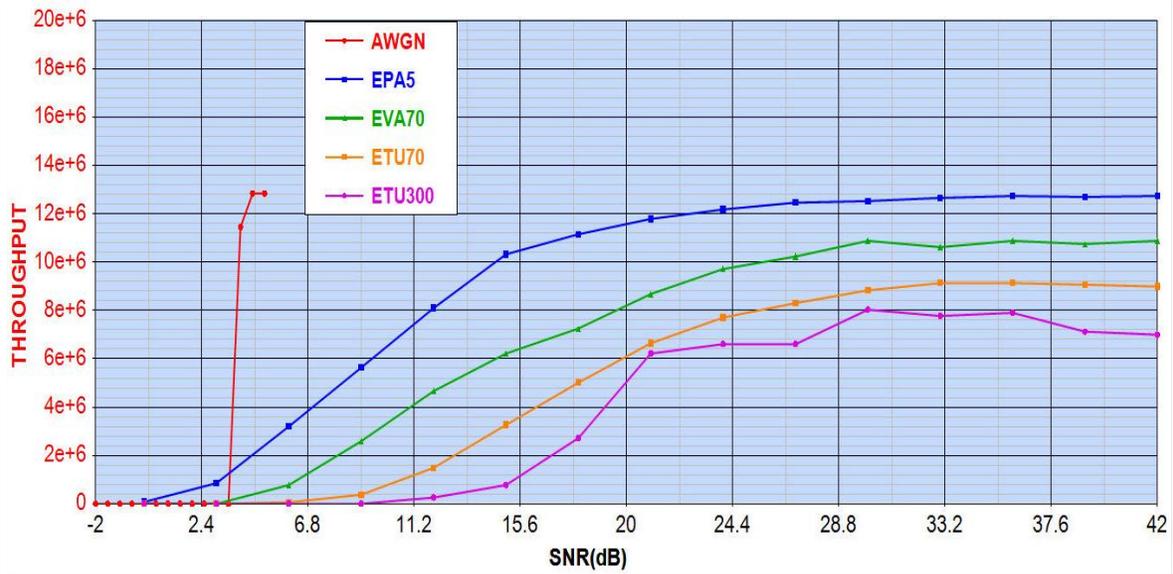


Figura 4.3. Throughput vs SNR para el escenario 1.

De las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y la figura 4.3 se observan los siguientes resultados:

- El valor de *throughput* es igual a 0 Kbps para una SNR en el intervalo de -2 dB a 0 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto ETU300, EVA70, ETU70 y AWGN a diferencia del canal multitrayecto EPA5 que alcanzan un valor de *throughput* igual a 855 Kbps.
- El máximo valor de *throughput* es igual a 12.84 Mbps para una SNR igual a 4.5 dB, cuando se considera el canal AWGN.
- El máximo valor de *throughput* es igual a 2 Mbps y 375 Kbps para una SNR igual a 4.5 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto EPA5 y EVA70 respectivamente a diferencia de los canales multitrayecto ETU70 y ETU300 que alcanzan un valor de *throughput* igual a 0 Mbps.
- El valor de *throughput* es igual a 64.8 Kbps y 63 Kbps para una SNR en el intervalo de 6 dB a 10 dB, cuando se consideran los canales multitrayecto ETU70, ETU300 respectivamente,
- El valor de *throughput* donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 12 Mbps para una SNR igual a 4 dB, cuando se considera el canal AWGN a diferencia de los canales multitrayecto EPA5 y EVA70 que alcanzan un valor de *throughput* igual a 11 Mbps para una SNR igual a 19 dB y 35 dB respectivamente.
- El valor de *throughput* donde no se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 9.13 Mbps para una SNR igual a 33 dB, cuando se considera el canal multitrayecto ETU70 y es igual a 7.78 Mbps para una SNR igual a 34.1 dB, cuando se considera el canal multitrayecto ETU300.

De las tabla 4.4, 4.6 y la figura 4.3 se concluye que:



- El valor del *throughput* aumenta a medida que se aumenta la SNR hasta llegar a un punto donde se alcanza el máximo nivel de *throughput*.
- El máximo valor *throughput* alcanzado con una menor SNR es cuando se considera el canal AWGN, lo cual confirma que es el de mejor desempeño.

4.2 ESCENARIO 2

Análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO con modulación 64QAM y modelo de canal multitrayecto EVA 70, donde se varía el ancho de banda del canal. Se analizan los anchos de banda de 5 MHz (25 RB), 10 MHz (50 RB), 15 MHz (75 RB) y 20 MHz (100 RB). Los parámetros del escenario 2 se muestran en la tabla 4.7.

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

Tabla 4.7. Parámetros para el escenario 2.

El objetivo de este escenario es tener en cuenta los efectos de los diferentes anchos de banda sobre el desempeño del enlace de bajada, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 4.8 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo.

| EVA70 | | | | |
|-------------------|----------------------|--------|--------|--------|
| Anchos de banda | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| BLER objetivo | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| SNR [dB] | 32 | -- | -- | -- |
| BER | 350×10^{-6} | -- | -- | -- |
| Throughput [Mbps] | 5.51 | -- | -- | -- |

Tabla 4.8. SNR, BER y *throughput* para el escenario 2.

La tabla 4.9 muestra el valor de BLER más baja alcanzada en cada uno de los anchos de banda para los que no se alcanzó la BLER objetivo. Además se muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR teniendo en cuenta la BLER obtenida.



| EVA70 | | | |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Anchos de banda | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| BLER | 0.15 | 0.191 | 0.245 |
| SNR [dB] | 36 | 36 | 36 |
| BER | 163.7×10^{-6} | 98.75×10^{-6} | 99.65×10^{-6} |
| Throughput [Mbps] | 10.81 | 17.54 | 20.4 |

Tabla 4.9. Resultados para los anchos de banda de 10, 15 y 20 MHz del escenario 2.

La figura 4.4 muestra el comportamiento de la BLER para los diferentes anchos de banda del enlace y valores de SNR.

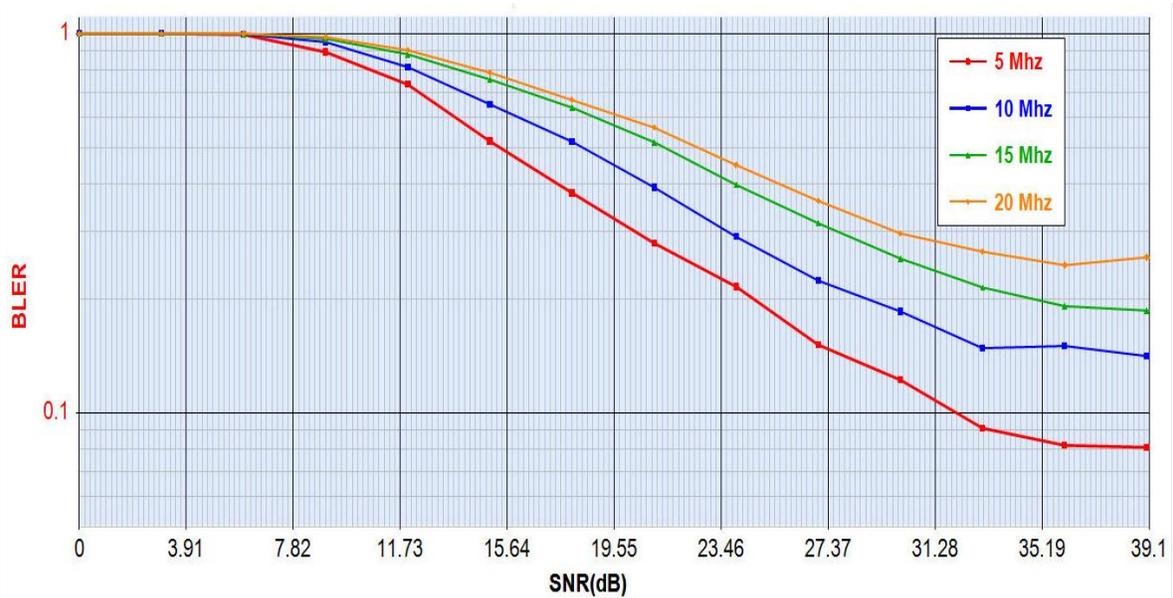


Figura 4.4. BLER vs SNR para el escenario 2.

De las tablas 4.8, 4.9 y la figura 4.4 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER es igual a 100% para una SNR en el intervalo de 0 dB a 6 dB cuando se consideran los cuatro anchos de banda del enlace, mostrando que el número bloques transmitidos son errados.
- El valor de BLER empieza a disminuir para una SNR en el intervalo de 6 dB a 33 dB, cuando se consideran los cuatro anchos de banda del enlace.
- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 32 dB cuando se considera el ancho de banda del enlace de 5 MHz, como se muestra en la tabla 4.8.
- El valor de BLER tiende a estabilizarse para una SNR mayor a 33 dB cuando se consideran los cuatro anchos de banda del enlace.



- El valor de BLER objetivo (0.1) no se alcanza cuando se consideran los ancho de banda del enlace de 10 MHz, 15MHz y 20 MHz, donde se obtiene valores de BLER iguales a 0.15, 0.191 y 0.245 respectivamente.

La figura 4.5 muestra el desempeño en términos de BER para los 4 anchos de banda del enlace y para diferentes valores de SNR.

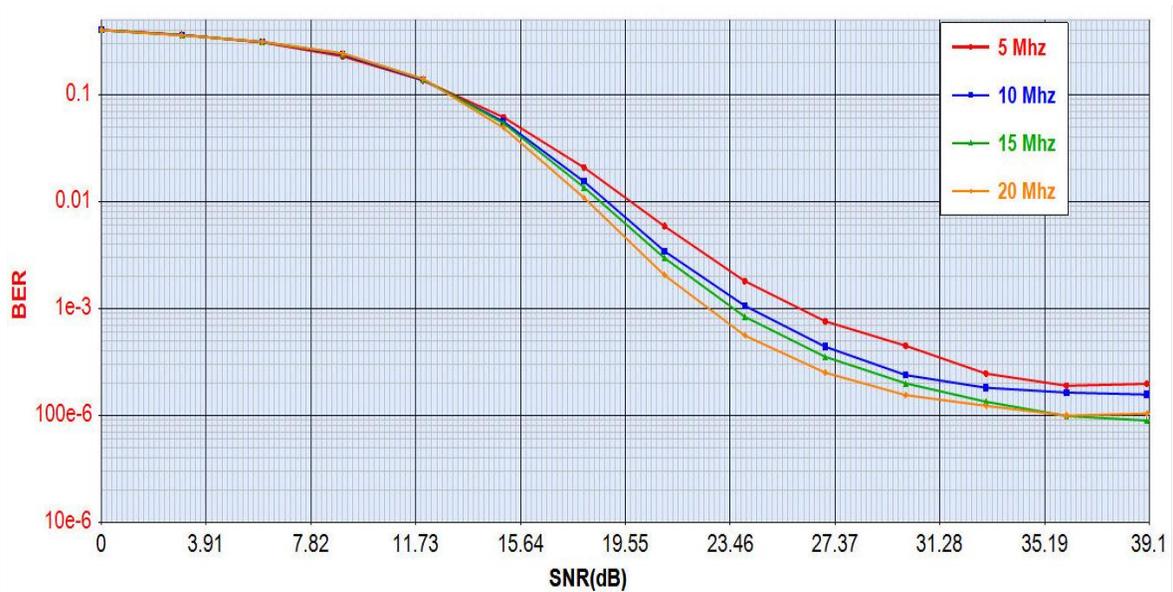


Figura 4.5. BER vs SNR para el escenario 2.

De las tablas 4.8, 4.9 y la figura 4.5 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 350×10^{-6} para una SNR igual a 32 dB cuando se considera el ancho de banda del enlace de 5 MHz.
- El valor de BER tiene las mismas características para una SNR en el intervalo de 0 dB a 15 dB, cuando se consideran los cuatro anchos de banda del enlace.
- El valor de BER tiene mejor desempeño para una SNR en el intervalo de 15 dB a 36 dB, cuando se considera el ancho de banda del enlace de 20 MHz que cuando se consideran los ancho de banda del enlace de 5 MHz, 10 MHz y 15 MHz, por que alcanza menores valores de BER con una menor SNR.
- El menor valor de BER se alcanza para una SNR mayor a 36 dB, cuando se consideran los anchos de banda del enlace de 15 MHz y 20 MHz que cuando se consideran los ancho de banda del enlace de 5 MHz, 10 MHz.
- El valor de BER donde no se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 163×10^{-6} , 98.75×10^{-6} y 99.65×10^{-6} para una SNR igual a 36 dB, cuando se



consideran los anchos de banda del enlace de 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente.

La tabla 4.10 muestra los valores de *throughput* alcanzados en los cuatro anchos de banda para diferentes SNR.

| Anchos de banda \ SNR [dB] | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 3 | 0 Mbps | 0 Mbps | 0 Mbps | 0 Mbps |
| 12 | 1.746 Mbps | 3.318 Mbps | 3.162 Mbps | 3.343 Mbps |
| 21 | 4.747 Mbps | 8.718 Mbps | 9.935 Mbps | 12.04 Mbps |
| 33 | 5.512 Mbps | 11.22 Mbps | 16.5 Mbps | 20.4 Mbps |

Tabla 4.10. *Throughput* para diferentes SNR en el escenario 2.

La tabla 4.11 muestra los valores máximos de *throughput* teóricos y alcanzados para los 4 anchos de banda.

| EVA70 | | | | |
|---|-------|--------|--------|--------|
| Anchos de banda | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| Tasa de codificación teórica | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Tasa de Codificación efectiva del simulador | 0.349 | 0.3409 | 0.3443 | 0.3422 |
| Throughput [Mbps] máx. teórico | 7.53 | 14.72 | 22.31 | 29.56 |
| SNR [dB] max. throughput | 39 | 39 | 36 | 39 |
| Throughput [Mbps] máx. obtenido | 5.57 | 11.51 | 17.54 | 21 |

Tabla 4.11. Máximo *throughput* teórico y alcanzado para el escenario 2.

