

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL DE SISTEMA DE LA TECNOLOGÍA LTE  
MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN LTE-AMoRE®**



**JOSÉ FRANCISCO CONDE CASTRO  
JAIME HERNANDO VILLAMUEZ ROSERO**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
GRIAL - Grupo de Radio e InALámbricas  
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio  
Popayán  
2013**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL DE SISTEMA DE LA TECNOLOGÍA LTE  
MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN LTE-AMoRE®**



**JOSÉ FRANCISCO CONDE CASTRO  
JAIME HERNANDO VILLAMUEZ ROSERO**

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones

**Director  
VÍCTOR MANUEL QUINTERO FLÓREZ**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
GRIAL - Grupo de Radio e InALámbricas  
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio  
Popayán  
2013**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1 ARQUITECTURA DE LA TECNOLOGÍA LTE .....	5
1.1 EVOLUCIÓN DE LA ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL CELULAR .....	5
1.2 REQUERIMIENTOS 3GPP PARA LTE .....	5
1.3 GENERALIDADES DE LA ARQUITECTURA LTE/SAE .....	6
1.3.1 Equipo de usuario .....	7
1.3.2 E-UTRAN nodo B .....	7
1.3.3 Núcleo de red de paquetes evolucionado .....	9
1.3.4 Operador de servicios.....	10
1.4 ASPECTOS RADIO DE LA TECNOLOGÍA LTE.....	10
1.4.1 Tecnologías de acceso .....	10
1.4.2 Sistema de múltiples entradas múltiples salidas .....	13
1.4.3 Estructura de trama de LTE.....	15
1.4.4 Ancho de banda de transmisión.....	17
1.4.5 Niveles/Subniveles y protocolos de la interfaz radio de LTE .....	17
2 SIMULACIÓN DE UNA RED LTE .....	23
2.1 PLAN DE ESTUDIO DE LOS PARAMETROS PARA LA SIMULACIÓN DE UNA RED LTE.....	23
2.1.1 Parámetros del sistema en el enlace de bajada .....	24
2.1.2 Parámetros del sistema en el enlace de subida .....	25
2.1.3 Parámetros globales del sistema .....	26
2.2 INDICADORES DE DESEMPEÑO DE UNA RED LTE .....	27
2.2.1 Indicadores de desempeño seleccionados .....	27
2.2.2 Indicadores de desempeño del enlace de bajada .....	27
2.2.3 Indicadores de desempeño del enlace de subida .....	31
2.3 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	33
2.4 RESTRICCIONES DE LA HERRAMIENTA .....	34

<b>3</b>	<b>PLAN DE PRUEBAS, EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA LTE MEDIANTE EL USO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACION LTE-AMoRE®</b> .....	<b>35</b>
3.1	PLAN DE PRUEBAS PARA CADA UNA DE LAS SIMULACIONES.....	35
3.2	EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO EN EL ESCENARIO I .....	40
3.2.1	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada .....	41
3.2.2	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de bajada .....	43
3.2.3	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada .....	43
3.2.4	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada .....	45
3.2.5	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada .....	46
3.2.6	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de subida .....	48
3.2.7	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de subida .....	50
3.2.8	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de subida .....	50
3.2.9	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de subida .....	53
3.2.10	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de subida .....	55
3.3	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN EL ESCENARIO II .....	57
3.3.1	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada .....	57
3.3.2	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de bajada .....	59
3.3.3	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada .....	59
3.3.4	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada .....	61
3.3.5	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada .....	62



3.3.6	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de subida .....	64
3.3.7	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de subida .....	65
3.3.8	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de subida .....	66
3.3.9	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de subida .....	68
3.3.10	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de subida .....	69
3.4	<b>EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN EL ESCENARIO III .....</b>	<b>71</b>
3.4.1	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada .....	72
3.4.2	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada .....	73
3.4.3	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada .....	74
3.4.4	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada .....	75
3.4.5	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de subida .....	76
3.4.6	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de subida .....	77
3.4.7	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de subida .....	78
3.4.8	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de subida .....	79
3.5	<b>EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE MIMO .....</b>	<b>80</b>
3.5.1	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada .....	80
3.5.2	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de bajada .....	83
3.5.3	Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada .....	83
3.5.4	Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada .....	84

3.5.5	Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada .....	85
3.6	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO .....	87
4	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	91
4.1	CONCLUSIONES.....	91
4.2	TRABAJOS FUTUROS.....	93
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	94

## LISTA DE IMÁGENES

Figura 1.1. Elementos principales del sistema LTE/SAE.....	6
Figura 1.2. Red de acceso E-UTRAN .....	8
Figura 1.3. Funciones principales del eNB y relaciones con otros nodos lógicos.....	8
Figura 1.4. Diagrama en bloques de un sistema OFDMA .....	11
Figura 1.5. Funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA.....	13
Figura 1.6. Sistemas de antenas .....	15
Figura 1.7. Estructura de trama de LTE .....	16
Figura 1.8. Asignación de recursos en el enlace de bajada .....	16
Figura 1.9. Asignación de recursos en el enlace de subida .....	17
Figura 1.10. Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN .....	18
Figura 1.11. Segmentación y ensamblado RLC.....	20
Figura 1.12. Tipos de canales de E-UTRAN .....	21
Figura 2.1. Metodología de Simulación.....	23
Figura 2.2. Ventana de selección de gráficas del enlace de bajada .....	28
Figura 2.3. Ventana de selección de gráficas del enlace de subida .....	32
Figura 3.1. Escenario para la Evaluación de los Algoritmos de Planificación de Paquetes .....	36
Figura 3.2. Asignación de Recursos del Maximum Rate .....	37
Figura 3.3. Asignación de Recursos del Round Robin .....	37
Figura 3.4. Asignación de Recursos del Proportional Fair.....	37
Figura 3.5. Ubicación de los UEs en el escenario I .....	39
Figura 3.6. Ubicación de los UEs en el escenario II .....	39
Figura 3.7. Ubicación de los UEs en el escenario III .....	40
Figura 3.8. Ubicación de los UEs en el escenario IV .....	40
Figura 3.9. Throughput total de la celda en el enlace de bajada en el escenario I .....	41
Figura 3.10. Throughput de cada UE en el enlace de bajada en el escenario I.....	42
Figura 3.11. Retardo de transmisión en el enlace de bajada en el escenario I.....	42
Figura 3.12. Porcentaje de pérdidas de PDUs en el enlace de bajada en el escenario I..	43
Figura 3.13. Asignación de recursos en el enlace de bajada en el escenario I .....	44
Figura 3.14. Throughput a subnivel MAC en el enlace de bajada en el escenario I .....	44
Figura 3.15. Tamaño de las PDUs en el enlace de bajada en el escenario I.....	45
Figura 3.16. SINR efectiva en el enlace de bajada en el escenario I.....	45
Figura 3.17. SINR efectiva suavizada en el enlace de bajada en el escenario I.....	46
Figura 3.18. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de transmisiones... en el enlace de bajada en el escenario I.....	46
Figura 3.19. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada... en el escenario I .....	47

Figura 3.20. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta..... transmisión en el enlace de bajada en el escenario I.....	48
Figura 3.21. Throughput total de la celda en el enlace de subida en el escenario I.....	48
Figura 3.22. Throughput de cada UE en el enlace de subida en el escenario I.....	49
Figura 3.23. Retardo de transmisión en el enlace de subida en el escenario I.....	50
Figura 3.24. Porcentaje de pérdidas PDU en el enlace de subida en el escenario I.....	50
Figura 3.25. Asignación de recursos en el enlace de subida en el escenario I.....	51
Figura 3.26. Throughput a subnivel MAC en el enlace de subida en el escenario I.....	51
Figura 3.27. Tamaños de las PDUs en el enlace de subida en el escenario I.....	52
Figura 3.28. Potencia de transmisión de cada UE en el enlace de subida..... en el escenario I.....	52
Figura 3.29. Potencia de transmisión por RB en el enlace de subida en el escenario I....	53
Figura 3.30. Valor SINR pico en el enlace de subida en el escenario I.....	53
Figura 3.31. SINR efectiva en el enlace de subida en el escenario I.....	54
Figura 3.32. SINR Efectiva suavizada en el enlace de subida en el escenario I.....	54
Figura 3.33. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de retransmisiones en el enlace de subida en el escenario I.....	55
Figura 3.34. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de subida..... en el escenario I.....	56
Figura 3.35. Tasa de error H-ARQ después de la primera y segunda transmisión en el..... enlace de subida en el escenario I.....	56
Figura 3.36. Throughput Total de la Celda en el enlace de bajada en el escenario II.....	58
Figura 3.37. Throughput de cada UE en el enlace de bajada en el escenario II.....	58
Figura 3.38. Retardo de transmisión en el enlace de bajada en el escenario II.....	59
Figura 3.39. Porcentaje de pérdidas PDUs en el enlace de bajada en el escenario II.....	59
Figura 3.40. Asignación de recursos en el enlace de bajada en el escenario II.....	60
Figura 3.41 Throughput a subnivel MAC en el enlace de bajada en el escenario II.....	60
Figura 3.42. Tamaños de las PDUs en el enlace de bajada en el escenario II.....	61
Figura 3.43. SINR efectiva en el enlace de bajada en el escenario II.....	61
Figura 3.44. SINR efectiva suavizada en el enlace de bajada en el escenario II.....	62
Figura 3.45. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de transmisiones... en el enlace de bajada en el escenario II.....	62
Figura 3.46. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada en el..... escenario II.....	63
Figura 3.47. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta..... transmisión en el enlace de bajada en el escenario II.....	64
Figura 3.48. Throughput total de la celda en el enlace de subida en el escenario II.....	64
Figura 3.49. Throughput de cada UE en el enlace de subida en el escenario II.....	65
Figura 3.50. Retardo de transmisión en el enlace de subida en el escenario II.....	65
Figura 3.51. Porcentaje de pérdidas de PDUs en el enlace de subida en el escenario II.	67
Figura 3.52. Asignación de recursos en el enlace de subida en el escenario II.....	67
Figura 3.53. Potencia de transmisión total en el enlace de subida en el escenario II.....	67

Figura 3.54. Potencia de transmisión por RB en el enlace de subida en el escenario II...	67
Figura 3.55. Throughput a subnivel MAC en el enlace de subida en el escenario II.....	67
Figura 3.56. Tamaños de las PDUs en el enlace de subida en el escenario II .....	68
Figura 3.57. Valor SINR pico en el enlace de subida en el escenario II .....	68
Figura 3.58. SINR efectiva en el enlace de subida en el escenario II.....	69
Figura 3.59. SINR efectiva suavizada en el enlace de subida en el escenario II.....	69
Figura 3.60. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de transmisiones en el enlace de subida en el escenario II .....	70
Figura 3.61. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de subida en el.....	70
Figura 3.62. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta..... transmisión en el enlace de subida en el escenario II .....	71
Figura 3.63. Throughput total de la celda en el enlace de bajada en el escenario III .....	72
Figura 3.64. Throughput de cada UE en el enlace de bajada en el escenario III.....	72
Figura 3.65. Retardo de transmisión en el enlace de bajada en el escenario III.....	73
Figura 3.66. Throughput a subnivel MAC en el enlace de bajada en el escenario III .....	73
Figura 3.67. Tamaños de las PDUs en el enlace de bajada en el escenario III.....	74
Figura 3.68. SINR efectiva suavizada en el enlace de bajada en el escenario III.....	74
Figura 3.69. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta..... transmisión en el enlace de bajada en el escenario III .....	75
Figura 3.70. Throughput total de la celda en el enlace de subida en el escenario III.....	76
Figura 3.71. Throughput de cada UE en el enlace de subida en el escenario III .....	76
Figura 3.72. Retardo de transmisión en el enlace de subida en el escenario III.....	77
Figura 3.73. Potencia de transmisión total en el enlace de subida en el escenario III .....	77
Figura 3.74. Potencia de transmisión por RB en el enlace de subida en el escenario III..	78
Figura 3.75. Tamaños de las PDUs en el enlace de subida en el escenario III .....	78
Figura 3.76. SINR efectiva suavizada en el enlace de subida en el escenario III .....	78
Figura 3.77. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta..... transmisión en el enlace de subida en el escenario III .....	79
Figura 3.78. Throughput total de la celda con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de..... bajada.....	81
Figura 3.79. Throughput de cada UE con MIMO 2x2 y MIMO 4x4..... en el enlace de bajada.....	81
Figura 3.80. Retardo de transmisión con MIMO 2x2 y MIMO 4x4..... en el enlace de bajada.....	82
Figura 3.81. Porcentaje de pérdidas de PDUs con MIMO 2x2 y MIMO 4x4..... en el enlace de bajada.....	83
Figura 3.82. Tamaños de las PDUs con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace..... de bajada.....	86
Figura 3.83. SINR efectiva suavizada con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace..... de bajada.....	86
Figura 3.84. Tasa de error H-ARQ después de la primera transmisión con MIMO 2x2 y..... MIMO 4x4 en el enlace de bajada .....	86

Figura 3.85. Tasa de error H-ARQ después de la segunda transmisión con MIMO 2x2 y.....  
MIMO 4x4 en el enlace de bajada ..... 87

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Anchos de banda soportados en LTE .....	17
Tabla 2.1. Indicadores seleccionados para su visualización en el enlace de bajada .....	28
Tabla 2.2. Relación entre esquema de modulación, tasa de codificación y eficiencia espectral .....	30
Tabla 2.3. Indicadores seleccionados para su visualización en el enlace de subida .....	32
Tabla 3.1. Parámetros del enlace de bajada .....	38
Tabla 3.2. Parámetros del enlace de subida .....	38
Tabla 3.3. Parámetros globales del sistema .....	39
Tabla 3.4 Indicadores para los UEs con condiciones de canal favorables .....	88
Tabla 3.5 Indicadores para los UEs con condiciones de canal desfavorables .....	88
Tabla 3.6 Indicadores para los UEs con condiciones de canal favorables .....	89
Tabla 3.7 Indicadores para los UEs con condiciones de canal desfavorables .....	89

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>16-QAM</b>	<i>16-State Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación por Amplitud en Cuadratura de 16 Estados.
<b>64-QAM</b>	<i>64-State Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación por Amplitud en Cuadratura de 64 Estados.
<b>1G</b>	<i>First Generation</i> , Primera Generación.
<b>2G</b>	<i>Second Generation</i> , Segunda Generación.
<b>3G</b>	<i>Third Generation</i> , Tercera Generación.
<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i> , Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación.
<b>4G</b>	<i>Fourth Generation</i> , Cuarta Generación.
<b>ADSL</b>	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital Asimétrica.
<b>AMC</b>	<i>Adaptative Modulation and Coding</i> , Modulación y Codificación Adaptativa.
<b>AMoRE</b>	<i>Advanced Mobile Radio Realtime Experience</i> .
<b>AWGN</b>	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bits.
<b>BLER</b>	<i>Block Error Rate</i> , Tasa de Error de Bloques.
<b>BS</b>	<i>Base Station</i> , Estación Base.
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i> , Controlador de la Estación Base.
<b>CAPEX</b>	<i>Capital Expenditures</i> , Costos de Inversión.
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso al Medio por División de Código.
<b>CS</b>	<i>Circuit Switching</i> , Conmutación de Circuitos.
<b>CSI</b>	<i>Channel Status Information</i> , Información del Estado del Canal.
<b>CP</b>	<i>Control Plane</i> , Plano de Control.
<b>DFT</b>	<i>Discrete Fourier Transform</i> , Transformada de Fourier Discreta.
<b>DVB-T</b>	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i> , Difusión de Video Digital-Terrestre.
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> , Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS Evolucionada.
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> , Velocidades de Transmisión de Datos Mejoradas para Evolución GSM.
<b>eNB</b>	<i>Evolved NodeB</i> , Nodo B Evolucionado.
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Red de Paquetes Evolucionado.
<b>EPM</b>	Empresas Públicas de Medellín.
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System</i> , Sistema de Paquetes Evolucionado.
<b>EVA</b>	<i>Extended Vehicular A</i> , Modelo Vehicular A Extendido.
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Frecuencia.
<b>FIET</b>	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i> , Servicio General de Paquetes Vía Radio.
<b>GRIAL</b>	Grupo de Radio e InALámbricas.
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communication</i> , Sistema Global para Comunicaciones Móviles.



<b>GUTI</b>	<i>Global Unique Temporary Identity</i> , Identidad Única Temporal Global.
<b>H-ARQ</b>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> , Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida.
<b>HII</b>	<i>High-Interference Indicator</i> , Indicador de Alta Interferencia.
<b>HO</b>	<i>Handover</i> , Traspaso.
<b>HSPA</b>	<i>High Speed Packet Access</i> , Acceso a Paquetes de Alta Velocidad.
<b>HSS</b>	<i>Home Subscription Server</i> , Servidor de Suscriptores Locales.
<b>IETF</b>	<i>Internet Engineering Task Force</i> , Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet.
<b>IFFT</b>	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier Inversa.
<b>IMS</b>	<i>IP Multimedia Subsystem</i> , Subsistema Multimedia IP
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
<b>IPv4</b>	<i>Internet Protocol version 4</i> , Protocolo de Internet Versión 4.
<b>IPv6</b>	<i>Internet Protocol version 6</i> , Protocolo de Internet Versión 6.
<b>ISI</b>	<i>Inter Symbol Interference</i> , Interferencia entre Símbolos.
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución de Largo Término.
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
<b>MCS</b>	<i>Modulation and Coding Scheme</i> , Esquema de Modulación y Codificación.
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiples Entradas Múltiples Salidas.
<b>MISO</b>	<i>Multiple Input Single Output</i> , Múltiples Entradas Única Salida.
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i> , Entidad de Gestión de Movilidad.
<b>NAS</b>	<i>Non Access Stratum</i> , Nivel de no Acceso.
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>OPEX</b>	<i>Operating Expense</i> , Costos de Operación.
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
<b>P-GW</b>	<i>Packet Data Network Gateway</i> , Puerta de Enlace de la Red de Paquetes de Datos.
<b>PAPR</b>	<i>Peak to Average Power Ratio</i> , Relación de Potencia Pico a Potencia Promedio.
<b>PCC</b>	<i>Policy and Charging Control</i> , Control de Políticas y Tarificación.
<b>PCRF</b>	<i>Policy and Charging Resources Function</i> , Función de Políticas y Tarificación de Recursos.
<b>PDCP</b>	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos.
<b>PDU</b>	<i>Protocol Data Unit</i> , Unidad de Datos de Protocolo.
<b>PS</b>	<i>Packet Switching</i> , Conmutación de Paquetes.
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación por Amplitud en Cuadratura.
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.

<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
<b>R8</b>	<i>Release 8</i> , Especificación 8.
<b>R10</b>	<i>Release 10</i> , Especificación 10.
<b>RACH</b>	<i>Random Access Channel</i> , Canal de Acceso Aleatorio.
<b>RB</b>	<i>Resource Block</i> , Bloque de Recursos.
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
<b>RI</b>	<i>Radio Interface</i> , Interfaz Radio.
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i> , Control de Enlace Radio.
<b>RN</b>	<i>Relay Node</i> , Nodo Repetidor.
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i> , Controlador de la Red Radio.
<b>RRC</b>	<i>Radio Resource Control</i> , Control de Recursos Radio.
<b>RRM</b>	<i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
<b>RS</b>	<i>Reference Signal</i> , Señal de Referencia.
<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway</i> , Puerta de Enlace de Servicio.
<b>SAE</b>	<i>Service Architecture Evolution</i> , Evolución de la Arquitectura del Sistema.
<b>SC</b>	<i>Single Carrier</i> , Única Portadora.
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única.
<b>SCS</b>	<i>Scheduling Candidate Set</i> , Conjunto Candidato de Planificación.
<b>SDU</b>	<i>Service Data Unit</i> , Unidad de Datos del Servicio.
<b>SIMO</b>	<i>Single Input Multiple Output</i> , Única Entrada Múltiples Salidas.
<b>SINR</b>	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido más Interferencia.
<b>SIP</b>	<i>Session Initiation Protocol</i> , Protocolo de Iniciación de Sesión.
<b>SISO</b>	<i>Single Input Single Output</i> , Única Entrada Única Salida.
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
<b>TBS</b>	<i>Transport Block Size</i> , Tamaño de los Bloques de Transporte.
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
<b>TTI</b>	<i>Transmission Time Interval</i> , Intervalo de Tiempo de Transmisión.
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
<b>UNE</b>	Unidad de Negocios Estratégicos.
<b>UP</b>	<i>User Plane</i> , Plano de Usuario.
<b>UTRAN</b>	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> , Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS.
<b>VoIP</b>	<i>Voice over Internet Protocol</i> , Voz sobre Protocolo de Internet.
<b>WiMAX</b>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.

## INTRODUCCIÓN

Usualmente el servicio de banda ancha ha sido brindado por medio de tecnologías cableadas, debido a que estas brindan mayores velocidades de transmisión de datos en comparación con tecnologías inalámbricas y móviles. En los últimos años el despliegue de redes inalámbricas avanzadas ha brindado a los usuarios mejores características de prestación del servicio en comparación con tecnologías anteriores, sin importar el lugar y momento donde se encuentren, siempre y cuando estos se encuentren dentro del área de cobertura, exhibiendo ventajas de operación relacionadas a la movilidad, escalabilidad y flexibilidad. A raíz de esto, diversos grupos de investigación, organizaciones y fabricantes alrededor del mundo se encuentran estudiando y analizando nuevos estándares de acceso inalámbrico, con el fin de implementar sistemas que permitan ofrecer mayores velocidades de transmisión de datos, menor latencia y mayor eficiencia espectral.

La tecnología de comunicación móvil Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*), se basa en un conjunto de especificaciones técnicas definidas por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) a través de la Especificación 8 (R8, *Release 8*). LTE cuenta con una Interfaz Radio (RI, *Radio Interface*) que permite un eficiente y flexible manejo del espectro radioeléctrico, permitiendo seleccionar diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación de acuerdo a las condiciones del enlace o del canal. LTE opera con anchos de banda variables que van desde 1.4 MHz hasta 20 MHz y velocidades de transmisión de datos teóricos de hasta 100 Mbps en el enlace de bajada y 50 Mbps en el enlace de subida, para un ancho de banda de 20 MHz [1].

En el enlace de bajada LTE utiliza la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y en el enlace de subida la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*). Además LTE hace uso de los siguientes esquemas de modulación: Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*), Modulación por Amplitud en Cuadratura de 16 Estados (16-QAM, *16-State Quadrature Amplitude Modulation*) y Modulación por Amplitud en Cuadratura de 64 Estados (64-QAM, *64-State Quadrature Amplitude Modulation*).

Son muchas las variantes que LTE introduce a los sistemas de comunicación móvil celular, relacionadas con las altas velocidades de transmisión de datos, baja latencia, Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), mayor eficiencia espectral y una arquitectura de red mucho más sencilla basada únicamente en la Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switching*) por medio del Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*), con el objetivo de ofrecer de manera eficiente servicios de datos. Se espera que con LTE se puedan desintegrar definitivamente las barreras que todavía impiden la consecución plena de movilidad con capacidad multimedia.

## MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Los sistemas de comunicación móvil celular de Primera Generación (1G, *First Generation*) (sistemas analógicos) se caracterizaron por ser estándares propietarios, lo que no permitió su desarrollo a nivel global. A partir de la introducción de sistemas de comunicación móvil celular de Segunda Generación (2G, *Second Generation*), y por medio del Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communication*) se empezó a hablar de un sistema único y común a nivel mundial en lo que respecta a la telefonía móvil. La necesidad de brindar mejores servicios, con mayores velocidades de transmisión de datos y por medio de nuevas soluciones de conectividad, ha propiciado el estudio y desarrollo de tecnologías móviles de Tercera Generación (3G, *Third Generation*) y Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*).

El crecimiento considerable en el número de usuarios de telefonía móvil, ligado al desarrollo tecnológico actual, ha permitido pronosticar una alta demanda de aplicaciones móviles de banda ancha, tales como: televisión móvil, navegación por internet de alta velocidad, envío y recepción de correos electrónicos, redes sociales, comercio móvil, descarga rápida de contenidos multimedia y juegos interactivos, entre otros. Satisfacer dicha demanda, logrando que los servicios resulten atractivos para el usuario, al mismo tiempo que los diferentes operadores puedan reducir los Costos de Inversión (CAPEX, *Capital Expenditures*) y Operación (OPEX, *Operating Expense*) requiere del continuo avance en el desarrollo de las redes móviles actuales.

En la constante evolución de la banda ancha móvil, y en el camino hacia ella se han desplegado tecnologías como el Servicio General de Paquetes Vía Radio (GPRS, *General Packet Radio Service*), Velocidades de Transmisión de Datos Mejorados para Evolución GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*), Acceso a Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High Speed Packet Access*) y actualmente la tecnología LTE, en lo que se refiere a las tecnologías 3GPP.

En Colombia LTE es una tecnología que apenas está implementándose por parte de la Unidad de Negocios Estratégicos (UNE) filial de las Empresas Públicas de Medellín (EPM). Por otra parte se realizarán durante el año 2013 subastas de las diferentes bandas de frecuencia para implementación de sistemas de comunicación móvil banda ancha para los demás operadores móviles que existen en Colombia y los nuevos operadores. Es decir que en los próximos años el despliegue de las redes móviles convergerá hacia los sistemas de 4G.

Los operadores deben contar con herramientas de simulación que permitan el diseño y la planificación de las redes y que actúan como demostradores de las capacidades de esta tecnología. En el mercado existen muchas de estas herramientas, y algunas de ellas han

sido usadas en el desarrollo de algunos trabajos de grado de la Universidad del Cauca [2] [3] [4].

Es por esta razón que en este trabajo de grado se analizará y evaluará el desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE en los enlaces de bajada y subida, haciendo uso de la herramienta de simulación LTE-AMoRE® (*Advanced Mobile Radio Realtime Experience*). La herramienta LTE-AMoRE® [5] fue creada en la Universidad Técnica de Munich<sup>1</sup>, y actualmente su soporte es brindado por la empresa de investigación Nomor Research®<sup>2</sup>, bajo la dirección de Nokia Siemens Networks®<sup>3</sup>. Esta herramienta ofrece la posibilidad de configurar un escenario específico de red con el fin de analizar los diferentes indicadores de desempeño en los dos primeros niveles del modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) de la tecnología LTE.

El desarrollo de este trabajo de grado es de suma importancia, ya que ha sido posible establecer un vínculo directo con una de las empresas encargadas de brindar soporte a las empresas de telefonía móvil del país, Nokia Siemens Networks® Colombia, la cual ha facilitado el uso de la herramienta LTE-AMoRE® con fines académicos.

Los resultados de las simulaciones que se realizaron con la herramienta LTE-AMoRE® permitirán demostrar las ventajas de las técnicas de acceso al medio y los esquemas de modulación implementados en la tecnología LTE. Además, estos resultados servirán para analizar detalladamente los indicadores de desempeño de los dos primeros niveles de la pila de protocolos de OSI (niveles físico y de enlace de datos).

Finalmente, se espera que los resultados obtenidos sean de utilidad tanto en las actividades académicas de la Universidad del Cauca como en el diseño e implementación de las futuras redes de comunicación móvil celular en Colombia basados en LTE.

---

<sup>1</sup> <http://www.tum.de/>

<sup>2</sup> <http://www.nomor.de/>

<sup>3</sup> <http://www.nokiasiemensnetworks.com>

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Analizar el desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE haciendo uso de la herramienta de simulación LTE-AMoRE®.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los indicadores de desempeño más importantes a nivel de sistema en los diferentes niveles y subniveles que conforman el modelo de referencia de LTE y que son utilizados por la herramienta de simulación LTE-AMoRE®.
- Evaluar los indicadores de desempeño identificados en los enlaces de bajada y subida, con y sin el uso de sistemas MIMO.

El presente trabajo de grado se encuentra estructurado de la siguiente manera:

#### **Capítulo 1. Arquitectura de la Tecnología LTE.**

En este capítulo se describen y resumen las características asociadas al funcionamiento de LTE, su arquitectura, los elementos que constituyen la red de acceso y el núcleo de la red, sus interfaces, los principales protocolos sobre los que se sustentan dichas interfaces y las ventajas y desventajas de los sistemas basados en esta tecnología.

#### **Capítulo 2. Simulación de una Red LTE.**

Describe las características de los parámetros e indicadores asociadas al funcionamiento de una red LTE en los enlaces de bajada y subida, utilizadas para el desarrollo de este trabajo de grado.

#### **Capítulo 3. Plan de Pruebas para la Evaluación y Análisis del Desempeño de LTE, mediante el uso de la herramienta de simulación LTE-AMoRE®.**

Incluye el diseño del plan de pruebas y presenta los resultados obtenidos, realizando las respectivas interpretaciones y análisis del comportamiento de la tecnología LTE bajo diferentes condiciones de operación.

#### **Capítulo 4. Conclusiones.**

Presenta las conclusiones del trabajo de grado, y posibles trabajos futuros e investigaciones sobre esta temática.

# 1 ARQUITECTURA DE LA TECNOLOGÍA LTE

## 1.1 EVOLUCIÓN DE LA ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL CELULAR

La evolución de la arquitectura de los sistemas de comunicación móvil celular ha permitido mejorar aspectos como la velocidad de acceso y transporte, así como la QoS, empleando para esto una red totalmente convergente basada en PS que cuenta con la capacidad de brindar movilidad y continuidad del servicio entre redes de acceso heterogéneas. Según lo expuesto en el reporte técnico TR 23.882 [6], se han establecido y definido una serie de requerimientos para una arquitectura basada en la Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, *Service Architecture Evolution*), entre los que se encuentran:

- Soportar la movilidad de los usuarios en otros sistemas 3GPP como también no 3GPP.
- Soportar aplicaciones en tiempo real.
- Proporcionar una arquitectura escalable sin comprometer la capacidad del sistema, separando el Plano de Control (CP, *Control Plane*) y el Plano de Usuario (UP, *User Plane*).
- Basar su conectividad en IP con QoS mejorada.
- Interoperabilidad entre terminales, servidores y sistemas compatibles con el Protocolo de Internet Versión 4 (IPv4, *Internet Protocol versión 4*) y el Protocolo de Internet Versión 6 (IPv6, *Internet Protocol versión 6*).
- Asegurar como mínimo el mismo nivel de seguridad que se tiene en las redes 3GPP actuales.
- Soportar el Subsistema Multimedia IP (IMS, *IP Multimedia Subsystem*).

## 1.2 REQUERIMIENTOS 3GPP PARA LTE

LTE surge como iniciativa propia del 3GPP en noviembre del año 2004, donde se inició el trabajo relacionado con la evolución de la red de acceso conocida como Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS (UTRAN, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*). Luego, a principios del año 2005 comenzaron los trabajos para la especificación de LTE por parte del 3GPP, con el reporte técnico TR 25.913 [7]. Entre los requerimientos principales que se establecen en este reporte para la implementación de LTE se encuentran:

- Optimizar el sistema para la PS basado en una red IP. A diferencia de UMTS, LTE no contempla la implementación del dominio de Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*).
- Soportar altas velocidades de transmisión de datos, de hasta 100 Mbps en el enlace de bajada y 50 Mbps en el enlace de subida.

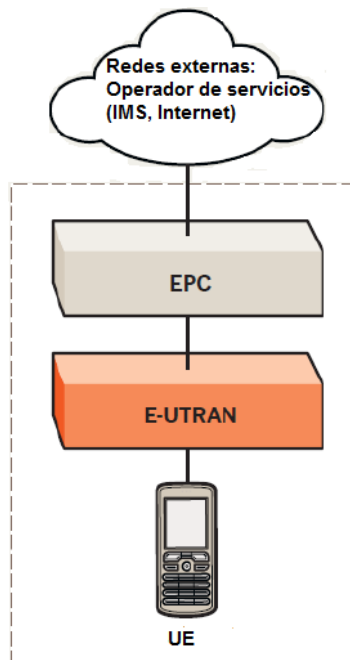
- Presentar latencias menores a 100 ms en el CP y menores a 10 ms en el UP.
- Hacer uso de anchos de banda de sistema entre 1.4 MHz y 20 MHz, brindando flexibilidad espectral.
- Utilizar diferentes bandas de frecuencia.
- Brindar la posibilidad de interoperar con sistemas 3GPP como GSM, UMTS y no-3GPP como el sistema de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) y el sistema basado en la técnica de Acceso al Medio por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*), denominado CDMA-2000.

### 1.3 GENERALIDADES DE LA ARQUITECTURA LTE/SAE

En la Figura 1.1 se observan los elementos principales de arquitectura LTE. SAE es el nombre que recibe la arquitectura de red propuesta por el 3GPP para LTE, la cual está conformada por tres componentes principales<sup>4</sup> y fuera de ella se encuentra el operador de servicios como redes externas:

- Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*).
- La Red de Acceso de Radio Terrestre UMTS Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*).
- El Núcleo de Red de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*).
- Operador de Servicios.

Figura 1.1. Elementos principales del sistema LTE/SAE [1]



<sup>4</sup> Los nodos de CS y las interfaces relacionadas con las arquitecturas anteriores del 3GPP no están presentes en E-UTRAN ni en el EPC.



### 1.3.1 Equipo de usuario

El UE es el dispositivo o terminal que el usuario final utiliza para realizar la comunicación. Puede ser un teléfono inteligente, una tarjeta de datos o un modem de datos. De acuerdo a los estándares de LTE se busca reducir la complejidad del UE en términos de tamaño, peso y duración de batería, entre otros.

### 1.3.2 E-UTRAN nodo B

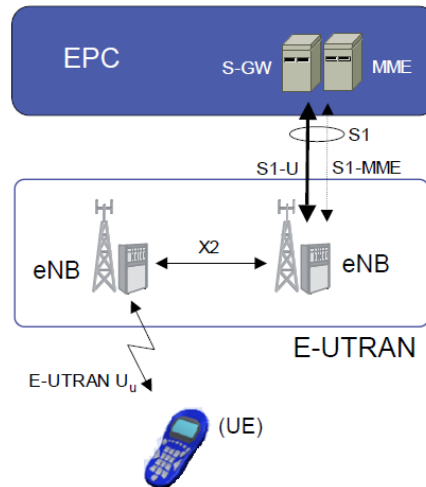
Como se observa en la Figura 1.2, la red de acceso se compone de una única entidad de red llamada Nodo B Evolucionado (eNB, *Evolved Node B*), que representa la Estación Base (BS, *Base Station*), la cual integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso de GSM y UMTS, que estaban compuestas adicionalmente por el Controlador de la Estación Base (BSC, *Base Station Controller*) y el Controlador de la Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*) respectivamente. Las funciones del eNB dentro de la arquitectura E-UTRAN se detallan en las especificaciones técnicas TS 36.300 [8] y TS 36.401 [9] del 3GPP, de las cuales se destacan las siguientes:

- Gestión adecuada de los recursos radio.
- Compresión de encabezados, protección de datos del UP y encaminamiento del tráfico hacia el EPC.
- Soportar un control mejorado sobre la QoS, gestionando adecuadamente los requerimientos del servicio, protocolos y aplicaciones de acuerdo a los recursos y las características de la red de acceso.
- Proveer mecanismos para la operación de protocolos de niveles superiores sobre la RI.
- Reducir la latencia y asegurar la QoS punto a punto, cuando se realiza un Traspaso (HO, *Handover*) entre distintas tecnologías de acceso radio.

Los eNB proporcionan la conectividad entre los UEs y la EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2. Las conexiones de un eNB son del tipo punto a punto y punto a multipunto.

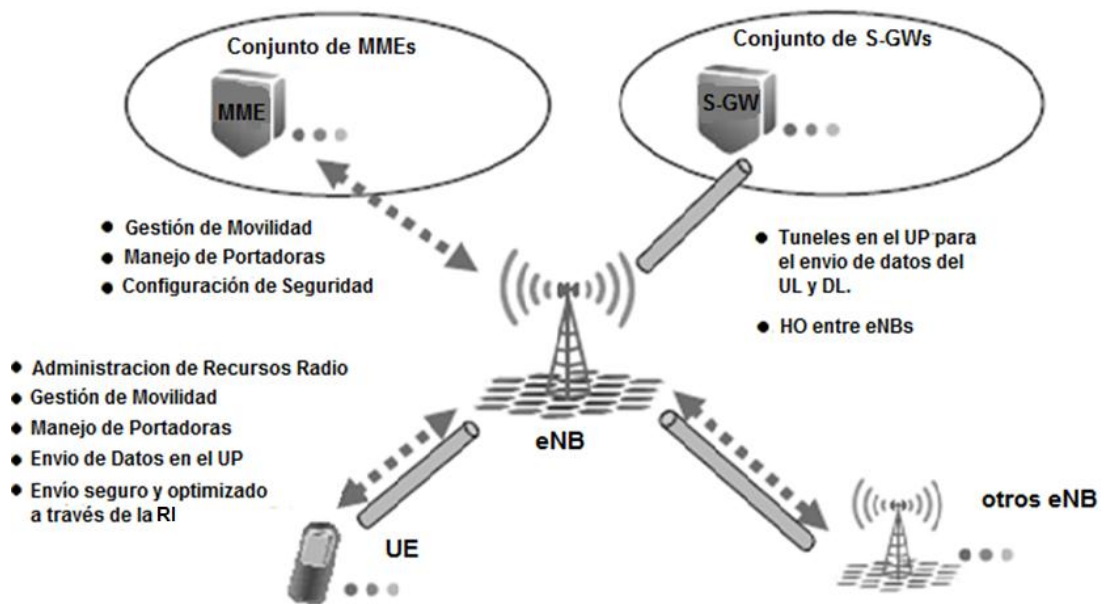
La interfaz E-UTRAN Uu, denominada también como LTE Uu o simplemente RI LTE, permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los UEs, además todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y el control de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB.

