

# ANÁLISIS A NIVEL DE SISTEMA DE UNA RED HETEROGÉNEA BASADA EN LTE.



**Cristhian Alberto Núñez Concha**  
**Diego Armando Suarez Gómez**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL**  
**Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio**  
**Popayán, 2014**

# ANÁLISIS A NIVEL DE SISTEMA DE UNA RED HETEROGÉNEA BASADA EN LTE.



Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones.

**Cristhian Alberto Núñez Concha**  
**Diego Armando Suarez Gómez**

Director:

Víctor Manuel Quintero Florez

Codirector:

Claudia Milena Hernández Bonilla

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL**  
**Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio**  
**Popayán, 2014**



# CONTENIDO

	pág.
CAPITULO 1.....	1
MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO.....	4
CAPITULO 2.....	5
CONCEPTOS GENERALES.....	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	5
2.2 PEQUEÑAS CELDAS ( <i>SMALL CELLS</i> ).....	5
2.2.1 Metroceldas.....	5
2.2.2 Microceldas.....	5
2.2.3 Picoceldas.....	6
2.2.4 Femtoceldas.....	6
2.3 REDES HETEROGÉNEAS.....	7
2.3.1 Factores que Impulsan a las Redes Heterogéneas.....	8
2.4 INTERFERENCIA EN REDES HETEROGÉNEAS.....	10
2.4.1 Interferencia <i>Co-layer</i> .....	10
2.4.2 Interferencia <i>Cross-Layer</i> .....	11
2.5 FEMTOCELDAS EN LTE.....	12
2.5.1 Arquitectura.....	12
2.5.2 Posibles Variantes para la Arquitectura de una Red Heterogénea en LTE....	13
2.5.3 Control de Acceso.....	15
2.5.4 Estructura Celular Jerárquica.....	15
2.5.5 Procedimientos de <i>Handover</i> .....	17
2.5.6 Capa Física y Asignación de <i>Throughput</i> .....	18
CAPITULO 3.....	23
METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	23



3.1	METODOLOGÍA DE DESARROLLO .....	23
3.1.1	Análisis de requerimientos .....	24
3.1.2	Diseño.....	25
3.1.3	Implementación.....	32
3.1.4	Pruebas.....	42
CAPITULO 4.....		46
ANALISIS DE RESULTADOS.....		46
4.1	INTERFERENCIA <i>CROSS-LAYER</i> .....	47
4.1.1	Macrouuario Interferido por HeNB.....	47
4.1.2	Femtousuario Interferido por el eNB.....	52
4.1.3	Prueba de Movilidad de Macrouuario .....	66
4.2	INTERFERENCIA <i>CO-LAYER</i> .....	71
4.2.1	Efecto del Número de Femtoceldas Activas .....	71
4.2.2	Efecto de la Potencia de Transmisión de HeNB .....	74
4.2.3	Prueba de Movilidad de Femtousuario .....	76
CAPÍTULO 5.....		82
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....		82
5.1	CONCLUSIONES .....	82
5.2	TRABAJOS FUTUROS.....	84
REFERENCIAS .....		85
APENDICE A.....		87
INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SIMULADOR LTE-SIM.....		87
A.1	INSTALACION DE LTE-Sim .....	87
A.2	CONFIGURACIÓN GLOBAL DE LTE-Sim.....	90
A.3	PARAMETRIZACION Y SIMULACION DE ESCENARIOS .....	91
A.4	CONFIGURACION DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACION A TRAVES DE LOS ARCHIVOS DE LTE-Sim .....	93
A.4.1	Posición de los macro usuarios.....	93
A.4.2	Potencia de transmisión de los HeNB .....	94
A.4.3	Potencia de transmisión del eNB .....	94
A.4.4	Posición de los edificios .....	95
A.4.5	Handover .....	96
A.4.6	Movilidad de usuario .....	97
A.4.7	Zonas de distribución de los femtousuarios.....	98
APENDICE B.....		99
ESCENARIOS DE SIMULACION .....		99