El valor de la tasa de codificación efectiva o dada por el simulador se utiliza para calcular el máximo valor de *throughput* teórico mediante la ecuación 3.5, como se muestra en la tabla 4.11.

La figura 4.6 muestra el *throughput* para los diferentes anchos de banda del enlace y valores de SNR.

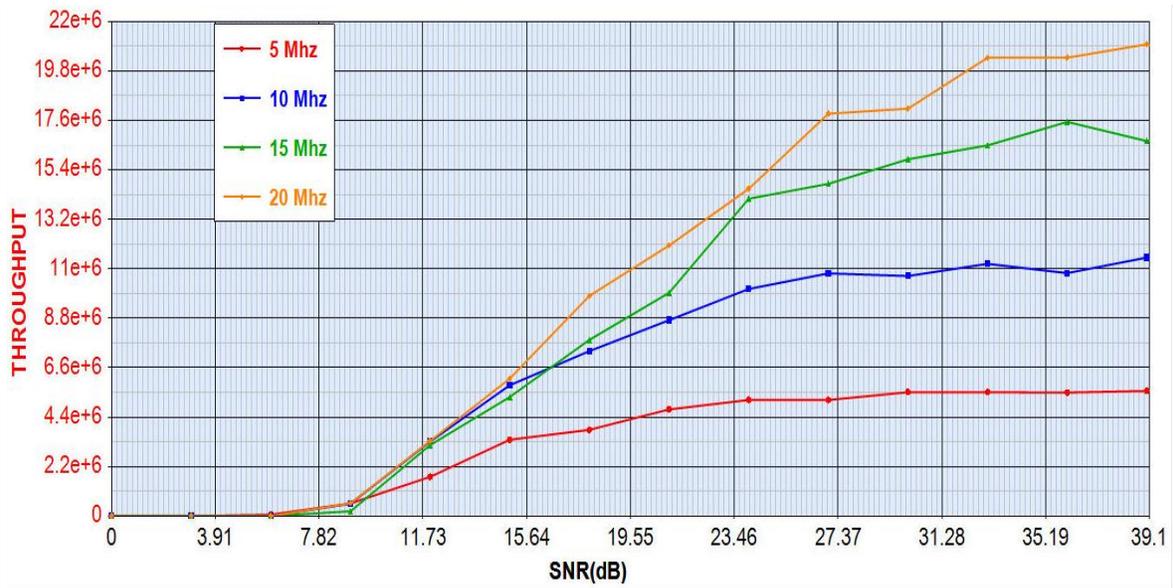


Figura 4.6. Throughput vs SNR para el escenario 2.

De las tabla 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y la figura 4.6 se observan los siguientes resultados:

- El valor de *throughput* es aproximado a 0 para una SNR en el intervalo de 0 dB a 9 dB, cuando se consideran los cuatro anchos de banda del enlace.
- El valor de *throughput* es igual a 5.8 Mbps para una SNR en el intervalo de 0 dB a 9 dB, cuando se consideran los anchos de banda del enlace de 10 MHz, 15MHz y 20 MHz a diferencia del ancho de banda del enlace de 5 MHz que alcanza un valor de *throughput* igual a 3.397 Mbps.
- El valor de *throughput* tiene mejor desempeño para una SNR mayor a 15 dB, cuando se considera el ancho de banda del enlace de 20 MHz que cuando se consideran los ancho de banda del enlace de 5 MHz, 10 MHz y 15 MHz.
- El valor de *throughput* donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 5.51 Mbps para una SNR igual a 32 dB cuando se considera el ancho de banda del enlace de 5 MHz.
- El valor de *throughput* donde no se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 10.81 Mbps, 17.54 Mbps y 20.4 Mbps para una SNR igual a 36 dB cuando se consideran los ancho de banda del enlace de 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente.

De la tabla 4.10, 4.11 y la figura 4.6 se concluye que:

- El mayor valor de *throughput* se alcanza a mayor ancho de banda del enlace y viceversa.



La tabla 4.12 muestra los anchos de banda de transmisión teóricos y obtenidos para el enlace.

| Anchos de banda del canal | Anchos de banda de transmisión teóricos | Anchos de banda de transmisión obtenidos |
|---------------------------|---|--|
| 5 MHz | 4.5 MHz | 4.4305 MHz |
| 10 MHz | 9 MHz | 8.6335 MHz |
| 15 MHz | 13.5 MHz | 13.319 MHz |
| 20 MHz | 18 MHz | 17.855 MHz |

Tabla 4.12. Anchos de banda para el escenario 3.

A continuación se muestra el espectro para cada uno de los anchos de banda utilizados en este escenario.

La figura 4.7 muestra el espectro para un ancho de banda de 5 MHz en banda base. El ancho de banda ocupado es de 4.4347 MHz, centrada en 0 Hz con una frecuencia por el límite inferior de -2.2104 MHz y una frecuencia por el límite superior de 2.2242 MHz.

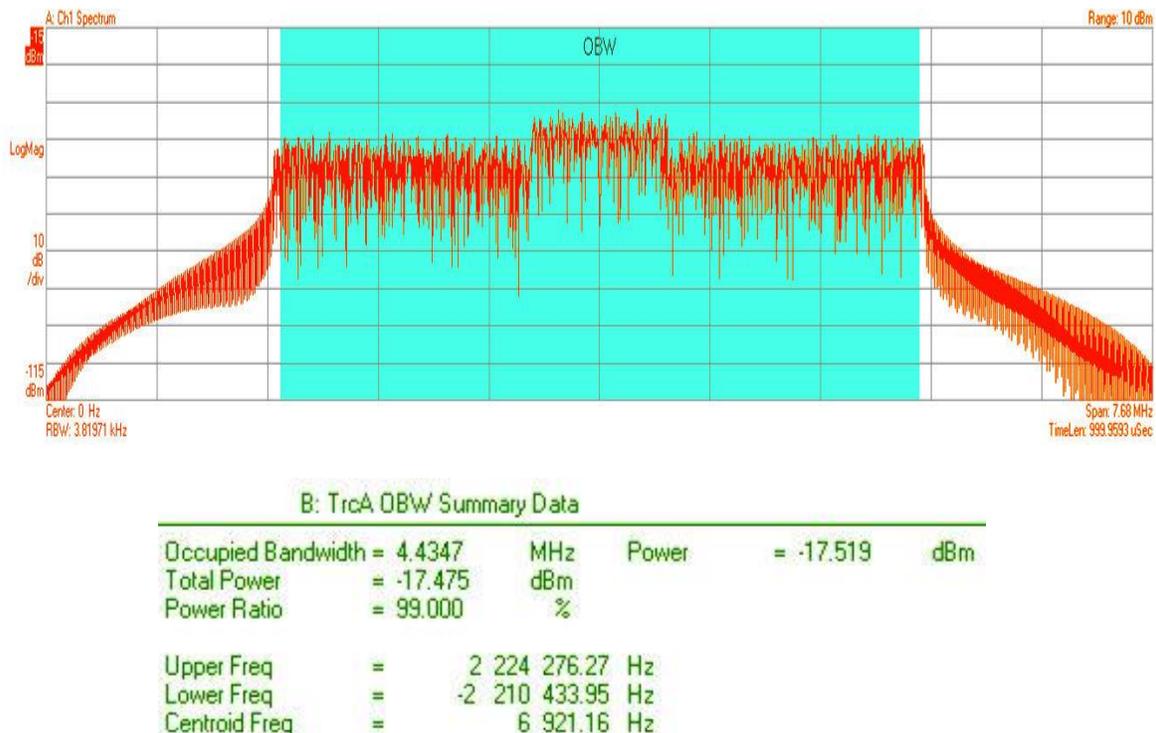


Figura 4.7. Espectro de la señal en banda base con un ancho de banda de 5 MHz.

La figura 4.8 muestra el espectro para un ancho de banda de 5 MHz en banda base después de pasar por el canal. El ancho de banda ocupado es de 4.4305 MHz, centrada en



2.5 GHz con una frecuencia límite inferior igual a 2.4977 GHz y una frecuencia límite superior igual a 2.5022 GHz.

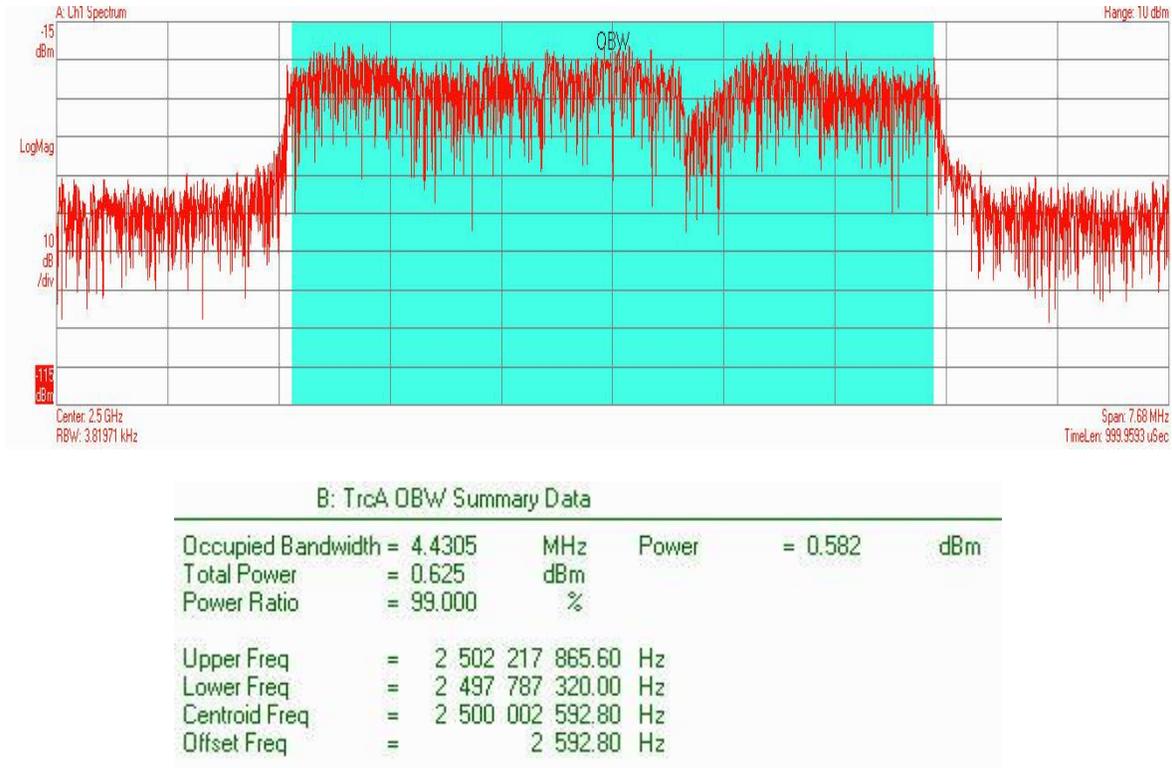
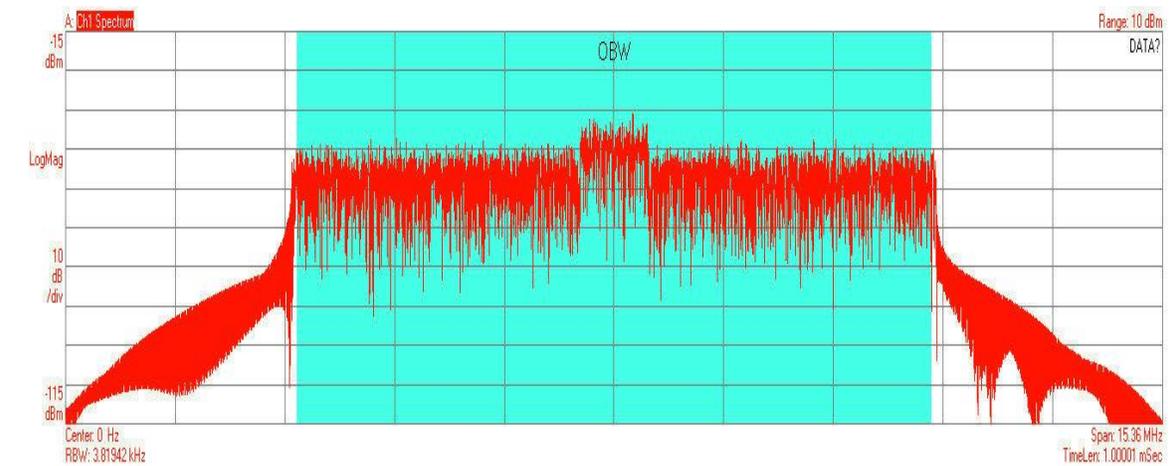


Figura 4.8. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 5 MHz.

La figura 4.9 muestra el espectro para un ancho de banda de 10 MHz en banda base. El ancho de banda ocupado es de 8.8883 MHz, centrada en 0 Hz con una frecuencia por el límite inferior de -4.4356 MHz y una frecuencia por el límite superior de 4.4526 MHz.