Figura 1.2. Red de acceso E-UTRAN [10]



E-UTRAN está conformada por varios eNB distribuidos por toda el área de cobertura de la red, es decir, E-UTRAN es una malla de eNB conectados por medio de la interfaz X2. La funcionalidad clave de un eNB consiste en la Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), así el eNB incluye funciones de control de admisión a los servicios portadores radio, control de movilidad (decisión de realizar un HO), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace de subida como en el de bajada (denominadas funciones de planificación), control de interferencias entre eNBs, control de la realización y del envío de medidas desde los UEs que puedan ser útiles en la RRM.

Figura 1.3. Funciones principales del eNB y relaciones con otros nodos lógicos [1]



Se debe resaltar que el eNB puede estar sirviendo a múltiples UEs en su área de cobertura, pero cada UE está conectado a un solo eNB a la vez. Un eNB está conectado a los eNB vecinos para que los HO puedan realizarse, lo cual incluye el intercambio de señalización con otros eNB y con la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobile Management Entity*). En la Figura 1.3 se muestran las entidades con las que se relaciona un eNB, así como sus principales funciones.

Funcionalmente el eNB actúa como un equipo de red de nivel 2 (nivel de enlace de datos) entre el UE y el EPC. El eNB también realiza el cifrado/descifrado de datos (seguridad) y la compresión/descompresión de encabezados IP, con lo que se evita el envío de la misma secuencia de datos en el encabezado IP en repetidas ocasiones.

### 1.3.3 Núcleo de red de paquetes evolucionado

Sin duda el EPC es el elemento principal de la SAE, puesto que proporciona la conectividad basada en IP. El EPC está compuesto por varios elementos que trabajan de forma independiente, dentro de los cuales se encuentran [11]:

- Puerta de Enlace de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*): equipo encargado de direccionar y reenviar los paquetes de datos en el UP. Gestiona la movilidad durante el proceso de HO entre eNBs o entre diferentes redes de acceso. Corresponde a un punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio.
- Puerta de Enlace de la Red de Paquetes de Datos (P-GW, *Packet Data Network Gateway*): equipo encargado de brindar conectividad entre los diferentes UEs y las redes de paquetes externas. El P-GW también realiza funciones de sincronización y filtrado, según lo requiera el servicio ofrecido.
- Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobile Management Entity*): es el elemento de control principal dentro del EPC, ya que es el responsable de la gestión de la movilidad de los UEs ordenándole al S-GW cambiar de un eNB a otro durante el proceso de HO. Además el MME se encarga de autenticar los UEs en la red cuando estos se registran por primera vez y de asignar a cada UE una Identidad Única Temporal Global (GUTI, *Global Unique Temporary Identity*).
- Servidor de Suscriptores Locales (HSS, *Home Subscription Server*): corresponde a una base de datos central que contiene información de los perfiles de abonado y los servicios disponibles para los UEs. Por otra parte el HSS registra la ubicación del UE, contactándose con cada uno de los MME que gestiona la movilidad de los UEs.
- Función de Políticas y Tarifación de Recursos (PCRF, *Policy and Charging Resources Function*): elemento de red responsable del Control de Políticas y Tarifación (PCC, *Policy and Charging Control*). Gestiona las políticas del servicio de cada sesión de usuario y toma decisiones acerca de los procesos de tarifación.

### **1.3.4 Operador de servicios**

Dentro del dominio de servicios se encuentra el operador de servicios basados en IMS. El IMS es una arquitectura usada por los operadores para proporcionar servicios multimedia basados en el Protocolo de Iniciación de Sesión (SIP, *Session Initiation Protocol*), por ejemplo el servicio de Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP, *Voice over Internet Protocol*).

Los proveedores u operadores de servicios que no hacen uso de IMS solamente cuentan con un servidor que se conecta al UE a través de algún protocolo soportado por una aplicación. A su vez, pueden existir operadores de servicios distintos al operador de red.

## **1.4 ASPECTOS RADIO DE LA TECNOLOGÍA LTE**

La conexión entre los UEs con el eNB se establece a través de la RI, haciendo uso de los diferentes canales físicos. Se deben presentar condiciones adecuadas en el canal de transmisión para asegurar que los datos se reciban correctamente.

### **1.4.1 Tecnologías de acceso**

La RI utiliza las técnicas OFDMA en el enlace de bajada y SC-FDMA en el enlace de subida. Estas técnicas de acceso son muy apropiadas para administrar y gestionar el ancho de banda disponible, permitiéndoles a los operadores desplegar LTE en diferentes bandas de frecuencia. Uno de los mecanismos para aprovechar eficientemente la disponibilidad espectral es el uso del sistema de múltiples antenas tanto en el eNB como en los UEs por medio de la tecnología de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*).

#### **1.4.1.1 OFDMA**

La técnica OFDMA está basada en la técnica de transmisión de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), usada en un gran número de sistemas y tecnologías de comunicaciones como son: Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*), Difusión de Video Digital-Terrestre (DVB-T, *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), Red de Área Local Inalámbrica (WLAN, *Wireless Local Area Network*) y WiMAX [12].

La motivación principal para utilizar OFDMA en LTE y otros sistemas se debe a las siguientes propiedades [12]:

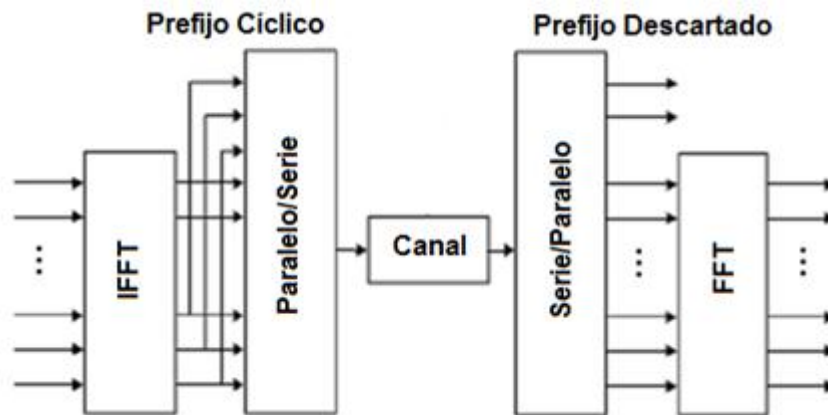
- Robustez ante la propagación multitrayecto.
- Facilidad de generación o modulación a través de la Transformación Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*).

- Compatibilidad con las técnicas MIMO.
- Flexibilidad para adaptarse a radiocanales con diferentes anchos de banda.
- Diversidad en frecuencia (sistemas con un ancho de banda mayor que el ancho de banda de coherencia<sup>5</sup>).
- Despliegue de redes isofrecuenciales, en donde varios transmisores ubicados en diferentes zonas de cobertura transmiten en la misma frecuencia.

La técnica OFDMA es una técnica de transmisión multiportadora, que permite modular y multiplexar la información proveniente de una o varias fuentes sobre un grupo de frecuencias ortogonales entre sí, dividiendo el ancho de banda del canal en subportadoras. La característica de ortogonalidad garantiza un uso eficiente del espectro, al permitir que las subportadoras se traslapen sin interferirse. En LTE las subportadoras adyacentes están separadas 15 KHz, y esta separación se mantiene para cualquiera de los anchos de banda del sistema [14].

La implementación de OFDMA se basa en el uso de la FFT y de la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*). La FFT convierte una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y la IFFT viceversa. En LTE se utiliza la FFT en recepción y la IFFT en transmisión.

Figura 1.4. Diagrama en bloques de un sistema OFDMA



En la Figura 1.4 se muestra que la señal obtenida a la salida de la IFFT en el transmisor se le añade un prefijo cíclico para conformar el símbolo OFDM. Este prefijo cíclico es básicamente un intervalo de guarda en el cual se transmite una repetición de los últimos segundos del símbolo a transmitir, con el fin de reducir la Interferencia entre Símbolos

<sup>5</sup> El ancho de banda de coherencia ( $B_c$ ) corresponde al rango de frecuencias sobre el cual la respuesta del canal en frecuencia se considera plana, es decir que todas las componentes espectrales se encuentran correlacionadas y por lo tanto sufren aproximadamente la misma atenuación y sus cambios de fase son lineales con la frecuencia [13].

(ISI, *Inter Symbol Interference*). La ISI se produce cuando el tiempo de duración del símbolo es menor a la dispersión del retardo<sup>6</sup> (*Delay Spread*) del canal. OFDMA aplica los principios de OFDM para que diferentes usuarios tengan la posibilidad de compartir una misma banda de frecuencias manteniendo la ortogonalidad entre sus comunicaciones. Para ello, cada usuario utiliza un conjunto de subportadoras para la transmisión, las cuales pueden ser contiguas o no. En el enlace de bajada OFDMA realiza una asignación de recursos óptima, ya que en cada Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*) de duración de 1 ms el algoritmo de planificación de paquetes asigna un conjunto de subportadoras de acuerdo a las condiciones del canal de cada UE.

#### 1.4.1.2 SC-FDMA

El parámetro clave que afecta las comunicaciones móviles, es la duración de la batería. Si bien es cierto que la duración de la vida útil de las baterías disminuye con el tiempo, es necesario que los UEs utilicen la menor cantidad de energía posible para transmitir. Sin embargo, el componente que mayor energía consume es el amplificador de potencia de radiofrecuencia. Las señales con un valor de Relación de Potencia Pico a Potencia Promedio<sup>7</sup> (PAPR, *Pick-to-Average Power Ratio*) muy alto requieren amplificadores de potencia altamente lineales para evitar la distorsión asociada a la intermodulación<sup>8</sup>. Para conseguir esto, el amplificador debe operar por debajo de su valor de potencia pico, lo que se traduce finalmente en una menor eficiencia<sup>9</sup>.

Por esta razón es necesario utilizar una técnica de transmisión que permita mantener un valor de eficiencia de consumo de energía favorable. OFDMA no es un buen candidato ya que tiene una alta PAPR, y en el enlace de bajada el consumo de energía no es un problema, ya que el eNB posee un suministro de energía amplio y constante. Como resultado, LTE utiliza en el enlace de subida SC-FDMA, la cual es una técnica que combina el bajo PAPR ofrecido por sistemas de portadora única y las ventajas de OFDMA. De esta manera se simplifican las características del transmisor manteniendo la ortogonalidad entre las subportadoras. SC-FDMA es una técnica de acceso múltiple que emplea una única portadora en el envío de la información [14].

---

<sup>6</sup> La dispersión del retardo corresponde al conjunto de valores obtenidos de la diferencia entre el tiempo de llegada de todas las componentes multirrayecto más significativas con respecto al tiempo de llegada de la primera componente [15].

<sup>7</sup> Se define PAPR como la relación entre el nivel de potencia máximo de la señal con respecto a su nivel de potencia promedio. En sistemas OFDMA de múltiples portadoras se pueden presentar altos valores de PAPR debido a la suma de diferentes subportadoras, sobre todo al implementar sistemas MIMO, pues se generan emisiones no deseadas sobre algunos canales adyacentes que degradan la BER [16].

<sup>8</sup> La intermodulación es la alteración de la forma de onda de una señal debido a que la ganancia no lineal del sistema genera nuevas componentes espectrales en frecuencias que son suma y resta de las frecuencias de las componentes espectrales ya presentes en la señal.

<sup>9</sup> La eficiencia corresponde a la relación entre la energía transmitida respecto de la energía consumida.

La técnica SC-FDMA permite utilizar los mismos bloques de procesamiento y la misma asignación de recursos que OFDMA. A causa de su naturaleza de portadora única, el SC-FDMA obliga al UE a transmitir en un conjunto de subportadoras adyacentes.

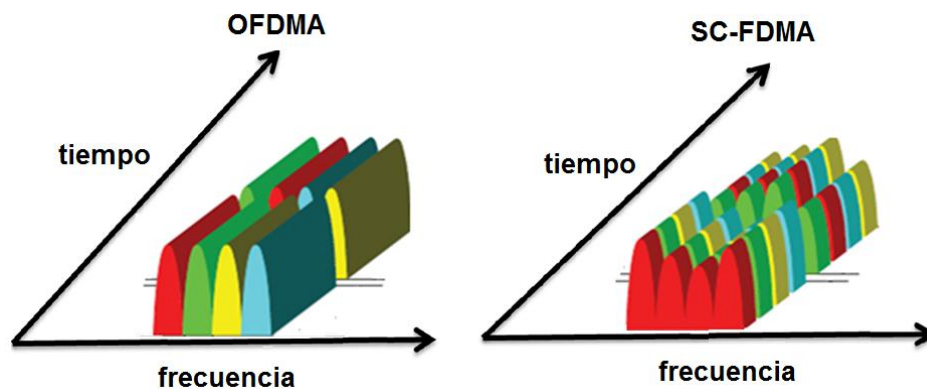
Los símbolos se generan de la misma forma que en OFDMA por medio de la IFFT. Previamente a la IFFT se aplica la Transformada de Fourier Discreta (DFT, *Discrete Fourier Transform*) con la intención de expandir los símbolos sobre todas las subportadoras que llevan información, produciendo una estructura virtual de una portadora única. La duración de la señal presente y el ancho de banda es igual que en OFDMA. Una vez se ha conformado el bloque de la señal, se le añade el prefijo cíclico para reducir la ISI [14].

En resumen, las ventajas de la técnica SC-FDMA para el enlace de subida son:

- Transmisión por medio de subportadoras adyacentes.
- Buena relación PAPR.
- Asignación de recursos similar que en OFDMA.

La Figura 1.5 muestra la distribución en tiempo y frecuencia de señales OFDMA y SC-FDMA. En OFDMA se transmiten “M” símbolos en paralelo, donde cada símbolo está representado por un color (subportadora), y se distribuye el ancho de banda total entre ellas, mientras que en SC-FDMA se transmiten “M” símbolos secuencialmente cada uno ocupando todo el ancho de banda disponible.

Figura 1.5. Funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA [17]



#### 1.4.2 Sistema de múltiples entradas múltiples salidas

Otra de las características importantes de LTE es el uso de sistemas de múltiples antenas en los enlaces de subida y bajada, conocido como MIMO. El principio de MIMO es la multiplexación espacial, que consiste en enviar señales desde múltiples antenas y recibiendo esas señales por medio de múltiples antenas.

En los últimos años esta tecnología ha sido muy empleada en los sistemas de comunicación inalámbrica, ya que permite aumentar significativamente las velocidades de transmisión de datos o el desempeño del sistema gracias a la multiplexación espacial o diversidad espacial respectivamente, por medio de múltiples antenas separadas físicamente.

MIMO tiene dos esquemas generales de funcionamiento:

- **Diversidad Espacial**
  - Combate el desvanecimiento al transmitir simultáneamente la misma información por cada una de las antenas.
  - La implementación de esta técnica permite incrementar la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*), lo que representa una mejora en la calidad de la señal recibida y una menor Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), gracias a la redundancia que contrarresta los efectos generados por el desvanecimiento.
  
- **Multiplexación Espacial**
  - El conjunto de símbolos a transmitir se divide entre el número de antenas usadas en el transmisor, generando múltiples flujos de transmisión, los cuales son enviados simultáneamente, dentro de la misma banda de frecuencia.
  - La señal se propaga por medio de múltiples trayectorias, por lo que cada antena recibe una superposición de las señales transmitidas, además de las señales provenientes de otras antenas.
  - El sistema de transmisión emplea una precodificación en los flujos de datos transmitidos, con el objetivo de que cada antena receptora pueda reconocer y recuperar solamente la información que le corresponde, reconstruyendo los flujos que son multiplexados para interpretar correctamente los datos originales en receptor.

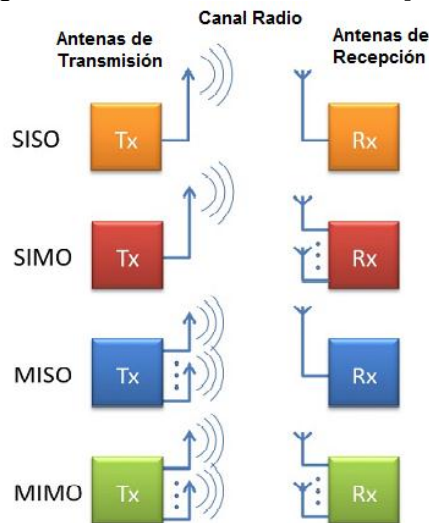
En la Figura 1.6 se observan las posibles configuraciones de antenas empleadas en LTE:

- Única Entrada Única Salida (SISO, *Single Input Single Output*): tanto el transmisor como el receptor poseen una sola antena.
- Múltiples Entradas Única Salida (MISO, *Multiple Input Single Output*): el transmisor posee varias antenas mientras que el receptor solo una.
- Única Entrada Múltiples Salidas (SIMO, *Single Input Multiple Output*): el transmisor tiene una sola antena y el receptor cuenta con varias antenas.
- MIMO: tanto el transmisor como el receptor poseen más de una antena.



Las configuraciones de MIMO con un número elevado de antenas permiten obtener mayores velocidades de transmisión de datos, lo que lo convierte en un componente fundamental de LTE al implementar el esquema de multiplexación espacial. Los arreglos de antenas más comunes en LTE son MIMO 2x2 y MIMO 4x4.

Figura 1.6. Sistemas de antenas [18]

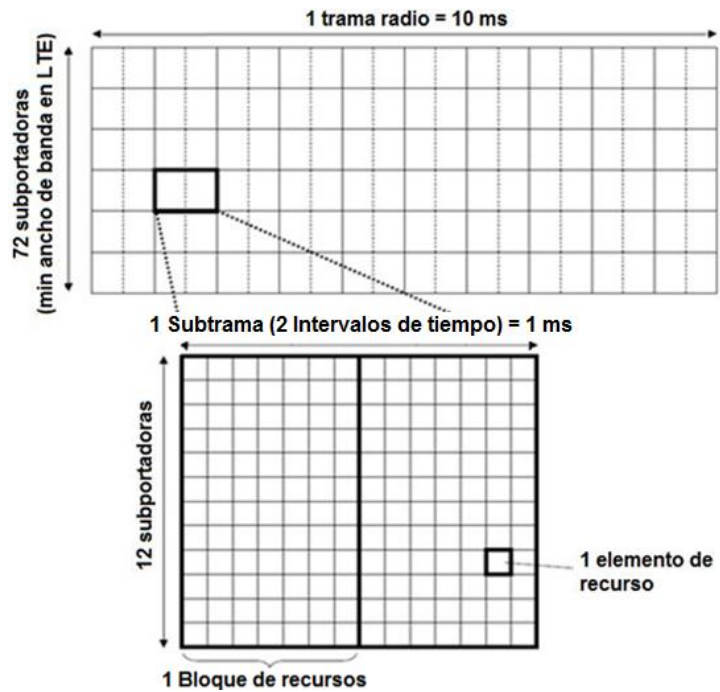


### 1.4.3 Estructura de trama de LTE

Por lo general los sistemas basados en la tecnología LTE operan en dos modos de duplexación: Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) para bandas pares y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) para bandas impares, lo cual permite realizar un mejor uso del espectro radioeléctrico. Por otra parte una estructura de trama FDD en el dominio del tiempo se encuentra dividida en 10 subtramas de 1 ms, donde cada subtrama está compuesta por dos intervalos de tiempo de 0.5 ms, como se muestra en la Figura 1.7.

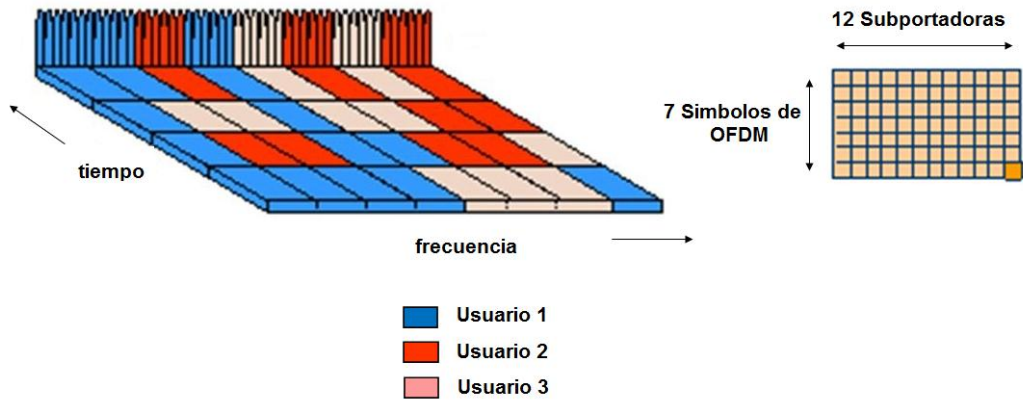
Un elemento de recursos corresponde a la unidad más pequeña del Bloque de Recursos (RB, *Resource Block*), el cual ocupa un símbolo OFDM o SC-FDMA en el dominio del tiempo y una subportadora en el dominio de la frecuencia. Además, el RB corresponde a la unidad básica de asignación que el eNB realiza a un UE. Un RB ocupa un ancho de banda de 180 KHz equivalente a 12 subportadoras, las cuales presentan una separación de 15 KHz entre ellas. En cada RB se transmiten 6 o 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico utilizado. La duración de un RB es igual a 0.5 ms, equivalente a un intervalo de tiempo, como se observa en la Figura 1.7.

Figura 1.7. Estructura de trama de LTE



#### 1.4.3.1 Transmisión en el enlace de bajada

Figura 1.8. Asignación de recursos en el enlace de bajada [18]

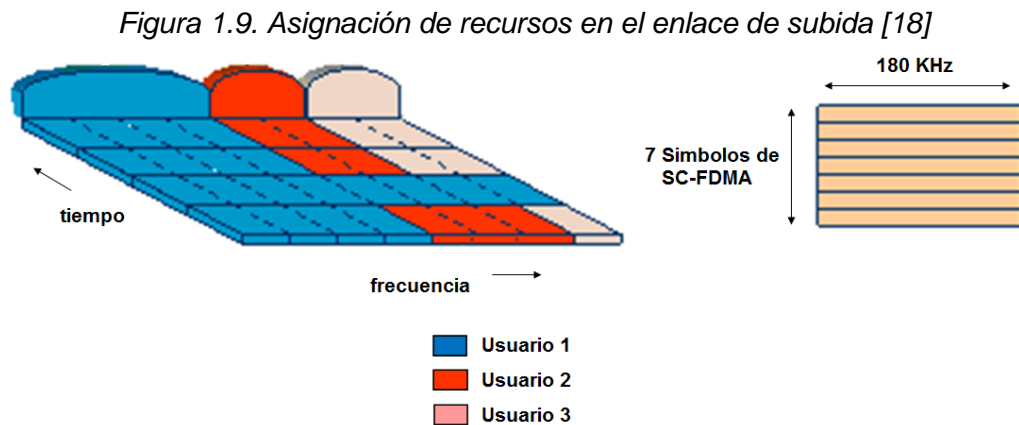


En la Figura 1.8 se muestra la cuadrícula tiempo-frecuencia para el enlace de bajada en LTE, en donde cada elemento de recurso corresponde a una subportadora OFDM durante un intervalo de tiempo de un símbolo OFDM.

La duración de un símbolo OFDMA en LTE es igual a  $66.7\mu\text{s}$  ( $1/15\text{ KHz}$ ). Este valor fue definido por el 3GPP basado en los estudios realizados en lo relacionado a la dispersión de retardo del canal radio y el tiempo de coherencia<sup>10</sup> con el objetivo de disminuir la ISI.

### 1.4.3.2 Transmisión en el enlace de subida

En el enlace de subida los RB asignados a un UE deben ser consecutivos en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en la Figura 1.9.



### 1.4.4 Ancho de banda de transmisión

*Tabla 1.1. Anchos de banda soportados en LTE*

Ancho de Banda (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Número de Bloques de Recursos físicos	6	15	25	50	75	100

La asignación del ancho de banda en LTE se encuentra entre los valores de 0 y 20 MHz, lo que permite la asignación entre 6 y 100 RB respectivamente como se muestran en la Tabla 1.1. La máxima cantidad de RB que se pueden asignar a un UE depende del ancho de banda del sistema y del número de usuarios asociados al eNB.

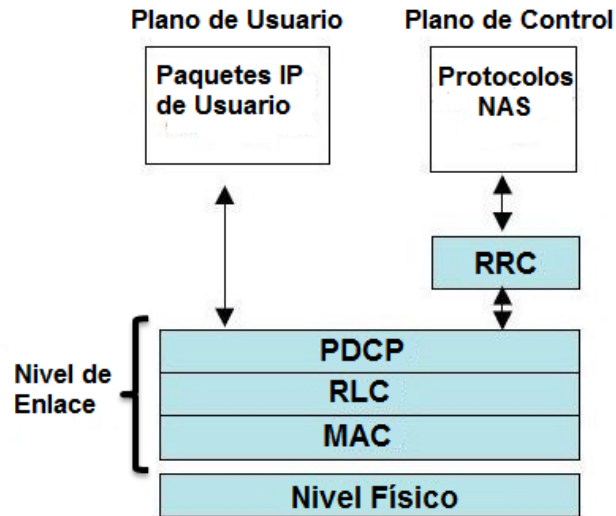
### 1.4.5 Niveles/Subniveles y protocolos de la interfaz radio de LTE

Los protocolos de la RI de E-UTRAN, se estructuran en torno a un UP y un CP. El UP abarca los protocolos utilizados para el envío del tráfico (paquetes IP) correspondientes a

<sup>10</sup> El tiempo de coherencia corresponde a la duración en la cual se considera invariante la respuesta impulsiva del canal, es decir que las características del canal no varían significativamente.

los servicios a los que acceden los terminales a través de la red. El CP se refiere a los protocolos necesarios para soportar las funciones y procedimientos en las diferentes interfaces (señalización y control).

Figura 1.10. Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN



El envío de paquetes IP entre el eNB y un UE a través de la RI se sustenta en una pila de protocolos formada por el nivel de enlace y el nivel físico (nivel 2 y 1 respectivamente del modelo de referencia OSI), presentada en la Figura 1.10. El nivel de enlace se divide en tres subniveles: Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*), Control de Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*) y Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*). Cada nivel y subnivel de la pila de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones concretas y definen el formato de los paquetes de datos que se intercambian entre entidades remotas.

Los subniveles PDCP, RLC, MAC y el nivel físico se comparten entre el CP y el UP. Además el CP incorpora un nuevo protocolo denominado Control de Recursos Radio (RRC, *Radio Resource Control*) encargado de realizar la gestión de la conexión a nivel radio entre el UE y el eNB, la configuración de los Servicios Portadores S1 (*S1 Bearer*) y el envío de mensajes relacionados con la movilidad desde y hacia el UE. El subnivel RRC corresponde al nivel 3 del modelo de referencia OSI debido a que gestiona funcionalidades a nivel de red.

Es importante enfatizar que el UP está interconectado a la S-GW mediante los S1 y por este plano se transmiten los paquetes IP generados por el UE o destinados a él. Por el contrario, el CP está interconectado al MME, en donde están ubicadas las funcionalidades de gestión de la sesión, la movilidad y los mecanismos de control de las llamadas.

### 1.4.5.1 Nivel de enlace

Este nivel se ocupa de la topología de la red, el acceso al medio, la detección y corrección de errores, la distribución ordenada de tramas y el control de flujo. Este es el nivel 2 del modelo de referencia OSI. A continuación se realiza una descripción de cada uno de sus subniveles.

#### 1.4.5.1.1 Subnivel protocolo de convergencia de paquetes de datos

El subnivel PDCP se encarga de realizar las siguientes funciones [19]:

- Compresión/descompresión del encabezado de los paquetes IP que llegan al eNB. El protocolo utilizado para ello es Compresión Robusta de Encabezado (ROHC, *Robust Header Compression*) definido por el Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet (IETF, *Internet Engineering Task Force*) en su estándar RFC 3095 [20].
- Cifrado de datos y señalización, utilizando para ello una clave de 128 bits.
- Implementación de mecanismos de protección de la integridad de los mensajes de señalización generados tanto por el subnivel RRC como por los protocolos de Nivel de no Acceso (NAS, *Non-Access Stratum*) ubicados en la MME.
- Reordenamiento y/o detección de duplicidad de paquetes RLC cuando se implementan mecanismos de movilidad entre eNBs.

Es importante resaltar que los mecanismos de cifrado y protección de la integridad son obligatorios en los flujos de señalización que se transmiten a través del CP de la RI LTE, mientras que el cifrado es opcional en los flujos de datos transmitidos a través del UP de dicha RI. En lo que respecta al mecanismo de compresión de encabezados, teóricamente es obligatorio en todos los casos, sin embargo hay que mencionar que el protocolo ROHC soporta un modo de operación transparente que permite mantener el encabezado del paquete IP inalterado.

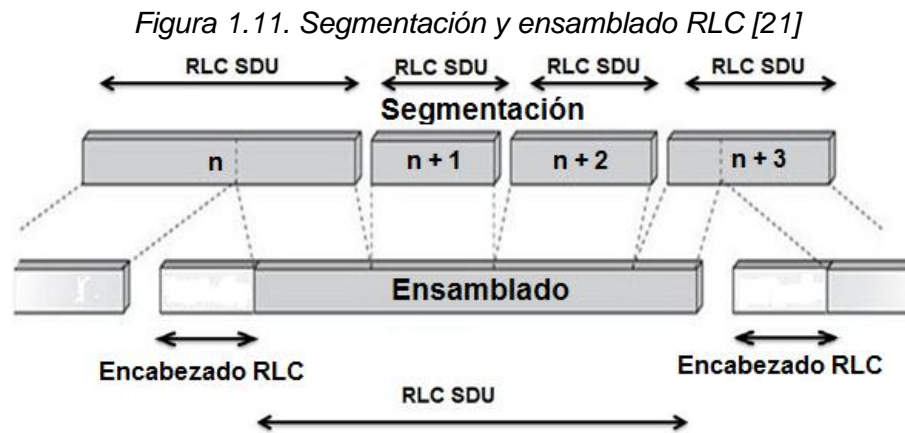
#### 1.4.5.1.2 Subnivel de control de enlace radio

El subnivel RLC es el encargado de proveer una transferencia de paquetes ordenada a través de la RI a los niveles superiores. Esto evita que se produzcan entregas fuera de orden, retransmisiones ambiguas o la recepción de paquetes duplicados de otras transmisiones.

Este subnivel también realiza procedimientos de segmentación y ensamblado de los paquetes IP recibidos por parte de los niveles superiores, a los que se les denomina RLC-SDU, como se muestra en la Figura 1.11, con el fin de adaptar su tamaño a las capacidades de transmisión de la RI. Las PDUs enviadas a los niveles inferiores de la pila

se denominan RLC-PDUs<sup>11</sup>. Por otra parte, este subnivel implementa retransmisión de RLC-PDUs que han sido recibidas con errores, evita las duplicaciones y se encarga de garantizar que los RLC-SDUs sean recibidos y entregados de forma ordenada a los niveles superiores.

Dependiendo de la decisión del planificador de paquetes (*packet scheduler*), cierta cantidad de datos son seleccionados para realizar una transmisión a través de una RLC-SDU.



#### 1.4.5.1.3 Subnivel de control de acceso al medio

El subnivel MAC proporciona técnicas de control de errores mediante procedimientos de Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida (H-ARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*). Este es un mecanismo de retransmisión distinto del disponible en el subnivel RLC, que se aplica sobre los canales de transmisión. El procedimiento H-ARQ utiliza técnicas de retransmisión basadas en el incremento de redundancia. La información contenida dentro del canal de transporte se transmite con un mínimo de redundancia incremental, capaz de corregir los errores producidos por los efectos que introduce el canal radio. Si esta redundancia no es suficiente para corregir los errores en el receptor, este solicita la transmisión de la información de la redundancia adicional, con el fin de detectar correctamente la información. Este proceso se repite hasta que el receptor haya recuperado correctamente el contenido del canal de transporte [10].

Un canal de transporte define la forma cómo se transmite la información en la RI y se encuentra relacionado con aspectos como: la dirección de transferencia (enlace de

<sup>11</sup> En general, los datos enviados hacia un nivel superior se conocen como una Unidad de Servicio de Datos (SDU, *Service Data Unit*) y los datos correspondientes hacia un nivel inferior se denotan como Unidad de Datos de Protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*).

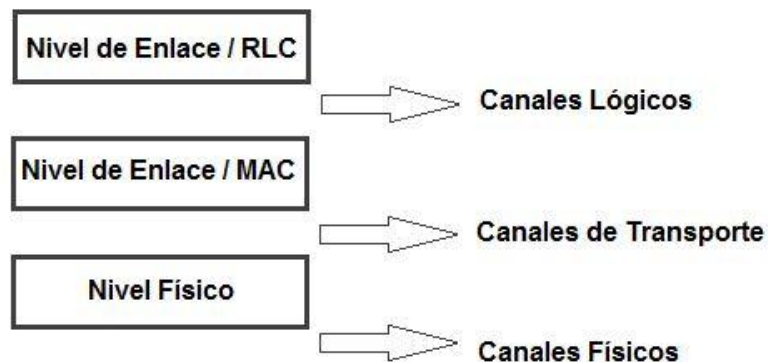
subida, enlace de bajada o bidireccional), características del control de potencia, y velocidad de transmisión de datos, entre otros.

Un canal lógico se define por el tipo de información que lleva y generalmente se clasifica como: canal de control utilizado para la transmisión de información de control y configuración necesaria para el funcionamiento del sistema LTE; o como un canal de tráfico utilizado para transportar información de usuario.

La funcionalidad de planificación de paquetes se encuentra en el eNB, que tiene una entidad MAC por celda, tanto para el enlace de subida como de bajada. Para realizar la asignación de recursos es importante que el eNB conozca previamente las condiciones del canal que se presenta en la RI, para que el algoritmo de planificación de paquetes realice una asignación dinámica de recursos de acuerdo a dichas condiciones.

En la Figura 1.12 se muestra la asignación de los diferentes canales presentes dentro de la arquitectura de LTE, con relación a los niveles y subniveles del modelo de referencia OSI.

*Figura 1.12. Tipos de canales de E-UTRAN*



El subnivel MAC es el encargado de establecer el enlace entre el subnivel RLC y el nivel físico, además realiza las siguientes funciones:

- Multiplexación de los diferentes canales lógicos y el mapeo de los canales lógicos en los canales de transporte correspondientes.
- Implementación de técnicas de control de errores a través de métodos de retransmisión H-ARQ, basados en métodos de redundancia.
- Selección del formato de transmisión (esquema de modulación y codificación y tamaño del bloque de transporte) implementados en el nivel físico.
- Multiplexación y demultiplexación de tramas MAC, las cuales son conocidas con el nombre MAC-SDU y se transmiten por medio de los canales de transporte.
- Difusión de la información de los recursos radio disponibles.

En este subnivel se evalúa el *throughput*<sup>12</sup> del sistema. Se afirma que el *throughput* en el subnivel MAC corresponde a la medida efectiva de la red, ya que en este punto de la pila de protocolos se analiza el *throughput* adecuado en tiempo real de los UE, el cual depende de las condiciones del canal de cada uno de ellos dentro de la celda.

#### 1.4.5.2 Nivel físico

El nivel físico es el encargado de realizar los procesos de codificación/decodificación, modulación/demodulación, y procesamiento multi-antena, además ofrece servicios al subnivel MAC por medio de canales de transporte, realizando el mapeo de los canales de transporte en los canales físicos.

Los canales físicos son los canales de transmisión que soportan datos de usuario y mensajes de control. Además, tiene la posibilidad de multiplexar varios canales de transportes (iguales o diferentes entre sí).

Las funciones que se realizan en el nivel físico son las siguientes:

- Implementación de las técnicas de acceso SC-FDMA y OFDMA en los enlaces de subida y bajada, respectivamente.
- Modulación y demodulación.
- Implementación de sistemas MIMO.
- Implementación de la técnica de control de errores H-ARQ.
- Control de sincronización para evitar interferencia entre los UEs.
- Gestión adecuada de la potencia de transmisión del UE y el eNB.

Los sistemas basados en la tecnología LTE pueden operar en bandas de UHF por encima de los 450 MHz y hasta los 3.5 GHz [22].

---

<sup>12</sup> El *throughput* es la cantidad de datos o volumen de información recibidos sin errores, incluyendo información de usuario y control.