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1 Red heterogénea considerando pequeñas celdas y <i>relays</i> [1].	7
Figura 2-2 Incremento de Tráfico en interiores [15].	8
Figura 2-3 Frecuencia de problemas con telefonía celular en interiores [40].	9
Figura 2-4 Interferencia <i>Co-Layer</i> en el enlace de bajada [18].	11
Figura 2-5 Interferencia <i>Cross-Layer</i> en el enlace de bajada [18].	12
Figura 2-6 Variante 1 de arquitectura una red heterogénea basada en LTE [20].	13
Figura 2-7 Variante 2 de arquitectura una red heterogénea basada en LTE [20].	14
Figura 2-8 Variante 3 de arquitectura una red heterogénea basada en LTE [20].	14
Figura 2-9 Estructura celular jerárquica [18].	16
Figura 2-10 Escenarios de handover [23].	17
Figura 2-11 Estructura de recursos tiempo-frecuencia [25].	18
Figura 2-12 Asignación de TBS a un UE en el enlace de bajada.	21
Figura 3-1 Modelo Lineal Secuencial.	23
Figura 3-2 Interferencia <i>Cross-Layer</i> para el enlace de bajada [29].	26
Figura 3-3 Interferencia <i>Co-layer</i> para el enlace de bajada [29].	27
Figura 3-4 Curvas SNR-BLER para 5 MHz [35].	31
Figura 3-5 a) Escenario única celda b) Escenario multicelda [33].	33
Figura 3-6 a) Edificio tipo Dual Stripe b) Edificios tipo Grilla 5x5 [34].	33
Figura 3-7 Movilidad de usuarios a) <i>Random Direction</i> b) <i>Random Walk</i> [34].	34
Figura 3-8 Proceso de <i>handover</i> basado en potencia.	37
Figura 3-9 Muestra de resultados del simulador LTE-Sim.	39
Figura 3-10 Implementación método Montecarlo.	40
Figura 3-11 Obtención de la SINR en rangos de valores y numero de repeticiones.	41
Figura 3-12 Obtención del <i>throughput</i> .	42
Figura 3-13 Obtención del <i>throughput</i> promedio.	42
Figura 4-1 Escenario 4.1.1 A (Efecto del número de femtoceldas).	47
Figura 4-2 Histograma de SINR (Escenario 4.1.1 A).	48
Figura 4-3 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.1 A).	48
Figura 4-4 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.1 A).	49
Figura 4-5 CCDF del <i>throughput</i> (Escenario 4.1.1 A).	49
Figura 4-6 Escenario 4.1.1 B (Efecto de la posición del macrousoario).	50
Figura 4-7 Histograma de SINR (Escenario 4.1.1 B).	51
Figura 4-8 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.1 B).	51
Figura 4-9 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.1 B).	52
Figura 4-10 CCDF del <i>throughput</i> (Escenario 4.1.1 B).	52
Figura 4-11 Posibles posiciones del femtousuario en el interior del apartamento.	53



Figura 4-12 Escenario 4.1.2.1 A (Efecto de la posición del edificio y potencia de transmisión de HeNB).	53
Figura 4-13 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.1 A).	54
Figura 4-14 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.1 A).	55
Figura 4-15 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.2.1 A).	55
Figura 4-16 CCDF del <i>Throughput</i> (Escenario 4.1.2.1 A).	56
Figura 4-17 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.1 B).	57
Figura 4-18 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.1 B).	57
Figura 4-19 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.2.1 B).	58
Figura 4-20 CCDF del <i>Throughput</i> (Escenario 4.1.2.1 B).	58
Figura 4-21 Posibles posiciones del Femtousuario en el exterior del apartamento.	59
Figura 4-22 Escenario 4.1.2.2 (Efecto de la posición del edificio, potencia y Handover de los femtousuarios en el exterior del edificio)	59
Figura 4-23 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.2 A).	60
Figura 4-24 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.2 A).	61
Figura 4-25 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.2.2 A).	61
Figura 4-26 CCDF del <i>throughput</i> (Escenario 4.1.2.2 A).	62
Figura 4-27 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.2 B).	63
Figura 4-28 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.2 B).	63
Figura 4-29 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.2.2 B).	64
Figura 4-30 CCDF del <i>throughput</i> (Escenario 4.1.2.2 B).	64
Figura 4-31 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.3).	65
Figura 4-32 CCDF del <i>Throughput</i> (Escenario 4.1.2.3).	65
Figura 4-33 Escenario 4.1.3 (Prueba de Movilidad de Macrouuario).	66
Figura 4-34 SINR vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 A).	67
Figura 4-35 <i>Throughput</i> vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 A).	68
Figura 4-36 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.3 A).	68
Figura 4-37 SINR vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 B).	69
Figura 4-38 <i>Throughput</i> vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 B).	70
Figura 4-39 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.1.3 B).	70
Figura 4-40 Escenario 4.2.1 (Efecto del número de femtoceldas).	71
Figura 4-41 Histograma de SINR (Escenario 4.2.1).	72
Figura 4-42 Probabilidad de degradación (Escenario 4.2.1).	73
Figura 4-43 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.2.1).	73
Figura 4-44 CCDF del <i>Throughput</i> (Escenario 4.2.1).	74
Figura 4-45 Escenario 4.2.2 (Efecto de la potencia de transmisión de HeNB).	74
Figura 4-46 Histograma de SINR (Escenario 4.2.2).	75
Figura 4-47 Probabilidad de degradación (Escenario 4.2.2).	75
Figura 4-48 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.2.2).	76
Figura 4-49 CCDF del <i>throughput</i> (Escenario 4.2.2).	76
Figura 4-50. Escenario 4.2.3 (Prueba de movilidad de femtousuario).	77
Figura 4-51 SINR vs Distancia (Escenario 4.2.3 A).	78
Figura 4-52 <i>Throughput</i> vs Distancia (Escenario 4.2.3 A).	78
Figura 4-53 <i>Throughput</i> promedio (Escenario 4.2.3 A).	79