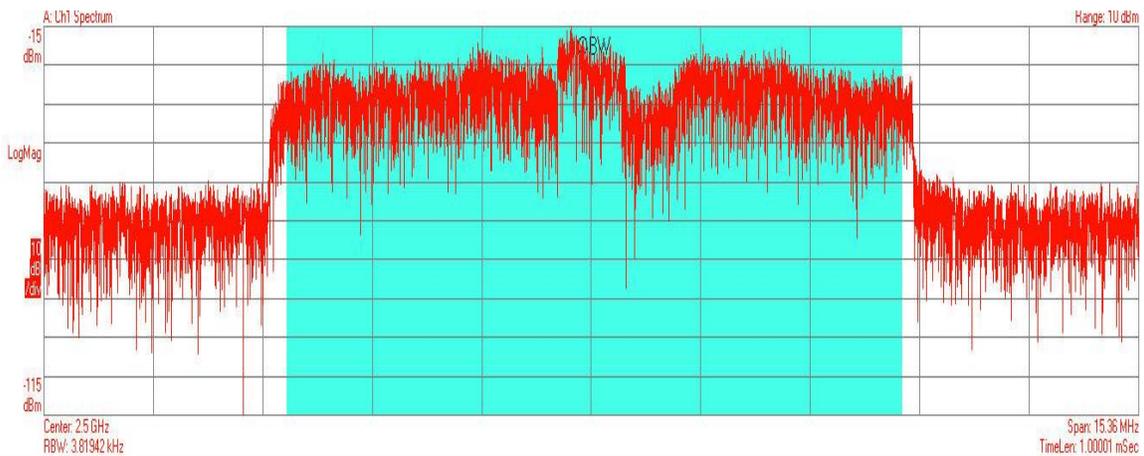


B: TrcA OBW Summary Data

| | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----|-------|-----------|-----|
| Occupied Bandwidth | = 8.8883 | MHz | Power | = -15.666 | dBm |
| Total Power | = -15.622 | dBm | | | |
| Power Ratio | = 99.000 | % | | | |
| Upper Freq | = 4 452 665.83 | Hz | | | |
| Lower Freq | = -4 435 655.70 | Hz | | | |
| Centroid Freq | = 8 505.06 | Hz | | | |
| Offset Freq | = 8 505.06 | Hz | | | |

Figura 4.9. Espectro de la señal banda base con un ancho de banda de 10 MHz.

La figura 4.10 muestra el espectro para un ancho de banda de 10 MHz en banda base después de pasar por el canal. El ancho de banda ocupado es de 8.6335 MHz, centrada en 2.5 GHz con una frecuencia por el límite inferior de 2.4957 GHz y una frecuencia por el límite superior de 2.5043 GHz.

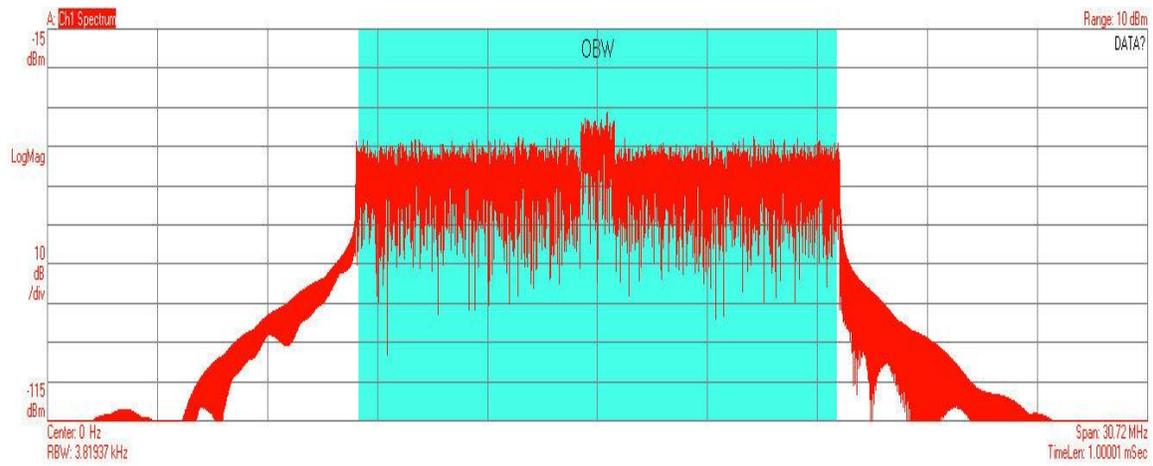


B: TrcA OBW Summary Data

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|-----|-------|---------|-----|
| Occupied Bandwidth | = 8.6335 | MHz | Power | = 4.436 | dBm |
| Total Power | = 4.479 | dBm | | | |
| Power Ratio | = 99.000 | % | | | |
| Upper Freq | = 2 504 366 155.77 | Hz | | | |
| Lower Freq | = 2 495 732 623.32 | Hz | | | |
| Centroid Freq | = 2 500 049 389.55 | Hz | | | |
| Offset Freq | = 49 389.55 | Hz | | | |

Figura 4.10. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 10 MHz.

La figura 4.11 muestra el espectro para un ancho de banda de 15 MHz en banda base. El ancho de banda ocupado es de 13.355 MHz, centrada en 0 Hz con una frecuencia por el límite inferior de -6.6702 MHz y una frecuencia por el límite superior de 6.6849 MHz.

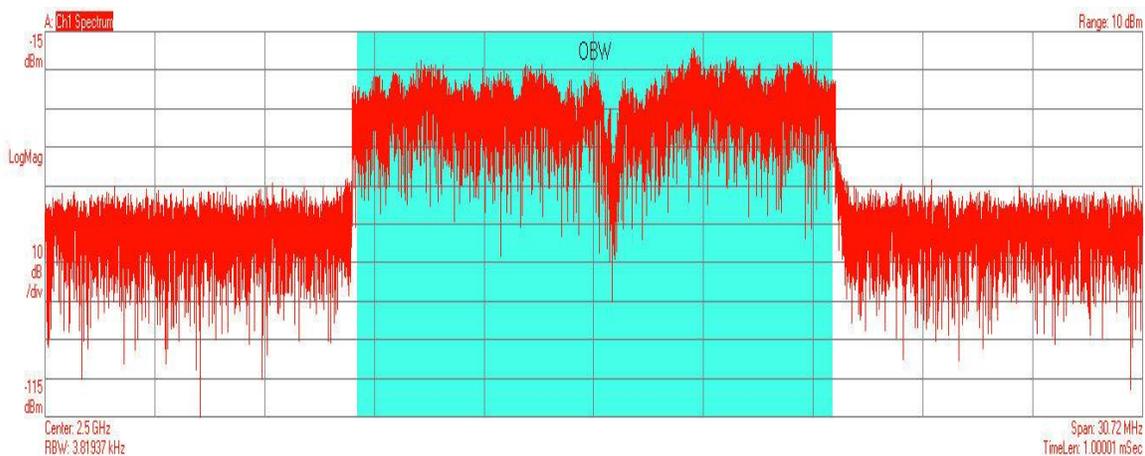


B: TrcA OBW Summary Data

| | | | | | | | |
|--------------------|---|---------------|-----|-------|---|---------|-----|
| Occupied Bandwidth | = | 13.355 | MHz | Power | = | -14.397 | dBm |
| Total Power | = | -14.353 | dBm | | | | |
| Power Ratio | = | 99.000 | % | | | | |
| Upper Freq | = | 6 684 980.12 | Hz | | | | |
| Lower Freq | = | -6 670 202.01 | Hz | | | | |
| Centroid Freq | = | 7 389.06 | Hz | | | | |
| Offset Freq | = | 7 389.06 | Hz | | | | |

Figura 4.11. Espectro de la señal banda base con un ancho de banda de 15 MHz.

La figura 4.12 muestra el espectro para un ancho de banda de 15 MHz en banda base después de pasar por el canal. El ancho de banda ocupado es de 13.319 MHz, centrada en 2.5 GHz con una frecuencia por el límite inferior de 2.4933 GHz y una frecuencia por el límite superior de 2.5066 GHz.



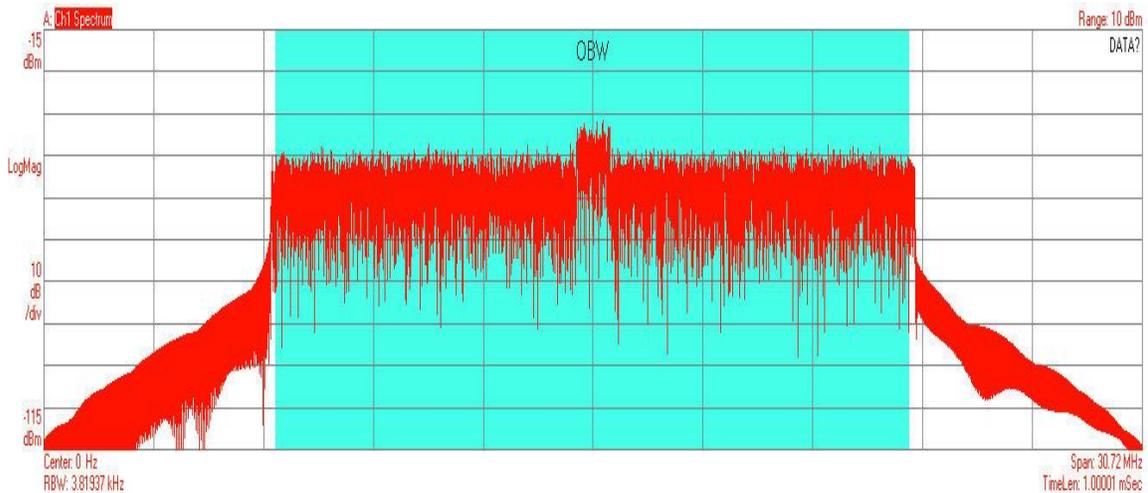


B: TrcA OBW Summary Data

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|-----|-------|---------|-----|
| Occupied Bandwidth | = 13.319 | MHz | Power | = 3.545 | dBm |
| Total Power | = 3.589 | dBm | | | |
| Power Ratio | = 99.000 | % | | | |
| Upper Freq | = 2 506 693 981.87 | Hz | | | |
| Lower Freq | = 2 493 374 965.43 | Hz | | | |
| Centroid Freq | = 2 500 034 473.65 | Hz | | | |
| Offset Freq | = 34 473.65 | Hz | | | |

Figura 4.12. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 15 MHz.

La figura 4.13 muestra el espectro para un ancho de banda de 20 MHz en banda base. El ancho de banda ocupado es de 17.729 MHz centrada en 0 Hz, con una frecuencia por el límite inferior de -8.8667 MHz y una frecuencia por el límite superior de 8.8625 MHz.



B: TrcA OBW Summary Data

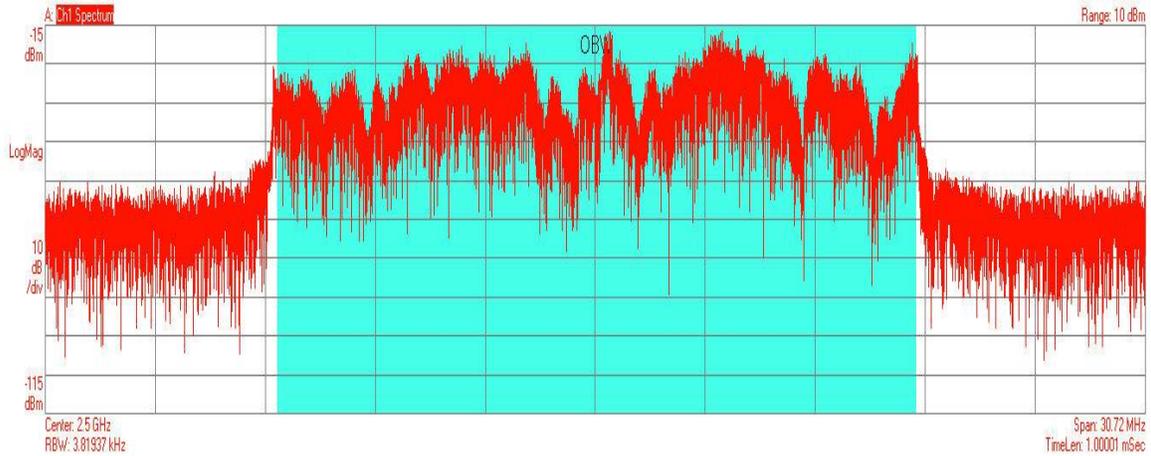
| | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----|-------|-----------|-----|
| Occupied Bandwidth | = 17.729 | MHz | Power | = -13.388 | dBm |
| Total Power | = -13.344 | dBm | | | |
| Power Ratio | = 99.000 | % | | | |
| Upper Freq | = 8 862 566.08 | Hz | | | |
| Lower Freq | = -8 866 740.32 | Hz | | | |
| Centroid Freq | = -2 087.12 | Hz | | | |
| Offset Freq | = -2 087.12 | Hz | | | |

Figura 4.13. Espectro de la señal banda base con un ancho de banda de 20 MHz.

La figura 4.14 muestra el espectro para un ancho de banda de 20 MHz en banda base después de pasar por el canal. El ancho de banda ocupado es de 17.855 MHz, centrada en



2.5 GHz con una frecuencia por el límite inferior de 2.4911 GHz y una frecuencia por el límite superior de 2.5089 GHz.



B: TrcA OBW Summary Data

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|-----|-------|---------|-----|
| Occupied Bandwidth | = 17.855 | MHz | Power | = 5.848 | dBm |
| Total Power | = 5.892 | dBm | | | |
| Power Ratio | = 99.000 | % | | | |
| Upper Freq | = 2 508 971 827.82 | Hz | | | |
| Lower Freq | = 2 491 116 648.65 | Hz | | | |
| Centroid Freq | = 2 500 044 238.23 | Hz | | | |
| Offset Freq | = 44 238.23 | Hz | | | |

Figura 4.14. Espectro de la señal después del canal con un ancho de banda de 20 MHz.

De la tabla 4.12 y las figuras 4.8, 4.10, 4.12 y 4.14 se concluye que:

- Aunque existe una pequeña variación en los anchos de banda de transmisión obtenidos a través del simulador, el canal no tiene un efecto significativo sobre el ancho de banda de transmisión. Además, se puede apreciar que la señal se encuentra centrada en la frecuencia de de 2.5 GHz, que hace parte de una de las bandas especificada para LTE por el *Release 8* del 3GPP.