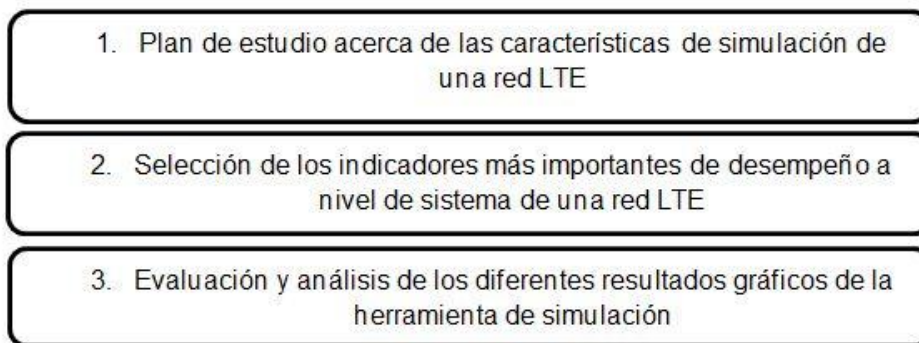
## 2 SIMULACIÓN DE UNA RED LTE

Para la ejecución del proceso de simulación se propone una aplicación de una metodología de simulación que permita el análisis de desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE en los enlaces de subida y bajada respectivamente, a través de un modelo conceptual del sistema, basado en las especificaciones del R8 del 3GPP.

La metodología empleada define los lineamientos necesarios para el modelado de un sistema de comunicación móvil celular, mediante una serie de fases que permiten identificar, estructurar e implementar una simulación del sistema.

El uso de la herramienta de simulación se basó al igual que el desarrollo del trabajo de grado en la aplicación de la metodología lineal secuencial, como se observa en la Figura 2.1. Las siguientes son las fases que se implementaron:

*Figura 2.1. Metodología de Simulación*



### 2.1 PLAN DE ESTUDIO DE LOS PARAMETROS PARA LA SIMULACIÓN DE UNA RED LTE

El plan de estudio que se realizó consiste en un análisis minucioso del funcionamiento y el comportamiento de los diferentes parámetros del enlace de subida y bajada respectivamente, que permiten simular una red LTE, con la idea de determinar o estimar su efecto sobre el comportamiento de esta.

Uno de los elementos más importantes es el algoritmo de planificación de paquetes, encargado de asignar los recursos disponibles y establecer el número máximo de unidades de recursos que pueden ser asignados en cada TTI a un UE.

LTE cuenta con tres diferentes algoritmos de planificación de paquetes [10]:

- *Maximum Rate*: al seleccionar esta opción, el sistema otorga la prioridad a los UEs que mejores condiciones poseen en cuanto a las características del canal radio en

un RB dado. A pesar de que algunos UEs pueden llegar a transmitir a las máximas velocidades de transmisión de datos, la asignación de los recursos no se realiza de manera equitativa, pues solamente los UEs con mejores condiciones dispondrían de los recursos del sistema.

- *Round Robin*: al seleccionar esta opción, todos los UEs disponen de los mismos recursos durante un intervalo de tiempo, sin tener en cuenta las condiciones del canal para cada uno de ellos. En este sentido se dice que esta es una técnica que no se adapta a las condiciones ni a las necesidades de los UEs.
- *Proportional Fair*: este algoritmo permite establecer una relación directa entre la velocidad de transmisión y la distribución de los recursos. El algoritmo asigna recursos a los UEs que cuentan con buenas condiciones de canal y también a los que no cuentan con dichas condiciones. Este algoritmo asigna equitativamente el ancho de banda del sistema permitiendo que todos los UEs puedan transmitir su información haciendo uso de los mismos recursos, todo esto con el objetivo de alcanzar la máxima capacidad e incrementar la eficiencia espectral del sistema. Los recursos se asignan cuando la calidad de canal que un UE observa en un determinado momento es mayor a la calidad media que el mismo UE ha percibido en el tiempo [10].

A continuación se presenta la configuración de los parámetros más importantes para el análisis y evaluación a nivel de sistema de una red LTE en los enlaces de subida y de bajada, así como de algunos de los parámetros globales del sistema.

### 2.1.1 Parámetros del sistema en el enlace de bajada

Los parámetros del sistema en el enlace de bajada corresponden a los definidos por el 3GPP en las especificaciones del R8 para simular una red LTE.

Algunos de los parámetros que permiten estimar la QoS en el enlace de bajada son:

- **Factor de prioridad**: este parámetro es esencial para determinar la asignación de recursos por parte del algoritmo de planificación de paquetes. Los valores más altos de este parámetro representan una menor prioridad para los UEs.
- **BLER objetivo**: el valor de la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) permite realizar la adaptación del enlace de bajada.
- **Potencia de Transmisión de cada antena**: especifica la potencia de transmisión total emitida por cada una de las antenas del eNB medida en vatios.
- **Diversidad en Recepción / MIMO**: permite seleccionar el esquema de multiplexación espacial para todos los UEs y a su vez permite habilitar los diferentes modos de operación de la técnica de MIMO, dentro de los cuales se encuentran los siguientes: 1x1, 1x2, 2x2, 2x4, 4x2 y 4x4.

- **Modo de Trama MIMO:** Permite al operador trabajar con dos tramas al implementar la técnica de MIMO.

La descripción detallada de cada uno de los parámetros del sistema en el enlace de bajada se encuentra en el Anexo A.

### 2.1.2 Parámetros del sistema en el enlace de subida

Los parámetros del sistema en el enlace de subida, de igual forma que los parámetros en el enlace de bajada son los definidos por el 3GPP en las especificaciones del R8 para una red LTE.

Una de las funciones más importantes del eNB en el enlace de subida corresponde al procedimiento de control de potencia realizado por el RRC. El objetivo del control de potencia es disminuir los valores de potencia de transmisión y reducir el consumo de energía de los UEs.

La operación del algoritmo y la señalización es más lenta que la rapidez de las variaciones del desvanecimiento rápido, ya que está destinada a compensar los efectos de las pérdidas de propagación y el desvanecimiento por sombra. A continuación se presenta los parámetros de mayor relevancia en el enlace de subida:

- **SIR objetivo (lazo abierto):** el eNB trata de adaptar la potencia de transmisión de cada uno de los UE, de tal manera que la SINR recibida sea igual al valor de SIR objetivo especificada.
- **Control de potencia:** corresponde al control de potencia en lazo cerrado compatible con el estándar.
- **Asignación de ancho de banda:** permite al eNB asignar más de una unidad de recursos para cada UE con el fin de incrementar el valor pico del *throughput* y reducir el tiempo de retardo para ráfagas o para tráfico de altas velocidades de transmisión de datos
- **Máxima Potencia Total de Transmisión:** corresponde al valor máximo de potencia en vatios con el cual todos los UEs se encuentran transmitiendo.
- **Diversidad en Recepción:** permite que los UEs al momento de realizar la transmisión en el enlace de subida, lo hagan por medio de una antena, y se reciba esta información en el eNB a través de dos antenas.

Por otra parte el simulador LTE-AMoRE® hace uso de un modelo de pérdidas de propagación específico definido por la Ecuación 2.1 [24].

$$L_d [dB] = \Delta + E * 10 \log_{10}(d) \quad (2.1)$$

Dónde:

- $\Delta$  [dB]: corrimiento en atenuación<sup>13</sup>.
- $E$ : exponente de pérdidas de propagación<sup>14</sup>.
- $d$  [km]: distancia de separación entre eNB y UE.

La descripción detallada de cada uno de los parámetros del sistema en el enlace de subida se encuentra en el Anexo A.

### 2.1.3 Parámetros globales del sistema

Los parámetros globales del sistema comprenden aspectos relacionados con las características físicas de la celda, dentro de los cuales se encuentran:

- **Modo de H-ARQ:** permite al operador establecer el método utilizado para la combinación de las retransmisiones H-ARQ. Las tres opciones son: ARQ, *Chase Combining* y Redundancia Incremental (*Incremental Redundancy*). ARQ presenta el peor desempeño, ya que no tiene en cuenta las muestras recibidas del mismo bloque de transporte para su decodificación. Los esquemas de *Chase Combining* y Redundancia Incremental permiten que la probabilidad de error después de la decodificación se reduzca con cada retransmisión.
- **Radio de la celda:** indica el radio de la celda, en este caso 0.167 Km. Este parámetro no se puede modificar.
- **Movilidad al interior de la celda:** permite activar y desactivar el movimiento aleatorio de algunos o de todos los UEs dentro de la celda.
- **Modelo de desvanecimiento rápido:** permite seleccionar uno de los diferentes modelos de desvanecimiento de canal, dentro de los cuales se encuentran: Modelo de Peatón A (*Pedestrian A*) y Peatón B (*Pedestrian B*) con velocidad de 3 km/h, Modelo Vehicular A Extendido (EVA, *Extended Vehicular A*) con velocidad de 30 km/h. Si no se selecciona ninguna opción, el sistema selecciona un canal con Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*).
- **Escenario de celda aislada:** esta opción permite deshabilitar la interferencia de las celdas vecinas, permitiendo obtener un alto desempeño en la propia celda. El sistema se convierte en un sistema de una sola celda y por tanto no existen limitaciones causadas por la interferencia. Aunque cuando se hace uso de la técnica de MIMO si está presente la interferencia.

La descripción detallada de cada uno de los parámetros globales del sistema se encuentra en el Anexo A.

---

<sup>13</sup> Valor obtenido y especificado por el creador de la herramienta que es igual a 128.1 dB [24].

<sup>14</sup> Valor obtenido y especificado por el creador de la herramienta que es igual a 3.76 [24].

## **2.2 INDICADORES DE DESEMPEÑO DE UNA RED LTE**

En esta fase se realizó el estudio de los indicadores que permite analizar el desempeño a nivel de sistema de una red LTE a través del R8, luego de verificar el comportamiento de cada uno de ellos, se optó por seleccionar los indicadores más importantes, los cuales se encuentran relacionados con velocidad de transmisión de datos, retardo de transmisión y la movilidad [25]. De tal modo que los indicadores seleccionados permitan obtener un mejor análisis con respecto a lo especificado en el R8.

A continuación se presentan más detalladamente la selección de los indicadores de desempeño del enlace de bajada y subida respectivamente, que se emplean en este trabajo de grado.

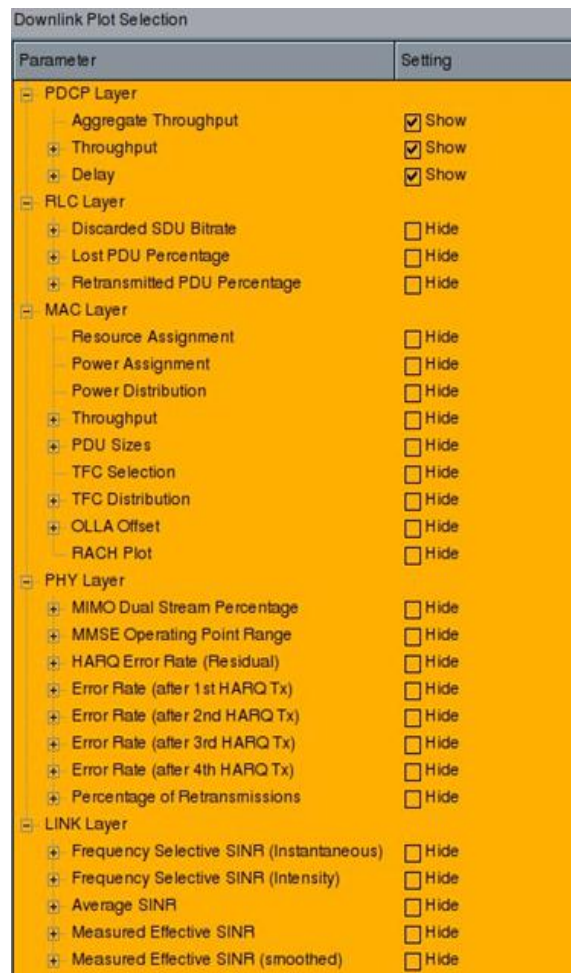
### **2.2.1 Indicadores de desempeño seleccionados**

Los diferentes indicadores de desempeño que se muestran en la Tabla 2.1 y la Tabla 2.3, fueron los seleccionados para realizar la evaluación y el análisis del sistema. A través de estos indicadores se lograron analizar por medio de resultados gráficos, aspectos importantes como: *throughput* individual y total de la celda, retardos de transmisión, SINR, asignación de recursos y la técnica de corrección de errores H-ARQ, dentro de los cuales algunos se encuentran definidos en las especificaciones del R8 del 3GPP, como velocidad de transmisión de datos y los retardos de transmisión del sistema.

### **2.2.2 Indicadores de desempeño del enlace de bajada**

En la Figura 2.2 se observa la ventana de selección de todos los indicadores que permite evaluar la herramienta de simulación en el enlace de bajada para LTE, la cual incluye los diferentes indicadores del modelo de referencia OSI: conformado por el nivel de enlace y sus correspondientes subniveles PDCP, RLC y MAC; y el nivel físico.

Figura 2.2. Ventana de selección de gráficas del enlace de bajada



Por otra parte, en la Tabla 2.1 se listan los indicadores más importantes seleccionados para la simulación, los cuales permiten analizar el desempeño en el enlace de bajada.

Tabla 2.1. Indicadores seleccionados para su visualización en el enlace de bajada

Indicadores a evaluar en el enlace de bajada
<b>Subnivel PDCP</b>
Throughput total de la celda
Throughput de cada UE
Retardo de transmisión
<b>Subnivel RLC</b>
Porcentaje de pérdidas de PDU
<b>Subnivel MAC</b>

Asignación de Recursos
<i>Throughput</i> a nivel MAC
Tamaño de las PDU
<b>Nivel de Enlace</b>
SINR Efectiva
SINR Efectiva Suavizada
<b>Nivel Físico</b>
Tasa de Error Global H-ARQ después del número máximo de transmisiones
Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el número total de bloques de transporte transmitidos
Tasa de Error H-ARQ después de la 1ª, 2ª, 3ª y 4ª transmisión

Los indicadores de *Throughput* total de la celda y *Throughput* de cada uno de los UEs muestran gráficamente el volumen total de información sin errores transmitidos dentro de la celda y por cada uno de los UEs. Los resultados de este parámetro incluyen aspectos relacionados con la velocidad de transmisión de los paquetes y las características de la RI del sistema.

Es importante destacar que el *Throughput* a subnivel MAC presenta valores mayores que el *Throughput* a subnivel PDCP, debido a que en este subnivel se tienen en cuenta los encabezados de señalización de RLC, las retransmisiones RLC y transmisiones H-ARQ fallidas, por tal razón representan el *throughput* efectivo del sistema.

Una forma de encontrar el *throughput* total de la celda es por medio de la eficiencia espectral del esquema de modulación implementado, por medio de la Ecuación 2.2 [26].

$$\eta = \frac{R}{B} = \frac{T_S * \text{Tasa de Codificación}}{T_B} \quad (2.2)$$

Dónde:

- $\eta$  [bps/Hz]: eficiencia espectral.
- $R$  [bps]: velocidad de transmisión.
- $B$  [Hz]: ancho de banda del sistema.
- $T_S$  [s]: duración de símbolo.
- $T_B$  [s]: duración de bit.

De acuerdo a la Ecuación 2.2 es posible asumir el *throughput* como la velocidad de transmisión del sistema, con el fin de encontrar el valor de la eficiencia espectral con

ayuda del ancho de banda, para de esta forma hallar el esquema de modulación y la tasa de codificación implementados para cada UE, por medio de la Tabla 2.2<sup>15</sup>.

Tabla 2.2. Relación entre esquema de modulación, tasa de codificación y eficiencia espectral

Esquema de Modulación	Tasa de Codificación	Eficiencia Espectral [bps/Hz]
QPSK	1	2
QPSK	$\frac{1}{2}$	1
QPSK	$\frac{3}{4}$	1.5
16-QAM	1	4
16-QAM	$\frac{1}{2}$	2
16-QAM	$\frac{3}{4}$	3
64-QAM	1	6
64-QAM	$\frac{1}{2}$	3
64-QAM	$\frac{3}{4}$	4.5

Por otra parte, el retardo de transmisión es un indicador muy importante que permite medir el tiempo que tarda un paquete en ir desde el subnivel PDCP de la eNB hasta el mismo subnivel en el UE. Este retardo incluye el tiempo de espera de los paquetes en el *buffer* de cada UE, y en algunos casos los valores superan los descritos en las especificaciones del R8, donde el valor objetivo es menor a 10 ms en el UP [23].

El indicador de porcentaje de pérdidas de PDU permite analizar el porcentaje de pérdidas de PDUs del subnivel RLC ocasionadas por las características desfavorables del canal, ya que se ha alcanzado un tiempo de espera máximo o un número máximo de retransmisiones fallidas.

La asignación de recursos permite visualizar de qué forma son asignados los recursos de ancho de banda a cada uno de los UEs por cada TTI. La asignación de recursos disponibles se realiza de forma dinámica por parte del algoritmo de planificación de paquetes acorde al algoritmo implementado en el eNB. Por otra parte, el indicador de desempeño relacionado con el tamaño de las PDU, presenta el Tamaño de los Bloques de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) en bytes para cada uno de los UEs por cada TTI, donde es posible visualizar la asignación de recursos por parte del algoritmo de planificación de paquetes y las diferentes PDUs de subnivel MAC recibidas con errores. Los resultados de estos dos indicadores permiten visualizar el comportamiento del algoritmo de planificación de paquetes, acorde a las condiciones de canal de los UEs dadas por los valores de SINR.

<sup>15</sup> Los valores de *throughput* exactos no se pudieron determinar en ninguno de los escenarios presentadas en este trabajo de grado debido a que la versión de la herramienta LTE-AMoRE® no permitió obtener los resultados numéricos exactos de RB asignados a cada UE ni de la Tasa de Error de Bloques (BLER, *Block Error Rate*).



A nivel de enlace del modelo de referencia OSI se analizan y evalúan las medidas efectiva y suavizada de la SINR, las cuales representan las características del canal y sus valores están ligados a la degradación que sufre la señal transmitida ocasionada por factores como la atenuación, el ruido del canal, los desvanecimientos rápidos y por sombra y la interferencia. Las medidas suavizadas de SINR corresponden al promedio de las medidas realizadas cada 3 segundos sobre los recursos asignados a cada UE.

En el nivel físico se analizan y evalúan los indicadores de desempeño relacionados con los porcentajes de la tasa de error global H-ARQ después del número máximo de retransmisiones y tasa de error H-ARQ después de cada una de las retransmisiones, en donde la herramienta permite realizar hasta 3 retransmisiones para declarar una PDU como pérdida. Estos resultados permitieron verificar la efectividad de la técnica de corrección de errores H-ARQ por medio de la Redundancia Incremental.

Por otra parte el porcentaje de la tasa de error global H-ARQ se determina de manera aproximada por medio de la BER. La BER es una medida de evaluación de la calidad de la información recibida, y se define como la relación entre el número de bits recibidos erróneamente y el número total de bits transmitidos, como se muestra en la Ecuación 2.2 [27].

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad [2.2]$$

### **2.2.3 Indicadores de desempeño del enlace de subida**

En la Figura 2.3 se presentan todos los indicadores de desempeño de la herramienta de simulación en el enlace de subida.

Figura 2.3. Ventana de selección de gráficas del enlace de subida

Uplink Plot Selection	
Parameter	Setting
[-] PDCP Layer	
Aggregate Throughput	<input type="checkbox"/> Hide
+ Throughput	<input type="checkbox"/> Hide
+ Delay	<input type="checkbox"/> Hide
[-] RLC Layer	
+ Discarded SDU Bitrate	<input type="checkbox"/> Hide
+ Lost PDU Percentage	<input type="checkbox"/> Hide
+ Retransmitted PDU Percentage	<input type="checkbox"/> Hide
[-] MAC Layer	
Resource Assignment	<input type="checkbox"/> Hide
Power Assignment	<input type="checkbox"/> Hide
+ Total Tx Power	<input type="checkbox"/> Hide
+ Tx Power per PRB	<input type="checkbox"/> Hide
+ Throughput	<input type="checkbox"/> Hide
+ PDU Sizes	<input type="checkbox"/> Hide
TFC Selection	<input type="checkbox"/> Hide
+ TFC Distribution	<input type="checkbox"/> Hide
+ OLLA Offset	<input type="checkbox"/> Hide
[-] PHY Layer	
+ HARQ Error Rate (Residual)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Error Rate (after 1st HARQ Tx)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Error Rate (after 2nd HARQ Tx)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Error Rate (after 3rd HARQ Tx)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Error Rate (after 4th HARQ Tx)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Percentage of Retransmissions	<input type="checkbox"/> Hide
[-] LINK Layer	
+ Frequency Selective SINR (Instantaneous)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Frequency Selective Known SINR (Instantaneous)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Frequency Selective SINR (Intensity)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Frequency Selective Known SINR (Intensity)	<input type="checkbox"/> Hide
+ Peak SINR	<input type="checkbox"/> Hide
+ Measured Effective SINR	<input type="checkbox"/> Hide
+ Measured Effective SINR (smoothed)	<input type="checkbox"/> Hide

En la Tabla 2.3 se encuentran los indicadores más importantes de la simulación, seleccionados para evaluar el desempeño en el enlace de subida. Estos son los mismos indicadores del enlace de bajada, con la diferencia que se adicionan tres indicadores: en el subnivel MAC la potencia de transmisión total y la potencia de transmisión por RB; y en el nivel de enlace el valor pico de SINR.

Tabla 2.3. Indicadores seleccionados para su visualización en el enlace de subida

Indicadores a evaluar en el enlace de subida
<b>Subnivel PDCP</b>
<i>Throughput</i> total de la celda
<i>Throughput</i> de cada UE

Retardo de transmisión
<b>Subnivel RLC</b>
Porcentaje de pérdidas de PDU
<b>Subnivel MAC</b>
Asignación de Recursos
Potencia de Transmisión Total
Potencia de Transmisión por PRB
<i>Throughput</i> a subnivel MAC
<b>Nivel de Enlace</b>
Valor Pico de SINR
SINR Efectiva
SINR Efectiva Suavizada
<b>Nivel Físico</b>
Tasa de Error Residual H-ARQ después del número máximo de transmisiones
Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el número total de bloques de transporte transmitidos
Tasa de Error H-ARQ después de la 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> y 4 <sup>a</sup> transmisión

En el caso de la potencia por RB se dividen los valores logarítmicos de potencia por el número total de RB asignados a cada UE [24]. Estas gráficas, en conjunto con las gráficas de SINR del enlace de subida permiten visualizar el funcionamiento del mecanismo de control de potencia.

En el nivel de enlace se evalúa y analiza el valor pico de SINR, donde a diferencia del parámetro de SINR encontrado en el enlace de bajada, aquí se muestran los valores de SINR sin tener en cuenta las decisiones tomadas por el algoritmo de planificación de paquetes con respecto a la asignación de recursos y el control de potencia.

### 2.3 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de haber seleccionado los indicadores de desempeño más importantes de una red LTE, se realizan unas simulaciones a través de unos escenarios establecidos, obteniendo diferentes resultados gráficos de cada uno de ellos, con la intención de hacer un análisis comparativo con las especificaciones del R8.

En el Capítulo 3, se presenta detalladamente la evaluación y el análisis de los resultados obtenidos de cada uno de los indicadores de desempeño seleccionados.

## **2.4 RESTRICCIONES DE LA HERRAMIENTA**

De acuerdo a la descripción de los parámetros e indicadores de desempeño realizada y al manejo de la herramienta de simulación LTE-AMoRE® se evidencian algunas restricciones y limitaciones de esta herramienta. Algunas de ellas están relacionadas con la modificación de algunos de los parámetros, especialmente las características físicas de la celda y de operación simultánea de múltiples eNBs, ya que no se dispuso de los permisos administrativos de la herramienta necesarios para acceder a los archivos de configuración, con el fin de editar manualmente los parámetros que no pudieron ser modificados. Sin embargo, esto no impide realizar las simulaciones de una red LTE típica, pues estos parámetros están definidos de acuerdo a las especificaciones del R8.

Muchas de las inquietudes relacionadas con la operación y funcionamiento de la herramienta no pudieron ser solucionadas debido a que se recibió muy poca asesoría e información por parte de Nokia-Siemens Network Colombia y su fabricante.

### **3 PLAN DE PRUEBAS, EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA LTE MEDIANTE EL USO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACION LTE-AMoRE®**

En este capítulo se evaluaron y analizaron los indicadores de desempeño de los dos primeros niveles y sus respectivos subniveles del modelo de referencia OSI, en los enlaces de bajada y subida del sistema LTE, por medio de la herramienta de simulación LTE-AMoRE®.

A continuación se describe el plan de pruebas seleccionado para realizar las simulaciones, teniendo en cuenta la definición de cada uno de los escenarios sobre los cuales se va a trabajar y la configuración de los parámetros esenciales de la simulación.

Los resultados de cada una de las simulaciones en los escenarios implementados se organizaron de la siguiente manera: en primer lugar se muestran las figuras obtenidas en la simulación para el enlace de bajada y su respectivo análisis, y finalmente se realiza el mismo procedimiento en el caso del enlace de subida.

#### **3.1 PLAN DE PRUEBAS PARA CADA UNA DE LAS SIMULACIONES**

Para realizar el análisis del desempeño a nivel de sistema de una red LTE simulada con la herramienta LTE-AMoRE® se evaluaron los diferentes indicadores de los niveles físico y de enlace y de sus respectivos subniveles del modelo de referencia OSI correspondiente a la tecnología LTE, en los enlaces de subida y bajada.

- Al inicio del programa es necesario escoger un espacio de trabajo, que opera con ancho de banda de 20 MHz, TTI de 1 ms y 10 UE.
- Los parámetros globales del sistema como son: potencia de transmisión, radio de celda y modo de duplexación están establecidos por defecto y no se pueden modificar.
- Los UEs se mantuvieron estáticos dentro de la celda.
- Se tomaron 100 muestras en 25 segundos para graficar cada uno de los indicadores.

La simulación permitió obtener resultados gráficos de los diferentes indicadores seleccionados, ya que en el transcurso de la simulación la transmisión de información útil entre eNB y los UEs fue ininterrumpida, por lo tanto en todos los intervalos de transmisión hubo intercambio de información.

Debido a las limitaciones de la herramienta de simulación, las simulaciones se realizaron para una sola celda, en donde solamente transmitía un solo eNB, pues se contaba con una versión desactualizada del software.

Para realizar el desarrollo de cada una de las simulaciones se tuvieron en cuenta las opciones de configuración que se encuentran en la Tabla 3.1.

La Tabla 3.1 muestra los parámetros de configuración del enlace de bajada. El único de estos parámetros que se modificó corresponde al relacionado con el uso de la tecnología MIMO 2x2 y MIMO 4x4. A continuación se presentan las configuraciones de los parámetros más importantes del enlace de bajada.

- **Factor de prioridad:** en las simulaciones realizadas se seleccionó un factor de prioridad igual a 1 para que todos los UEs tengan la misma prioridad al momento que el algoritmo de planificación de paquetes realiza la asignación de los recursos disponibles del sistema.
- **BLER objetivo:** el valor de BLER objetivo definido por la herramienta es del 20% para todas las simulaciones, si se supera este valor es necesario el uso de una retransmisión H-ARQ.
- **Planificador de paquetes:** para la selección del algoritmo de planificación de paquetes, se realizaron simulaciones en un escenario de prueba, que está conformado por tres UEs los cuales se encuentran ubicados como se observa en la Figura 3.1, con el fin de analizar cuál de los tres algoritmos *Maximum Rate*, *Round Robin* y *Proportional Fair* presentaba el mejor comportamiento en cuanto a la asignación de recursos del sistema, esto se puede observar en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4.

Figura 3.1. Escenario para la evaluación de los algoritmos de planificación de paquetes

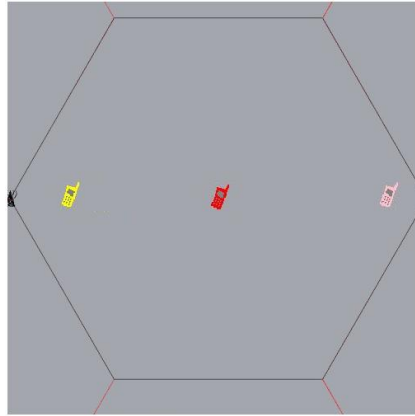


Figura 3.2. Asignacion de Recursos del Maximum Rate

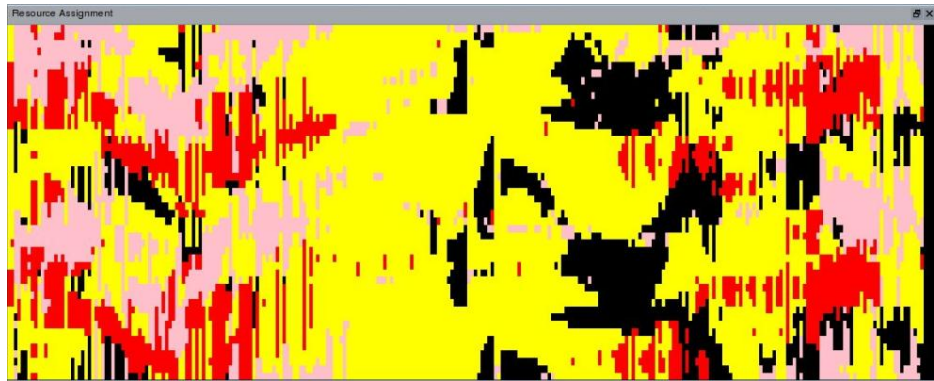


Figura 3.3. Asignación de Recursos del Round Robin

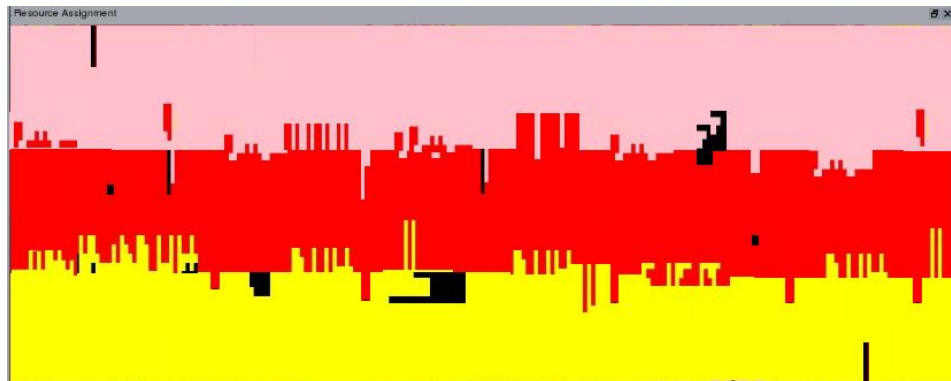
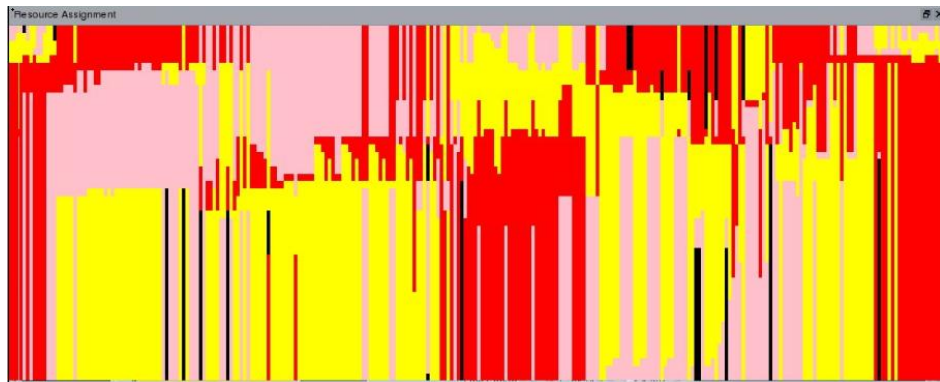


Figura 3.4. Asignación de Recursos del Proportional Fair



Fue posible determinar que el algoritmo de planificación de paquetes *Proportional Fair* presentó el mejor comportamiento, debido a que realiza una mejor asignación de dichos recursos con respecto a los demás algoritmos. Este hecho coincide con la selección del algoritmo de planificación de paquetes descrita en las especificaciones del R8 [23], por lo tanto todos los resultados presentados en este trabajo de grado se obtuvieron haciendo uso de este algoritmo específico.

Tabla 3.1. Parámetros del enlace de bajada

PARAMETROS	CONFIGURACIÓN
Tráfico	Activado
Potencia de Transmisión	40 W
Diversidad en Recepción	2x2
Modo Trama MIMO	Doble Trama
Errores Nivel de Enlace	Activado
Planificador de paquetes	<i>Proportional Fair</i>

Los parámetros del enlace de subida que aparecen en la Tabla 3.2 no sufrieron modificaciones, al igual que los parámetros del enlace de bajada presentados en la Tabla 3.1.

- **SIR objetivo (lazo abierto):** si el eNB determina que el valor de SINR recibido de alguno de los UEs es menor que el valor de SIR objetivo, envía comandos de control de potencia para que estos transmitan con un nivel de potencia mayor, con el objetivo de alcanzar el valor establecido de SIR objetivo.
- **Control de potencia:** si no se selecciona ningún mecanismo de control de potencia, los UEs transmiten con los máximos niveles de potencia definidos.
- **Asignación de ancho de banda:** el escenario general seleccionado para las diferentes simulaciones cuenta con un ancho de banda de 20 MHz, este parámetro permite que el eNB asigne más de una unidad de recursos a cada UE, de tal modo que se incrementen los valores máximos de *throughput* y se disminuyan los retardos de transmisión.

Tabla 3.2. Parámetros del enlace de subida

PARAMETROS	CONFIGURACIÓN
Tráfico	Activado
Máxima potencia total de transmisión	0.2500 W
Errores Nivel de Enlace	Activado
Diversidad en Recepción	1x2
Asignación de Ancho de Banda	Automático

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros globales del sistema. Algunos de estos parámetros no pudieron ser modificados.

- **Modo de H-ARQ:** en este parámetro se seleccionó el modo de Redundancia Incremental, debido a que este es el método de retransmisiones más eficaz con respecto a los demás, ya que se envía información redundante adicional que se combina con la información recibida para lograr una decodificación exitosa.
- **Movilidad al interior de la celda:** para las simulaciones realizadas se trabajó con los UEs estáticos.



- **Modelo de desvanecimiento rápido:** se seleccionó el modelo de peatón B a una velocidad de 3 Km/h. Las variaciones del canal son relativamente lentas, con el fin de que las decisiones del planificador se puedan visualizar con facilidad en los resultados gráficos.

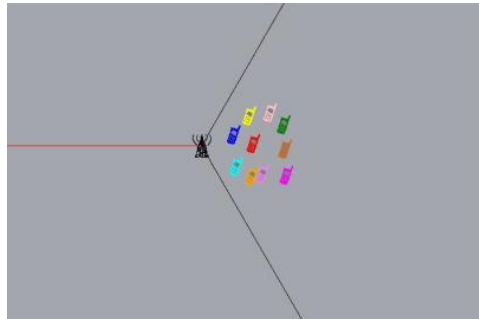
*Tabla 3.3. Parámetros globales del sistema*

PARAMETROS	CONFIGURACIÓN
Retransmisiones	Activado
Modo H-ARQ	Redundancia Incremental
Modo Duplexación	FDD
Modelo del Canal	PedB (3 km/h)
Radio de la Celda	0.167 km
Permitir Movimiento en la Celda	Desactivado

Para la ejecución del plan de pruebas se dispuso de los siguientes cuatro escenarios de simulación, cada uno con 10 UEs, a excepción del último escenario, en donde se evaluaron las técnicas de MIMO 2x2 y MIMO 4x4:

- Escenario I: en este escenario todos los UEs se encuentran situados cerca de la eNB, como se aprecia en la Figura 3.5.

*Figura 3.5. Ubicación de los UEs en el escenario I*



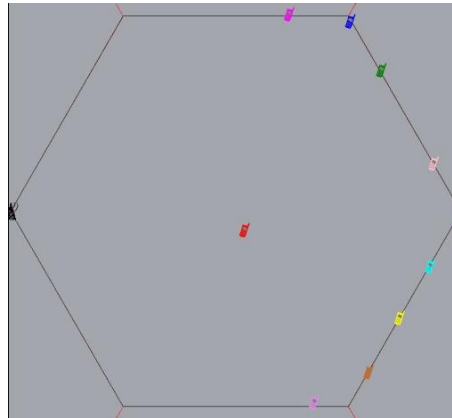
- Escenario II: Los UEs se encuentran ubicados uno tras otro alejándose del eNB, como se aprecia en la Figura 3.6.

*Figura 3.6. Ubicación de los UEs en el escenario II*



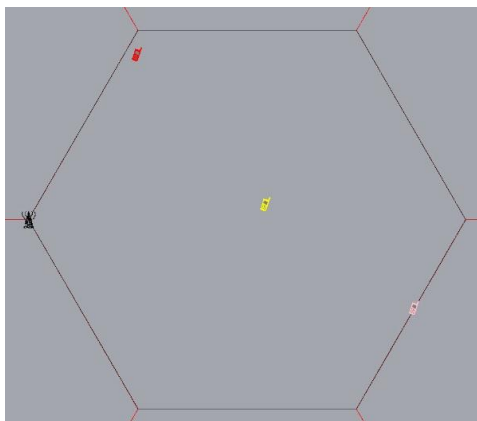
- Escenario III: en este escenario se encuentran ubicados nueve UEs sobre la frontera de la celda y un UE en la mitad de ella, en línea directa con el eNB, como se observa en la Figura 3.7.