Figura 4-54 SINR vs Distancia (Escenario 4.2.3 B).....	79
Figura 4-55 <i>Throughput</i> vs Distancia (Escenario 4.2.3 B). ....	80
Figura 4-56 <i>Throughput promedio</i> (Escenario 4.2.3 B). ....	81
Figura A-1 Pagina Web de descarga del simulador LTE-Sim.....	87
Figura A-2 Archivo .zip descargado de LTE-Sim.....	88
Figura A-3 Extracción de paquetes del simulador. ....	88
Figura A-4 Permisos de ejecución. ....	89
Figura A-5 Directorio raíz de instalación del simulador LTE-Sim.....	89
Figura A-6 Ventana principal del simulador LTE-Sim. ....	90
Figura A-7 Líneas de configuración de modelo de canal del archivo "global_config". ....	90
Figura A-8 Módulos de depuración de resultados. ....	91
Figura A-9 Configuración de posición de macrousuarios. ....	93
Figura A-10 Configuración de potencia de transmisión de HeNB.....	94
Figura A-11 Configuración de potencia de transmisión de eNB. ....	95
Figura A-12 Configuración de la posición de edificios. ....	95
Figura A-13 Configuración de handover de macrousuarios.....	96
Figura A-14 Configuración de handover de femtousuarios.....	97
Figura A-15 Configuración de movilidad de usuarios. ....	97
Figura A-16 Configuración zonas de distribución de los femtousuarios.....	98



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1 Características principales de las pequeñas celdas. ....	7
Tabla 2-2 Interferencia Co-canal en redes heterogéneas. ....	11
Tabla 2-3 Número de PRBs en función del ancho de banda. ....	19
Tabla 2-4 Índice de Modulación y TBS para el PDSCH [26]. ....	20
Tabla 2-5 Índice CQI [26]. ....	21
Tabla 3-1 Tipos de interferencia Co-canal en el enlace de bajada. ....	27
Tabla 3-2 a) Rango de valores de SINR seleccionado. b) Valores TBS y su correspondiente <i>throughput</i> . ....	30
Tabla 3-3 Índice CQI y requerimientos de SINR de referencia [36]. ....	31
Tabla 3-4 Modelo de pérdidas por trayecto [33] [34]. ....	35
Tabla 3-5 Escenarios de simulación. ....	44
Tabla 3-6 Parámetros generales del sistema. ....	45
Tabla 4-1 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.1 A). ....	47
Tabla 4-2 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.1 B). ....	50
Tabla 4-3 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.1 A). ....	53
Tabla 4-4 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.1 B). ....	56
Tabla 4-5 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.2 A). ....	59
Tabla 4-6 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.2 B). ....	62
Tabla 4-7 Resultados estadísticos (Escenario 4.2.1). ....	72
Tabla 4-8 Resultados estadísticos (Escenario 4.2.2). ....	74
Tabla B-1 Escenarios de simulación con parámetros técnicos. ....	101





## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>16QAM</b>	Modulación en Amplitud y Cuadratura de 16 niveles, <i>16 Quadrature Amplitude Modulation</i> .
<b>3GPP</b>	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación, <i>3rd Generation Partnership Project</i> .
<b>4G</b>	Cuarta Generación, <i>Fourth Generation</i> .
<b>64QAM</b>	Modulación en Amplitud y Cuadratura de 64 niveles, <i>64 Quadrature Amplitude Modulation</i> .
<b>ADSL</b>	Línea de Suscriptor Digital, <i>Digital Subscriber Line</i> .
<b>AMC</b>	Modulación y Codificación Adaptativa, <i>Adaptive Modulation and Coding</i> .
<b>BER</b>	Tasa de Error de Bit, <i>Bit Error Rate</i> .
<b>BLER</b>	Tasa de Error de Bloque, <i>Block Error Rate</i> .
<b>BS</b>	Estación Base, <i>Base Station</i> .
<b>BW</b>	Ancho de Banda, <i>Band-Width</i> .
<b>CA</b>	Agregación de Portadoras, <i>Carrier Agregagation</i> .
<b>CAPEX</b>	Costo de Inversión, <i>Capital Expenditures</i> .
<b>CCI</b>	Interferencia Co-canal, <i>Co-channel Interference</i> .
<b>CCDF</b>	Función de Distribución Acumulativa Complementaria, <i>Complementary Cumulative Distribution Function</i> .
<b>CDF</b>	Función de Distribución Acumulativa, <i>Cumulative Distribution Function</i> .
<b>CDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Código, <i>Code Division Multiple Access</i> .
<b>CP</b>	Prefijo Cíclico, <i>Cyclic Prefix</i> .
<b>CPE</b>	Equipo Local de Usuario, <i>Customer Premises Equipment</i> .



<b>CQI</b>	Indicador de la Calidad del Canal, <i>Channel Quality Indicator</i> .
<b>CSG</b>	Grupo Cerrado de Suscriptores, <i>Closed Subscriber Group</i> .
<b>DC</b>	Corriente Continua, <i>Direct Current</i> .
<b>DL</b>	Enlace de Bajada, <i>Down-Link</i> .
<b>DS-PC</b>	Autocontrol dinámico de potencia, <i>Dynamic Self-Power Control</i> .
<b>eNB</b>	Nodo B evolucionado, <i>Evolved Node B</i> .
<b>EPC</b>	Núcleo de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet Core</i> .
<b>EPS</b>	Sistema de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet System</i> .
<b>E-UTRAN</b>	Red de Acceso Radio UMTS Evolucionada, <i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> .
<b>FAPs</b>	Puntos de Acceso de Femtoceldas, <i>Femtocells Access points</i> .
<b>FDD</b>	Duplexación por División de Frecuencia, <i>Frequency Division Duplexing</i> .
<b>FDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Frecuencia, <i>Frequency Division Multiple Access</i> .
<b>FFR</b>	Reutilización de Frecuencia Fraccional, <i>Fractional Frequency Reuse</i> .
<b>FUE</b>	Equipo femtousuario, <i>Femtouser equipment</i> .
<b>GRIAL</b>	Grupo de Radio e InALámbricas.
<b>GSM</b>	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, <i>Global System for Mobile Communications</i> .
<b>HCS</b>	Estructura Celular Jerárquica, <i>Hierarchical Cell Structure</i> .
<b>HeNB</b>	Nodo B evolucionado para el Hogar, <i>Home Evolved Node B</i> .
<b>HeNB-GW</b>	Pasarela de Nodo B evolucionado para el Hogar, <i>Home eNodeB Gateway</i> .
<b>HetNet</b>	Redes Heterogéneas, <i>Heterogeneous Networks</i> .
<b>HNS</b>	Subsistema HeNB, <i>Home NodeB Subsystem</i> .
<b>HO</b>	Procedimientos de Traspaso, <i>Handover</i> .



<b>HSPA</b>	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad, <i>High Speed Packet Access</i> .
<b>ICI</b>	Interferencia Interportadora, <i>Intercarrier Interference</i> .
<b>ICIC</b>	Esquema de Coordinación de Interferencia Intercelda, <i>Intercell Interference Coordination Scheme</i> .
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .
<b>IP</b>	Protocolo de Internet, <i>Internet Protocol</i> .
<b>ISI</b>	Interferencia Intersimbólica, <i>Intersymbol Interference</i> .
<b>LTE</b>	Evolución de Largo Término, <i>Long Term Evolution</i> .
<b>LTE- ADVANCED</b>	Evolución de Largo Término - Avanzado, <i>Long Term Evolution-Advanced</i> .
<b>MCS</b>	Esquema de Modulación y Codificación, <i>Modulation and Coding Scheme</i> .
<b>MIMO</b>	Múltiples Entradas y Múltiples Salidas, <i>Multiple Input and Multiple Output</i> .
<b>MME</b>	Entidad de Administración de Movilidad, <i>Mobility Management Entity</i> .
<b>MUE</b>	Equipo macrousoario, <i>Macrouser equipment</i> .
<b>OAM</b>	Operación, Administración y Mantenimiento, <i>Operations, Administration and Management</i> .
<b>OFDM</b>	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal, <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> .
<b>OFDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales, <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> .
<b>OPEX</b>	Costos de Operación y Mantenimiento, <i>Operating Expenditures</i> .
<b>PedA</b>	Canal Peatonal A, <i>Pedestrian A Channel</i> .
<b>PedB</b>	Canal Peatonal B, <i>Pedestrian B Channel</i> .
<b>PDF</b>	Función de Densidad de Probabilidad, <i>Probability Density Function</i> .