4.3 ESCENARIO 3

Análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO con modulación QPSK, modelo de canal multirrayecto ETU 70 y ancho de banda de 5 MHz (25 RB), donde se varia la tasa de codificación. Se analizan tasas de codificación de 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6. Los parámetros del escenario 3 se muestran en la tabla 4.13.



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

Tabla 4.13. Parámetros para el escenario 3.

El objetivo de este escenario es tener en cuenta los efectos de la tasa de codificación sobre el desempeño del enlace de bajada, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 4.14 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo.

| ETU70 | | | | |
|------------------------------|--------------------|------|------|------|
| Modulación | QPSK | QPSK | QPSK | QPSK |
| Tasa de codificación teórica | 1/3 | 1/2 | 2/3 | 5/6 |
| BLER objetivo | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| SNR [dB] | 22.2 | -- | -- | -- |
| BER | 1×10^{-3} | -- | -- | -- |
| Throughput [Mbps] | 1.7 | -- | -- | -- |

Tabla 4.14. Tasa de codificación, SNR, BER y *throughput* para el escenario 3.

La tabla 4.15 muestra el valor de BLER más baja alcanzada en cada una de las tasas de codificación para los cuales no se alcanzó la BLER objetivo. Además se observa la BER y el *throughput* para el valor de SNR teniendo en cuenta la BLER obtenida.

| ETU70 | | | |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|-------|
| Modulación | QPSK | QPSK | QPSK |
| Tasa de codificación teórica | 1/2 | 2/3 | 5/6 |
| BLER | 0.102 | 0.234 | 0.716 |
| SNR [dB] | 33 | 30 | 36 |
| BER | 511×10^{-6} | 1.98×10^{-3} | 0.01 |
| Throughput [Mbps] | 2.87 | 3.283 | 2902 |

Tabla 4.15. Resultados para la tasa de codificación de 1/2, 2/3 y 5/6 del escenario 3.



La figura 4.15 muestra el comportamiento de la BLER en el canal ETU70 para las diferentes tasas de codificación y valores de SNR.

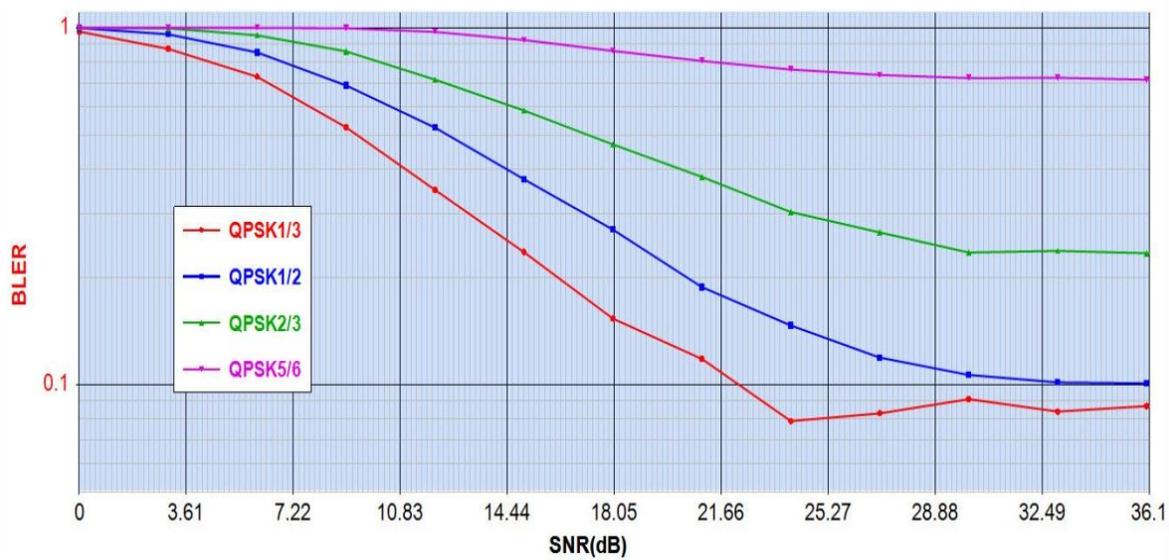


Figura 4.15. BLER vs SNR para el escenario 3.

De las tablas 4.14, 4.15 y la figura 4.15 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER es igual a 100% para una SNR en el intervalo de 0 dB a 3 dB, cuando se considera las tasas de codificación de 2/3 y 5/6 a diferencia de las tasas de codificación de 1/3 y 1/2 que alcanza un valor de BLER diferente del 100%.
- El valor de BLER se estabiliza para una SNR mayor a 30 dB, cuando se considera las tasas de codificación de 2/3 y 5/6 con valores de BLER iguales a 0.234, 0.723 respectivamente y para una SNR mayor a 33 dB, cuando se considera las tasas de codificación de 1/3 y 1/2 con valores de BLER iguales a 0.084 y 0.102 respectivamente.
- El valor de BLER es diferente a 100% para una SNR igual a 12 dB cuando se consideran las tasas de codificación de 1/2, 1/3, 2/3 y 5/6 con valores de BLER iguales a 0.351, 0.525, 0.716 y 0.974 respectivamente.
- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 17.16 dB cuando se considera una tasa de codificación de 1/3.
- El valor de BLER objetivo (0.1) no se alcanza cuando se consideran las tasas de codificación de 1/2, 2/3 y 5/6, donde se obtiene valores de BLER iguales a 0.102, 0.234 y 0.716 respectivamente.

De las tablas 4.14, 4.15 y la figura 4.15 se concluye que:



- El valor de BLER alcanzado cuando se considera la tasa de codificación de 5/6 se encuentra por encima del 70% con lo que este tipo de codificación no es viable en el presente escenario.

La figura 4.16 muestra el desempeño en términos de BER en el canal ETU70 para diferente tasa de codificación y valores de SNR.

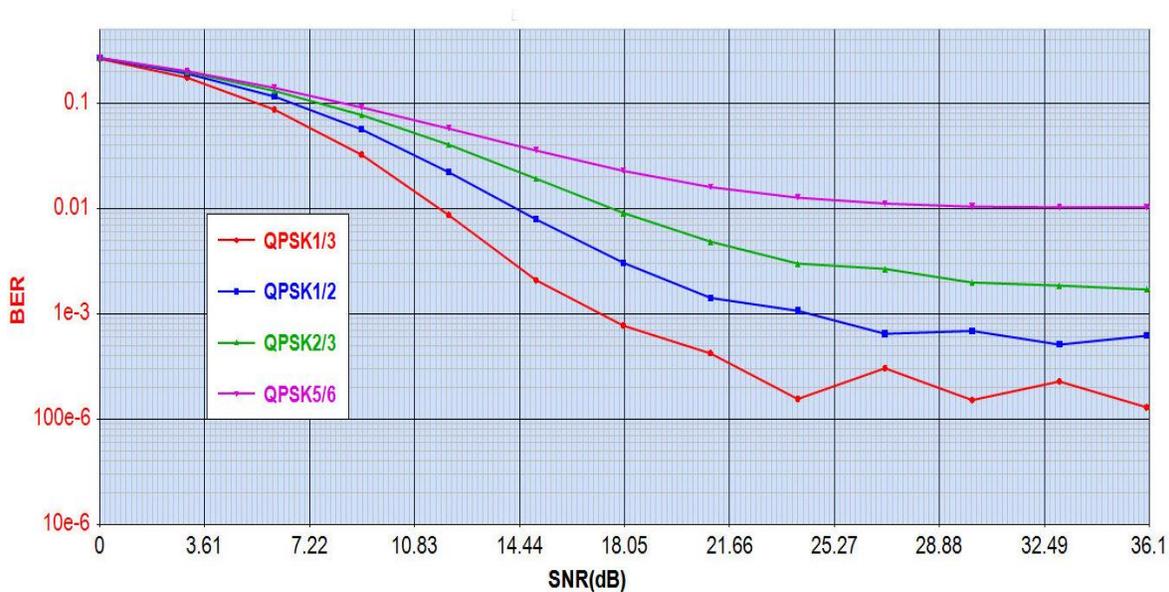


Figura 4.16. BER vs SNR para el escenario 3.

De las tablas 4.14, 4.15 y la figura 4.16 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 1×10^{-3} para una SNR igual a 17.16 dB cuando se considera una tasa de codificación de 1/3.
- El valor de BER donde no se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 511×10^{-6} , 1.98×10^{-3} y 0.01 cuando se consideran las tasas de codificación de 1/2, 2/3 y 5/6 respectivamente.
- El valor de BER se mantiene por encima de 0.01 para una SNR mayor a 0 dB, cuando se considera una tasa de codificación de 5/6.

De las tablas 4.14, 4.15 y la figura 4.16 se concluye que:

- La tasa de codificación de mejor desempeño en términos de BER es la de 1/3 en comparación a las de 1/2, 2/3, y 5/6, con lo que a menor tasa de codificación se obtiene un valor de BER más bajo (mayor redundancia).
- Se observa que al aumentar la SNR la BER comienza a disminuir para cualquier tasa de codificación. Sin embargo, la de peor desempeño es la tasa de 5/6 ya que así se aumenta la SNR la BER se mantiene por encima de 0.01.



La tabla 4.16 muestra los valores máximos de *throughput* alcanzados en las cuatro tasas de codificación.

| ETU70 | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Modulación | QPSK | QPSK | QPSK | QPSK |
| Tasa de codificación teórica | 1/3 | 1/2 | 2/3 | 5/6 |
| Tasa de codificación efectiva del simulador | 0.3183 | 0.5067 | 0.6365 | 0.8313 |
| Throughput [Mbps] máx. teórico | 2.291 | 3.648 | 4.582 | 5.985 |
| SNR [dB] max. throughput | 24 | 30 | 36 | 36 |
| Throughput [Mbps] máx. obtenido | 1.985 | 2.902 | 3.283 | 1.417 |

Tabla 4.16. Máximo *throughput* obtenido para el escenario 3.

Los valores para cada una de las tasas de codificación efectiva o dada por el simulador se utilizan para calcular el máximo valor de *throughput* teórico mediante la ecuación 3.5, como se muestra en la tabla 4.16.

La figura 4.17 muestra el *throughput* para las cuatro tasas de codificación y diferentes valores de SNR.

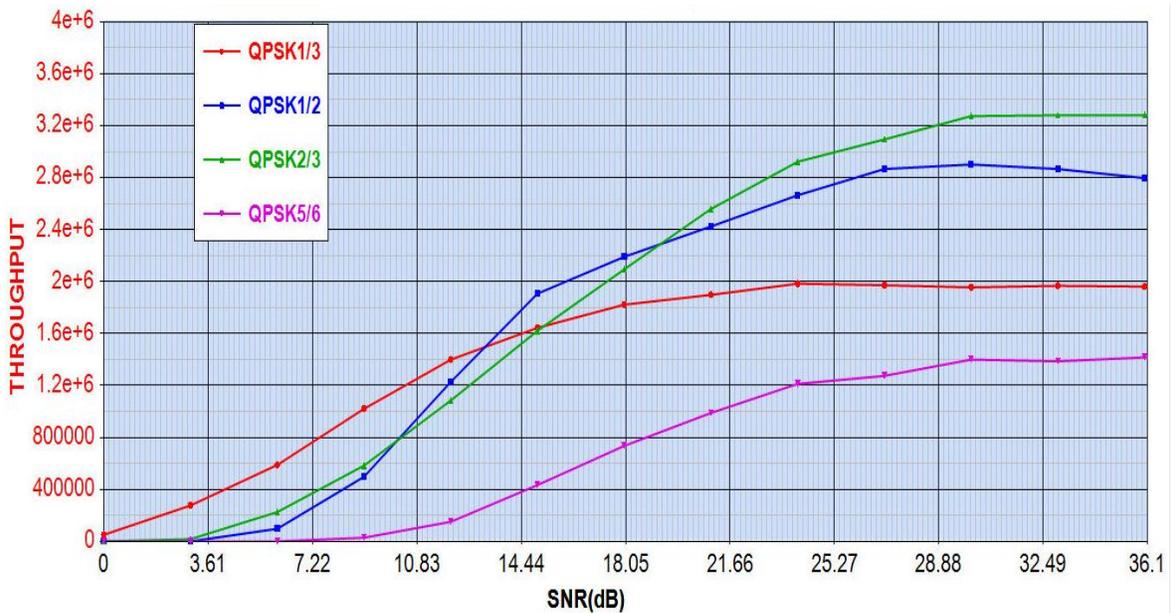


Figura 4.17. *Throughput* vs SNR para el escenario 3.



De las tablas 4.14, 4.15, 4.16 y la figura 4.17 se observan los siguientes resultados:

- El valor de *throughput* tiene mejor desempeño para una SNR en el intervalo de 0 dB a 9 dB, cuando se considera una tasa de codificación de 1/3 que cuando se consideran las tasas de codificación de 1/2, 2/3 y 5/6.
- El mayor valor de *throughput* es igual a 2 Mbps para una SNR en el intervalo de 13 dB a 19 dB, cuando se considera una tasa de codificación de 1/2.
- El valor de *throughput* tiene mejor desempeño para una SNR mayor a 19 dB, cuando se considera una tasa de codificación de 2/3.
- El valor de *throughput* donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 1.7 Mbps para una SNR igual a 17.16 dB cuando se considera una tasa de codificación de 1/3.

De las tablas 4.16 y la figura 4.17 se concluye que:

- El valor de *throughput* para la tasa de codificación de 5/6 no supera a las otras 3 en ningún valor de SNR.
- Para una tasa de codificación mayor a 0.666 el comportamiento del *throughput* tiende a disminuir por que la tasa de codificación se acerca a 1 es decir donde no se tiene codificación.