*Figura 3.7. Ubicación de los UEs en el escenario III*



- Escenario IV: este escenario se simuló con tres UEs ubicados como se muestra en la Figura 3.8 con el fin de realizar un análisis comparativo entre las dos técnicas de transmisión de MIMO, con el objetivo de visualizar los cambios en los diferentes indicadores de desempeño que muestra la herramienta.

*Figura 3.8. Ubicación de los UEs en el escenario IV*



### **3.2 EVALUACION Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO EN EL ESCENARIO I**

En este escenario se realizó la evaluación de los diferentes indicadores de desempeño de los dos primeros niveles y subniveles del modelo de referencia OSI de LTE. Esta evaluación y análisis se llevó a cabo en los enlaces de bajada y subida.

La Figura 3.5 muestra la ubicación de los UEs en el primer escenario, donde estos se encuentran próximos al eNB. Esta cercanía permite que haya un comportamiento adecuado del sistema, ya que todos los UEs presentan buenas condiciones del canal.

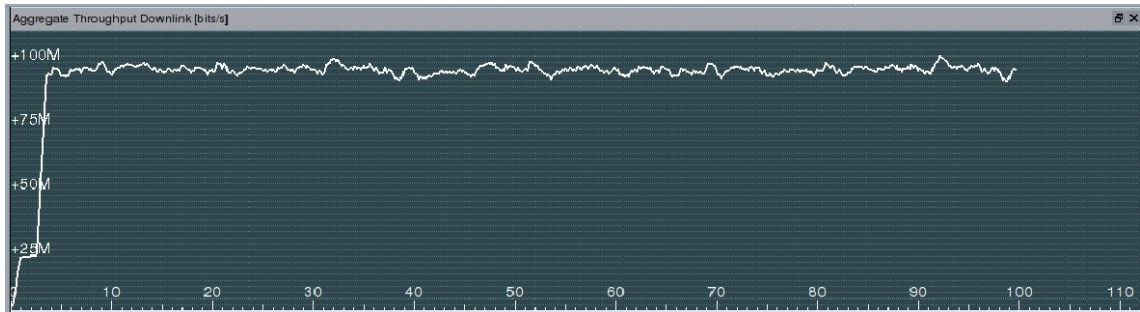
### 3.2.1 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada

El subnivel PDCP permite evaluar y analizar los siguientes indicadores:

- *Throughput* total de la celda.
- *Throughput* de cada UE.
- Retardo<sup>16</sup> de transmisión.

La Figura 3.9 muestra el *throughput* total en tiempo real del sistema en el enlace de bajada, donde se toman 100 muestras en un intervalo de 25 segundos, en el cual el valor del *throughput* se encuentra por encima de 90 Mbps, mostrando un alto desempeño del sistema, cercano al valor teórico especificado en el R8 [23] en donde se logra una tasa de 100 Mbps en el enlace de bajada. En este caso particular se alcanza este *throughput* gracias a la ubicación de los UEs y a la configuración de los parámetros del sistema. A pesar de que la herramienta no permite conocer con exactitud el esquema de modulación y la tasa de codificación empleados por el sistema, es posible afirmar que, como los UEs se encuentran cerca del eNB, estos implementan esquemas de modulación de alto orden, disminuyendo la redundancia en el sistema.

Figura 3.9. *Throughput* total de la celda en el enlace de bajada en el escenario I



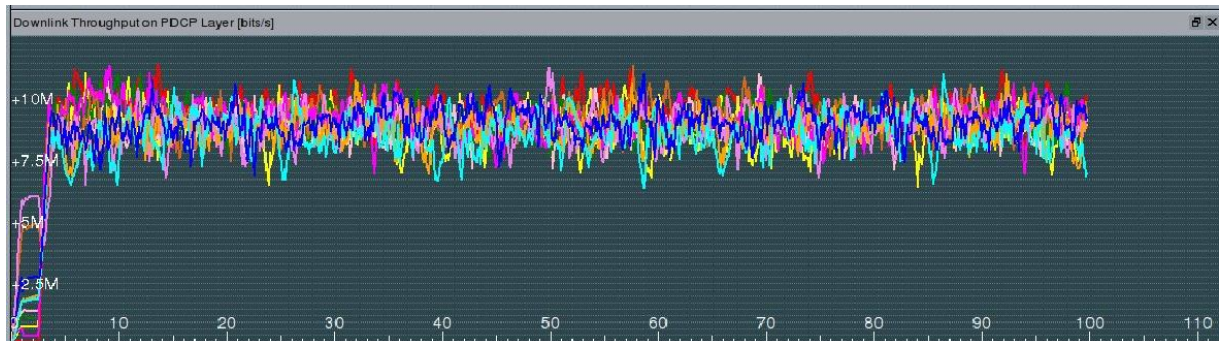
De acuerdo a la Ecuación 2.2, reemplazando los valores de *throughput* total en el enlace de bajada y el ancho de banda del sistema, es posible determinar la eficiencia espectral de este caso particular, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{R}{B} = \frac{95 \text{ Mbps}}{20 \text{ MHz}} = 4.75 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}$$

<sup>16</sup> El retardo de transmisión es el tiempo transcurrido desde la salida de un paquete del subnivel PDCP del eNB hasta la llegada de este paquete al mismo subnivel en el UE.

De acuerdo a la Tabla 2.2, el valor de eficiencia que más se aproxima con el valor encontrado se presenta cuando el sistema implementa el esquema de modulación de 64-QAM con una tasa de codificación igual a 3/4. Esto permite suponer que en el escenario I todos los UEs implementan este mismo esquema de modulación y la misma tasa de codificación en el enlace de bajada.

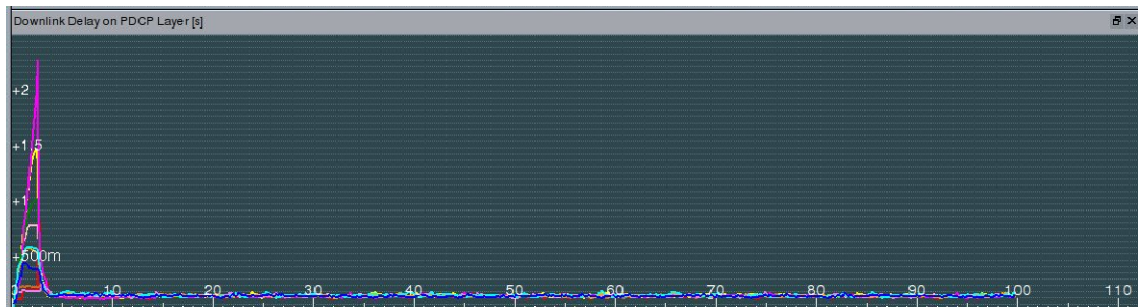
Figura 3.10. Throughput de cada UE en el enlace de bajada en el escenario I



La Figura 3.10 muestra el *throughput* de cada uno de los UEs en el enlace de bajada en Mbps. Debido a que los UEs se encuentran próximos al eNB, los valores de *throughput* para cada UE se encuentran entre 6 Mbps y 11 Mbps. Estos valores se relacionan directamente con la ubicación de los UEs dentro de la celda, ya que en las cercanías del eNB se cuenta con mejores condiciones de canal y los valores obtenidos de potencia son mayores respecto a los UE más distantes del eNB, lo que implica directamente un aumento de la SNR.

La Figura 3.11 muestra el retardo de transmisión de extremo a extremo en segundos, en donde se aprecia que los valores de retardo son muy bajos, debido a la ubicación de los UEs dentro de la celda. De acuerdo a las especificaciones del R8, este valor debe ser igual a 10 ms [23], sin embargo, en este caso en particular no es posible establecer con precisión el valor exacto de retardo producido en la simulación, ya que visualmente es complicado identificarlo.

Figura 3.11. Retardo de transmisión en el enlace de bajada en el escenario I



Por otra parte, en la Figura 3.11 se observan valores considerables de retardo durante los primeros segundos de la simulación. Este hecho se presentó debido a que al inicio de la simulación la herramienta establece por defecto la ubicación de los diferentes UEs. En el momento de cargar la nueva ubicación de los UEs, el simulador tarda unos segundos en actualizar dicho escenario.

### 3.2.2 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de bajada

En el subnivel RLC la herramienta evalúa los valores del porcentaje de las pérdidas de PDUs en el enlace de bajada.

*Figura 3.12. Porcentaje de pérdidas de PDUs en el enlace de bajada en el escenario I*



La Figura 3.12 muestra el porcentaje de pérdidas de las PDUs en el enlace de bajada. Como se observa no se presenta ninguna variación en el porcentaje ya que los UEs se encuentran cerca del eNB, esto implica que los UEs no necesitan retransmisiones, permitiendo así una buena comunicación sin pérdidas en el envío de las PDUs.

### 3.2.3 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada

En el subnivel MAC se pueden evaluar y analizar los siguientes indicadores:

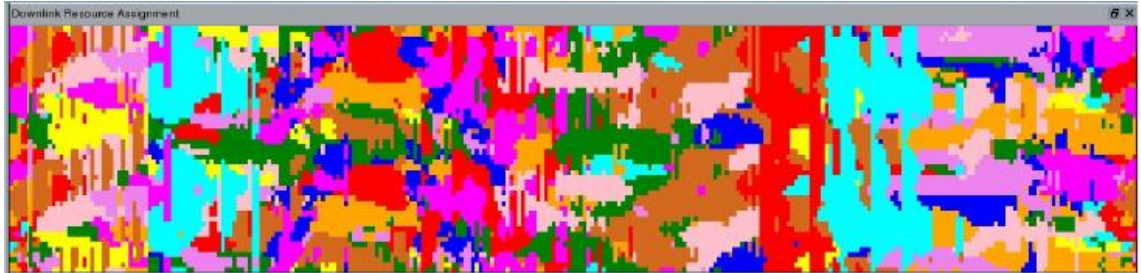
- Asignación de recursos.
- *Throughput* a subnivel MAC.
- Tamaño de las PDUs.

La Figura 3.13 muestra la asignación de recursos disponibles en el enlace de bajada, donde cada color significa la unidad de recurso de frecuencia asignada a cada UE en cada intervalo de tiempo. El eje vertical (frecuencia) se extiende por todo el ancho de banda del sistema que es igual a 20 MHz y cada pixel en el eje horizontal (tiempo) es equivalente a una subtrama o intervalo de tiempo de duración igual a 0.5 ms. Se observa en la Figura 3.13 que los recursos son asignados a cada UE por intervalos de tiempo (20 píxeles). Los UEs que mejor asignación de recursos tienen son los de color rojo y agua



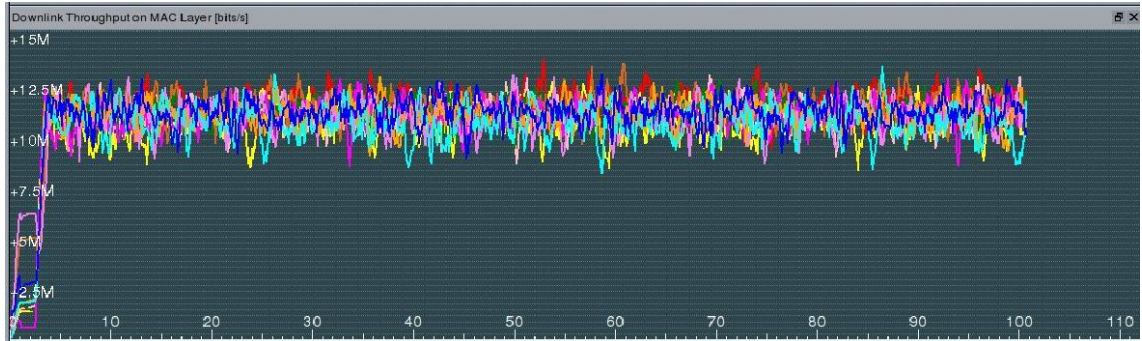
marina, dado que en algunos intervalos de tiempo se les asignan todos los recursos disponibles del sistema, ya que son los dos UE que se encuentran mucho más cerca del eNB.

Figura 3.13. Asignación de recursos en el enlace de bajada en el escenario I



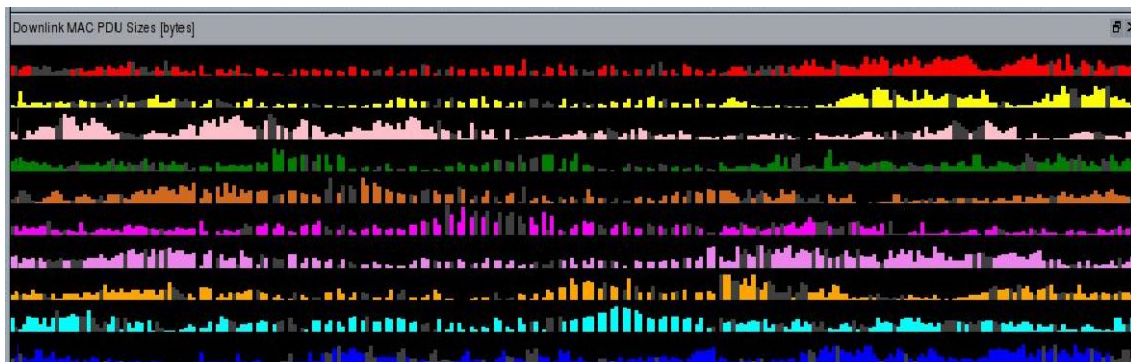
La Figura 3.14 muestra el *throughput* de cada UE a subnivel MAC en el enlace de bajada. Este es el *throughput* efectivo de la celda porque en el subnivel MAC se multiplexan los diferentes canales lógicos para formar los bloques de transporte de cada uno de los UEs. De acuerdo a la Figura 3.14 todos los UEs presentan variación en las medidas de *throughput*, cuyos valores se encuentran entre 9 Mbps y 12.5 Mbps, debido a que los UEs se encuentran cerca al eNB. Los valores pico de *throughput* más altos corresponden al UE de color rojo, ya que en los intervalos de tiempo donde se presentan estos valores pico, el UE recibe una mayor asignación de recursos disponibles por encontrarse próximo al eNB.

Figura 3.14. Throughput a subnivel MAC en el enlace de bajada en el escenario I



La Figura 3.15 muestra el TBS de las PDUs para cada uno de los UEs a subnivel MAC en el enlace de bajada, dado en bytes. Los UEs que se encuentran más lejos del eNB reciben una menor asignación de TBS ya que no implementan esquemas de modulación y tasa de codificación de alto orden. Se aprecia que todos los UEs presentan una asignación considerable de TBS debido a la ubicación de los UEs en la celda. Sin embargo, se observan espacios grises, debido a que algunas PDUs fueron recibidas con errores. Los espacios en negro indican que en estos intervalos de tiempo no se han recibido PDUs.

Figura 3.15. Tamaño de las PDUs en el enlace de bajada en el escenario I

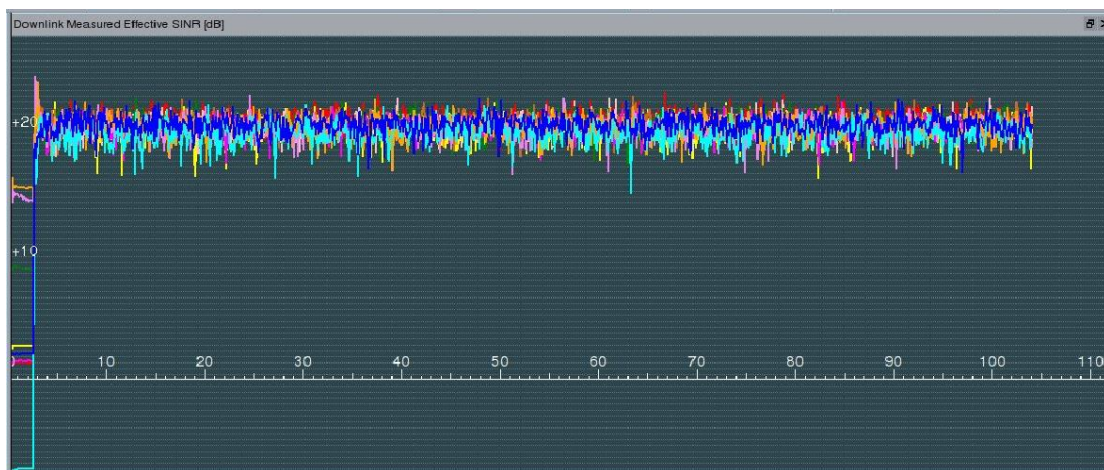


### 3.2.4 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada

En el nivel de enlace se evaluaron y analizaron los siguientes indicadores:

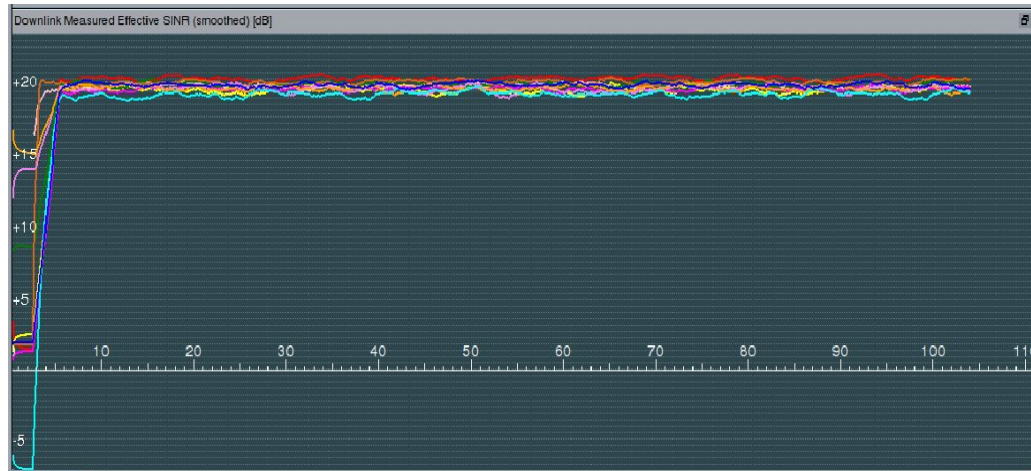
- SINR efectiva.
- SINR efectiva suavizada.

Figura 3.16. SINR efectiva en el enlace de bajada en el escenario I



La Figura 3.16 muestra la SINR efectiva en el enlace de bajada, donde se visualiza que los valores de SINR para cada uno de los UEs están en el rango de 18 dB y 22 dB. Al encontrarse los UEs cerca del eNB, existen mejores condiciones en el canal de transmisión, por lo tanto los valores medidos de SINR son altos. Por otra parte es necesario tener en cuenta que al no transmitir los eNBs de las celdas adyacentes, el sistema no está limitado por interferencia, y la SINR corresponde a SNR.

Figura 3.17. SINR efectiva suavizada en el enlace de bajada en el escenario I



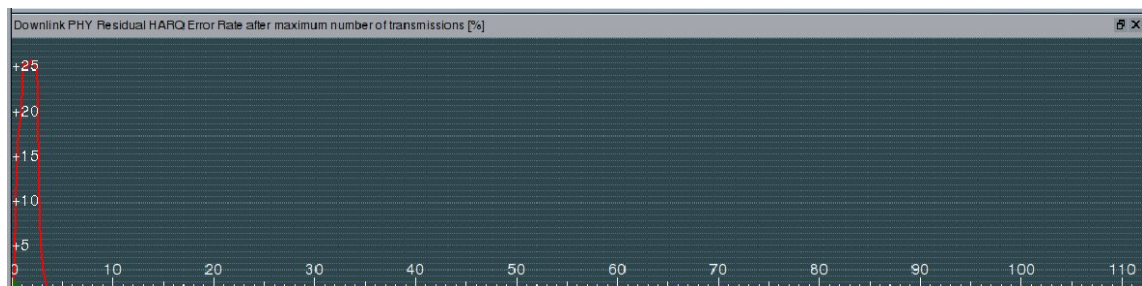
La Figura 3.17 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva en el enlace de bajada. La transmisión por parte del eNB se realiza mediante dos antenas, las cuales transmiten información diferente por cada una de ellas (multiplexación espacial). Este hecho permite que los valores obtenidos de SINR sean considerables, alrededor de los 20 dB para cada uno de los UE, ya que este sistema no está limitado por la interferencia.

### 3.2.5 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada

En el nivel físico se pueden evaluar y analizar indicadores tales como:

- Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de retransmisiones.
- Porcentaje de retransmisiones H-ARQ.
- Tasa de errores H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta transmisión.

Figura 3.18. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de transmisiones en el enlace de bajada en el escenario I

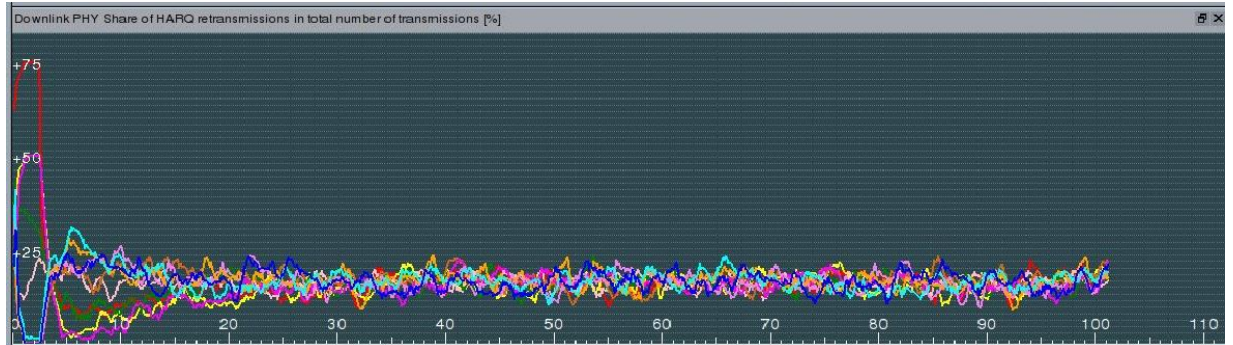


La Figura 3.18 no muestra variación en la tasa de error residual H-ARQ en el enlace de bajada, porque la ubicación de los UEs dentro de la celda genera un proceso de



recepción efectiva, por lo tanto ninguno de los UEs necesita retransmisión del mensaje original.

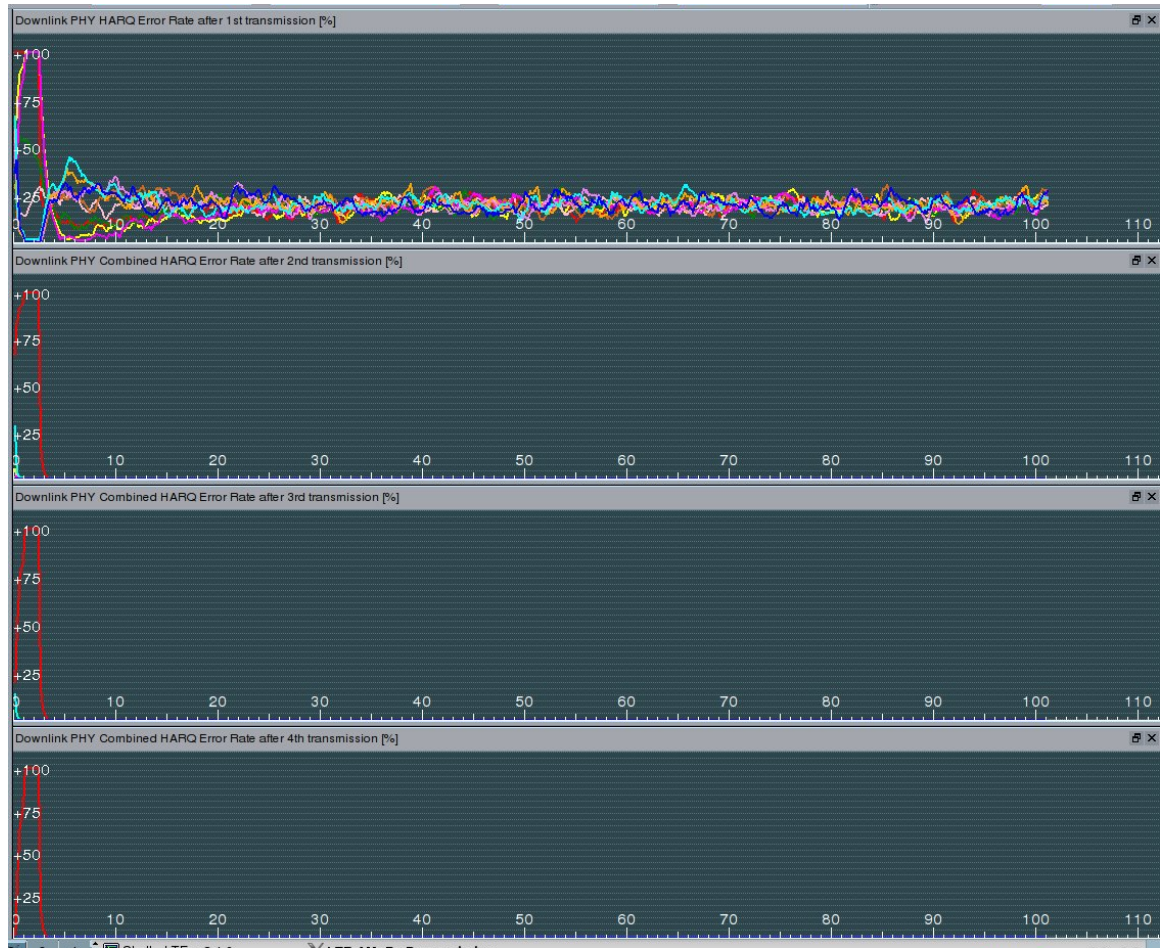
*Figura 3.19. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada en el escenario I*



La Figura 3.19 muestra el porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada, es decir, la cantidad de veces que el eNB envía una redundancia incremental para que la información sea decodificada correctamente por el UE. El número total de retransmisiones depende de la ubicación del UE, ya que a mayor distancia entre los terminales las señales recibidas poseen menor potencia, por tanto se espera un incremento en el número de errores producto de la atenuación y la multitrayectoria. La Figura 3.19 presenta valores de porcentaje de retransmisiones entre el 10 % y 25 % para todos los UEs en el enlace de bajada.

La Figura 3.20 muestra el porcentaje de la tasa de errores de las retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada. La herramienta permite realizar y evaluar hasta tres retransmisiones. Como se muestra el porcentaje de la tasa de error de la primera transmisión se encuentra entre 10% y 25%, dejando ver que solamente fue necesaria la primera retransmisión para recibir correctamente la información ya que la tasa de errores después de la segunda transmisión es igual a cero. Por esta razón los valores de porcentaje de errores de la Figura 3.20 corresponden solamente a los errores encontrados después de la primera transmisión. Todo esto se debe porque los UEs cuentan con buenas condiciones del canal, gracias a su ubicación tan cercana del eNB dentro de la celda.

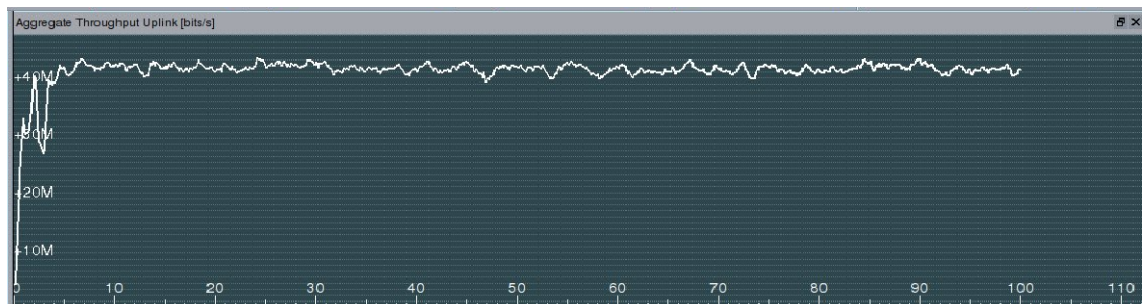
Figura 3.20. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta transmisión en el enlace de bajada en el escenario I



### 3.2.6 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de subida

Los indicadores que serán objeto de evaluación y análisis en este subnivel son los mismos que los evaluados y analizados en el enlace de bajada.

Figura 3.21. Throughput total de la celda en el enlace de subida en el escenario I



La Figura 3.21 muestra el *throughput* total de la celda a subnivel PDCP en el enlace de subida. Se puede observar que de acuerdo a la localización de los UEs, es posible obtener un valor de *throughput* promedio de 40 Mbps en el enlace de subida, cercano al valor teórico especificado en el R8 [23] igual a 50 Mbps. Este valor corresponde a la mitad del valor de *throughput* obtenido en el enlace de bajada, debido a las limitaciones de cada UE relacionadas con la potencia de transmisión, el número de antenas con las que se transmite y el esquema de modulación empleado.

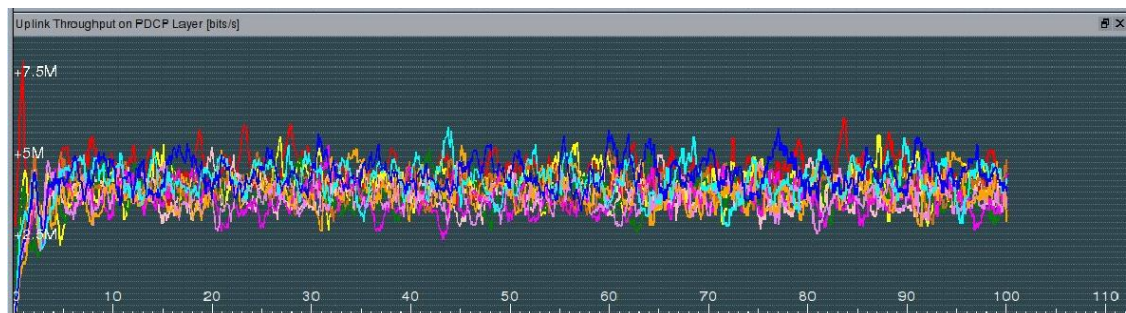
De acuerdo a la Ecuación 2.2, reemplazando los valores de *throughput* total en el enlace de subida y el ancho de banda del sistema, es posible determinar la eficiencia espectral de este caso particular, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{R}{B} = \frac{40 \text{ Mbps}}{20 \text{ MHz}} = 2 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}$$

De acuerdo a la Tabla 2.2, el valor de eficiencia que corresponde con el valor encontrado se presenta si el sistema implementa el esquema de modulación de 16-QAM con una tasa de codificación igual a 1/2. Esto permite suponer que en el escenario I todos los UEs implementan este mismo esquema de modulación y la misma tasa de codificación en el enlace de subida.

La Figura 3.22 muestra el *throughput* de cada uno de los UEs a subnivel PDCP en el enlace de subida, cuyos valores se encuentran entre 2.8 Mbps y 5.3 Mbps, debido a la ubicación y las condiciones de canal favorables de los UEs. Los valores de *throughput* más altos corresponden a los del UE de color rojo, siendo este uno de los más cercanos al eNB.

Figura 3.22. *Throughput* de cada UE en el enlace de subida en el escenario I

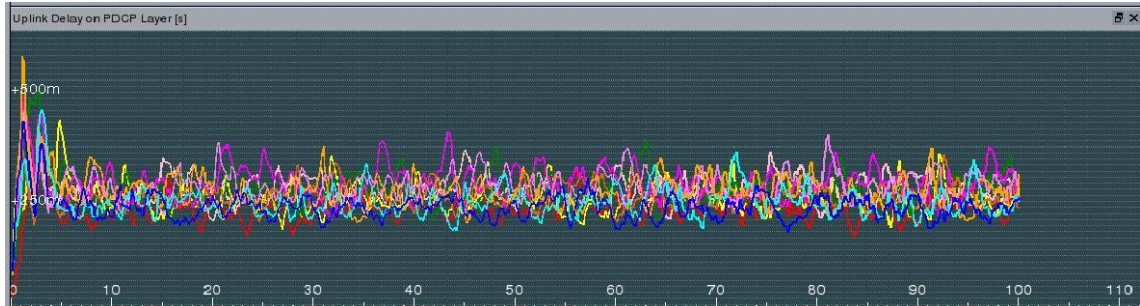


La Figura 3.23 muestra el retardo de transmisión para cada UE a subnivel PDCP en el enlace de subida. El valor del retardo oscila entre 250 ms y 300 ms, los cuales son valores mayores en comparación con los valores límite especificados en el R8 iguales a 10 ms [23]. Los valores elevados en el retardo ocurren debido a que el sistema debe esperar un tiempo en el cual el *buffer* de cada UE se desocupe para continuar con la



transmisión, por lo tanto se presentan retardos en la transmisión de la información, debido a restricciones del R8.

*Figura 3.23. Retardo de transmisión en el enlace de subida en el escenario I*

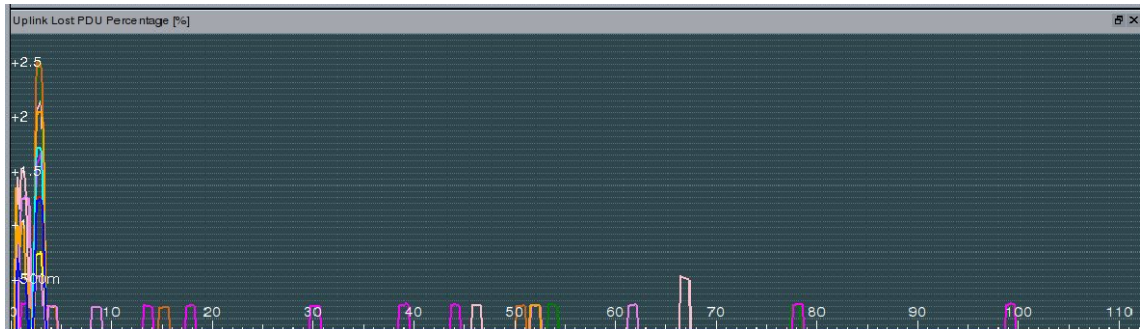


### 3.2.7 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de subida

En este subnivel se evalúa y analiza el porcentaje de pérdidas de las PDUs de la misma forma que en el enlace de bajada.

La Figura 3.24 muestra el porcentaje de pérdidas de PDUs en el enlace de subida. Gracias a las condiciones de canal favorables de todos los UEs, la mayoría de las PDUs son recibidas por el eNB, y solamente se presentan pérdidas en algunas situaciones, cuyos valores de pérdidas son menores al 0.5%. Como se muestra los UEs que presentaron estos valores de pérdidas de PDUs son los de color morado y rosado, ya que son los más distantes del eNB.

*Figura 3.24. Porcentaje de pérdidas PDU en el enlace de subida en el escenario I*



### 3.2.8 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de subida

Los parámetros analizados en este subnivel son los mismos que en el enlace de bajada, con la diferencia que se presentan dos nuevos indicadores:

- Potencia total de transmisión de cada UE.

- Potencia por RB de cada UE.

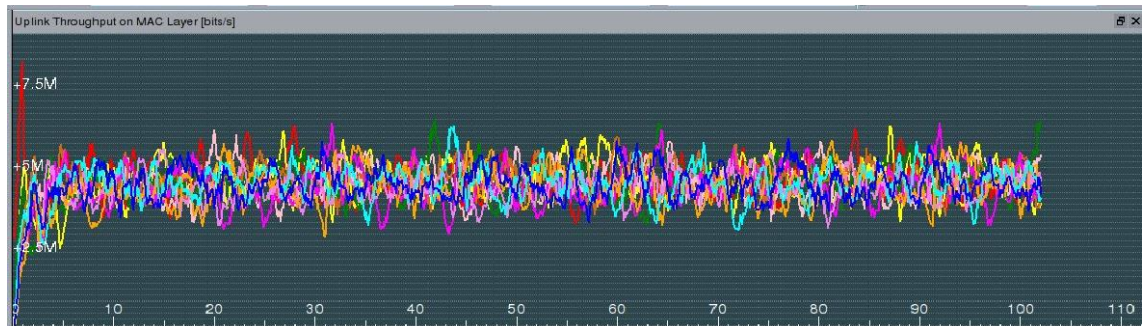
La Figura 3.25 muestra la asignación dinámica de recursos en el enlace de subida. Esta asignación depende fundamentalmente de las condiciones de canal y del planificador de paquetes. La asignación de recursos está ligada con la ubicación de los UEs, es decir, si el UE se encuentra dentro del lóbulo principal de radiación del eNB, tendrá una mejor asignación de recursos. Para asignar estos recursos, el eNB verifica la prioridad que existe en los diferentes UE. En el caso de la simulación el planificador de paquetes asigna la misma prioridad para cada UE, teniendo en cuenta la posición de los UEs y las pérdidas de propagación para realizar la asignación. Por esta razón, la asignación de recursos es similar que en el caso del enlace de bajada, dándole mayor asignación a los UEs de color rojo, azul y agua marina, por ser los más cercanos al eNB.

Figura 3.25. Asignación de recursos en el enlace de subida en el escenario I



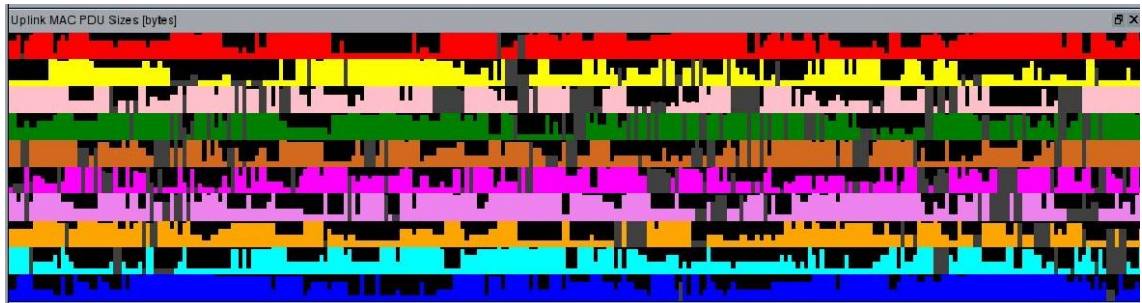
La Figura 3.26 muestra el *throughput* a subnivel MAC en el enlace de subida, cuyos valores obtenidos son directamente proporcionales con la distancia a la cual se encuentran los UEs, las condiciones del medio, la potencia de recepción en el eNB, el esquema de modulación y la tasa de codificación empleada. Los valores de *throughput* de los UEs están entre 3 Mbps y 6 Mbps. Estos niveles de *throughput* son mayores que los niveles de *throughput* a subnivel PDCP ya que se tiene en cuenta los encabezados de señalización a subnivel MAC y las retransmisiones RLC.

Figura 3.26. Throughput a subnivel MAC en el enlace de subida en el escenario I



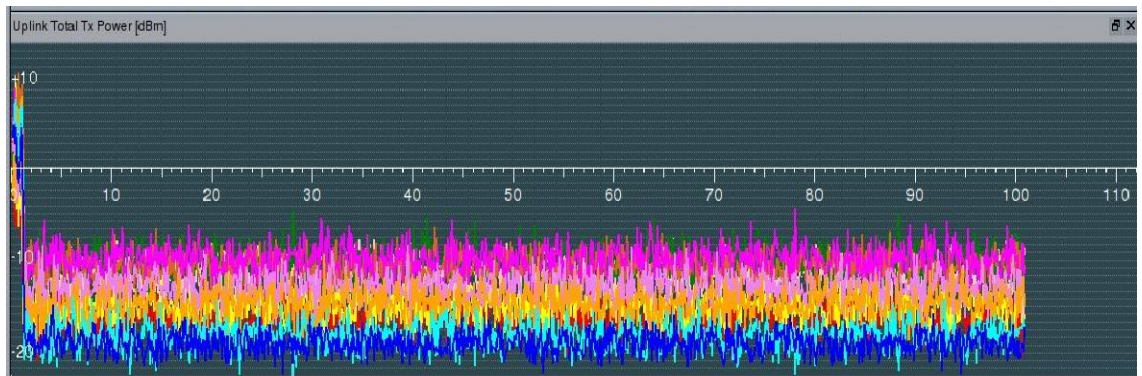
La Figura 3.27 muestra el tamaño de las PDUs a subnivel MAC en el enlace de subida. Las PDUs presentan una asignación de tamaños bastante considerables para cada UE durante toda la simulación, gracias a su ubicación dentro de la celda. Los UEs que presentan una mejor asignación de tamaño de PDUs son los de color rojo y azul, gracias a su proximidad con el eNB. Para los UEs más alejados del eNB no se asignaron PDUs en algunos intervalos de tiempo, representados como espacios negros, en donde se aprecia que el UE de color violeta es aquel que presenta más espacios negros.

*Figura 3.27. Tamaños de las PDUs en el enlace de subida en el escenario I*



La Figura 3.28 muestra la potencia total de transmisión de cada UE en el enlace de subida. La potencia de transmisión es directamente proporcional a la distancia de separación entre cada UE y el eNB. Como se observa el UE que transmite con un nivel de potencia de transmisión menor es el de color azul, ya que se encuentra más cerca del eNB, presentando niveles de potencia entre -21 dBm hasta -19 dBm. Por el contrario, el UE de color violeta presenta un nivel más alto de potencia de transmisión, ya que este se encuentra más alejado del eNB, tomando valores desde -12 dBm hasta -8 dBm. El control de potencia permite que los UEs que se encuentran más cerca del eNB transmitan con menores niveles con el fin de evitar la saturación del eNB, y permitir que los UE tengan una gestión adecuada de potencia.

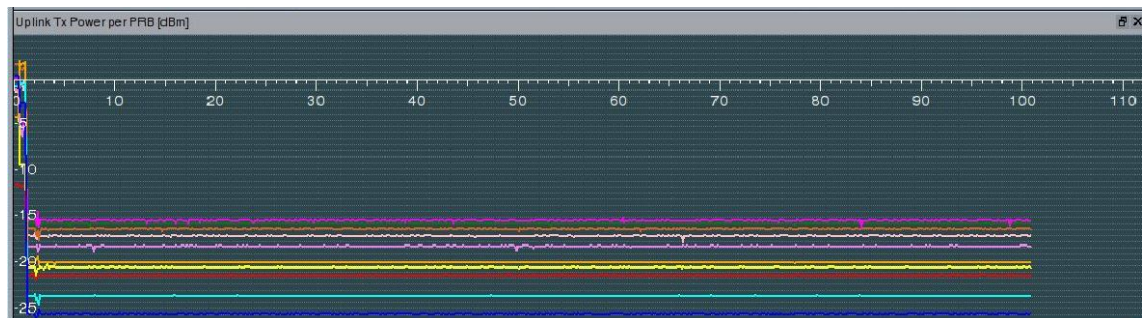
*Figura 3.28. Potencia de transmisión de cada UE en el enlace de subida en el escenario I*





La Figura 3.29 muestra la potencia de transmisión por bloque de recursos en el enlace de subida. Se presenta información similar que en la Figura 3.28, teniendo en cuenta que en este caso corresponde a un promedio de la potencia de cada uno de los RB asignados a los UEs medida en dBm, de acuerdo a los parámetros del enlace de subida presentados en el Capítulo 2. El control de potencia fraccional permite que los valores de potencia con los cuales transmiten los UEs compensen los efectos de las pérdidas de propagación para cada uno de ellos. De este modo todos los UEs cuentan con niveles de potencia de transmisión adecuados a su localización.

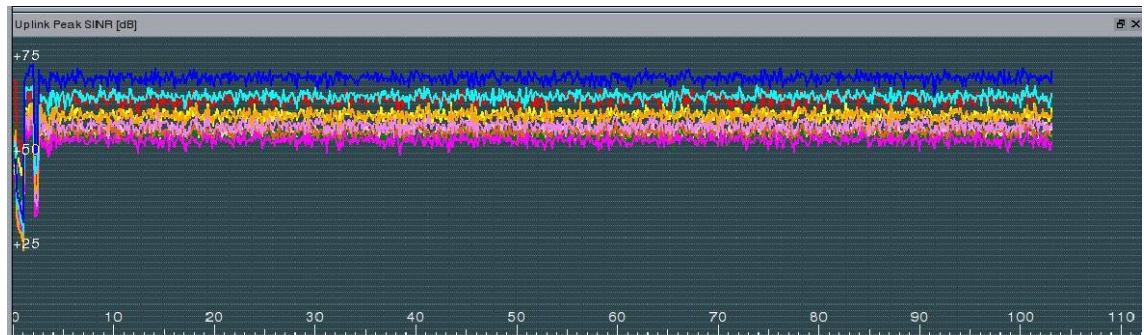
*Figura 3.29. Potencia de transmisión por RB en el enlace de subida en el escenario I*



### 3.2.9 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de subida

Las figuras que se muestran a continuación permiten analizar el comportamiento del canal radio en el enlace de subida a nivel de enlace. En esta situación se obtuvo un nuevo indicador: SINR pico en el enlace de subida.

*Figura 3.30. Valor SINR pico en el enlace de subida en el escenario I*

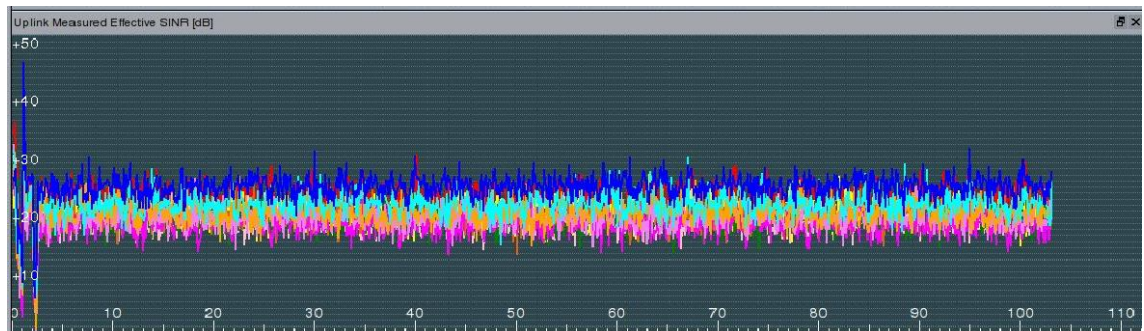


La Figura 3.30 muestra el valor SINR pico en el enlace de subida, donde se observa que el valor mayor de SINR corresponde al UE de color azul, siendo este uno de los más próximos al eNB, por lo cual radia con una menor potencia para que el eNB reciba adecuadamente su información transmitida, obteniendo valores de SINR aproximados a 70 dB. En este caso particular los valores encontrados de SINR son los esperados, ya que este sistema no se encuentra limitado por la interferencia de las celdas adyacentes y

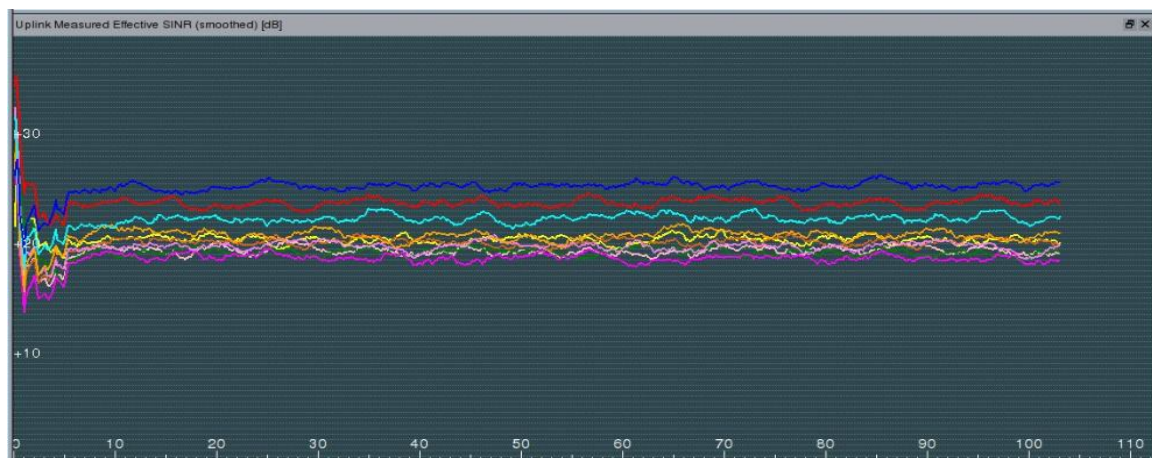
todos los UEs se encuentran muy cercanos al eNB, presentando buenas condiciones del canal, y además en el enlace de subida la herramienta emplea diversidad en recepción.

La Figura 3.31 muestra la SINR efectiva en el enlace de subida. En comparación con el enlace de bajada, los valores de SINR son mayores en esta situación, ya que los UEs se encargan de transmitir su información mediante una sola antena, por lo cual las señales recibidas por el eNB no presentan interferencia de la otra antena del mismo UE, mientras que el eNB aprovecha sus dos antenas para recibir la información (diversidad en recepción). De acuerdo a la Figura 3.31, el UE que presenta un mejor comportamiento en cuanto a SINR efectiva es el de color azul, cuyos valores se encuentran entre 25 dB y 29 dB. El caso contrario se presenta para el UE de color violeta, cuyos valores de SINR están entre 18 dB y 20 dB.

*Figura 3.31. SINR efectiva en el enlace de subida en el escenario I*



*Figura 3.32. SINR Efectiva suavizada en el enlace de subida en el escenario I*



La Figura 3.32 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva en el enlace de subida. Estos valores son superiores que los valores de SINR obtenidos en el enlace de bajada, ya que, como se mencionó anteriormente, la transmisión que realizan los UEs al eNB se hace a través de una sola antena. De acuerdo a la Figura 3.32, los valores obtenidos de



SINR efectiva que se encuentran por encima de los 20 dB, se presentaron gracias a las condiciones favorables del canal para todos los UEs. Los valores obtenidos de este parámetro no fueron los esperados de acuerdo a las especificaciones del R8, ya que en el enlace de subida se presentan mayores limitaciones de transmisión por parte del UE, por lo cual la señal de información va a estar sometida a los efectos del multitrayecto y a las pérdidas de propagación. Por esta razón se esperaba que los valores obtenidos de SINR fueran más bajos que los valores de SINR en el enlace de bajada.

### 3.2.10 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de subida

*Figura 3.33. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de retransmisiones en el enlace de subida en el escenario I*



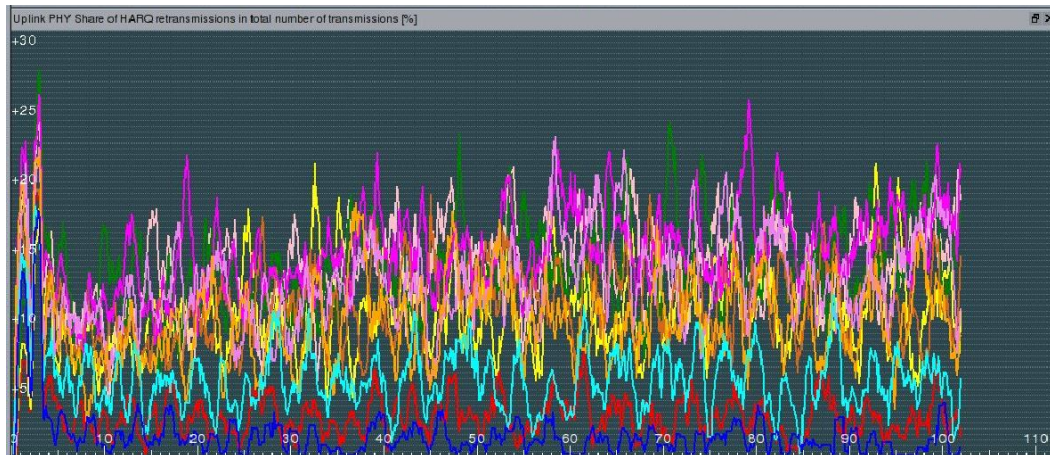
La Figura 3.33 muestra la tasa de error global H-ARQ después del número máximo de retransmisiones en el enlace de subida. En esta situación se obtuvieron retransmisiones por parte de los UEs que se encontraban más alejados del eNB, como es el caso de los UEs de color rosado y violeta, ya que en el trayecto las señales transmitidas están sometidas a los efectos del canal, dentro de los cuales se encuentran las pérdidas de propagación y los desvanecimientos, los cuales degradan la calidad de las señales. Por esta razón se requieren retransmisiones para recuperar el mensaje original.

El comportamiento de este indicador es diferente con respecto al enlace de bajada, ya que los UEs transmiten la información por medio de una sola antena, impidiéndole al UE aprovechar las ventajas ofrecidas por la técnica de MIMO en cuanto a la multiplexación espacial en el enlace de subida.

La Figura 3.34 muestra el porcentaje de retransmisiones H-ARQ de acuerdo al número total de bloques de transporte transmitidos en el enlace de subida. La Figura 3.34 representa el porcentaje de retransmisiones de cada UE, donde los valores se incrementan siempre y cuando la información recibida por el eNB presente errores. Además, se observa que el UE de color azul posee un menor porcentaje gracias a su

ubicación alcanzando un número menor de retransmisiones en comparación con el UE de color violeta, que alcanza los valores máximos mayores al 20%.

*Figura 3.34. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de subida en el escenario I*



*Figura 3.35. Tasa de error H-ARQ después de la primera y segunda transmisión en el enlace de subida en el escenario I*



La Figura 3.35 muestra la tasa de errores H-ARQ después de cada retransmisión en el enlace de subida, en donde se observa que es necesario el uso de las tres retransmisiones para algunos UEs con el fin de que el eNB recupere el mensaje original correctamente. Los UEs que no poseen condiciones de canal favorables, es decir los que se encuentran más alejados del eNB son aquellos que implementan el máximo de retransmisiones, estos son los UEs de color rosado y violeta.

Estos resultados obtenidos no fueron los esperados, debido a que los valores de SINR en el enlace de subida fueron mayores que en el enlace de bajada, por lo que presentan mayores niveles de interferencia, ya que tanto el eNB como el UE se encuentran transmitiendo y recibiendo con doble antena (multiplexación espacial), lo que generó una disminución de la SINR. Esto indicaría que se requiere un número mayor de retransmisiones H-ARQ por parte del eNB, con la intención de corregir los errores que presenta la señal de información transmitida. Sin embargo, cabe aclarar que los resultados de la tasa de errores son los esperados de acuerdo a la ubicación de los UEs con respecto al eNB, debido a su cercanía permite que se disminuyan la cantidad de errores y las retransmisiones para cada UE.

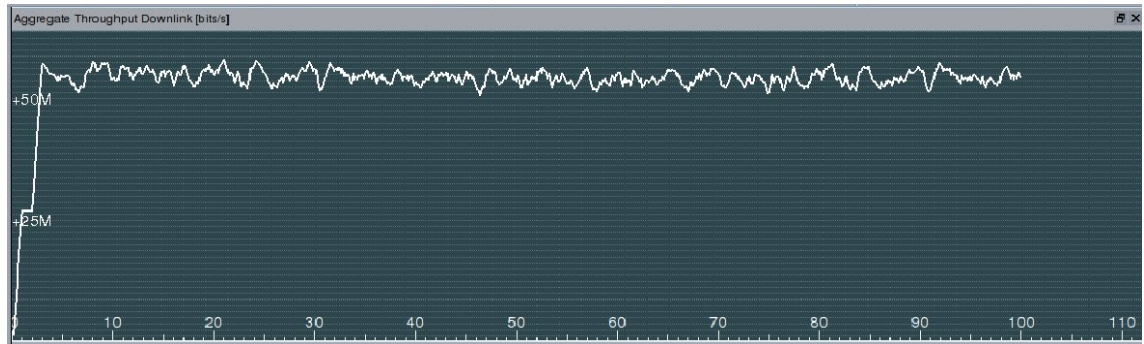
### **3.3 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN EL ESCENARIO II**

La Figura 3.6 muestra la distribución de los UEs dentro de la celda para el escenario II. Con el objetivo de determinar el comportamiento del sistema con respecto al escenario anterior y obtener resultados que dependen directamente de la separación entre los UEs y el eNB, se ubicaron los UEs uno detrás del otro a lo largo de la celda, con el fin de evaluar y analizar los indicadores en cada uno de los niveles y subniveles.

#### **3.3.1 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada**

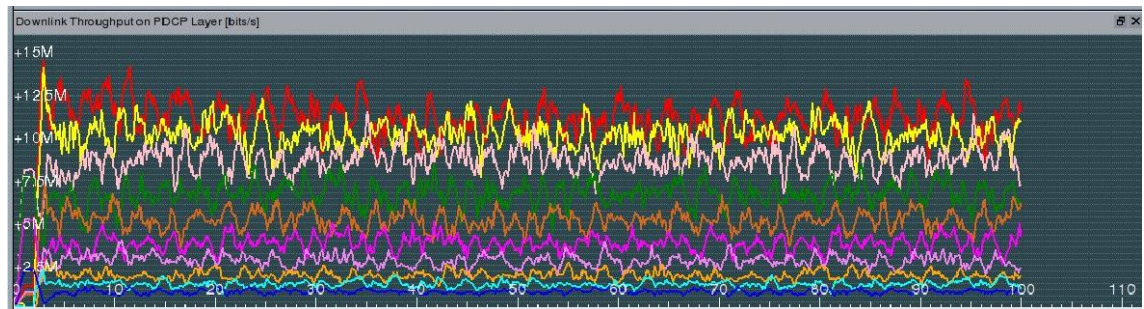
La Figura 3.36 muestra el *throughput* total de la celda en el enlace de bajada. En comparación con el escenario I el *throughput* total del sistema disminuyó aproximadamente a la mitad (54 Mbps), ya que las condiciones de canal de este escenario no permiten que todos los UEs reciban la información a una misma velocidad, pues los UEs más alejados del eNB están sometidos a condiciones que afectan en mayor grado la calidad del canal de transmisión.

Figura 3.36. *Throughput Total de la Celda en el enlace de bajada en el escenario II*



La Figura 3.37 muestra el *throughput* de cada uno de los UEs en el enlace de bajada, en donde se aprecia claramente que el algoritmo de planificación de paquetes asigna diferentes valores de *throughput* a cada uno de los UEs dependiendo de sus condiciones del canal. Al realizar una comparación entre los UEs de color rojo y azul que están situados en los extremos de la celda, se observa que el UE de color rojo alcanza valores de *throughput* mayores a 10 Mbps, mientras los valores de *throughput* que alcanza el UE de color azul son mucho menores y se encuentran cercanos a 1 Mbps.

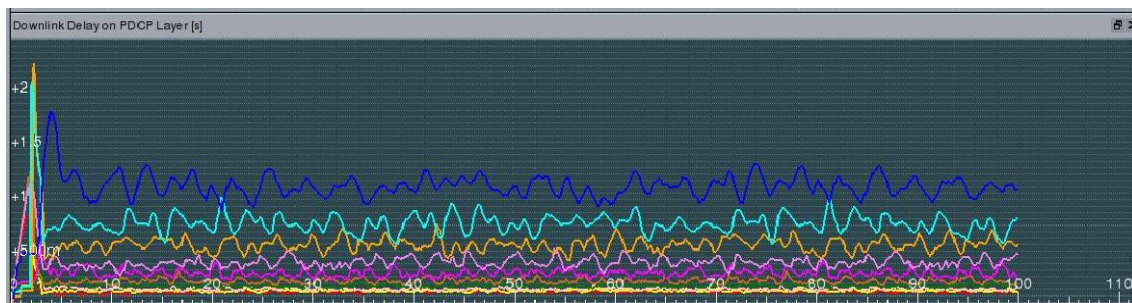
Figura 3.37. *Throughput de cada UE en el enlace de bajada en el escenario II*



La Figura 3.38 muestra el retardo de transmisión de todos los UEs en el enlace de bajada. En vista de que existen UEs que se encuentran más alejados del eNB, a diferencia del escenario I, en esta situación se presentan valores de retardo que dependen directamente de la distancia, puesto que la asignación de recursos para estos UEs es mínima debido a sus condiciones de canal desfavorables. Por esta razón el tamaño del *buffer* de almacenamiento de estos UEs es limitado, llenándose de manera rápida, pero desocupándose más lentamente al poseer una mínima cantidad de recursos asignados, provocando un retardo de transmisión mayor que el retardo de los UEs cercanos al eNB. El UE de color rojo presenta un valor similar de retardo al que se obtuvo en el escenario I, mientras que el UE de color azul presenta un mayor retardo superior a 1 segundo.



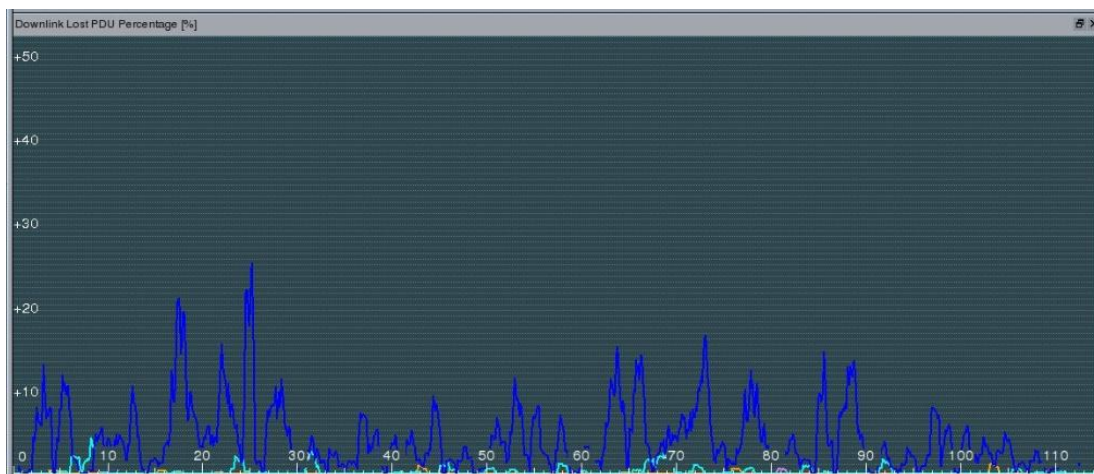
Figura 3.38. Retardo de transmisión en el enlace de bajada en el escenario II



### 3.3.2 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de bajada

La Figura 3.39 muestra el porcentaje de pérdidas de PDUs en el enlace de bajada, donde el UE de color azul presenta los valores más altos de pérdidas, llegando a encontrarse por encima del 20% en algunos intervalos de tiempo de la simulación. Esto se debe a que las señales transmitidas por los UEs más alejados del eNB están sometidas en una mayor medida a los efectos del canal, tales como las pérdidas de propagación y la multitrayectoria, que degradan las señales transmitidas, lo que introduce errores en las PDUs transmitidas.

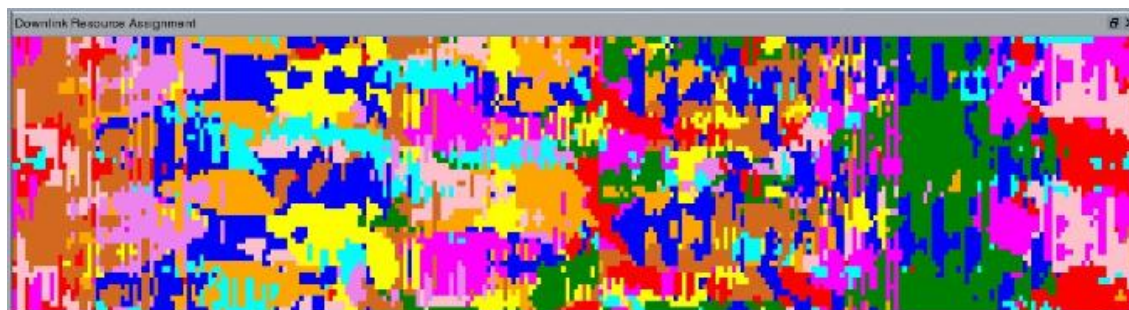
Figura 3.39. Porcentaje de pérdidas PDUs en el enlace de bajada en el escenario II



### 3.3.3 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada

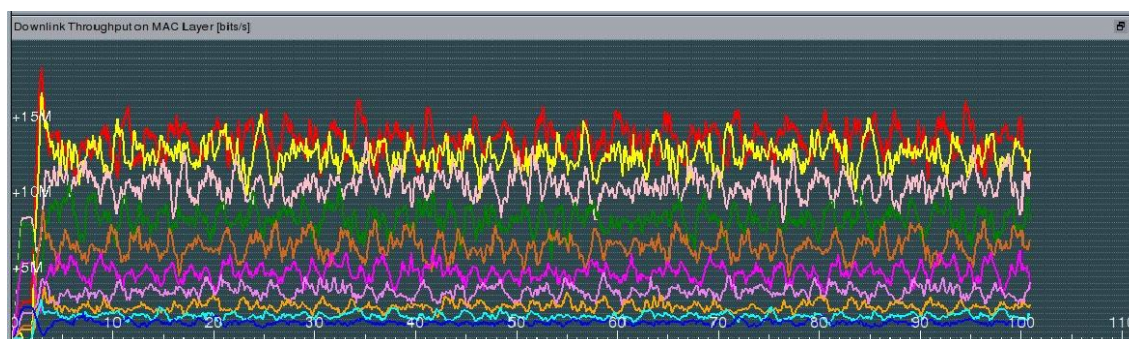
La Figura 3.40 muestra la asignación dinámica de recursos a cada UE en el enlace de bajada, realizada por el algoritmo de planificación de paquetes, el cual tiene en cuenta la SINR de cada UE, el esquema de modulación y la tasa de codificación. De acuerdo a la Figura 3.40, la asignación de los recursos se realiza de forma equitativa, permitiendo así que los diferentes UEs puedan transmitir la información que contienen dentro de sus buffers.

Figura 3.40. Asignación de recursos en el enlace de bajada en el escenario II



La Figura 3.41 muestra el *throughput* a subnivel MAC en el enlace de bajada. Al igual que en el subnivel PDCP, el UE que presenta los mejores valores de *throughput* a lo largo de la simulación es el de color rojo, los cuales se encuentran alrededor de los 13 Mbps y 15 Mbps. Cabe aclarar que este es el UE que más cerca se encuentra del eNB y por lo tanto prese donde los mejores valores se presentan en el escenario I, nta mejores condiciones de canal respecto de los demás.

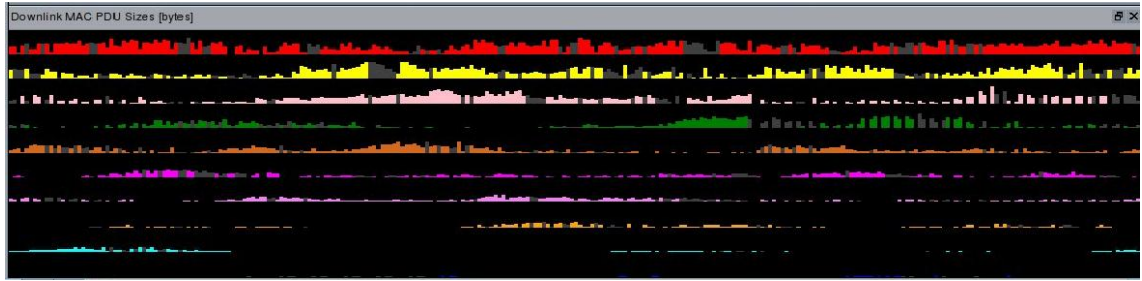
Figura 3.41 Throughput a subnivel MAC en el enlace de bajada en el escenario II



La Figura 3.42 muestra el tamaño de las PDUs en el enlace de bajada. Se observa que el tamaño de las PDUs tiende a disminuir a medida que un UE se encuentre más alejado del eNB. Estas condiciones desfavorables hacen que el algoritmo de planificación de paquetes asigne menores recursos para estos UE, dando como resultado la disminución en el tamaño de las PDUs, pues se envía menor cantidad de información y por lo tanto una disminución en la velocidad de transmisión de datos. A pesar de que los UEs cercanos tienen un tamaño mayor de PDUs, se observa la presencia de espacios negros, que representan la ausencia de asignación de PDUs en determinados intervalos de tiempo. El UE de color azul que se encuentra en la frontera de la celda posee una asignación de recursos mínima en intervalos de tiempo cortos, y con un tamaño de PDU reducido.



Figura 3.42. Tamaños de las PDUs en el enlace de bajada en el escenario II



### 3.3.4 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada

La Figura 3.43 muestra la SINR en el enlace de bajada. Nuevamente los UEs que se encuentran en las cercanías del eNB presentan los valores más altos de SINR, esto se logra observar para el UE de color rojo, el cual tiene un valor de SINR alrededor de los 20 dB gracias a que es el más próximo al eNB, pues sus condiciones de canal son las más favorables respecto de los demás UE. Además estos UE aprovechan al máximo las ventajas de la multiplexación espacial, puesto que las señales transmitidas por cada una de las antenas del eNB son recibidas con niveles adecuados de potencia. Caso contrario se presenta para el UE más alejado, ya que no es posible aprovechar las mismas ventajas, pues las señales recibidas están más sometidas a los efectos del entorno, como la multitrayectoria y las pérdidas de propagación.

Las variaciones de SINR de cada uno de los UEs que se presentan en la Figura 3.43 ocurren debido al fenómeno de la multitrayectoria, ya que en el transcurso de la propagación se presentan interferencias constructivas y destructivas de las señales, lo que gráficamente se observa como picos, los cuales se pueden considerar como desvanecimientos profundos en algunos intervalos de tiempo de la simulación.

Figura 3.43. SINR efectiva en el enlace de bajada en el escenario II

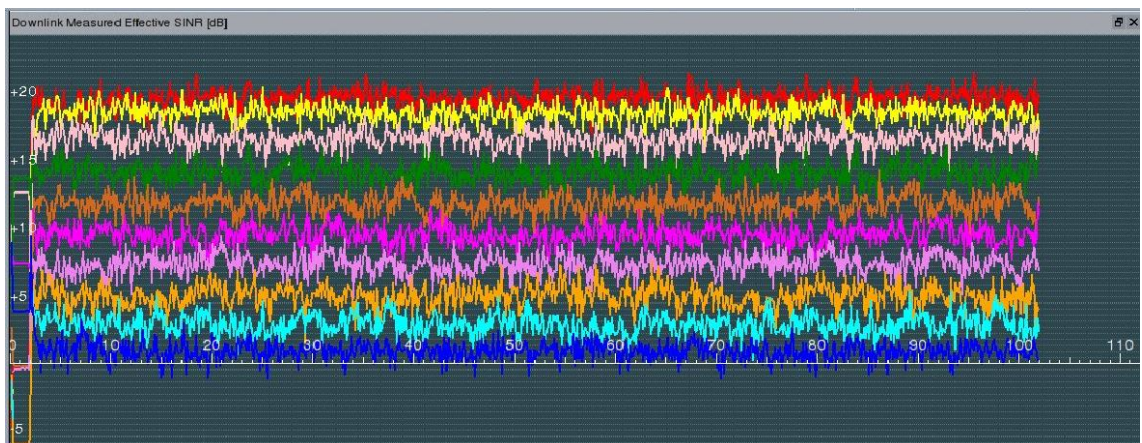
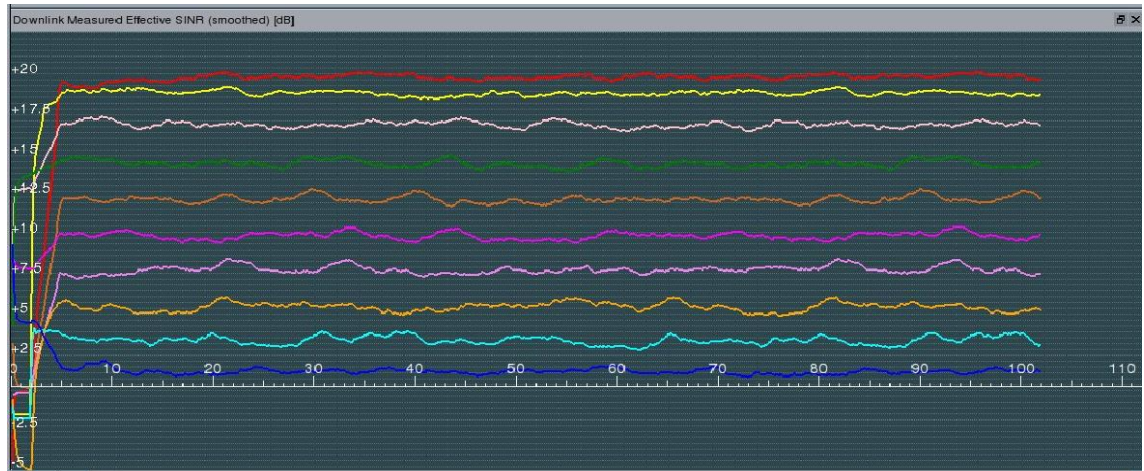


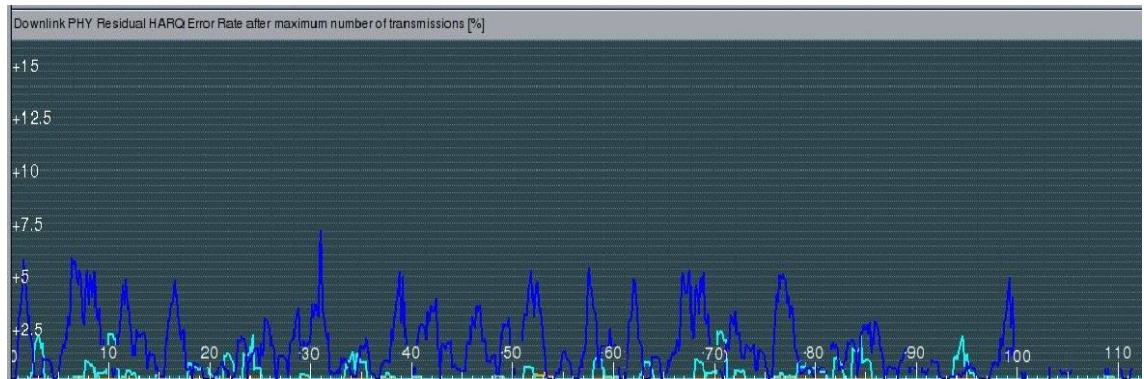
Figura 3.434. SINR efectiva suavizada en el enlace de bajada en el escenario II



La Figura 3.44 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva en el enlace de bajada. Los valores presentados corresponden al promedio de los valores de la SINR efectiva, lo que permite mostrar la tendencia de los valores de SINR para cada uno de los UEs en el transcurso de la simulación, la cual depende directamente de la distancia entre el eNB y el UE.