En términos generales se concluye que en el escenario propuesto la tasa de codificación que presenta el mejor desempeño es la 1/3 ya que cumple la BLER objetivo y presenta los valores más bajos de BER con relación a las demás tasas.

4.4 ESCENARIO 4

Análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO con modelo de canal multitrayecto EPA 5 y ancho de banda de 10 MHz (50 RB), donde se varia el tipo de modulación. Se analizan las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM. Los parámetros del escenario 4 se muestran en la tabla 4.17.

| Parámetro | Configuración |
|----------------------|--------------------|
| Ancho de banda | 10 MHz (50 RB) |
| Modulación | QPSK, 16QAM, 64QAM |
| Tasa de codificación | 1/3 |
| Modelo de canal | EPA5 |

Tabla 4.17. Parámetros para el escenario 4.



El objetivo de este escenario es tener en cuenta los efectos de los diferentes tipos de modulación sobre el desempeño del enlace de bajada, obteniendo valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 4.18 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo de 0.1 especificada en el 3GPP [3].

| EPA5 | | | |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Modulación | QPSK | 16QAM | 64QAM |
| BLER objetivo | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| SNR [dB] | 13.7 | 19.5 | 22.7 |
| BER | 8×10^{-3} | 5×10^{-3} | 6×10^{-3} |
| Throughput [Mbps] | 3.35 | 7.75 | 12.33 |

Tabla 4.18. SNR, BER y *throughput* para el escenario 4.

La figura 4.18 muestra el comportamiento de la BLER para el canal multitrayecto EPA5, modulaciones QPSK, 16QAM, 64QAM y diferentes valores de SNR.

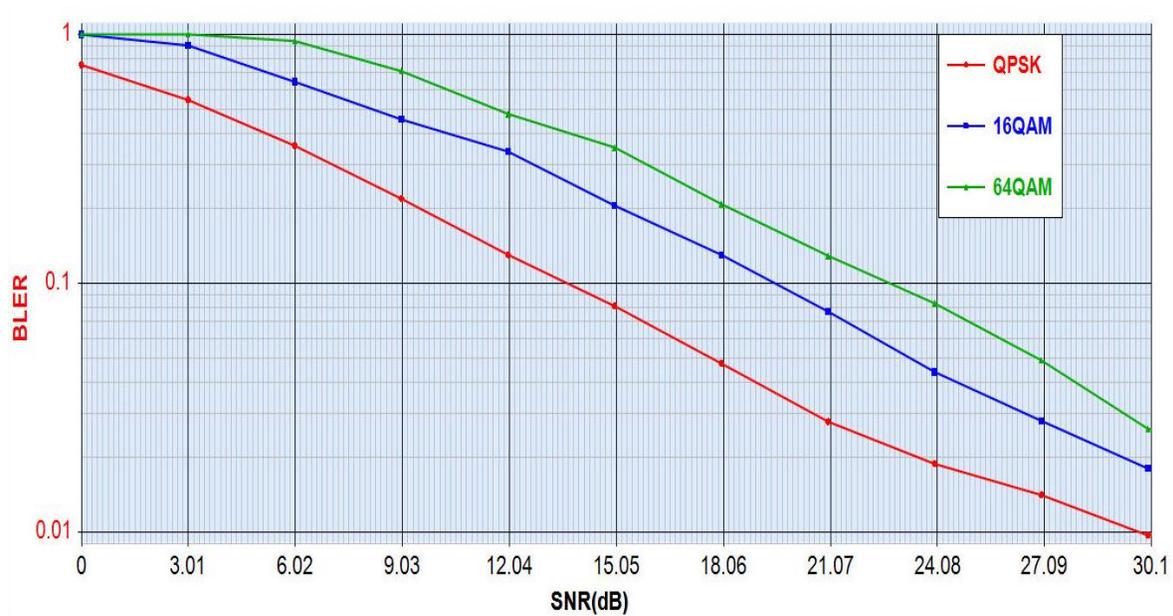


Figura 4.18. BLER vs SNR escenario 4.

De la tabla 4.18 y la figura 4.18 se observan los siguientes resultados:



- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 13.7 dB, 19.5 dB y 22.7 dB cuando se considera los 3 tipos de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM respectivamente.
- El valor de BLER objetivo alcanzado con menor SNR se da cuando se considera la modulación QPSK.
- El valor de BLER es mayor cuando se considera la modulación 64QAM que cuando se consideran las modulaciones QPSK y 16QAM. Por lo tanto, la modulación que tiene peor desempeño en términos de BLER es la de 64QAM y la de mejor desempeño en términos de BLER es QPSK. Además esta última alcanza el valor de BLER objetivo con menor SNR.

La figura 4.19 muestra el desempeño en términos de BER para el canal multitrayecto EPA5, modulaciones QPSK, 16QAM, 64QAM y diferentes valores de SNR.

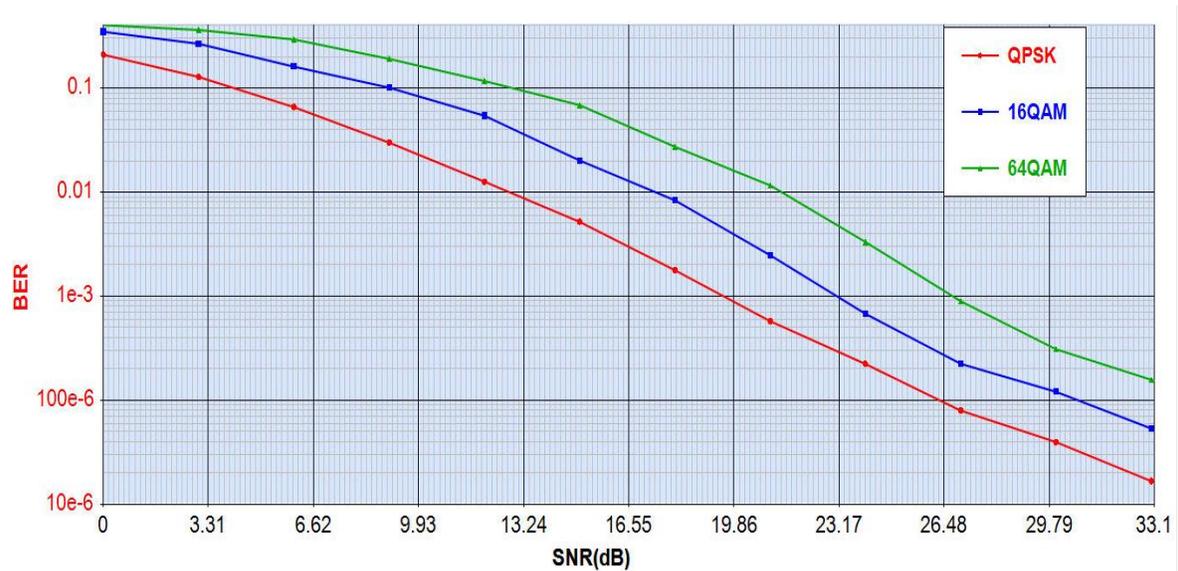


Figura 4.19. BER vs SNR escenario 4.

De la tabla 4.18 y la figura 4.19 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 8×10^{-3} , 5×10^{-3} y 6×10^{-3} cuando se considera los 3 tipos de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM respectivamente.
- El valor de BER tiene mejor desempeño para una SNR en el intervalo de 13.7 dB a 33.1 dB, cuando se considera modulación QPSK que cuando se consideran las modulaciones 16QAM y 64QAM.
- El valor de BER es mayor cuando se considera la modulación 64QAM que cuando se consideran las modulaciones QPSK y 16QAM. Por lo tanto, la modulación que tiene peor desempeño en términos de BER es la de 64QAM.



La tabla 4.19 muestra los valores máximos de *throughput* teóricos y obtenidos en los en los 3 tipos de modulación para diferente SNR.

| EPA5 | | | |
|---|--------|--------|--------|
| Modulación | QPSK | 16QAM | 64QAM |
| Tasa de codificación teórica | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Tasa de Codificación efectiva del simulador | 0.3183 | 0.3174 | 0.3409 |
| Throughput [Mbps] máx. teórico | 4.583 | 9.141 | 14.72 |
| SNR [dB] max. throughput | 30 | 33 | 33 |
| Throughput [Mbps] máx. obtenido | 4.278 | 8.576 | 13.44 |

Tabla 4.19. Máximo *throughput* obtenido para el escenario 4.

El valor de la tasa de codificación efectiva o dada por el simulador se utiliza para calcular el máximo valor de *throughput* teórico mediante la ecuación 3.5, como se muestra en la tabla 4.19.

La figura 4.20 muestra el desempeño en términos de *throughput* para el canal multirrayecto EPA5, modulaciones QPSK, 16QAM, 64QAM y diferentes valores de SNR.

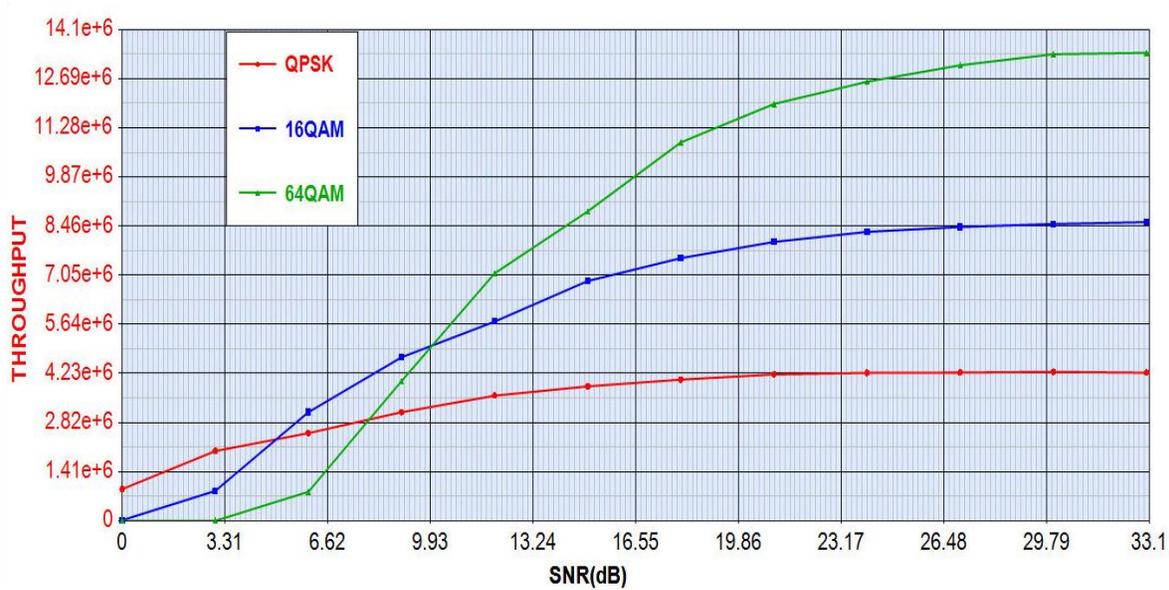


Figura 4.20. *Throughput* vs SNR escenario 4.

De las tablas 4.18, 4.19 y la figura 4.20 se observan los siguientes resultados:



- El máximo valor de *throughput* alcanzado es igual a 13.44 Mbps, cuando se considera la modulación 64QAM a diferencia de QPSK y 16QAM que alcanzan un valor de 4.278 Mbps y 8.576 Mbps.
- El valor de *throughput* donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 3.35 Mbps para una SNR igual a 13.7 dB, cuando se considera la modulación QPSK a diferencia de las modulaciones 16QAM y 64QAM que alcanzan un valor de *throughput* igual a 7.75 Mbps para una SNR igual a 19.5 dB y 12.33 Mbps para una SNR igual a 22.7 dB respectivamente.
- El valor de *throughput* está relacionado con el orden de modulación, para una buena relación señal a ruido se tiene que el valor se duplica debido al número de símbolos utilizados por cada modulación. Ya que, QPSK, 16QAM y 64QAM tienen 2, 4 y 6 bits por símbolo respectivamente.

A continuación se muestran los diagramas de constelación para cada tipo de modulación utilizada en este escenario.

La figura 4.21 muestra el diagrama de constelación para modulación QPSK con valor de SNR igual a 6 dB.

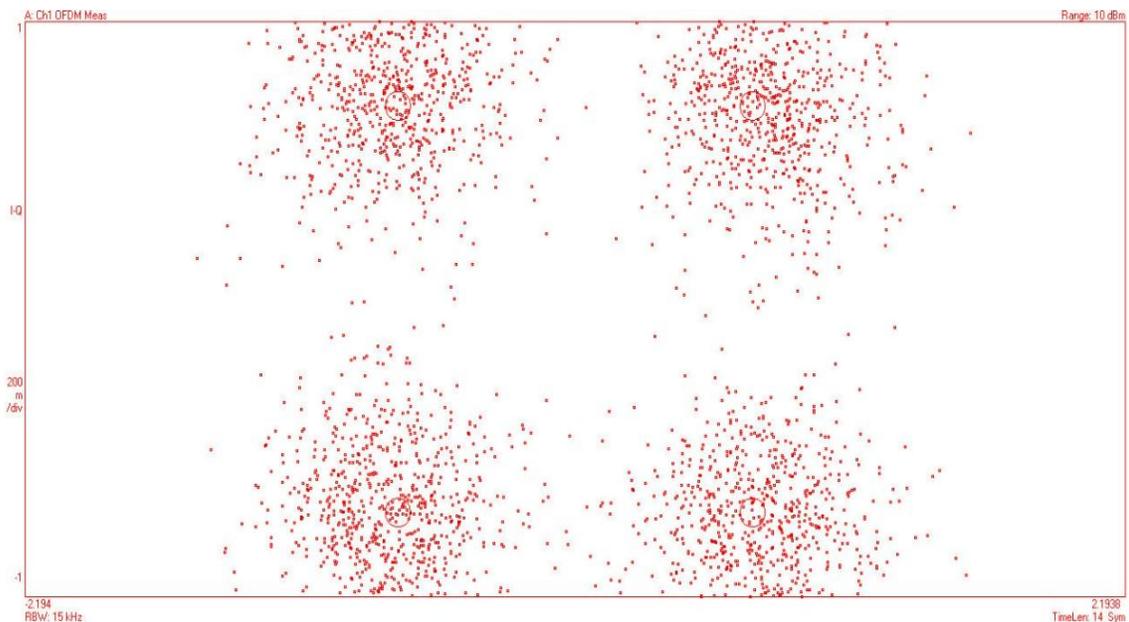


Figura 4.21. Constelación para QPSK con una SNR=6 dB.