### 3.3.5 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada

Figura 3.445. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de transmisiones en el enlace de bajada en el escenario II



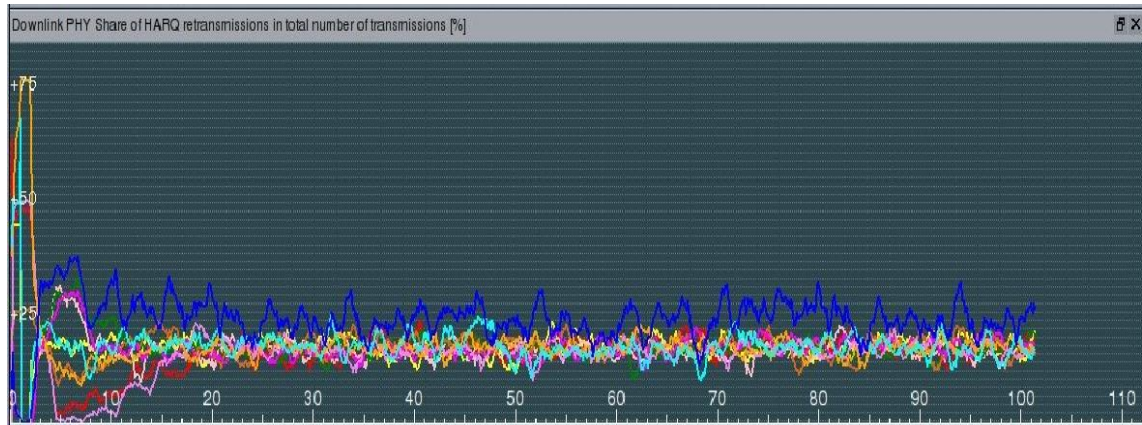
La Figura 3.45 muestra la tasa de error global H-ARQ después del número máximo de retransmisiones en el enlace de bajada. Los UEs que solicitan las retransmisiones son aquellos que no poseen condiciones de canal favorables. Este caso se presenta principalmente en la frontera de la celda, donde no hay una buena cobertura por parte del eNB, ya que las señales recibidas en estas locaciones son muy débiles. Por medio de las retransmisiones automáticas, la señal transmitida por el eNB se pueda recuperar adecuadamente en el destino gracias a la redundancia incremental. En la Figura 3.45 se



observa que los UEs de color azul y agua marina son los únicos que presentan errores después del máximo número de retransmisiones, ya que ellos están más alejados del eNB.

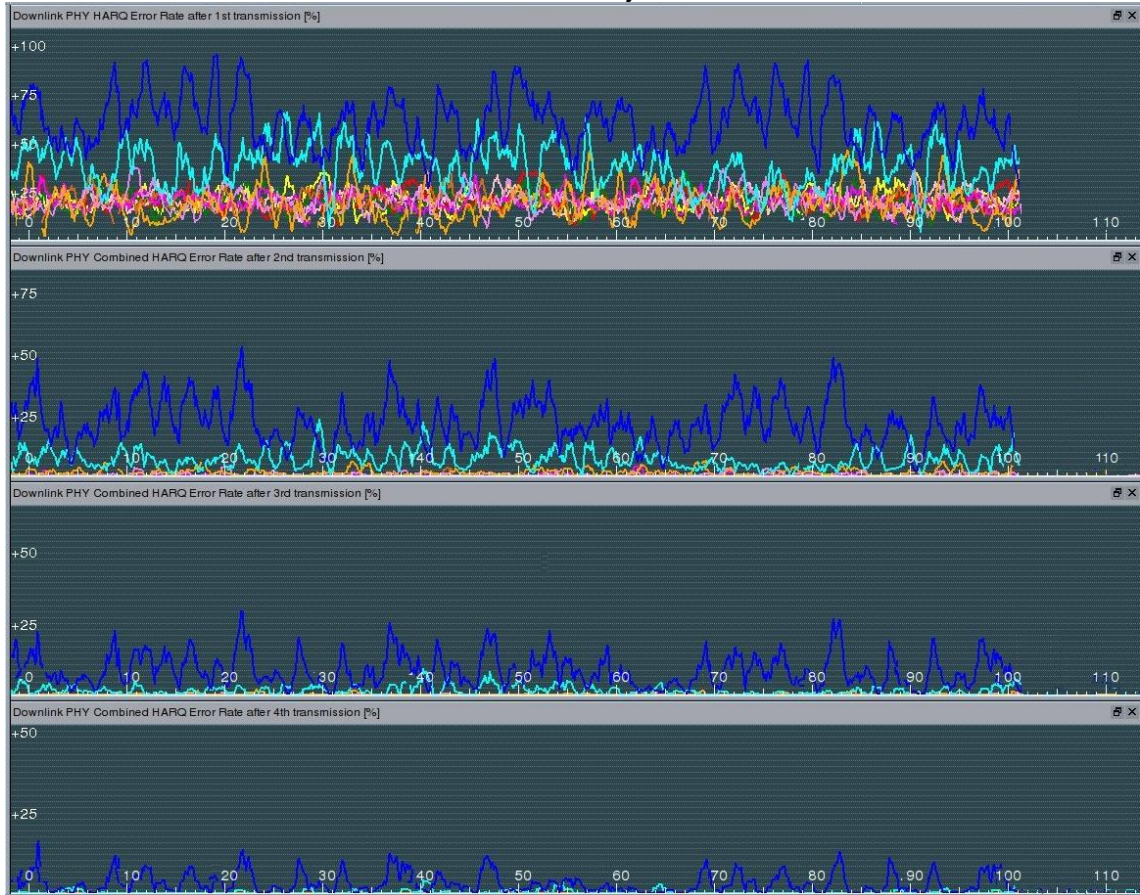
La Figura 3.46 muestra el porcentaje de retransmisiones H-ARQ de acuerdo al número total de bloques de transporte transmitidos en el enlace de bajada. Aquí se observa que el UE de color azul presenta un mayor porcentaje del número máximo de retransmisiones debido que presenta las condiciones menos favorables de canal, cuyos valores se encuentran alrededor del 25%. Por otra parte los valores de porcentajes de retransmisión son más altos que los valores encontrados en el escenario I, ya que su ubicación dentro de la celda respecto al eNB cambió considerablemente.

*Figura 3.456. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada en el escenario II*



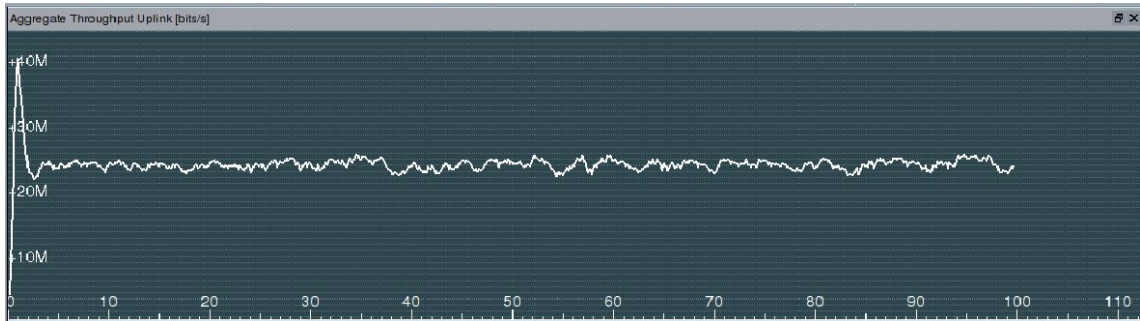
La Figura 3.47 muestra la tasa de errores de las retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada. En este escenario es necesario el uso de las tres retransmisiones disponibles por la herramienta de simulación, donde se observa que después de la primera transmisión H-ARQ todos los UEs necesitan al menos de la primera retransmisión, siendo el UE de color azul el más crítico debido a su ubicación dentro de la celda. Luego se observa que después de la segunda retransmisión H-ARQ los porcentajes disminuyen, manteniéndose los porcentajes para los UEs que presentan las peores condiciones de canal debido a su ubicación con respecto al eNB. De igual forma ocurre después de la última retransmisión H-ARQ, teniendo en cuenta que es necesario el envío de redundancia incremental para que en recepción se recupere correctamente la señal de información que fue enviada por el eNB.

Figura 3.467. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta transmisión en el enlace de bajada en el escenario II



### 3.3.6 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de subida

Figura 3.478. Throughput total de la celda en el enlace de subida en el escenario II

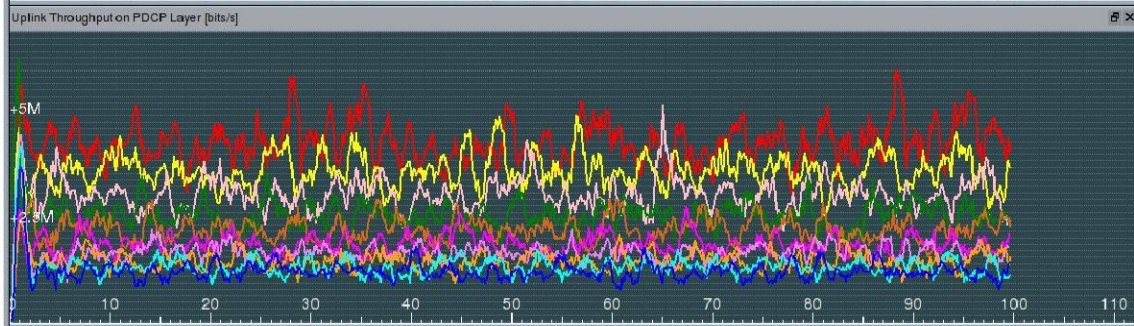


La Figura 3.48 muestra el *throughput* total de la celda en el enlace de subida. Se observa que este valor disminuyó considerablemente con respecto al escenario I, ya que en este caso el *throughput* total de la celda alcanza valores cercanos a los 24 Mbps. A pesar de



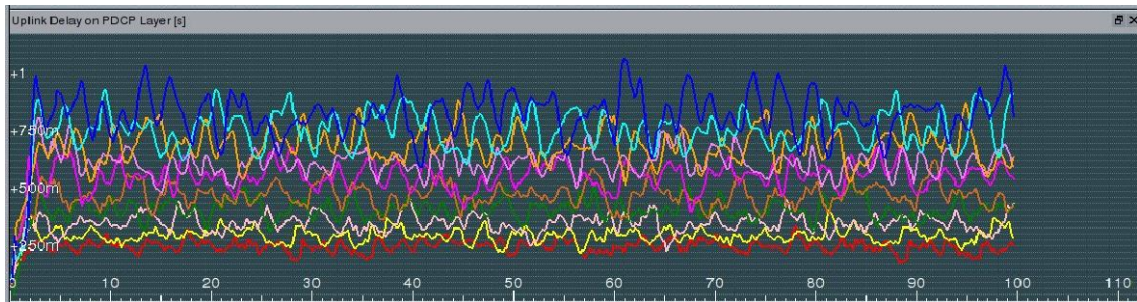
que algunos UE no poseen las mejores condiciones de canal, el sistema mantiene un *throughput* considerable.

Figura 3.489. *Throughput* de cada UE en el enlace de subida en el escenario II



La Figura 3.49 muestra el *throughput* que se presenta para cada UE en el enlace de subida. Estos valores disminuyen considerablemente con relación al escenario I. En la Figura 3.49 se aprecia que el UE de color rojo presenta las mejores condiciones de canal por estar más cerca del eNB y sus valores de *throughput* están alrededor de 4.5 Mbps. De ahí en adelante se observa que los valores de *throughput* disminuyen para cada uno de los UEs a medida que se alejan del eNB. A pesar de que los últimos UE se encuentran en las posiciones menos favorables, estos siguen presentando niveles de *throughput*.

Figura 3.50. Retardo de transmisión en el enlace de subida en el escenario II



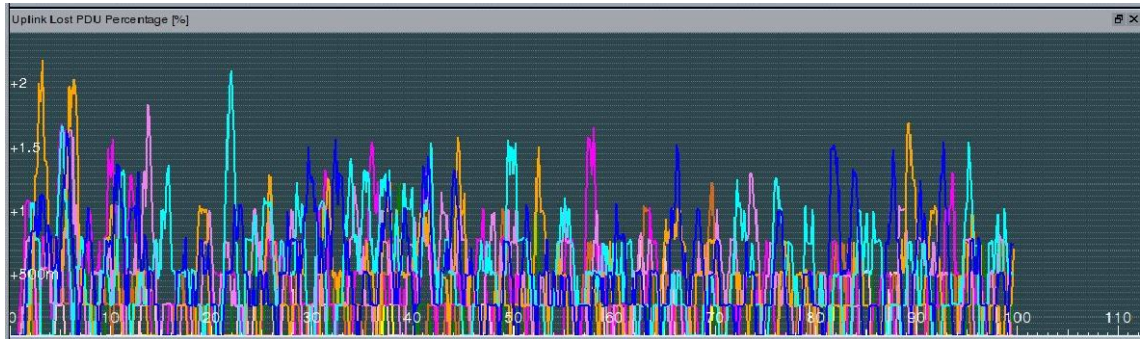
La Figura 3.50 muestra el retardo en la transmisión de cada UE en el enlace de subida. Con respecto a la Figura 3.38 del enlace de bajada se observa que los UEs más alejados del eNB presentan valores mayores. Esto ocurre porque en el enlace de subida los UEs transmiten con una antena y el eNB recibe con doble antena (diversidad en recepción), presentándose una limitación en la transmisión de la información por parte de los UEs ya que no se implementa la multiplexación espacial.

### 3.3.7 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de subida

La Figura 3.51 muestra el porcentaje de pérdidas de las PDUs en el enlace de subida, en donde se observa una pérdida considerable de PDUs por parte de los 5 UEs que se

encuentran más alejados del eNB. Estas pérdidas se generan debido a que la señal de información estará sometida en mayor medida a los efectos del canal, dentro de los cuales se encuentran las pérdidas de propagación y la multitrayectoria.

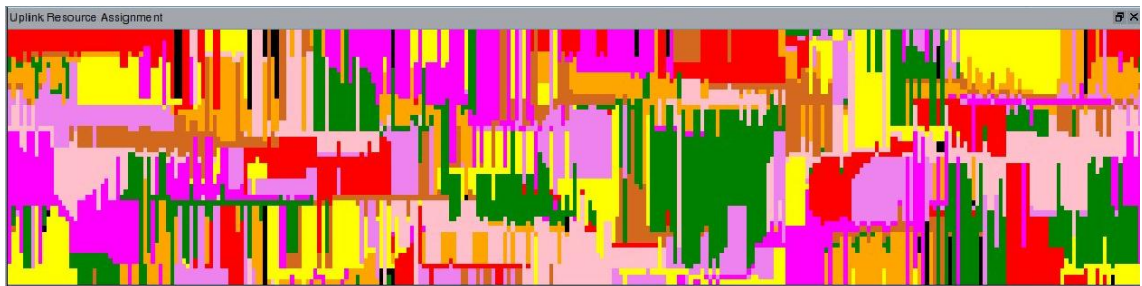
*Figura 3.51. Porcentaje de pérdidas de PDUs en el enlace de subida en el escenario II*



### 3.3.8 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de subida

La Figura 3.52 muestra la asignación dinámica de recursos para cada UE en el enlace de subida. Esta asignación se realiza de manera automática por parte del algoritmo de planificación de paquetes que se encuentra en el eNB, el cual tiene en cuenta las condiciones del canal dadas por la ubicación de los UEs. En la Figura 3.52 se observa que los UEs que reciben una mayor asignación de recursos disponibles son aquellos que se encuentran más próximos al eNB, pues presentan condiciones favorables de canal dentro del sistema.

*Figura 3.52. Asignación de recursos en el enlace de subida en el escenario II*



La Figura 3.53 muestra la potencia de transmisión total con la cual está transmitiendo cada uno de los UEs en el enlace de subida, en donde se observa el control de potencia realizado por el eNB, pues los UEs más cercanos a ella transmiten con niveles de potencia más bajos, en comparación con los UEs más alejados, que transmiten con los valores de potencia más altos. Para el UE de color rojo la potencia de transmisión se encuentra alrededor de -10 dBm, mientras que para los UEs que se encuentran más alejados del eNB requieren de niveles de potencia de hasta 10 dBm.

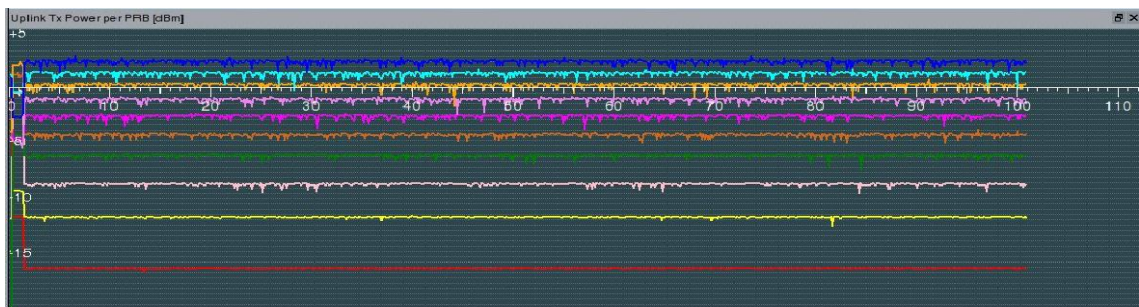


Figura 3.53. Potencia de transmisión total en el enlace de subida en el escenario II



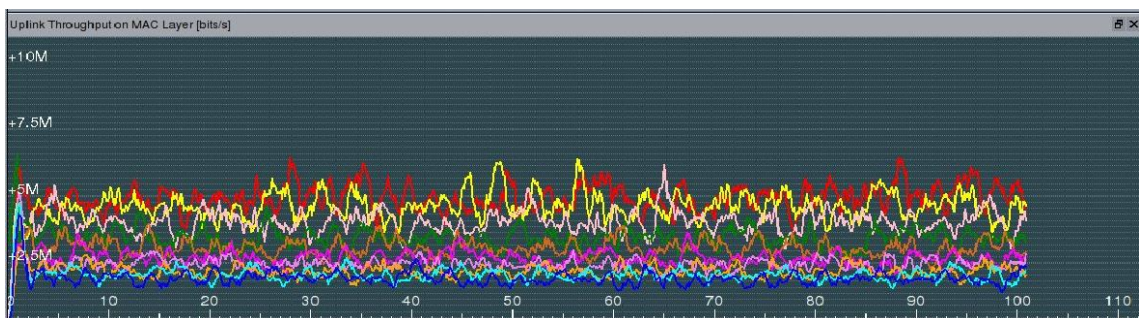
La Figura 3.54 muestra la potencia de transmisión por bloque de recursos en el enlace de subida, cuyos valores corresponden al promedio de la potencia de cada uno de los RB medida en dBm. Se observa que los valores encontrados de potencia de transmisión por RB están relacionados con la distancia de cada UE respecto del eNB, debido al control de potencia que realiza el eNB. Esto permite que la potencia de cada RB transmitido por los UEs tienda a mantenerse estable, ya que los UEs no se encuentran en movimiento.

Figura 3.494. Potencia de transmisión por RB en el enlace de subida en el escenario II



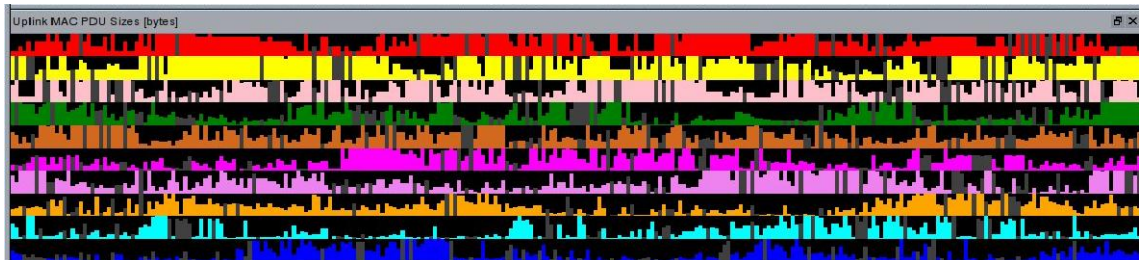
La Figura 3.55 muestra el *throughput* de cada UE a subnivel MAC en el enlace de subida. Haciendo una comparación con el *throughput* en enlace de bajada, los valores presentados en la Figura 3.49 son menores, estos se encuentran entre 2 Mbps y 5 Mbps, ya que las condiciones del canal de transmisión de los UEs son limitadas, pues algunos de los UEs se encuentran a mayor distancia de separación del eNB.

Figura 3.505. Throughput a subnivel MAC en el enlace de subida en el escenario II



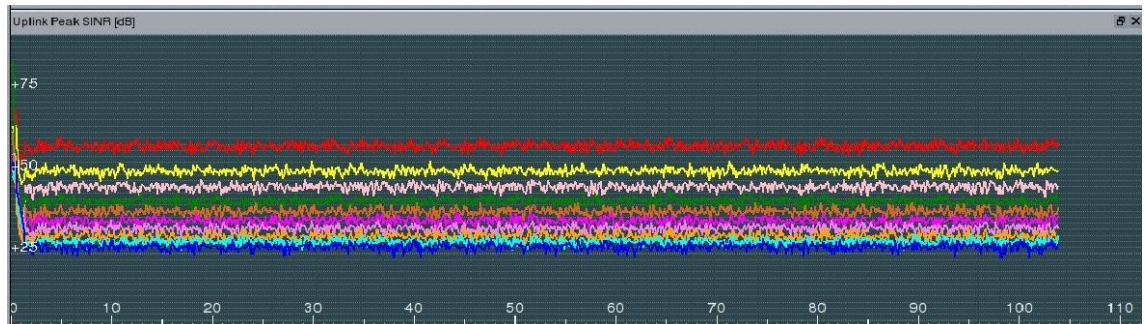
La Figura 3.56 muestra el tamaño de las PDUs en el enlace de subida. Se observa cómo los UEs que se encuentran más cerca del eNB presentan mayores tamaños de PDUs, pues sus condiciones de canal les permiten enviar más información. Sin embargo, en algunos intervalos de tiempo, la asignación de PDUs aumenta para los UEs más alejados, puesto que el algoritmo de planificación de paquetes trata de asignar recursos a estos UE, para que puedan transmitir su información a pesar de no contar con las mejores condiciones del canal.

*Figura 3.516. Tamaños de las PDUs en el enlace de subida en el escenario II*



### 3.3.9 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de subida

*Figura 3.527. Valor SINR pico en el enlace de subida en el escenario II*



La Figura 3.57 muestra el valor SINR pico en el enlace de subida de cada UE, donde aquel que presenta los valores más altos de SINR pico es el UE de color rojo alrededor de los 55 dB, gracias a que cuenta con las mejores condiciones de canal debido a su ubicación. A pesar de que este UE transmite con un nivel de potencia menor, esta se encuentra por encima de los niveles de interferencia y ruido.

La Figura 3.58 muestra la SINR efectiva de los UEs en el enlace de subida. Las variaciones en cada una de las curvas de la Figura 3.58 son producto del multitrayecto presente en el canal en el enlace de subida, ocasionando en algunos intervalos de tiempo de la simulación desvanecimientos profundos, debido a que en algunos instantes el eNB recibe múltiples ecos de una misma señal que se interfieren de manera destructiva.

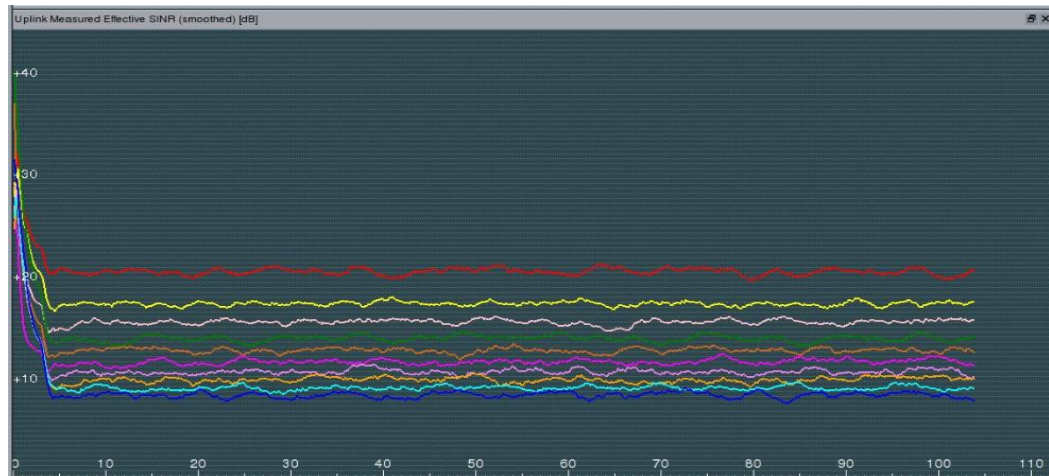


Figura 3.538. SINR efectiva en el enlace de subida en el escenario II



La Figura 3.59 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva en el enlace de subida. Estos valores son mayores a los presentados en el enlace de bajada, a pesar de que los UEs transmiten con menores niveles de potencia que el eNB, y la ganancia de sus antenas es mucho menor, esto ocurre ya que el UE se encuentra transmitiendo por una sola antena, mientras que el eNB recibe la señal de información a través de sus dos antenas, presentando diversidad en recepción. Por otra parte, el mecanismo de control de potencia trata de estabilizar los niveles de potencia con que deben transmitir los UEs de acuerdo a sus condiciones de canal y a los valores para la SIR objetivo definidos por la herramienta de simulación.

Figura 3.549. SINR efectiva suavizada en el enlace de subida en el escenario II

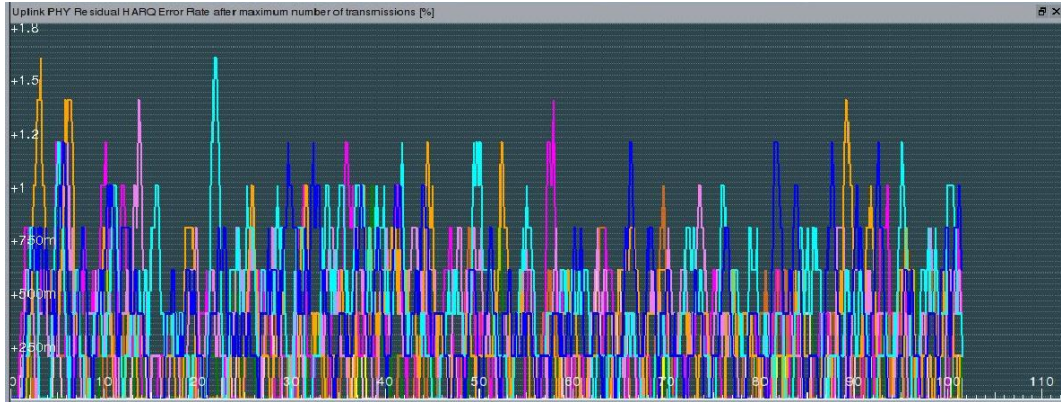


### 3.3.10 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de subida

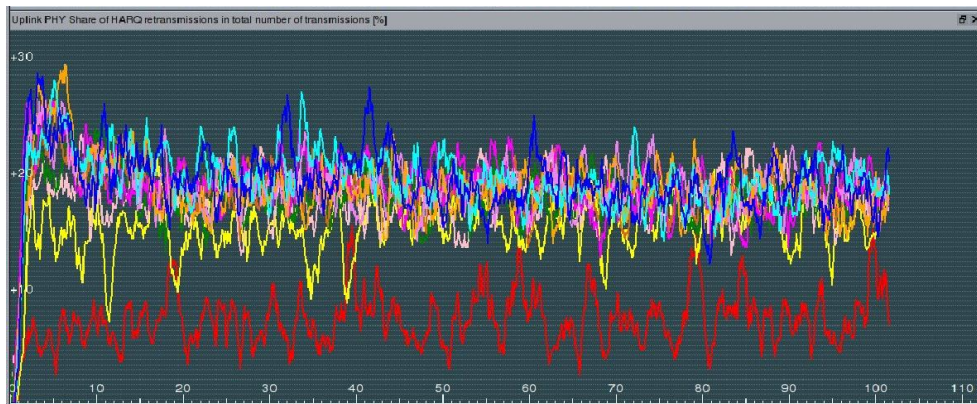
La Figura 3.60 muestra la tasa de error global H-ARQ de acuerdo al máximo número de retransmisiones en el enlace de subida. Se observa que incluso después de haber realizado las tres retransmisiones H-ARQ posibles en el sistema, se encontraron errores en la información recibida que no se pudieron reparar. Este caso ocurrió para los UEs que presentaron peores condiciones de canal, es decir aquellos que estaban más afectados

por las pérdidas de propagación y los efectos del multitrayecto, como es el caso de los UE de color azul y agua marina.

*Figura 3.60. Tasa de error global H-ARQ después del número máximo de transmisiones en el enlace de subida en el escenario II*



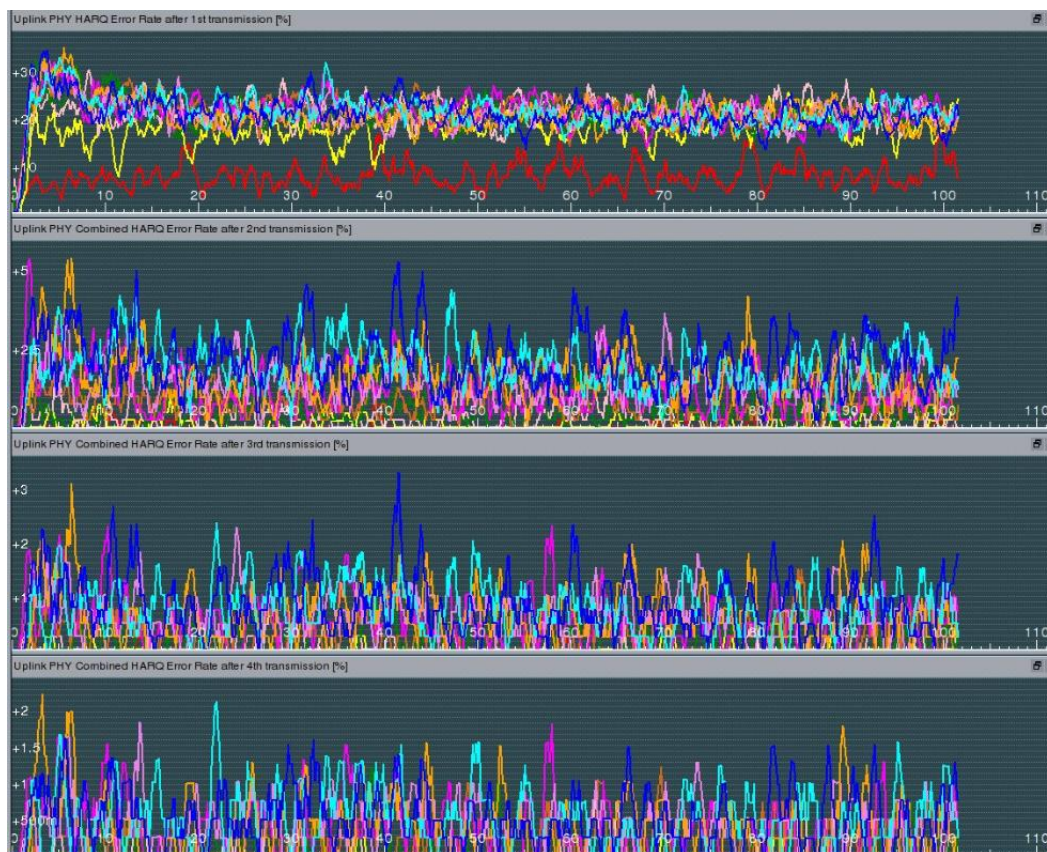
*Figura 3.551. Porcentaje de retransmisiones H-ARQ en el enlace de subida en el escenario II*



La Figura 3.61 muestra el porcentaje de retransmisiones H-ARQ de acuerdo al número total de bloques de transporte transmitidos en el enlace de subida. Se observa que el UE de color rojo, a pesar de contar con las condiciones de canal más favorables gracias a su ubicación, necesita hacer uso de al menos una retransmisión, ya que en el enlace de subida existen limitaciones en cuanto a la potencia de transmisión. A pesar de ello, este es el UE que presenta un porcentaje de retransmisión más bajo alrededor del 10 %, en comparación con los demás.



Figura 3.62. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta transmisión en el enlace de subida en el escenario II



La Figura 3.62 muestra la tasa de errores después de cada una de las retransmisiones H-ARQ en el enlace de subida. Se observa que el porcentaje de errores para el UE de color rojo desapareció después de la segunda retransmisión, debido a que la redundancia incremental permitió recuperar la información efectivamente. A pesar de que el UE de color azul hace uso de las tres retransmisiones disponibles por el sistema, el eNB no logra recibir la información sin errores de este UE. Se observa que la ubicación de los UEs juega un papel muy importante en el momento de realizar las retransmisiones, pues las limitaciones del medio de transmisión dependen directamente de la distancia que deben recorrer las señales transmitidas.

### 3.4 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN EL ESCENARIO III

En la Figura 3.7 se muestra el tercer escenario de simulación, donde se ubicaron los UEs en la celda de tal forma que se obtuviera una situación extrema en donde los UEs están ubicados en la frontera de la celda, con el propósito de evaluar y analizar el comportamiento del sistema en la situación menos favorable. Es necesario aclarar que en la simulación realizada, el único eNB que realizó la transmisión correspondía al eNB de la

misma celda en donde se ubicaron los UEs. Por tanto, en la situación presentada no se analizó el HO de ningún UE con un eNB de una celda adyacente, ni se presentaron los efectos de la interferencia inter-celda.

### 3.4.1 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada

Las Figuras 3.63 y 3.64 muestran el *throughput* total y el *throughput* de cada uno de los UEs de la celda en el enlace de bajada. Se aprecia claramente que el aporte mayor en el *throughput* total de la celda se genera por parte del UE de color rojo, pues presenta las mejores condiciones de canal, en comparación con los demás UE, ya que se encuentra en cercanías del eNB. En general, no se presentó un desempeño alto de la celda, a diferencia del escenario I, ya que la ubicación de los UEs en la frontera de la celda no les permitió aprovechar efectivamente los recursos disponibles del sistema.

Figura 3.63. *Throughput* total de la celda en el enlace de bajada en el escenario III

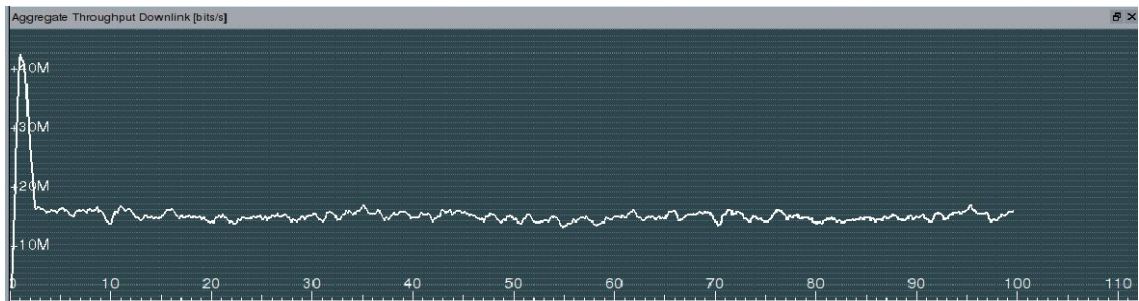
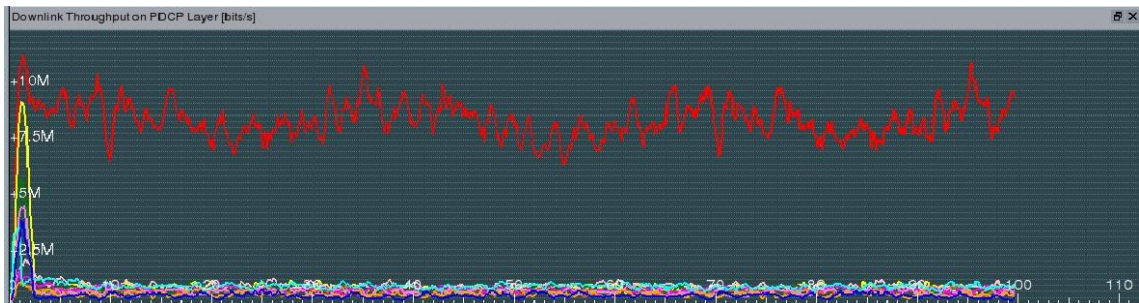


Figura 3.64. *Throughput* de cada UE en el enlace de bajada en el escenario III

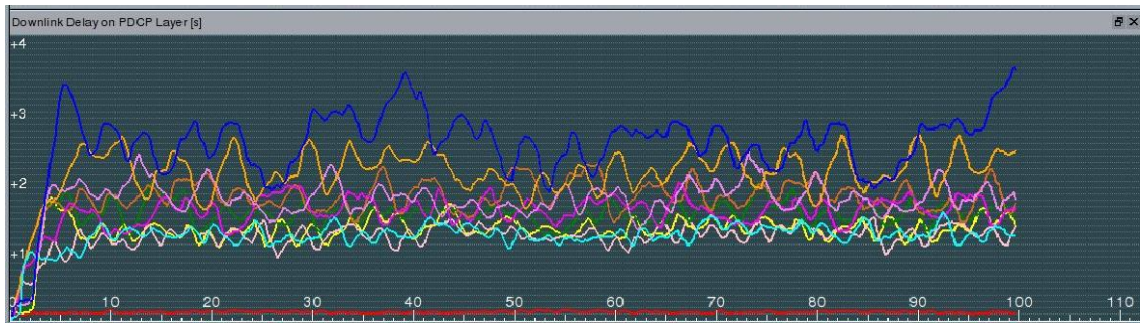


La Figura 3.65 muestra el retardo de transmisión en el enlace de bajada. Se observa que el UE de color rojo presenta los valores más bajos del orden de los milisegundos, puesto que se encuentra de frente al eNB, contando con las mejores condiciones de canal. Se aprecia que a pesar de que los UEs de color agua marina y rosado se encuentran en la frontera de la celda, sus valores de retardo corresponden a la mitad del retardo encontrado para los UEs de colores azul y naranja. El caso menos favorable se presenta para el UE de color azul, ya que alcanzó los valores de retardo más altos, superando los 3 segundos en algunos intervalos de tiempo.



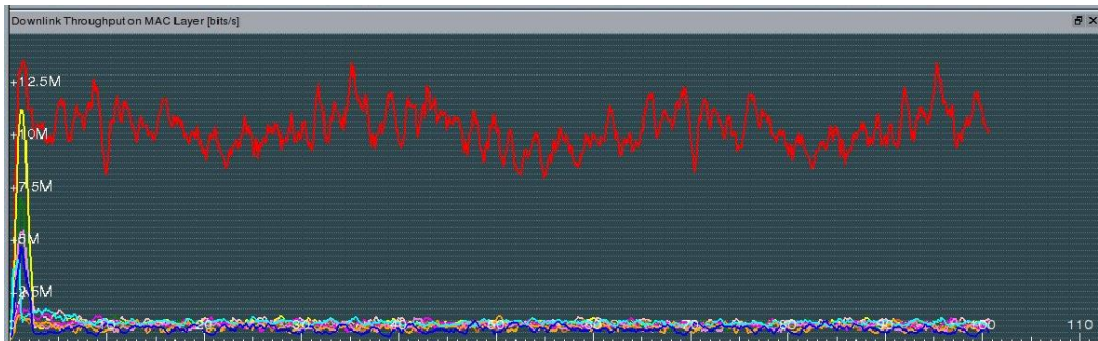
Otro aspecto a tener en cuenta es el tiempo que se demora en llenar y desocupar el *buffer* de cada UE, puesto que para los UEs que se encuentran en la frontera de la celda, su *buffer* se llena más rápido debido a la poca asignación de recursos, mientras que para desocupar la información contenida en él, el proceso se realiza lentamente, provocando un retardo más alto que para los demás UE.

Figura 3.565. Retardo de transmisión en el enlace de bajada en el escenario III



### 3.4.2 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada

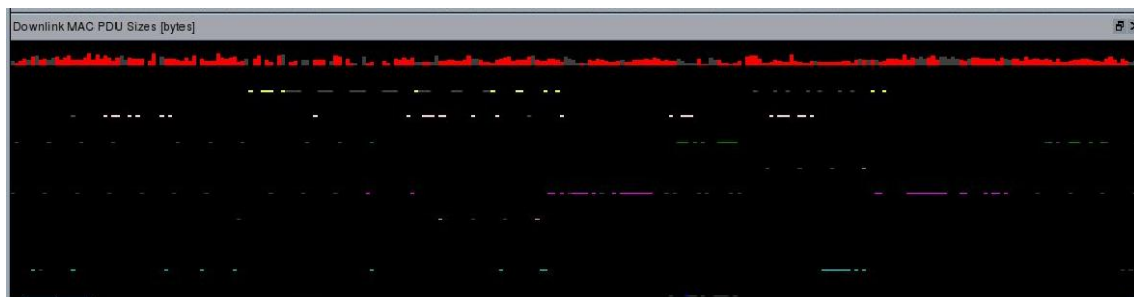
Figura 3.576. Throughput a subnivel MAC en el enlace de bajada en el escenario III



La Figura 3.66 muestra el *throughput* a subnivel MAC en el enlace de bajada. Se observa que el *throughput* del UE de color rojo es superior a 10 Mbps en el transcurso de la simulación. Estos valores de *throughput* son mayores a los presentados en el subnivel PDCP, ya que en el subnivel MAC se incluyeron los diferentes encabezados de señalización, retransmisiones y fragmentos de PDUs transmitidas efectivamente, por lo tanto, la velocidad de transmisión de la información se incrementa en este subnivel.

La ubicación del UE de color rojo es un factor clave para alcanzar este nivel de *throughput*, pues recibe con mayor intensidad las señales transmitidas por el eNB, gracias a sus condiciones de canal favorables, a diferencia de los demás UE que se encuentran en la frontera de la celda, cuyos valores de *throughput* no superan los 2 Mbps.

Figura 3.587. Tamaños de las PDUs en el enlace de bajada en el escenario III

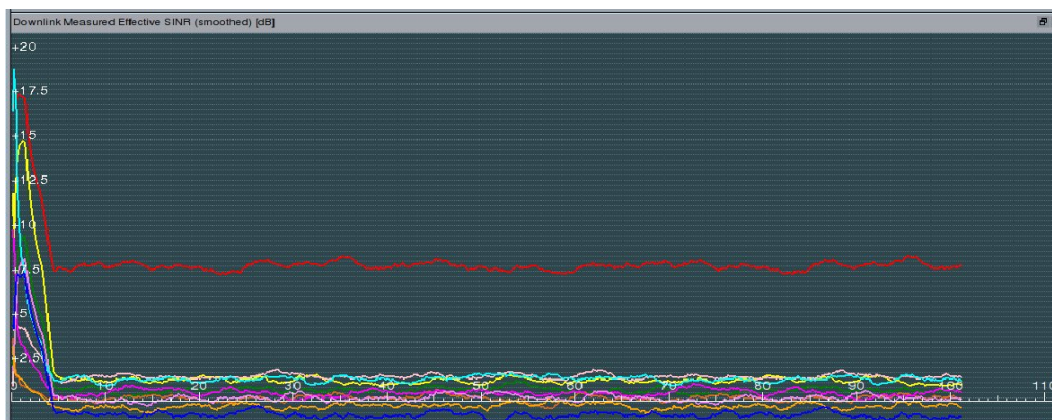


La Figura 3.67 muestra el tamaño de las PDUs en el enlace de bajada. Es claro que en la mayoría de intervalos de tiempo de la simulación fueron asignadas PDUs al UE de color rojo, lo que permitió incrementar su *throughput*, ya que contó con las condiciones de canal más favorables al momento de recibir la información. En algunos intervalos de tiempo se observan franjas de color negro en la asignación de PDUs al UE de color rojo, ya que el algoritmo de planificación de paquetes trata de asignar recursos a algunos de los UEs, siempre y cuando se encuentren dentro de la zona de cobertura del eNB y las condiciones del medio de transmisión lo permitan.

Por otra parte, los UEs que se encuentran más alejados del eNB reciben una menor cantidad de PDUs de tamaño reducido debido a las limitaciones del esquema de modulación y tasas de codificación implementados.

### 3.4.3 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada

Figura 3.598. SINR efectiva suavizada en el enlace de bajada en el escenario III

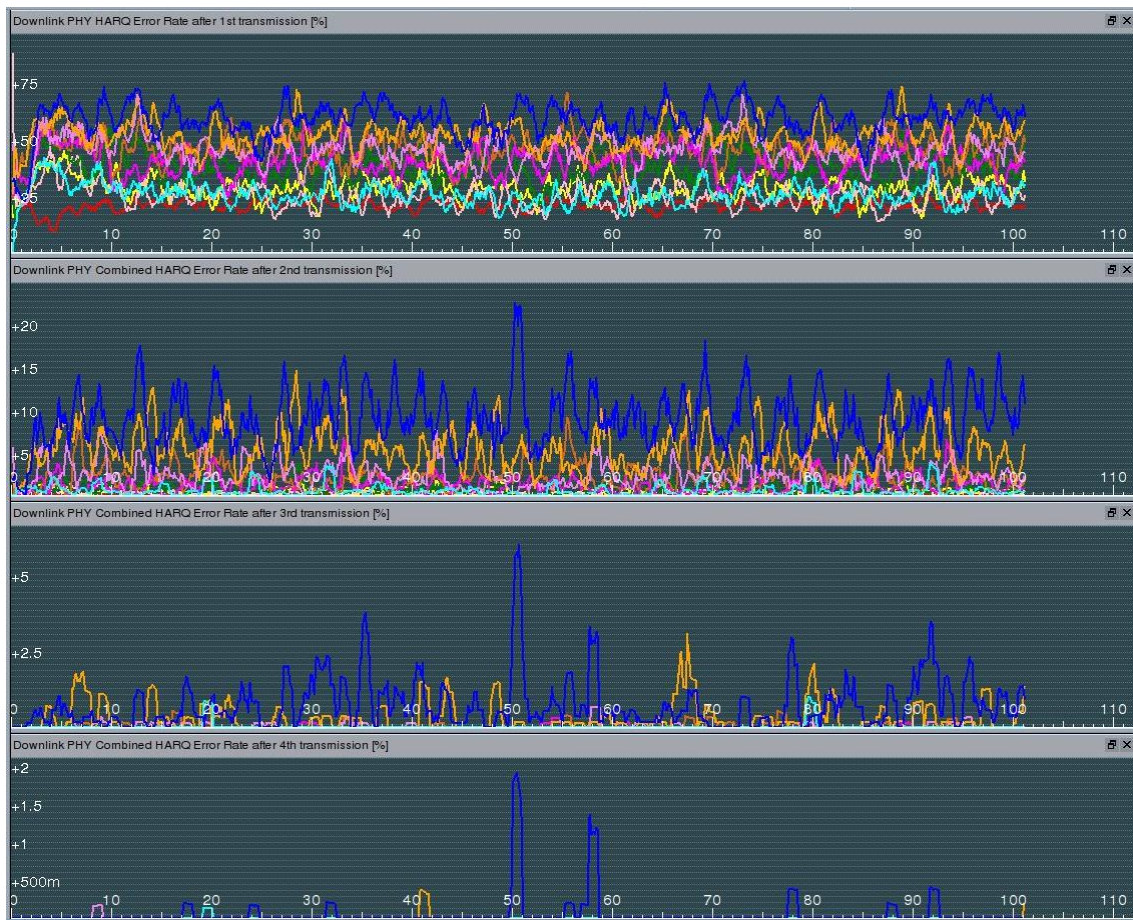


La Figura 3.68 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva en el enlace de bajada. De acuerdo a las razones explicadas anteriormente, el UE de color rojo presenta el mejor valor de SINR cercano a los 7.5 dB, ya que aprovecha de manera efectiva las señales transmitidas por el eNB, recibéndolas con niveles de potencia altos, permitiendo mejorar

las condiciones de canal. Este hecho no se presenta para los demás UE, pues al encontrarse en el extremo opuesto de la celda, los niveles de potencia recibida en algunos casos se encuentran por debajo de los niveles de potencia de ruido e interferencia, sobre todo para los UEs fuera del área de cobertura, cuyos valores de SINR están por debajo de 0 dB.

#### 3.4.4 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada

Figura 3.609. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta transmisión en el enlace de bajada en el escenario III



La Figura 3.69 muestra la tasa de errores de las retransmisiones H-ARQ en el enlace de bajada. En la parte superior se observa que después de la primera transmisión se encontraron errores en la información para todos los UEs, incluido el de color rojo. Por esta razón es necesaria la primera retransmisión para todos los UEs. Después de la primera retransmisión, el porcentaje de errores para el UE de color rojo desaparece, por lo tanto no es necesario reenviar redundancia incremental a este UE, y los recursos disponibles se destinan para los UEs ubicados en la frontera. A pesar de estar tan alejados del eNB, el porcentaje de errores para estos UEs disminuye a medida que se



hace uso de las retransmisiones adicionales. Sin embargo, el peor de los casos se presenta para el UE de color azul, pues luego de su tercera retransmisión, se siguen presentando errores alrededor del 20 % en ciertos intervalos de transmisión.

### 3.4.5 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de subida

Las Figuras 3.70 y 3.71 muestran que los niveles de *throughput* total del sistema disminuyeron hasta cerca de 5 Mbps. Esto ocurrió debido a la ubicación desfavorable de todos los UEs, excepto el de color rojo que se encontraba en las cercanías del eNB. A pesar de ello, el *throughput* individual de este UE es cercano a 1 Mbps, encontrándose un poco por encima del *throughput* de los demás UE. Esto indica que si la mayoría de los UEs se encuentran en condiciones desfavorables dentro de la celda, disminuye el *throughput* individual, tanto para ellos como para los UEs con mejores condiciones de canal, ya que aparentemente el algoritmo de planificación de paquetes trata de asignar recursos equitativamente.

Figura 3.70. *Throughput* total de la celda en el enlace de subida en el escenario III

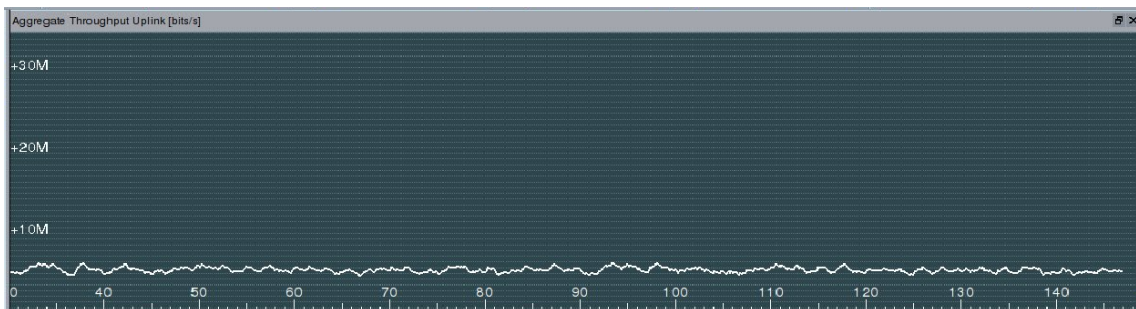
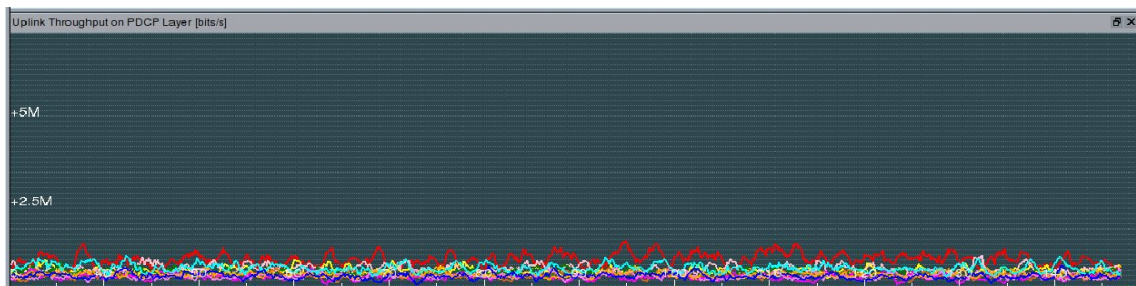


Figura 3.71. *Throughput* de cada UE en el enlace de subida en el escenario III

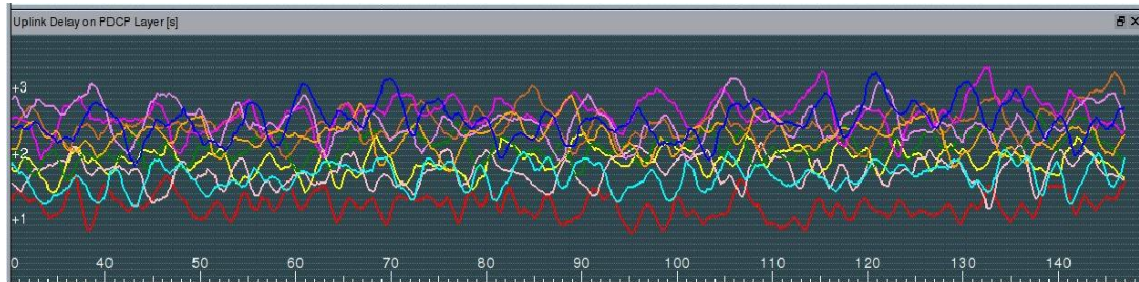


La Figura 3.72 muestra el retardo de transmisión en el enlace de subida. Se observa que el valor de retardo para el UE de color rojo se incrementó significativamente con respecto del valor presentado en la Figura 3.65 correspondiente al enlace de bajada, ya que las condiciones de transmisión de los UEs son limitadas, pues la potencia de transmisión es menor que la del eNB, la transmisión se realiza a través de una sola antena y la ganancia de ellas es menor. De este modo las señales se demoran más tiempo en recorrer el



trayecto, como también el *buffer* de cada UE demora en desocuparse, alcanzándose valores de retardo más altos.

*Figura 3.612. Retardo de transmisión en el enlace de subida en el escenario III*



### 3.4.6 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de subida

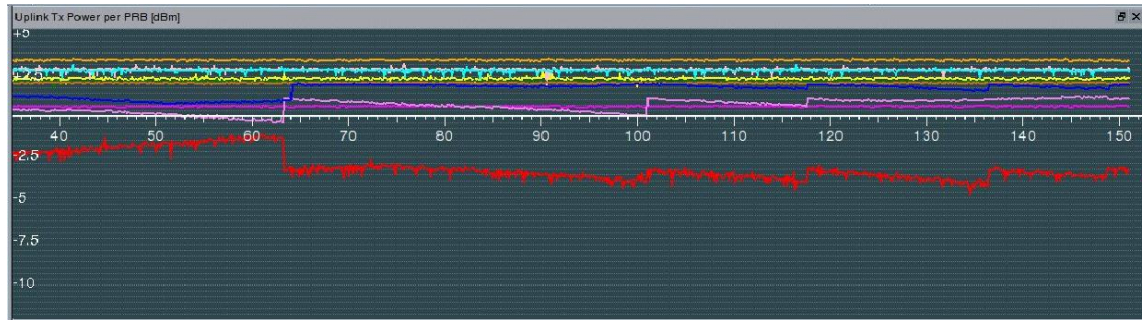
La Figura 3.73 muestra la potencia de transmisión total de la celda en el enlace de subida, donde la potencia con que transmite el UE de color rojo tiene un valor alrededor de -1 dBm y 3 dBm, siendo menor que la potencia de transmisión de los demás UEs, cuyos valores están entre 4 dBm y 11 dBm. El control de potencia en lazo cerrado realizado por el eNB permite que los UEs más alejados transmitan con niveles de potencia más altos. A pesar de estos valores de potencia de transmisión, no fue posible incrementar los valores de *throughput* de cada UE.

*Figura 3.73. Potencia de transmisión total en el enlace de subida en el escenario III*



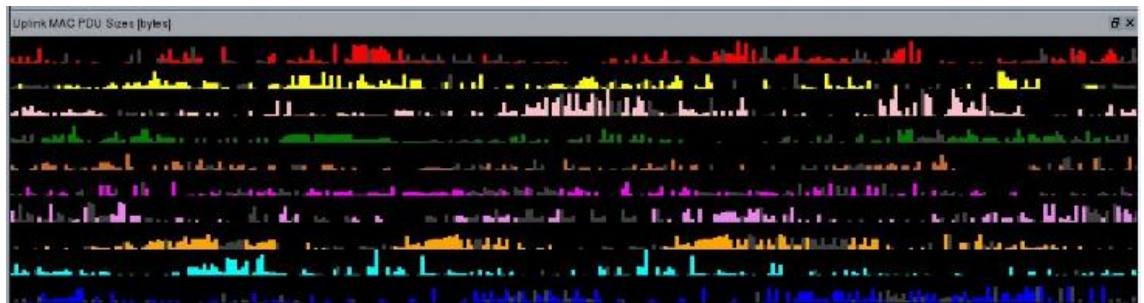
La Figura 3.74 muestra la potencia de transmisión por bloque de recursos en el enlace de subida. Se observa que en algunos intervalos de tiempo los niveles de potencia de transmisión del UE de color rojo disminuyen mientras que para el UE de color rosado aumentan. Esto se produce ya que ellos son los dos UE que se encuentran más cercanos al eNB, por lo tanto compiten por la máxima cantidad de recursos disponibles que el eNB les puede asignar.

Figura 3.74. Potencia de transmisión por RB en el enlace de subida en el escenario III



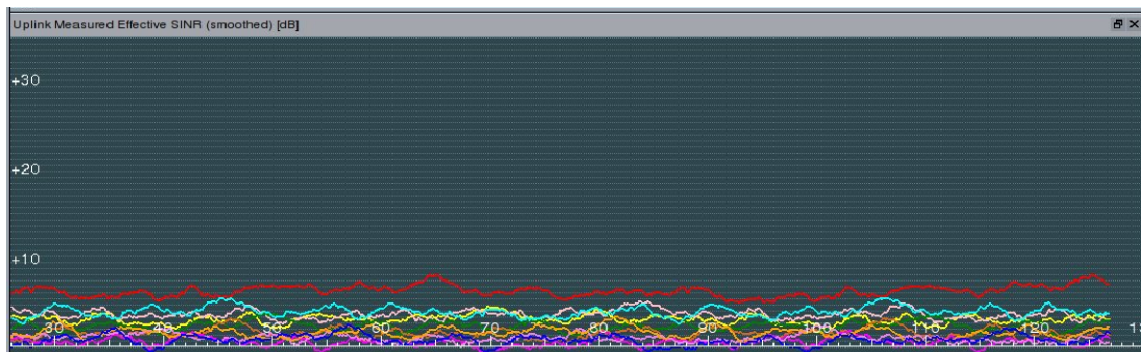
La Figura 3.75 muestra el tamaño de las PDUs en el enlace de subida. A diferencia del enlace de bajada, en este caso se aprecia que la asignación de tamaños de las PDUs mejora para todos los UEs de la celda, incluso los UEs que presentan las peores condiciones de canal. Sin embargo, en algunos intervalos de tiempo el tamaño de estas PDUs es poco significativo para cada UE, pues el algoritmo de planificación de paquetes se encarga de asignar recursos a los demás UEs.

Figura 3.625. Tamaños de las PDUs en el enlace de subida en el escenario III



### 3.4.7 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de subida

Figura 3.636. SINR efectiva suavizada en el enlace de subida en el escenario III

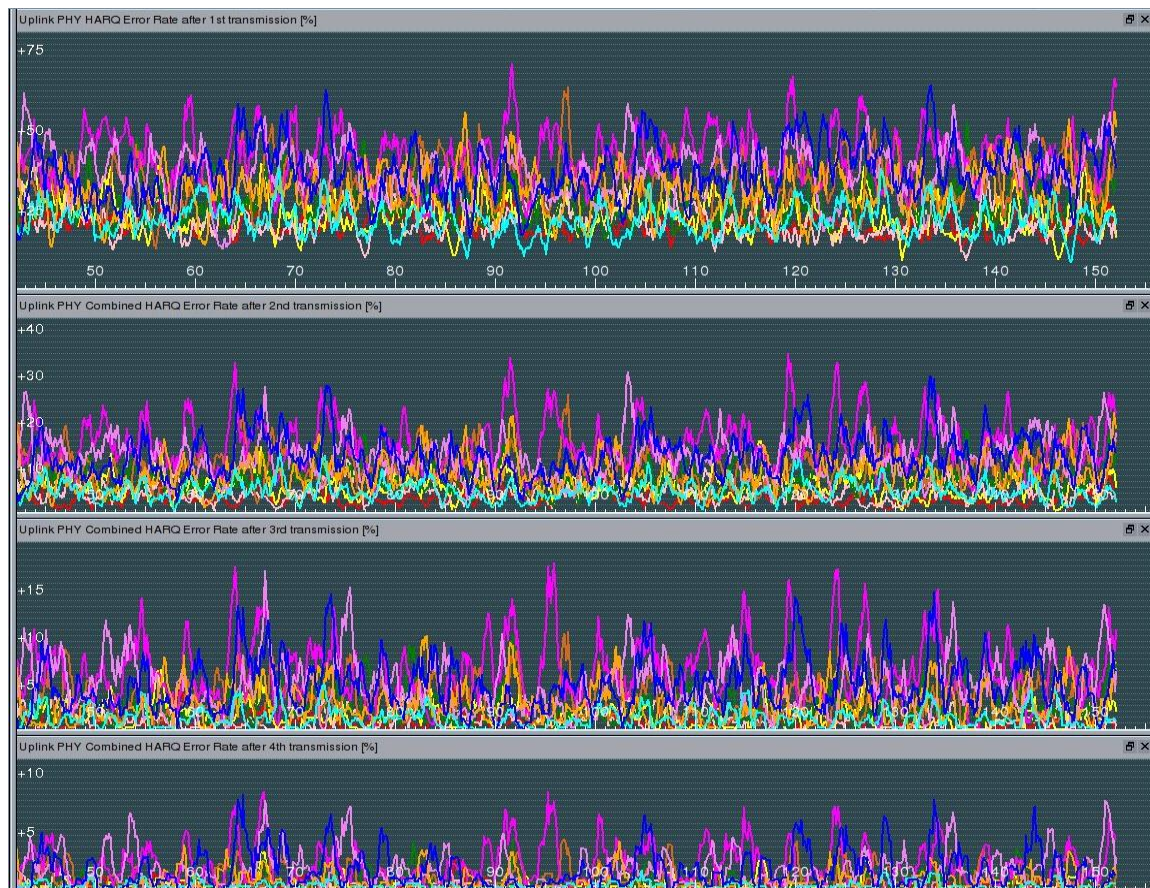




La Figura 3.76 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva en el enlace de subida, cuyos valores corresponden a un promedio durante intervalos de tiempo de 3 segundos. La Figura 3.76 indica que, a pesar de que los UEs que se encuentran en la frontera de la celda transmiten con niveles de potencia mayores que el UE de color rojo, los valores de SINR obtenidos de los UEs lejanos no alcanzaron a los valores de SINR del UE de color rojo, ya que sus señales transmitidas se ven afectadas por los efectos adversos del canal.

### 3.4.8 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de subida

*Figura 3.647. Tasa de error H-ARQ después de la primera, segunda, tercera y cuarta transmisión en el enlace de subida en el escenario III*



La Figura 3.77 muestra la tasa de errores de las retransmisiones H-ARQ en el enlace de subida. En este escenario en específico se requiere el uso de las tres retransmisiones para que la señal de información pueda ser recuperada correctamente en el eNB. Esto ocurre porque la ubicación de los UEs en la frontera de la celda hace que las señales transmitidas presenten una mayor degradación por parte de los efectos del canal. Por otra parte, los móviles no poseen las mejores condiciones de canal, pues los niveles de potencia de transmisión son bajos en comparación con los niveles del eNB y sólo se transmite por una sola antena.

Los valores de porcentaje de errores encontrados después de la primera transmisión son del orden del 20% y 55%, que incluyen algunos errores para el UE de color rojo. A pesar de que en cada retransmisión el sistema H-ARQ busca corregir los errores mediante la redundancia incremental, después de la segunda transmisión estos porcentajes disminuyeron hasta llegar al 30%. Se aprecia que los errores para el UE de color rojo desaparecieron gracias a sus condiciones de canal favorables. Después de la tercera transmisión los porcentajes de errores llegaron hasta el 10% y después de la cuarta 6%. A pesar de que se hizo uso de las tres retransmisiones, la información recibida de los UEs ubicados en la frontera de la celda aún contiene errores.

### **3.5 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE MIMO**

La Figura 3.8 muestra el último escenario de la simulación usado para realizar el análisis MIMO, el cual consta sólo de 3 UE ubicados estratégicamente con el objetivo de lograr una mejor visualización de los diferentes indicadores usados para evaluar y analizar el desempeño de dos esquemas MIMO. Para ello se realizó un cambio en uno de los parámetros del simulador en el enlace de bajada, donde se modificó el parámetro de diversidad en recepción que permitió cambiar el esquema de multiplexación espacial de MIMO 2x2 a MIMO 4x4, para apreciar las mejoras que se presentan al momento de hacer el cambio a un sistema de MIMO de mayor orden. A pesar de que en las especificaciones del R8 para LTE sólo se encuentra especificado el sistema de MIMO 2x2, y MIMO 4x4 aparece como opcional, se decidió emplearla en esta simulación, con el objetivo de evaluar y analizar las mejoras en el sistema al adicionar esta técnica, hay que hacer una observación acerca del comportamiento de la herramienta al implementar esta técnica, ya que se obtiene resultados que no son lo esperados, esto se debe a que la versión del simulador hace un tratamiento ideal de la señal de transmisión de todos los UEs sin tener en cuenta su ubicación dentro de la celda.

#### **3.5.1 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel PDCP en el enlace de bajada**

La Figura 3.78 muestra los valores promedio de *throughput* para MIMO 2x2 en la parte superior y MIMO 4x4 en la parte inferior, en el enlace de bajada. La adición de dos antenas en el transmisor permitió que el desempeño de la celda aumentara considerablemente, ya que los valores de *throughput* incrementaron casi al doble, pues para MIMO 2x2 los valores se encuentran entre 10 Mbps y 20 Mbps, mientras que para MIMO 4x4 los valores llegaron hasta 38 Mbps. Este hecho se presenta debido a que al cambiar el esquema de multiplexación espacial del sistema, es posible enviar una mayor cantidad de información por cada una de las antenas.

Figura 3.658. Throughput total de la celda con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada

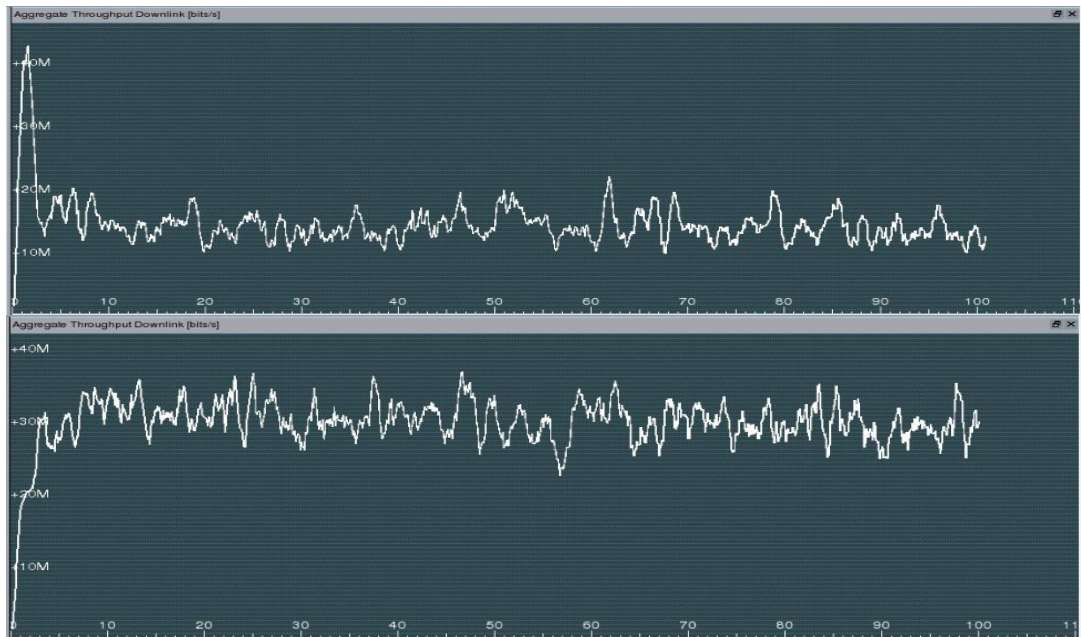
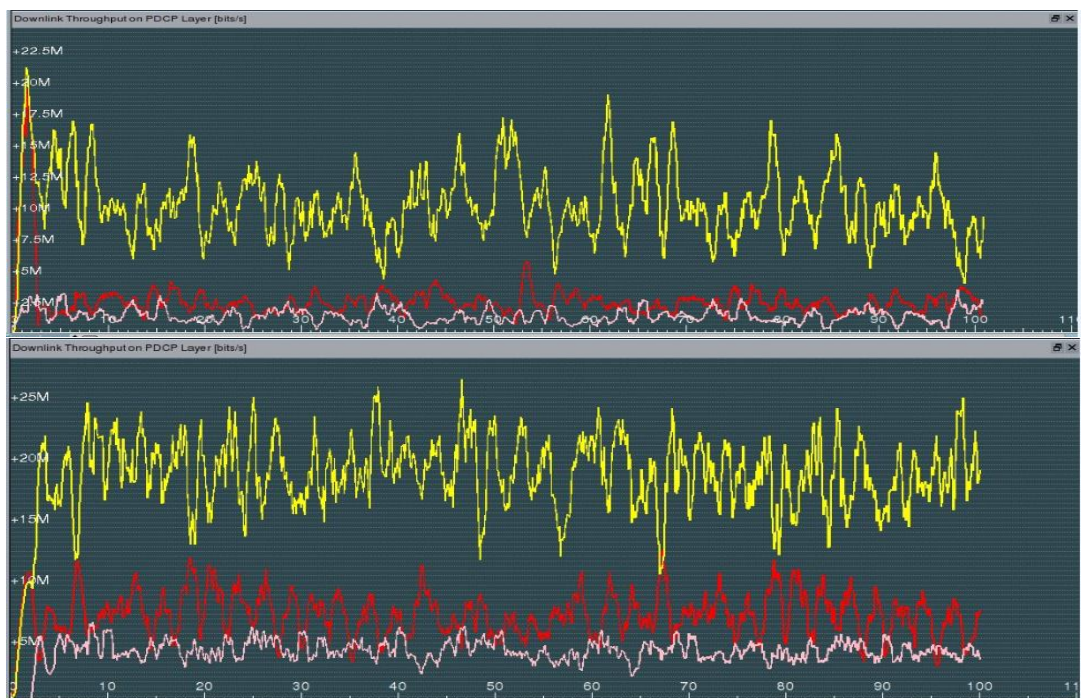


Figura 3.669. Throughput de cada UE con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada



La Figura 3.79 muestra el *throughput* de cada uno de los UE para MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada. Es claro que en ambas situaciones el UE de color amarillo presenta mejores valores de *throughput*, ya que se encuentra más cerca del eNB y dentro



de su zona de cobertura. Al emplear el esquema MIMO 4x4 el valor del *throughput* aumenta significativamente con respecto a los valores encontrados al emplear MIMO 2x2, ya que en el caso del UE de color amarillo emplea un esquema de modulación de alto orden y una tasa de codificación mayor, pues al encontrarse más cerca del eNB puede hacer uso de 16-QAM y en el mejor de los casos 64-QAM, mientras que para los UEs que se encuentran más alejados, el esquema de modulación empleado es de menor orden.

Figura 3.80. Retardo de transmisión con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada



La Figura 3.80 muestra el retardo de transmisión en el enlace de bajada al implementar MIMO 2x2 y MIMO 4x4, respectivamente. Los valores de retardo encontrados al implementar MIMO 2x2 son más altos que los valores encontrados al implementar MIMO 4x4, esto se debe a que el eNB aprovecha todas las antenas para transmitir diferente información, lo mismo que los UEs para recibir información. Al implementar MIMO 4x4, los valores de retardo disminuyen considerablemente, sobre todo para los UEs más alejados.

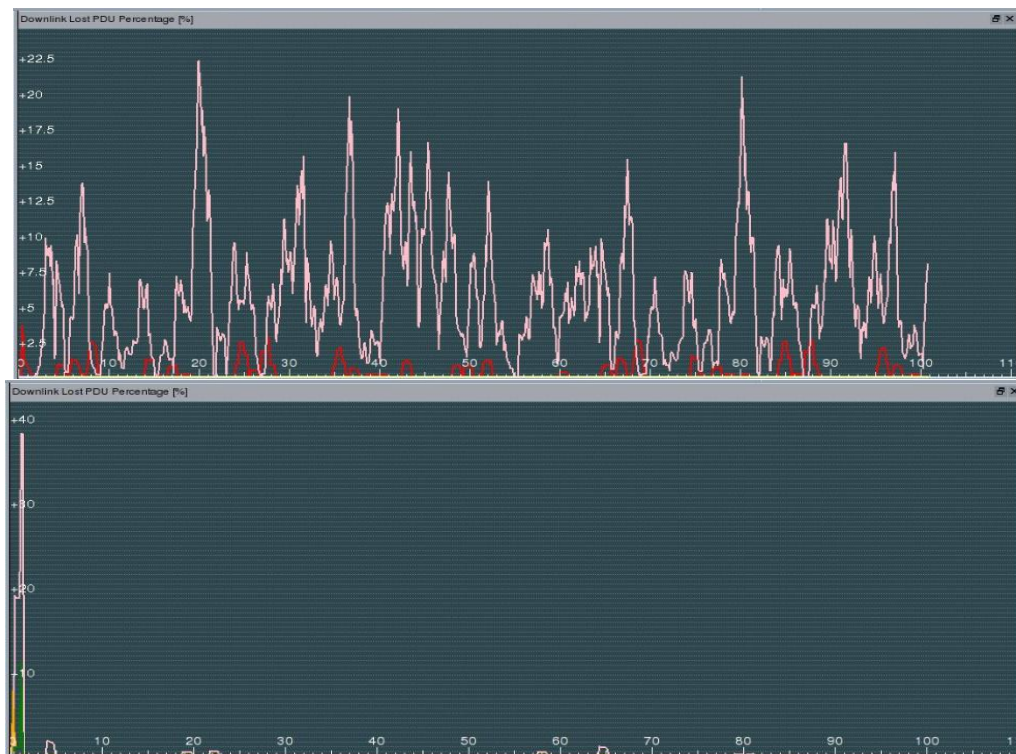
Los datos obtenidos a través de la herramienta de simulación no fueron los valores esperados ya que al implementar un sistema MIMO de mayor orden se esperaba que la señal de información presentara mayores valores de retardos, por el hecho de estar sometida a los efectos de la multitrayectoria y a la interferencia de las demás señales transmitidas a través de la RI.