La figura 4.22 muestra el diagrama de constelación para la modulación QPSK con valor de SNR igual a 36 dB.

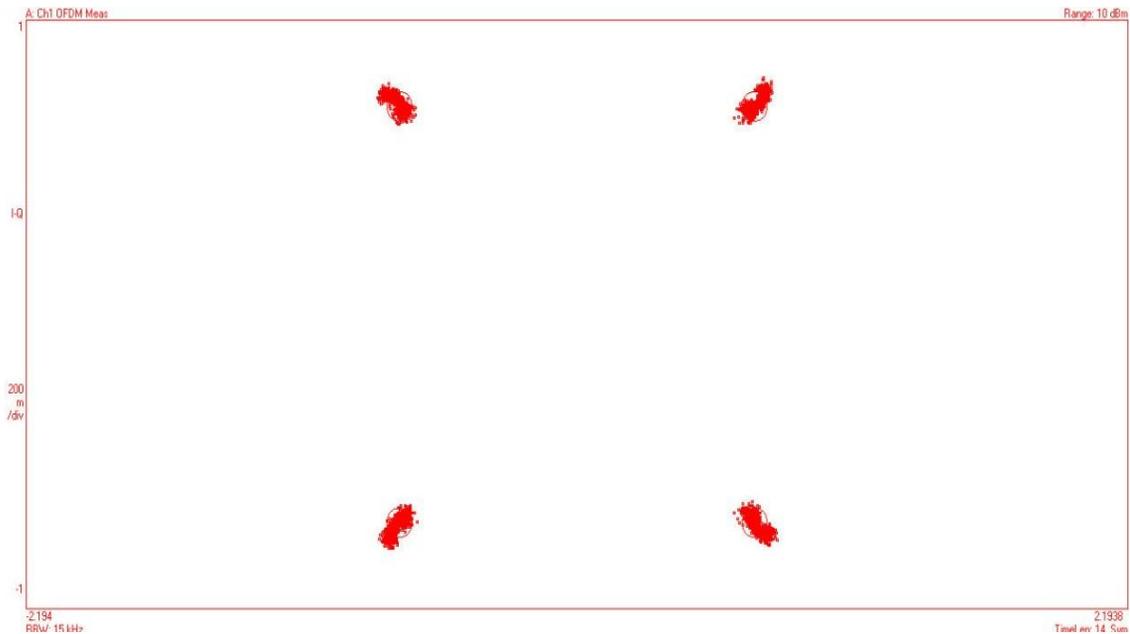


Figura 4.22. Constelación para QPSK con una SNR=36 dB.

La figura 4.23 muestra el diagrama de constelación para la modulación 16QAM con valor de SNR igual a 6 dB.

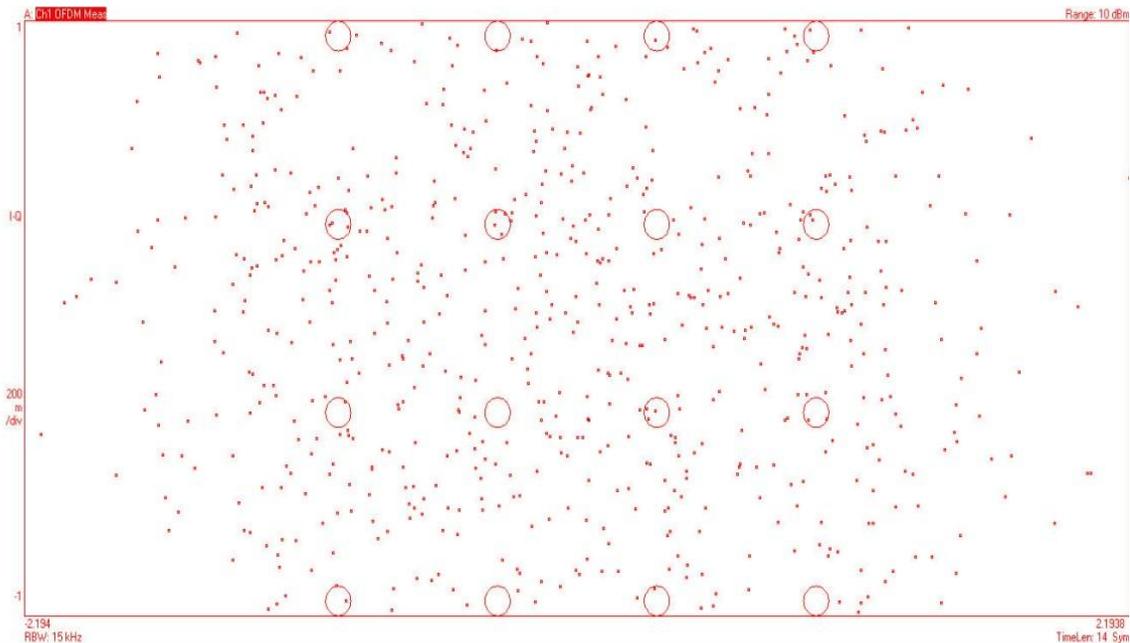


Figura 4.23. Constelación para 16QAM con una SNR=6 dB.

La figura 4.24 muestra el diagrama de constelación para la modulación 16QAM con valor de SNR igual a 36 dB.

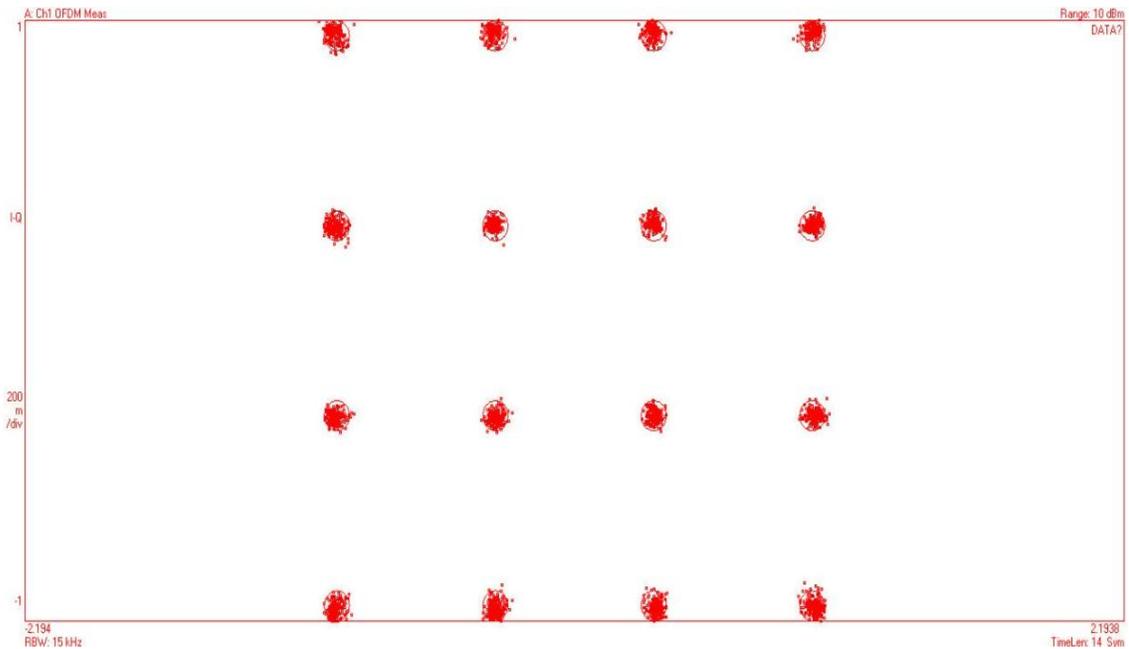


Figura 4.24. Constelación para 16QAM con una SNR=36 dB.

La figura 4.25 muestra el diagrama de constelación para la modulación 64QAM con valor de SNR igual a 6 dB.

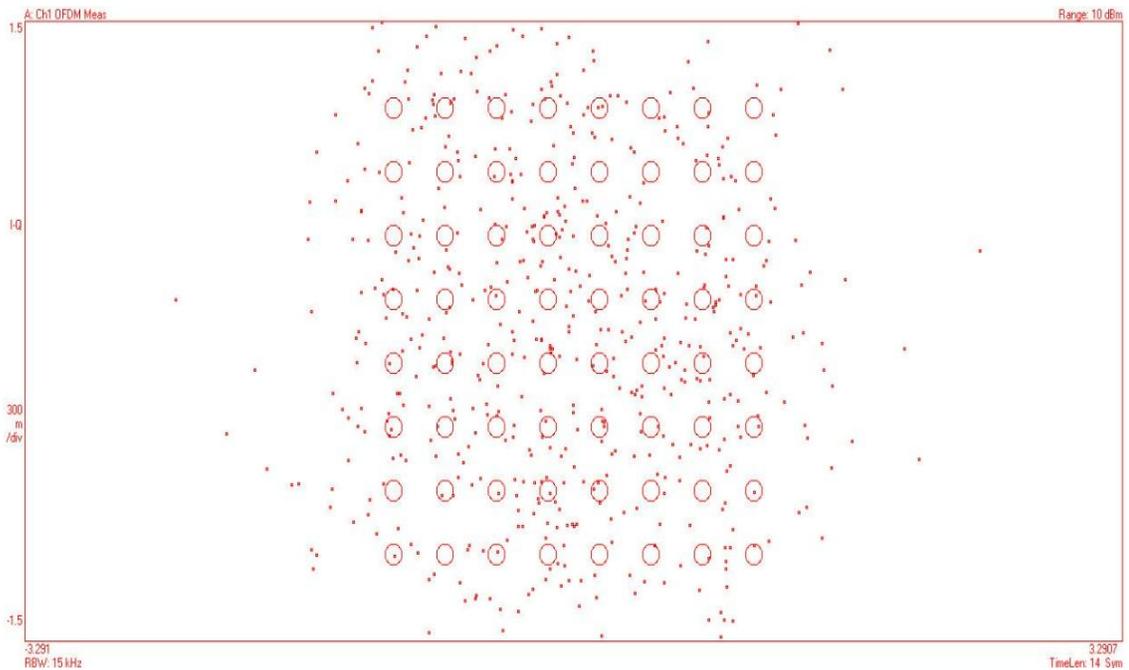


Figura 4.25. Constelación para 64QAM con una SNR=6 dB.



La figura 4.26 muestra el diagrama de constelación para la modulación 64QAM con valor de SNR igual a 36 dB.

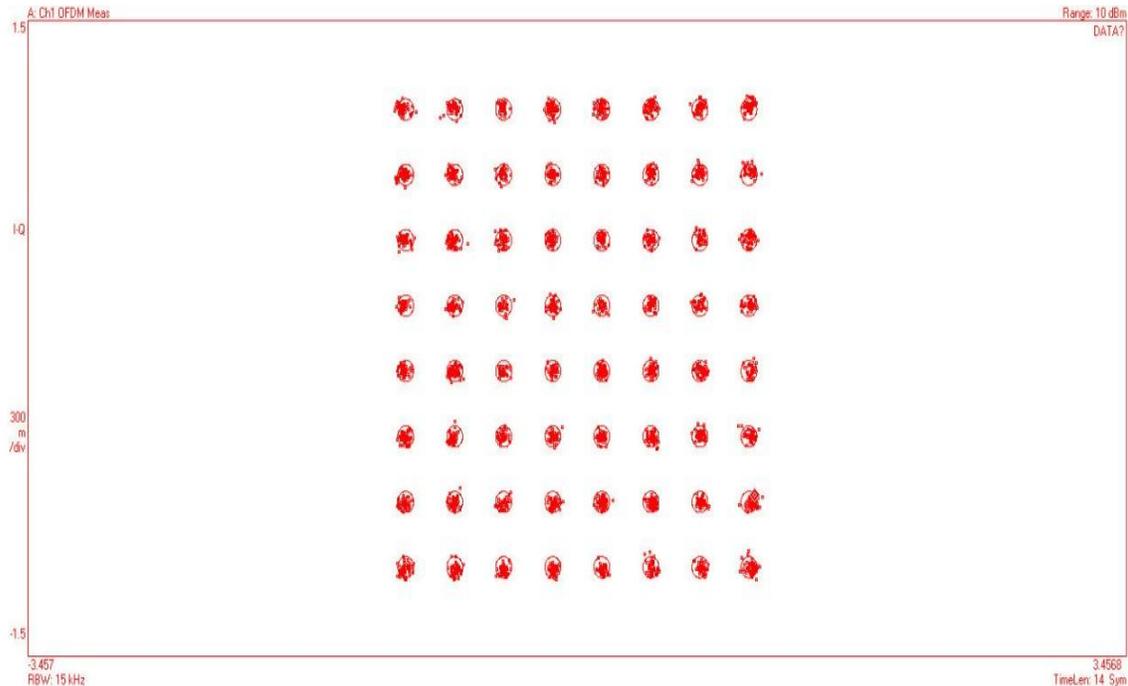


Figura 4.26. Constelación para 64QAM con una SNR=36 dB.