### 3.5.2 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel RLC en el enlace de bajada

La Figura 3.81 muestra el porcentaje de las pérdidas de PDUs en las dos configuraciones de antenas MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada, respectivamente. En la primera situación se obtuvieron valores de pérdidas de PDUs de hasta 22.5% en el caso del UE más alejado, debido a sus condiciones de canal y al número de antenas con las cuales está transmitiendo el eNB. En la segunda situación los valores de pérdidas se redujeron notoriamente, ya que sólo se encontraron algunas pérdidas para el UE de color rosado en intervalos cortos de tiempo.

Como se mencionó anteriormente los valores obtenidos mediante la herramienta de simulación fueron valores no esperados, ya que al trabajar con un sistema MIMO de mayor orden se incrementan los retardos, por lo tanto se deben presentar mayores porcentajes de pérdidas de PDU en la transmisión.

*Figura 3.81. Porcentaje de pérdidas de PDUs con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada*



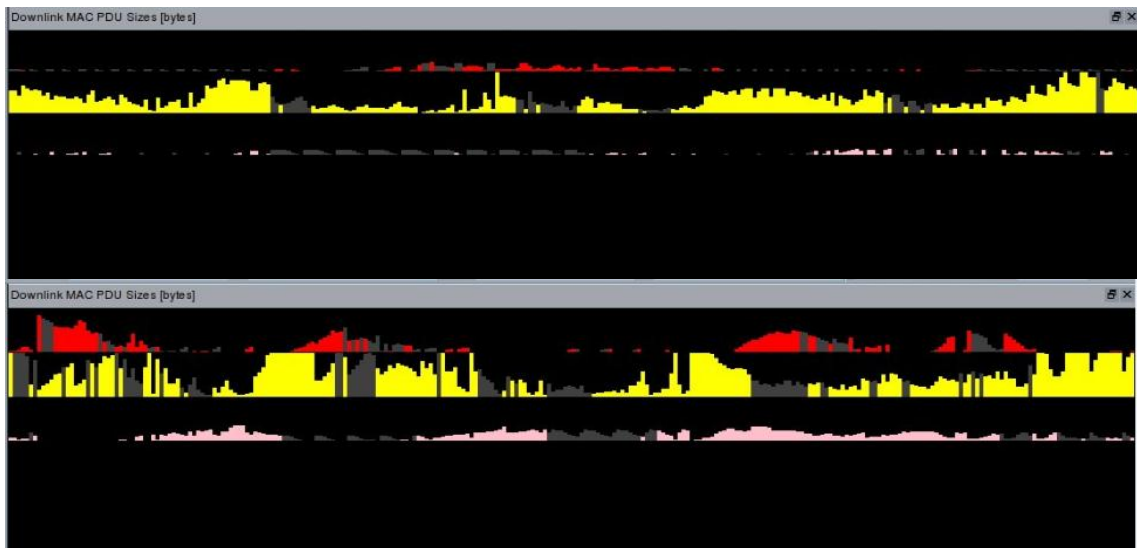
### 3.5.3 Evaluación y análisis del desempeño a subnivel MAC en el enlace de bajada

La Figura 3.82 muestra el tamaño de las PDUs para MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada. En la situación superior en donde se empleó MIMO 2x2, el UE amarillo presentó tamaños de PDUs mayores que los demás UE a lo largo de toda la simulación, a

pesar de que existen franjas negras que representan la ausencia de asignación de PDUs. Con el cambio de la tecnología a MIMO 4x4, los valores del tamaño de las PDUs aumentaron para todos los UEs, lo que permite brindarles un mejor servicio, incluso si estos se encuentran en las fronteras de la celda.

Los resultados obtenidos no fueron los esperados, debido a que los tamaños de PDU para MIMO 4x4 de los UE de color rojo y rosado deberían tener tamaños más pequeños de PDU, ya que estos UEs se encuentran en condiciones desfavorables por su ubicación en la celda, de tal modo que al implementar un sistema de MIMO de mayor orden la señal de información se verá afectada por los niveles de interferencia de las señales transmitidas por las demás antenas.

*Figura 3.82. Tamaños de las PDUs con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada*



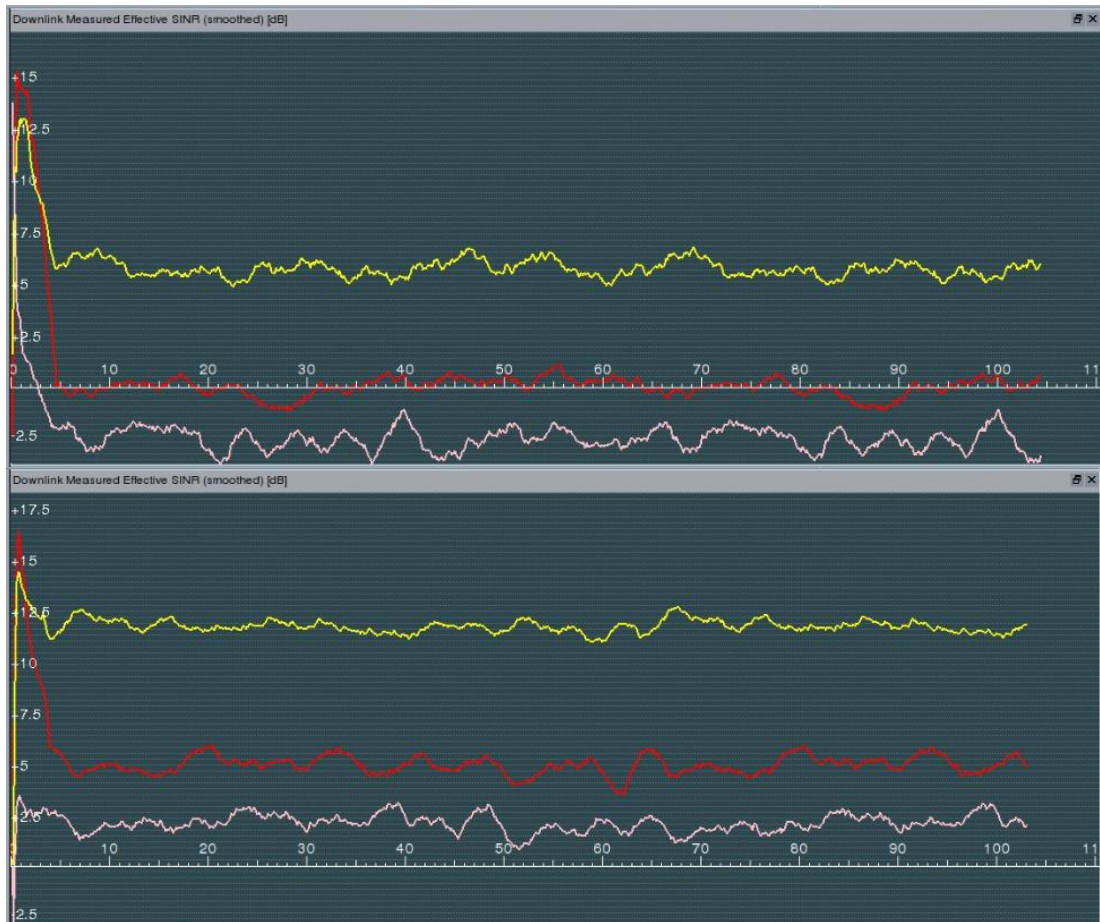
#### **3.5.4 Evaluación y análisis del desempeño a nivel de enlace en el enlace de bajada**

La Figura 3.83 muestra la medida suavizada de la SINR efectiva para MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada. En ambas situaciones el UE de color amarillo presenta los valores más altos de SINR, ya que cuenta con las mejores condiciones de canal con respecto de los demás UEs. Se tiene además que los valores encontrados al implementar MIMO 4x4 son mucho mayores alrededor de las 12.5 dB, ya que, como se mencionó anteriormente, el eNB se encuentra transmitiendo por medio de 4 antenas con los mismos niveles de potencia que transmitía en la primera situación.

Los valores que presentaron los UE de color rojo y rosado no fueron los esperados, ya que al implementar un sistema MIMO de mayor orden, las señales estarán sometidas a los efectos de la interferencia, por lo cual se espera que los valores de SINR debieran disminuir.



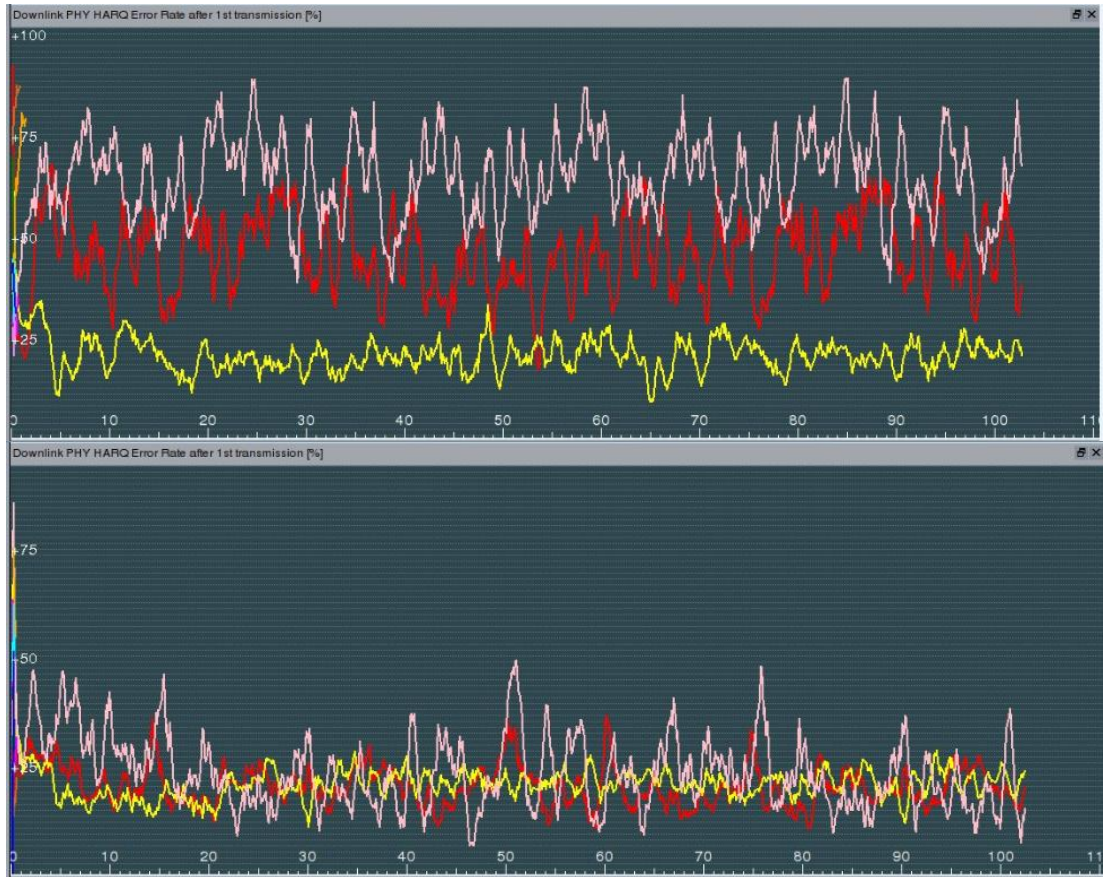
Figura 3.83. SINR efectiva suavizada con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada



### 3.5.5 Evaluación y análisis del desempeño a nivel físico en el enlace de bajada

La Figura 3.84 muestra la tasa de errores H-ARQ después de la primera transmisión en el enlace de bajada para MIMO 2x2 y MIMO 4x4, respectivamente. En ambas situaciones, los porcentajes más altos se presentaron para los UEs de color rosado y rojo, cuyos valores están entre 78% y 96% en la primera situación. Al realizar el cambio a MIMO 4x4 este porcentaje disminuyó de manera considerable, alcanzando valores máximos de 50% en algunos intervalos de tiempo. Los porcentajes de errores para el UE de color amarillo después de la primera transmisión fueron similares en ambas situaciones, ya que, a pesar de que este es el UE más cercano al eNB, no se descarta que esté sometido a la interferencia producida por el multitrayecto ni a las pérdidas de propagación producidas en el medio de transmisión.

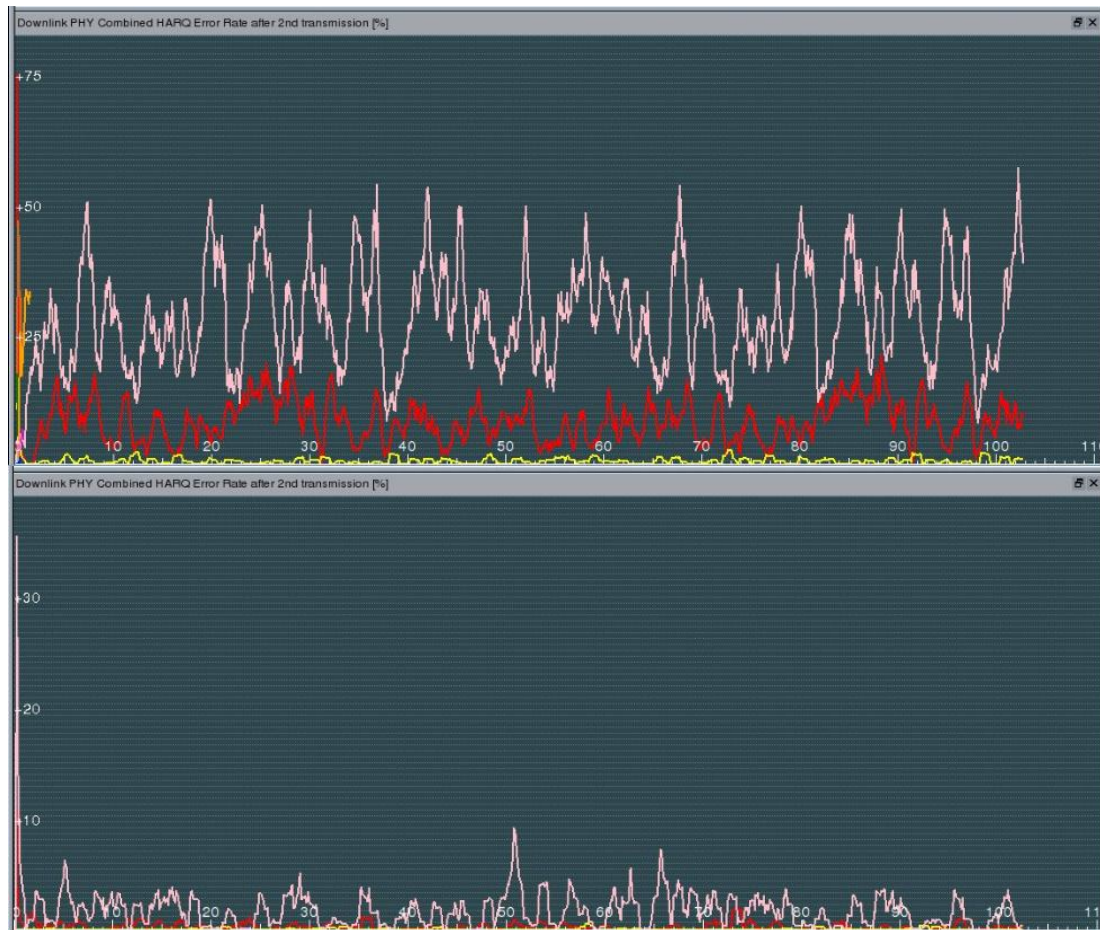
Figura 3.84. Tasa de error H-ARQ después de la primera transmisión con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada



La Figura 3.85 muestra la tasa de errores H-ARQ después de la segunda transmisión en el enlace de bajada, al implementar MIMO 2x2 y MIMO 4x4, respectivamente. Se observa una disminución en el porcentaje de errores con respecto a la primera transmisión, ya que en el caso de MIMO 2x2 el porcentaje de errores para el UE con las peores condiciones de canal disminuyó hasta 50%. La modificación de MIMO 4x4 produjo una disminución significativa para todos los UEs después de la segunda transmisión, cuyos valores no sobrepasaron el 10%. Esto indica que existe una estrecha relación entre el uso de la tecnología MIMO y las retransmisiones H-ARQ, ya que a mayor número de antenas, el número de retransmisiones necesarias para recuperar correctamente la información disminuyó.



Figura 3.675. Tasa de error H-ARQ después de la segunda transmisión con MIMO 2x2 y MIMO 4x4 en el enlace de bajada



Los valores obtenidos en cuanto a la implementación de la técnica H-ARQ no fueron los esperados, debido a que, como se mencionó anteriormente, al presentarse mayores niveles de interferencia generados por la transmisión a través de múltiples antenas, se necesita hacer uso de un número mayor de retransmisiones H-ARQ para corregir efectivamente en recepción los errores incluidos en la señal de información.

### 3.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO

Se observa en la Tabla 3.4 que el escenario I es el que mejores resultados presenta en cuanto al *throughput* individual y total de la celda, retardo de transmisión y los porcentajes de retransmisiones H-ARQ respecto de los demás escenarios de simulación, ya que todos los UEs cuentan con condiciones de canal favorables, gracias a su cercanía con el eNB. Esto permite asumir al escenario I como punto de comparación para determinar si un escenario presenta las condiciones de operación favorables, o si por el contrario los resultados obtenidos demuestran que un escenario no cuenta con estas condiciones. En

el caso del enlace de bajada se aprecia que los resultados para el escenario I son superiores comparándolos con los demás escenarios, especialmente los valores obtenidos de *throughput* total de la celda, ya que son aproximados a los definidos en el R8 [23].

*Tabla 3.4 Indicadores para los UEs con condiciones de canal favorables en el enlace de bajada*

<b>Indicadores</b>	<b>Escenario I</b>	<b>Escenario II</b>	<b>Escenario III</b>
<i>Throughput</i>	91 - 98 Mbps	50 - 55 Mbps	15 - 18 Mbps
<i>Throughput</i> de cada UE	9 - 10 Mbps	10 - 13 Mbps	5 - 10 Mbps
Retardos de transmisión	125 ms	125 ms	125 ms
Porcentaje de pérdidas de PDUs	-	-	-
SINR Efectiva	18 - 21 dB	17 - 20 dB	6 - 9 dB
Tasa de Error 1ra H-ARQ	17 - 20 %	17 - 26 %	23 - 26 %
Tasa de Error 2da H-ARQ	-	-	-
Tasa de Error 3ra H-ARQ	-	-	-
Tasa de Error 4ta H-ARQ	-	-	-

En la Tabla 3.5 se presentan variaciones de los resultados obtenidos de los siguientes indicadores de desempeño: *throughput* individual y total de la celda, porcentajes de retransmisiones H-ARQ y la SINR efectiva del sistema respecto de la Tabla 3.4, ya que los UEs se encuentran más alejados del eNB, por lo tanto se necesita hacer uso de un mayor número de retransmisiones, con la intención de corregir y recuperar correctamente la información de la señal original mediante la redundancia incremental. Se observa nuevamente que el escenario I es aquel que presenta los mejores resultados gracias a las condiciones de canal que poseen cada uno de los UEs.

*Tabla 3.5 Indicadores para los UEs con condiciones de canal desfavorables en el enlace de bajada*

<b>Indicadores</b>	<b>Escenario I</b>	<b>Escenario II</b>	<b>Escenario III</b>
<i>Throughput</i>	91 - 98 Mbps	50 - 55 Mbps	15 - 18 Mbps
<i>Throughput</i> de cada UE	6 - 8 Mbps	1 Mbps	1 Mbps
Retardos de transmisión	125 ms	1 - 1,2 s	2,5 - 3,5 s
Porcentaje de pérdidas de PDUs	-	0 - 20 %	0 - 50 %
SINR Efectiva	17 - 20 dB	0 - 2,5 dB	(-10) - 0 dB
Tasa de Error 1ra H-ARQ	25 - 27 %	50 - 80 %	60 - 100 %
Tasa de Error 2da H-ARQ	-	20 - 50 %	50 - 75 %
Tasa de Error 3ra H-ARQ	-	0 - 25 %	26 - 65 %
Tasa de Error 4ta H-ARQ	-	0 - 10 %	0 - 30 %

En el enlace de subida los resultados presentados en la Tabla 3.6 de los indicadores de desempeño relacionados al *throughput* individual y total de la celda, retardos de transmisión, porcentaje de pérdidas de PDU, SINR efectiva del sistema y el porcentaje de

retransmisiones son menores que en el enlace de bajada, debido a las limitaciones de transmisión de los UEs y porque la señal de información está sometida a los efectos del canal como el multitrayecto y las pérdidas de propagación. A pesar de ello, se pueden obtener velocidades de transmisión para los UEs con condiciones de canal favorables (escenario I) que corresponden aproximadamente a la mitad de los valores del enlace de bajada. Con respecto a algunos resultados es posible afirmar nuevamente que el escenario I es el punto de comparación gracias a los resultados obtenidos, haciendo la aclaración que los valores de SINR no corresponden con los resultados teóricos, ya que en el enlace de bajada se esperaban obtener mayores valores de SINR que en el enlace de subida, esto se debe a que el eNB no presenta limitaciones en cuanto a la potencia de transmisión, por lo cual la señal de información será más robusta frente a los efectos desfavorables del canal.

*Tabla 3.6 Indicadores para los UEs con condiciones de canal favorables en el enlace de subida*

<b>Indicadores</b>	<b>Escenario I</b>	<b>Escenario II</b>	<b>Escenario III</b>
<i>Throughput</i>	40 - 43 Mbps	22 - 25 Mbps	5 Mbps
<i>Throughput</i> de cada UE	3 - 6 Mbps	3 - 6 Mbps	0,9 - 1,2 Mbps
Retardos de transmisión	150 - 250 ms	220 - 250 ms	1 - 1,5 s
Porcentaje de pérdidas de PDUs	-	-	0 - 1 %
Potencia de transmisión	(-20) - (-17) dB	(-13) - (-9) dB	0 - 5 dB
SINR Efectiva	21 - 29 dB	20 - 25 dB	5 - 10 dB
Tasa de Error 1ra H-ARQ	0 - 4 %	4 - 10 %	23 - 28 %
Tasa de Error 2da H-ARQ	-	-	0 - 5 %
Tasa de Error 3ra H-ARQ	-	-	0 - 2 %
Tasa de Error 4ta H-ARQ	-	-	-

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.7, presentan algunas variaciones respecto de la Tabla 3.6, especialmente en los valores de retardo de transmisión y la tasa de retransmisiones H-ARQ. Esto se debe a que a medida que un UE percibe peores condiciones de canal, los indicadores presentan una degradación significativa. Por esta razón se incrementan los porcentajes de errores y los porcentajes de pérdidas de PDUs.

Por otro lado la Tabla 3.7 permite observar como es el comportamiento del control de potencia realizado por el eNB, el cual está directamente relacionado con los valores de SINR, como también de la ubicación de los UEs dentro de la celda. Donde los mejores valores se presentan en el escenario I debido a las condiciones favorables de canal.

*Tabla 3.7 Indicadores para los UEs con condiciones de canal desfavorables en el enlace de subida*

<b>Indicadores</b>	<b>Escenario I</b>	<b>Escenario II</b>	<b>Escenario III</b>
<i>Throughput</i>	40 - 43 Mbps	22 - 25 Mbps	5 Mbps
<i>Throughput</i> de cada UE	2,4 - 3,4 Mbps	0,8 - 1 Mbps	0,6 - 1 Mbps

Retardos de transmisión	250 - 300 ms	750 ms - 1s	2 - 3 s
Porcentaje de pérdidas de PDUs	0,025 %	1,5 - 2 %	2,5 - 7,5 %
Potencia de transmisión	(-11) - (-8) dB	5 - 10 dB	6 - 12 dB
SINR Efectiva	18 - 21 dB	5 - 9 dB	(-2) - (-6) dB
Tasa de Error 1ra H-ARQ	20 - 28 %	20 - 30 %	30 - 59 %
Tasa de Error 2da H-ARQ	0 - 1,5 %	2,5 - 5 %	15 - 30 %
Tasa de Error 3ra H-ARQ	0 - 0,7 %	1 - 3 %	5 - 10 %
Tasa de Error 4ta H-ARQ	0 - 0,025 %	0 - 2 %	0 - 6 %

## 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Después de cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo de grado, en el cual se realizó un análisis de desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE mediante el uso de la herramienta de simulación LTE-AMoRE® en los enlaces de subida y bajada, mediante el análisis y la evaluación de los indicadores de desempeño, acorde a las especificaciones del R8 del 3GPP y en los escenarios de simulación definidos.

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de grado y las recomendaciones sobre futuros trabajos de grado, los cuales darán continuidad al estudio y análisis de las diferentes tecnologías móviles inalámbricas para la comunicación de datos, haciendo uso de herramientas de simulación.

### 4.1 CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de grado se lograron identificar los indicadores de desempeño más importantes como el *throughput* individual y total de la celda, retardos de transmisión, control de potencia y los porcentajes de retransmisiones H-ARQ, a nivel de sistema en los dos primeros niveles y sus respectivos subniveles del modelo de referencia OSI correspondiente a la tecnología LTE. Por medio de estos indicadores fue posible realizar la evaluación y el análisis del desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE, ya que la herramienta de simulación LTE-AMoRE® permitió obtener gráficamente la evaluación de los indicadores en tiempo real para cada uno de los escenarios definidos en el plan de pruebas.
- Los valores de *throughput* obtenidos en las simulaciones para los casos más favorables presentados para los UEs más cercanos al eNB se aproximan a los valores descritos en el R8 del 3GPP. El mejor de los casos se presentó en el primer escenario de simulación, donde se alcanzaron velocidades de transmisión totales de la celda en el enlace de bajada cercanos a 100 Mbps, y en el enlace de subida cercanos a 40 Mbps. A pesar de ello, en algunas situaciones fue necesario el uso de retransmisiones H-ARQ para que los UEs y el eNB fueran capaces de recibir la información sin errores gracias a la redundancia incremental, logrando que después de cada retransmisión los valores de la tasa de errores disminuyeran considerablemente.
- Uno de los indicadores de desempeño evaluado en el enlace de subida para el cual se obtuvieron resultados diferentes a los descritos en las especificaciones del R8 del 3GPP fue el retardo de transmisión, ya que en algunos casos los valores obtenidos en la simulación llegaron a ser de hasta 3 segundos. Este hecho se presentó porque el generador de tráfico está configurado para mantener los



*buffers* del eNB llenos, por tanto los retardos entre eNB y los UEs incluyeron el tiempo de espera de los paquetes en estos *buffers*.

- Teóricamente los valores de la SINR son mayores en el enlace de bajada que en el enlace de subida, puesto que el eNB cuenta con mejores características de operación, ya que posee niveles de potencia mayores con respecto a los UE, logrando de esta manera contrarrestar los efectos del ruido y la interferencia. Al ejecutar las diferentes simulaciones, no se obtuvieron valores de la SINR que coincidieran con lo descrito anteriormente, ya que al realizar el eNB la transmisión por medio de dos antenas (sistema MIMO), se obtuvo un aumento en los niveles de interferencia que degradó el valor de la SINR, mientras que en el enlace de subida el UE está transmitiendo por una sola antena y el eNB recibe por dos antenas (ganancia por diversidad en recepción).
- En el desarrollo de este trabajo de grado se realizó un análisis comparativo de los sistemas de múltiples antenas MIMO 2x2 y MIMO 4x4 para un escenario específico. Cabe aclarar que el uso de sistemas MIMO 4x4 no está incluida en el R8, sino en LTE Avanzado definido en la Especificación 10 (R10, *Release 10*) del 3GPP. Sin embargo, este análisis permitió comprobar las ventajas que esta técnica brinda al sistema, ya que los valores de *throughput* se incrementan considerablemente al implementar MIMO 4x4.
- A medida que un UE se encuentra en cercanías del eNB posee mejores condiciones de canal, las cuales son aprovechadas efectivamente por la técnica MIMO 2x2, ya que las diferentes señales son recibidas con niveles de potencia altos y los retardos entre ellas son bajos. Por otra parte, si un UE no cuenta con las condiciones de canal adecuadas por el hecho de estar en la frontera de la celda, la técnica de MIMO 2x2, empeora su situación, ya que las señales recibidas sufren en mayor medida los efectos del canal, como los desvanecimientos, las pérdidas de propagación y la interferencia, originando un aumento de la ISI y la BER.
- El control de potencia es uno de los aspectos que mejor se pudo apreciar en los resultados de la simulación, ya que de acuerdo a la ubicación en la que se encuentran los UEs, el eNB envía comandos de control de potencia indicando el valor de potencia de transmisión. De acuerdo a esto, los UEs con mejores condiciones del canal de transmisión, es decir, los que se encuentran más cerca del eNB transmiten con niveles de potencia bajos. Esto permite que la vida útil de la batería de los móviles sea superior.
- El algoritmo de planificación de paquetes es el encargado de asignar los recursos a los diferentes UEs de acuerdo a sus condiciones de canal y a la prioridad que cada uno de ellos posea. De los resultados de la simulación es posible afirmar que

los UEs presentan una misma prioridad para la asignación de recursos, ya que el algoritmo de planificación de paquetes asigna en intervalos de tiempo cantidades similares de los recursos, incluso a los UEs que se encontraban en la frontera. Sin embargo, el tamaño de las PDUs de estos UEs era reducido, debido a sus condiciones de canal.

- Algunos resultados obtenidos en los indicadores de desempeño no fueron los esperados, ya que el comportamiento de la SINR y la técnica de corrección de errores H-ARQ mostraron resultados que no corresponden con la teoría, pues en el enlace de subida los valores de SINR son mayores que en el enlace de bajada, por esta razón se esperaba obtener mayor cantidad de errores en el enlace de bajada ocasionados por la interferencia, lo cual no se obtuvo. Este problema está asociado a la forma de operación de la herramienta, y no se logró determinar el motivo de este comportamiento.
- A través de la evaluación y el análisis de los indicadores seleccionados, se logró verificar el comportamiento en cuanto al desempeño de una red LTE, donde se logró observar que este se incrementa o decae, dependiendo de factores como: las condiciones de canal, velocidades de transmisión de datos, retardos de transmisión y el empleo de retransmisiones H-ARQ, como a la ubicación de los diferentes UEs dentro de la celda.
- Las simulaciones son una alternativa económicamente viable para el análisis de una tecnología de punta como LTE, ante la imposibilidad de adquirir equipos de simulación especializados o realizar una implementación real. Los valores que se obtuvieron para algunos de los indicadores de desempeño están muy cercanos a los valores objetivos especificados por el R8.

## **4.2 TRABAJOS FUTUROS**

Los resultados obtenidos del presente trabajo de grado, permiten plantear algunos trabajos futuros de investigación que contribuyan a la comprensión del funcionamiento y evaluación de los nuevos sistemas de comunicación móvil celular. Para ello se propone:

- Analizar el desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE mediante la herramienta LTE-AMoRE® para una red de múltiples celdas.
- Desarrollar una herramienta de simulación a nivel de sistema que permita diseñar una red LTE en la Ciudad de Popayán.
- Analizar el desempeño a nivel de sistema de la tecnología LTE Avanzado (R10) mediante el uso de una herramienta de simulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] H. Holma, A. Toskala, *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access*, Primera Edición, John Wiley and Sons, 2009.
- [2] J. Martínez, J. Covaleda, “Análisis de Desempeño a Nivel Físico del Enlace de Subida de LTE”, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [3] F. Córdoba, J. Zúñiga, “Análisis de Desempeño a Nivel Físico del Enlace de Bajada de LTE”, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [4] P. Urbano, P. Díaz, “Análisis de Capacidad y Cobertura de una Red Móvil LTE para la Ciudad de Popayán”, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [5] A. Klein, “The Demonstrator for Real Time System Level Simulation of LTE Radio Networks”, ITG Workshop on Simulation and Prototyping Environments for Mobile/Wireless Research, Senior Research Engineer Nokia Siemens Network CTO Research, Radio Systems Munich, Julio 2011.
- [6] 3GPP TR 23.882, “3GPP System Architecture Evolution (SAE): Report on technical options and conclusions”, V 8.0.0, 2008.
- [7] 3GPP TR 25.913, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; “Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)” (Release 8) [En línea]. Disponible en: [http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/25\\_series/25913-800.zip](http://ftp.3gpp.org/Specs/2010-12/Rel-8/25_series/25913-800.zip) [Consultado Mayo 2012].
- [8] 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall Description, Stage 2”, V 11.0, 2009 [En línea]. Disponible en: [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.300/](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.300/). [Consultado Junio 2012].
- [9] 3GPP TS 36.401, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Architecture Description”, V 8.2.0, 2008 [En línea]. Disponible en: [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.401/](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.401/). [Consultado Julio 2012].
- [10] R. Agusti, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, Jordi. Pérez, O. Sallent, “LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles”, Fundación Vodafone España, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2009.

- [11] P. Acuña, F. Montealegre, M. Salas, J. Salazar, “Propuesta de Requerimientos Técnicos para la Implementación de Redes Móviles con la Tecnología Long Term Evolution (LTE) en Costa Rica”, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Julio, 2010.
- [12] J. Cabrejas, D. Calabuig, N. Cardona, A. Fernández, A. García, M. González, D. Martín-Sacristán, D. Montserrat, J. Olmos, J. Ruiz Boqué, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Marcombo, Barcelona, 2011.
- [13] National Instruments, “Coherence Bandwidth”, National Instruments Corporation, 2012.  
Disponible en: <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/333#toc0>. [Consultado Diciembre 2012].
- [14] G. Orozco, J. Rosero, “Simulación Y Análisis De La Interferencia ICI En OFDM Sobre Un Enlace Punto A Punto,” tesis de pregrado, Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2010.
- [15] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. United States of America: Cambridge University Press, 2005.
- [16] P. Malathi, P.T. Vanathi, “Peak to Average Power Ratio (PAPR) Reduction Techniques for OFDM-MIMO System”.  
Disponible en:  
<http://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-ICVCI-2011-92-96.pdf>. [Consultado Febrero 2013].
- [17] 3G and 4G wireles blog, “OFDM and SC-FDMA” [En línea].  
Disponible en:  
<http://3g4g.blogspot.com/2009/02/ofdm-and-sc-fdma.html>. [Consultado Julio 2012].
- [18] Ericsson Internal, “LTE AIR Introduction Course” [En línea].  
Disponible en:  
[http://ericol.international.ericsson.com/sites/LTE\\_Competence\\_Space/air/interface/default.aspx](http://ericol.international.ericsson.com/sites/LTE_Competence_Space/air/interface/default.aspx). [Consultado Junio 2012].
- [19] 3GPP TS 36.323, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Packet Data Convegence Protocol (PDCP) Specification”, V 8.2.1 [En línea].  
Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36323.htm>. [Consultado Julio 2012].
- [20] RFC3095, “Roboust Header Compression (ROHC): Framework and four Profiles: RTP, UDP, ESP, uncompressed” [En línea].  
Disponible en: <http://tools.ietf.org/html/rfc3095> [Consultado Julio 2012].

- [21] 3GPP TS 36.213, “Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical layer procedures (Release 8)”, V 8.8.0, 2009 [En línea]. Disponible en: [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.213/](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.213/). [Consultado Noviembre 2012].
- [22] 3GPP TS 36.214, Version 8.6.0, Release 8, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Layer-Measurements.”
- [23] 3GPP, A Global Initiative. “Long Term Evolution”. The 3rd Generation Partnership Project. Disponible en: <http://www.3gpp.org/LTE>. [Consultado Noviembre 2012].
- [24] V. Pauli, “LTE AMoRE – Radio Emulator User Manual”, Nokia Siemens Networks, Alemania, 2010.
- [25] 3GPP TS 32.450, “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), LTE, Telecommunication management, Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions”, Version 8.0.0, Release 8, 2009.
- [26] “Evolución a Sistemas de Comunicaciones Móviles de Cuarta Generación (4G): Evolución de Largo Termino (LTE)”, notas de clase de Electica: LTE Departamento de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [27] Radio-Electronics.com, “BER Bit Error Rate Tutorial and Definition”, Adrio Communications Ltd [En línea]. Disponible en: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ber/bit-error-rate-tutorial-definition.php>. [Consultado Enero 2013].