De las figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26 se concluye que:

- Cuando se presenta una baja SNR la constelación de símbolos se presenta más dispersa con relación a los símbolos de referencia. Sin embargo, si se aumenta la SNR la constelación se agrupa dentro de cada uno de los símbolos de referencia.
- Cuando se aumenta el orden de modulación, el diagrama de constelación se vuelve más complejo siendo el enlace más sensible al ruido, a los efectos de la multitrayectoria y a la ISI. Por lo tanto es necesario incrementar la SNR con el fin de evitar que se degrade el desempeño del enlace.
- Cuando se presenta una baja SNR, la portadora modulada es afectada en amplitud y fase por el ruido y la propagación multitrayecto.

4.5 ESCENARIO 5

Análisis del desempeño a nivel físico de LTE en el enlace de bajada - sistema SISO con ancho de banda de 15 MHz (75 RB), donde se analizan los modelos de canal multitrayecto EPA5 y ETU300 con modulación QPSK y 64QAM respectivamente. Los parámetros del escenario 5 se muestran en la tabla 4.20.



| Parámetro | Configuración Sistema 1 | Configuración Sistema 2 |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Modelo de canal | EPA5 | ETU300 |
| Modulación | QPSK | 64QAM |
| Anchos de Banda | 15 MHz (75 RB) | 15 MHz (75 RB) |
| Tasa de codificación | 1/3 | 1/3 |

Tabla 4.20. Parámetros para el escenario 4.

El objetivo de este escenario es analizar el sistema de mejor y peor desempeño en el enlace de bajada de LTE, teniendo en cuenta los valores de BER, BLER y *throughput*.

La tabla 4.21 muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR que cumple con la BLER objetivo de 0.1 especificada en el 3GPP [25].

| Canal | EPA5 | ETU300 |
|-------------------|----------------------|--------|
| Modulación | QPSK | 64QAM |
| BLER objetivo | 0.1 | 0.1 |
| SNR [dB] | 16.4 | -- |
| BER | 1.8×10^{-3} | -- |
| Throughput [Mbps] | 5.95 | -- |

Tabla 4.21. BLER, SNR, BER y *throughput* del escenario 5.

La tabla 4.22 muestra el valor de BLER más bajo en cada uno de los modelos de canal. Además se muestra la BER y el *throughput* para el valor de SNR teniendo en cuenta la BLER obtenida.

| Canal | EPA5 | ETU300 |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| Modulación | QPSK | 64QAM |
| BLER | 0.032 | 0.767 |
| SNR [dB] | 27 | 27 |
| BER | 46.63×10^{-6} | 3.502×10^{-3} |
| Throughput [Mbps] | 6.437 | 4.04 |

Tabla 4.22. Resultados para los canales del escenario 5.

La figura 4.27 muestra el comportamiento de la BLER para los canales multitrayecto EPA5 y ETU300, con modulación QPSK y 64QAM respectivamente y diferentes valores de SNR.

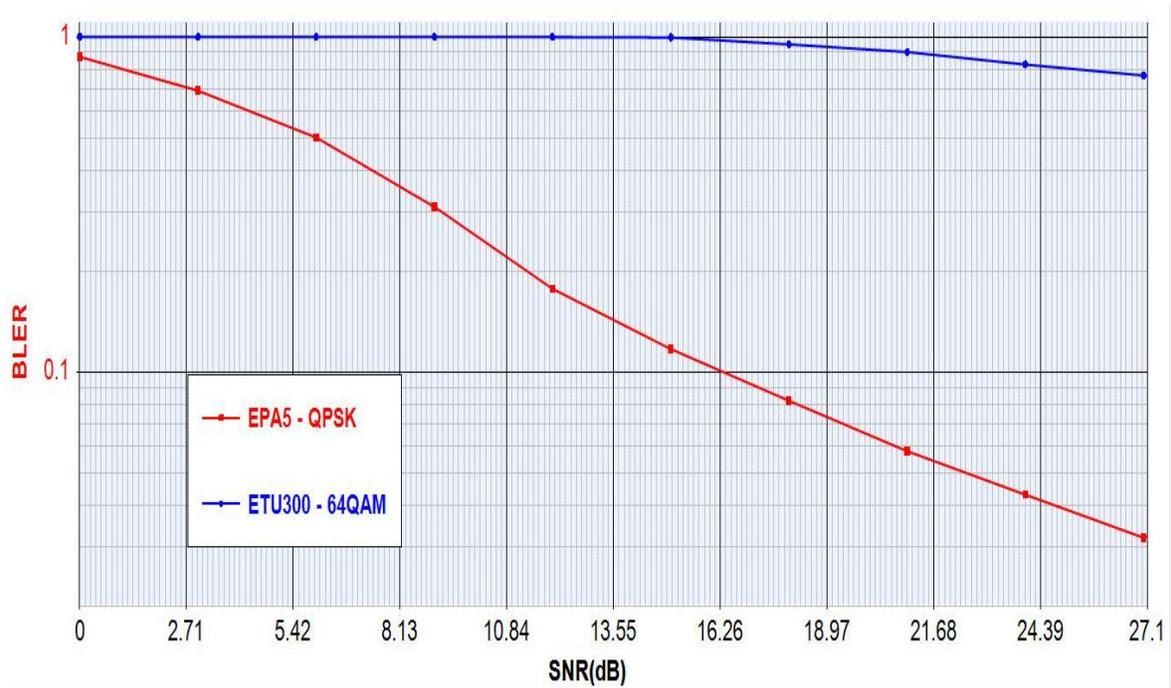


Figura 4.27. BLER vs SNR escenario 5.

De las tablas 4.21, 4.22 y la figura 4.27 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BLER objetivo (0.1) se alcanza para una SNR igual a 16.4 dB cuando se considera el canal EPA5 a diferencia del canal ETU300 que alcanza el valor más bajo de BLER igual a 0.767 con una SNR de 27 dB.
- El valor de BLER obtenida está por encima del 70% para cualquier valor de señal a ruido cuando se considera el canal ETU 300. Por lo tanto, se concluye que por ser un canal altamente dispersivo presenta altos niveles de error así se tenga una buena SNR.

La figura 4.28 muestra el desempeño en términos de BER para los canales multitrayecto EPA5 y ETU300, con modulación QPSK y 64QAM respectivamente y diferentes valores de SNR.

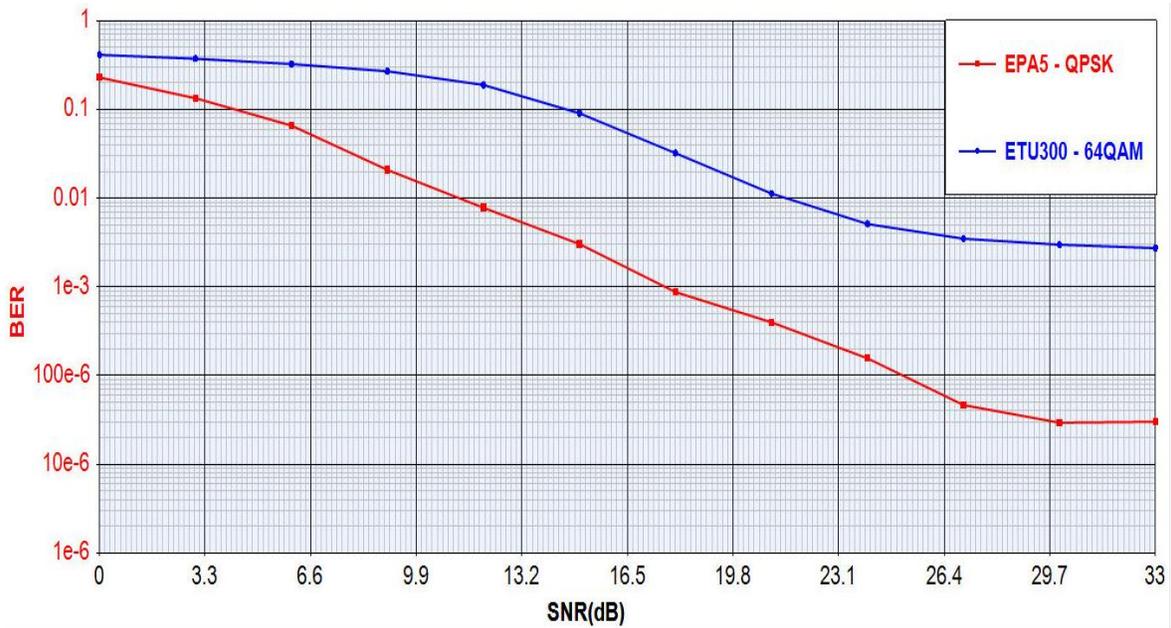


Figura 4.28. BER vs SNR escenario 5.

De la tabla 4.21 y la figura 4.28 se observan los siguientes resultados:

- El valor de BER donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 1.8×10^{-3} , para una SNR igual a 16.4 dB cuando se considera el canal multitrayecto EPA5.
- El menor valor de BER obtenido es de 29.5×10^{-6} cuando se considera el canal multitrayecto EPA5, a diferencia del canal ETU300 que alcanza el valor más bajo de BER igual a 2.7×10^{-3} . Por lo tanto, se concluye que el mayor número de bits erróneos se da en el canal ETU300.

La tabla 4.23 muestra los valores de *throughput* alcanzado en cada uno de los modelos de canal para diferentes valores de SNR.

| Canal \ SNR [dB] | EPA5 | ETU300 |
|------------------|------------|------------|
| 3 | 2.074 Mbps | 0 Mbps |
| 6 | 3.309 Mbps | 0 Mbps |
| 15 | 5.866 Mbps | 0 Mbps |
| 21 | 6.262 Mbps | 1.497 Mbps |
| 33 | 6.323 Mbps | 5.537 Mbps |

Tabla 4.23. *Throughput* para diferentes SNR en el escenario 5.



La figura 4.29 muestra el desempeño en términos de *throughput* para los canales multitrayecto EPA5 y ETU300, con modulación QPSK y 64QAM respectivamente y diferentes valores de SNR.

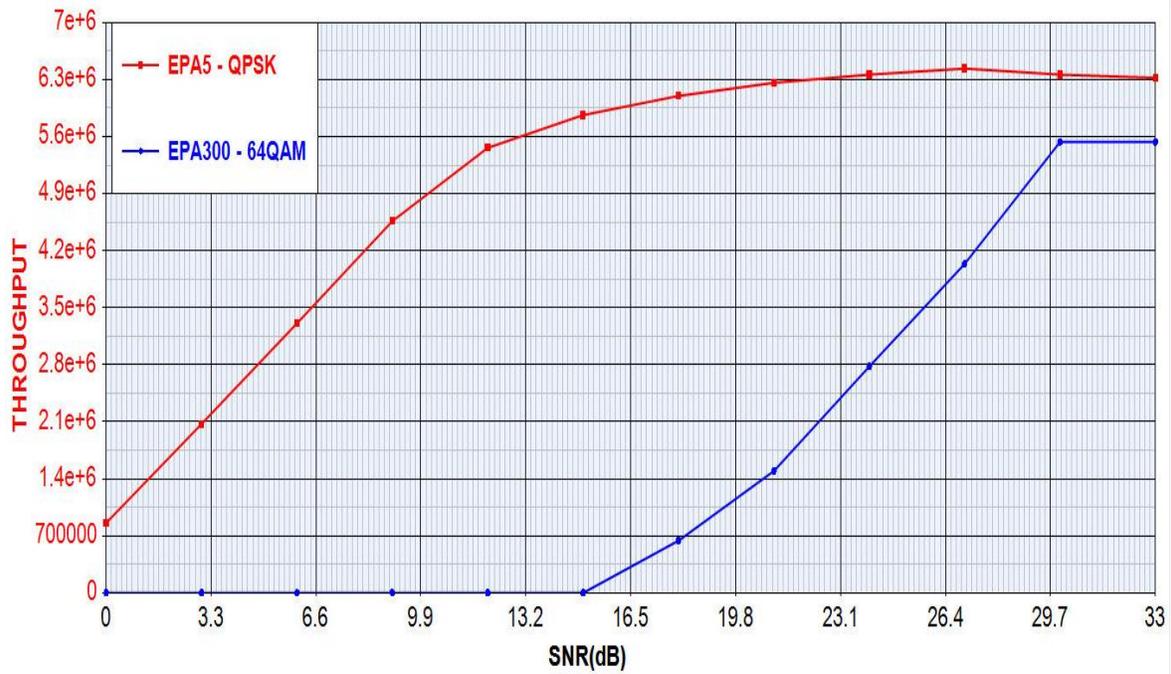


Figura 4.29. *Throughput* vs SNR escenario 5.

De las tablas 4.21, 4.23 y la figura 4.29 se observan los siguientes resultados:

- El valor de *throughput* donde se alcanza el valor de BLER objetivo (0.1) es igual a 5.95 Mbps para una SNR igual a 16.4 dB, cuando se considera el canal EPA5.
- El valor de *throughput* es igual a 2.074 Mbps, 3.309 Mbps y 5.866 Mbps para una SNR en el intervalo de 0 dB a 15 dB, cuando se considera el canal EPA5 a diferencia del canal multitrayecto ETU300 que presenta un valor de *throughput* igual a 0 Mbps.

A continuación se muestran los diagramas de constelación para cada tipo de modulación utilizada en este escenario.

La figura 4.30 muestra el diagrama de constelación para el canal EPA5, modulación QPSK con valor de SNR igual a 26 dB.

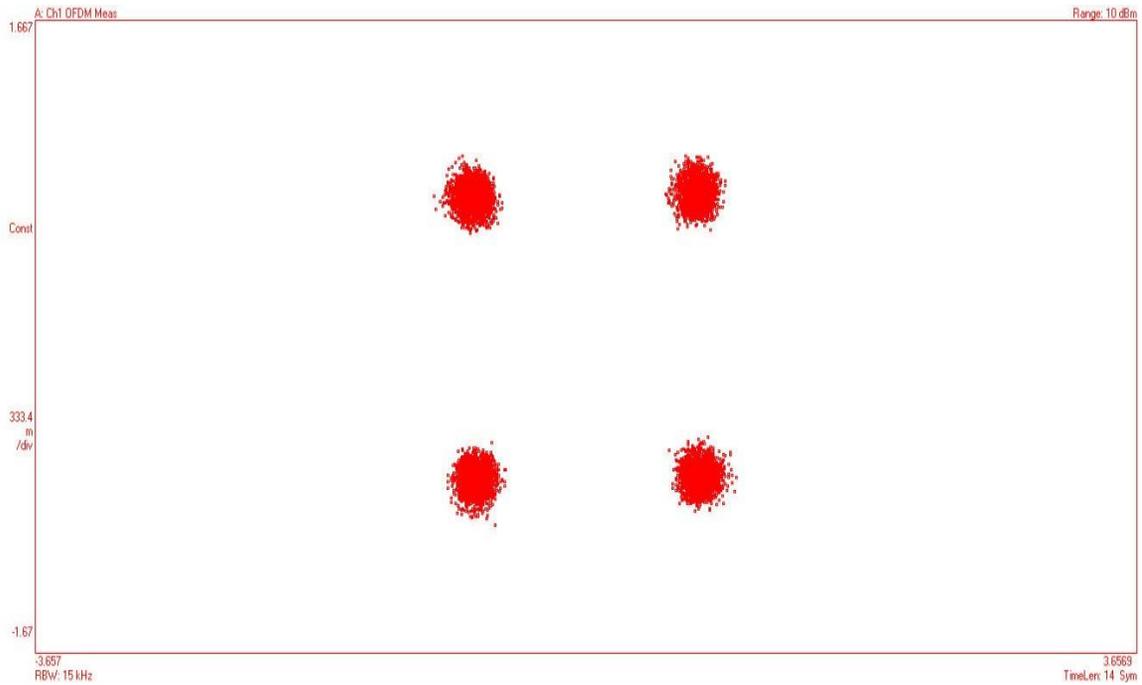


Figura 4.30. Constelación del canal EPA5 y modulación QPSK con una SNR=26 dB.

La figura 4.31 muestra el diagrama de constelación para el canal ETU300, modulación 64QAM con valor de SNR igual a 26 dB.

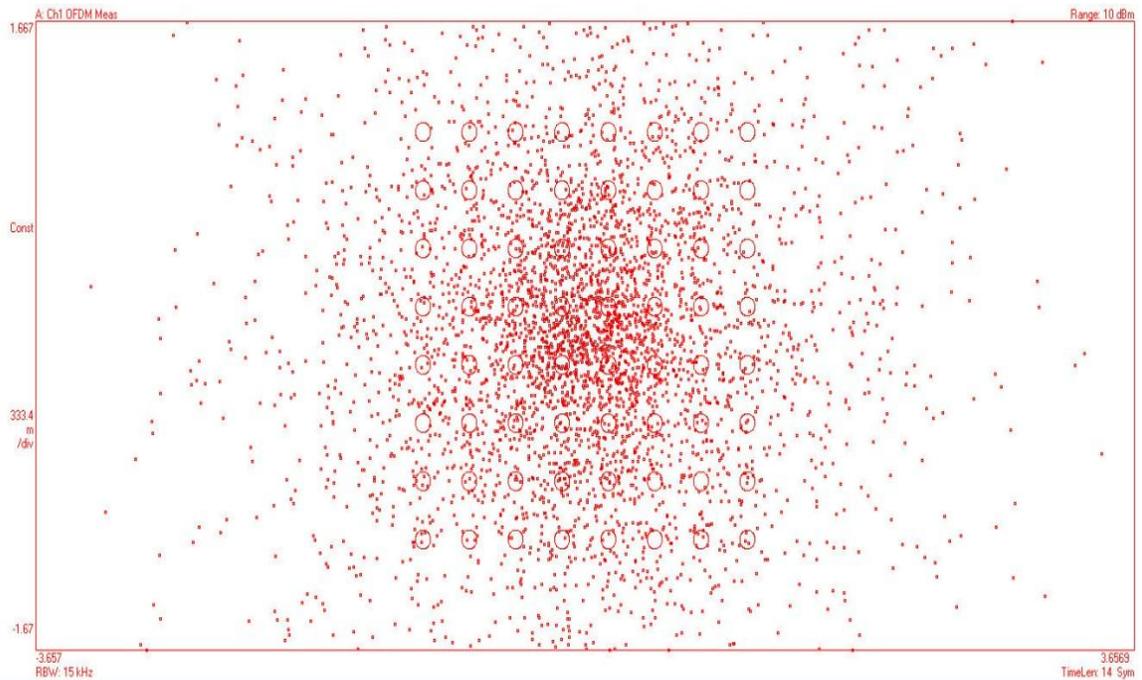


Figura 4.31. Constelación del canal ETU300 y modulación 64QAM con una SNR=26 dB.



De las figuras 4.30 y 4.31 se concluye que:

- El orden de modulación en un canal altamente dispersivo como ETU300 afecta notoriamente el desempeño en términos de BER, BLER y *throughput*. Ya que en la figura 4.31 se muestra la degradación de la constelación.
- También se puede observar que así se aumenta la SNR, la constelación para el canal ETU300 con modulación 64QAM no presenta mejora alguna. A diferencia del canal EPA5 con modulación QPSK donde la constelación se agrupa en cada uno de los símbolos de referencia.
- El modelo de canal multitrayecto ETU 300 presenta mayor dispersión en los puntos alrededor de los símbolos de referencia ocasionando que los puntos de la constelación generados en el transmisor cambien su posición al llegar al demodulador.



CAPÍTULO 5

TRABAJOS FUTUROS Y CONCLUSIONES

5.1 TRABAJOS FUTUROS

A continuación se presentan varias ideas de trabajos futuros con el fin de continuar con el presente trabajo de grado e integrar los resultados con los aportes generados hasta el momento.

- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE para el enlace de bajada con varios usuarios.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE para el enlace de bajada de LTE-Advanced en comparación con LTE *Release8*.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE para el enlace de bajada en modo TDD.
- Realizar un análisis de desempeño a nivel físico de LTE para el enlace de bajada en modo de trama FDD, con prefijo cíclico extendido y HARQ.
- Realizar un análisis de LTE a nivel físico incluyendo un sistema de múltiples antenas y analizar aspectos relacionados a la diversidad en transmisión y recepción.
- Realizar un análisis de la tecnología LTE y WIMAX donde se compare el desempeño a nivel físico de cada una.

5.2 CONCLUSIONES

- Al comparar los resultados de la simulación a nivel de enlace haciendo uso de los modelos de canal AWGN y multitrayecto, se tiene que el enlace con canal AWGN presenta un mejor desempeño en términos de BLER, BER y *throughput* en función del valor de SNR. Además el enlace con modelo de canal AWGN permitió lograr valores de BER y BLER iguales a 0.
- 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 EVA70, ETU70



y ETU300, los cuales consideran una velocidad de desplazamiento de 30.24 Km/h, 30.24 Km/h y 129.6 Km/h respectivamente.

- Similar a los resultados obtenidos en el enlace de subida [10], el desempeño en términos de BLER, BER y *throughput* para diferentes modelos de canal multitrayecto y modulaciones presentó, que la peor y mejor condición de propagación es con el canal de mayor dispersión ETU300 con modulación 64QAM y el canal de menor dispersión EPA5 con modulación QPSK respectivamente.
- En la simulación de un enlace SISO con modelos de canal multitrayecto EPA5 y ETU300 para diferentes esquemas de modulación, se observó que al aumentar la SNR, la cantidad de bits erróneos disminuyó considerablemente para el modelo de canal EPA5 y no para el canal ETU300, en este último debido a la mayor dispersión de los símbolos y la generación de ISI por multitrayectoria, cantidad de bits erróneos que no puede ser reducida con el incremento de la SNR.
- En el enlace SISO con modelo de canal multitrayecto ETU70 haciendo uso del esquema de modulación QPSK y tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 5/6, la tasa de 1/3 brinda el mejor desempeño en términos de BER y BLER, brindando un valor de BLER muy por debajo de la BLER objetivo. Esto implica que una mayor tasa de codificación afecta el desempeño del sistema en un enlace con modelo de canal multitrayecto, debido a la adición de bits de redundancia que facilita la detección y corrección de errores en recepción.
- La adaptación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, permitió obtener el modelo de simulación del enlace, mediante la definición de forma clara de los objetivos, fases y actividades, facilitando la implementación y el análisis del modelo de simulación y sus resultados haciendo uso de la herramienta SystemVue®.
- SystemVue es una herramienta de simulación que posibilita el estudio de varias tecnologías entre ellas LTE. SystemVue brindó la posibilidad de implementar los bloques funcionales necesarios para analizar el desempeño a nivel físico de LTE teniendo en cuenta las especificaciones del *Release 8* del 3GPP.



REFERENCIAS

- [1] LTE Encyclopedia. [En línea]. Disponible: <http://sites.google.com/site/lteencyclopedia>. [Citado: Abril 2012].
- [2] Agilent SystemVue 2011.03 Free Trial [En línea]. Disponible en: http://edocs.soco.agilent.com/display/support/SystemVue+Downloads?cmpid=zzfind_ezzfi-systemvue-latest-downloads [Citado Abril 2012].
- [3] R. Agusti, F. Álvarez, F. Casadevall, R. ferrús, J. Perez, O. Sallent. “LTE: Nuevas Tendencias en Telecomunicaciones Móviles.” Fundación Vodafone, primera edición, 2010.
- [4] C. Mehlführer, M. Wrulich, I. J. Colom, D. Bosanska y M. Rupp, “Simulating the Long Term Evolution Physical Layer,” Artículo. Vienna University of Technology, Vienna, Austria, Agosto 2009. [Citado: Abril de 2012].
- [5] H. Holma, A. Toskala, “LTE for UMTS, OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access.” Inglaterra, Wiley, 2009.
- [6] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, “4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband.” Elsevier, primera edición, 2011.
- [7] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, “LTE, The UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice.” Wiley, Edición 2009.
- [8] Agilent Technologies, “LTE and the Evolution to 4G Wireless Design and Measurement Challenges.” Wiley, Edición 2009.
- [9] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Physical Channels and Modulation.” (*Release 8*) [En línea]. Disponible en: http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36211-890.zip [Citado Mayo 2012].
- [10] J. Martínez, J. Covalada, “Análisis de Desempeño al Nivel Físico del Enlace de Subida de LTE,” tesis de pregrado, Ingeniería electrónica y telecomunicaciones, universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [11] J. F. Restrepo, “Análisis y estudio técnico de la transferencia de tecnología para la prestación de servicios de telefonía y banda ancha móvil en Colombia a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnología LTE,” tesis de maestría, Ingeniería electrónica y telecomunicaciones, universidad Nacional, Colombia, 2011.



- [12] P. Acuña, F. Montealegre, M. Salas, J. P. Salazar, “Propuesta de Requerimientos Técnicos para la Implementación de Redes móviles con la Tecnología LTE en Costa Rica.” Universidad de Costa Rica, 2010.
- [13] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “specification 36-series” (Release 8) [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm>. [Citado Octubre 2012].
- [14] T. A. Yahiya, “Understanding LTE and its Performance.” Francia, Springer, 2011.
- [15] N. A. López, “Efecto de las Redes de Cuarta Generación (LTE) en los Servicios Móviles en Chile.” Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2011.
- [16] C. G. Hurtado, “Estudio de Factibilidad para la Implementación de LTE (*Long Term Evolution*) en el Ecuador.” Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, 2011.
- [17] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Multiplexing and Channel Coding” [En línea]. Disponible: http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36212-880.zip [Citado Mayo 2012].
- [18] B. Furht, “Long Term Evolution 3GPP LTE Radio and Cellular Technology” Editorial CRC, edición 2009.
- [19] F. Khan “LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance.” Cambridge, New York, Edición 2009.
- [20] Telefónica, “LTE desde el punto de vista técnico: un par de apuntes.” Artículo de la Sociedad de la Información. [En línea]. Disponible: http://sociedadinformacion.fundacion.telefonica.com/DYC/SHI/seccion=1188&idioma=es_ES&id=2009100116310160&activo=4.do?elem=7449. [Consultado: Abril, 2012].
- [21] M. B. Elghonamy, “Long Term Evolution (LTE): The Way for Future Starts Here.” Proyecto Universidad de Alejandria, Egipto, 2009-2010.
- [22] C. Muñoz y J. Muñoz, “Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones,” Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 1995.
- [23] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Base Station (BS) radio



- transmission and reception.” (Release 8) [En línea]. Disponible: http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36104-870.zip [Citado Abril 2012].
- [24] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, “Terminal Conformance Specification, Radio Transmission and Reception (FDD),” (Release 6) [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/34_series/34.121 [Citado Julio 2012].
- [25] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): User Equipment (UE) radio transmission and reception.” (Release 8) [En línea]. Disponible: http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36101-860.zip [Citado Abril 2012].
- [26] N. V. Orozco, “Estudio de Factibilidad para la Migración del Sistema Móvil.” Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí Ecuador, 2011.
- [27] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Physical Layer Procedures” (Release 8) [En línea]. Disponible: http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36213-880.zip [Citado Junio 2012].
- [28] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Evolved Universal Radio Access Network (E-UTRA): Physical Layer Measurements” (Release 8) [En línea]. Disponible: http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/36_series/36214-870.zip [Citado Junio 2012].