<b>PDSCH</b>	Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada, <i>Physical Downlink Shared Channel</i> .
<b>PLMN</b>	Redes Terrestres Públicas Móviles, <i>Public Land Mobil Network</i> .
<b>PLR</b>	Tasa de Pérdida de Paquetes, <i>Packet Loss Ratio</i> .
<b>POO</b>	Programación Orientada a Objetos.
<b>PRB</b>	Bloque de Recurso Físico, <i>Physical Resource Block</i> .
<b>QoS</b>	Calidad de Servicio, <i>Quality of Service</i> .
<b>QPSK</b>	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura, <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> .
<b>RAM</b>	Memoria de Acceso Aleatorio, <i>Random Acces Memory</i> .
<b>RE</b>	Elemento de Recurso, <i>Resouce Element</i> .
<b>RRM</b>	Gestión de Recursos Radio, <i>Radio Resource Management</i> .
<b>S-GW</b>	Pasarela de servicios, <i>Serving Gateway</i> .
<b>SINR</b>	Relación Señal a Ruido más Interferencia, <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> .
<b>SIR</b>	Relación Señal a Interferencia, <i>Signal to Interference Ratio</i> .
<b>SON</b>	Redes Auto Organizadas, <i>Self - Organizing Networks</i> .
<b>TBS</b>	Tamaños del Bloque de Transporte, <i>Transport Block Size</i> .
<b>TDD</b>	Duplexación por División de Tiempo, <i>Time Division Duplexing</i> .
<b>TDMA</b>	Acceso Multiple por División de Tiempo, <i>Time Division Multiplexing Access</i> .
<b>TTI</b>	Intervalo de Tiempo de Transmisión, <i>Transmission Time Interval</i> .
<b>UE</b>	Equipo de Usuario, <i>User Equipment</i> .
<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones, <i>International Telecommunication Union</i> .
<b>UIT-T</b>	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de ITU, <i>ITU Telecommunication Standardization Sector</i> .
<b>UL</b>	Enlace de Subida, <i>Up-Link</i> .



<b>UMTS</b>	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles, <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> .
<b>VehA</b>	Canal Vehicular A, <i>Vehicular A Channel</i> .
<b>VehB</b>	Canal Vehicular B, <i>Vehicular B Channel</i> .
<b>WiFi</b>	Fidelidad Inalámbrica, <i>Wireless Fidelity</i> .



# CAPITULO 1

## MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La tecnología Evolución a Largo Termino (LTE, *Long Term Evolution*), se proyecta como una de las tecnologías de redes inalámbricas que pretende suplir las necesidades actuales de demanda de datos e información, garantizando altas velocidades de transmisión de datos, menores tiempos de retardo y alta eficiencia espectral, orientada a brindar las mejores condiciones de calidad, capacidad<sup>1</sup> y cobertura en relación a sus predecesores.

Inicialmente esta tecnología se proyecta para trabajar bajo un sistema celular homogéneo, es decir, una red de estaciones base con una disposición planeada y un conjunto de terminales de usuario, en la cual todas las estaciones base tienen similares características de operación, potencia de transmisión, tipos de antena y forma de conexión al núcleo de la red, de tal manera que la asignación de recursos y prestación de servicios se realiza de forma uniforme a todos los usuarios. Además los lugares de emplazamiento y características de funcionamiento de las estaciones base son cuidadosamente establecidas por los operadores para asegurar el máximo de capacidad y cobertura de la red y mantener la experiencia de usuario en un desempeño óptimo [1].

Sin embargo, el crecimiento de la demanda de información por parte de los usuarios pone a los operadores en la constante tarea de actualizar la red para garantizar una mejor calidad en la prestación de los servicios ofrecidos, siendo esta cada vez más costosa y compleja. De esta manera, se propone la implementación de esquemas de Múltiples entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple-input Multiple-output*), Agregación de portadoras (CA, *Carrier Agreggregation*) y Redes Heterogéneas<sup>2</sup> (HetNet, *Heterogeneous Networks*) como tecnologías que aportan a LTE la posibilidad de afrontar la demanda creciente por parte de los usuarios y los cambios previstos para el sector de las redes de telecomunicaciones inalámbricas [2].

---

<sup>1</sup> Capacidad: debe entenderse como la velocidad de transmisión de datos total (*throughput*) que puede ser obtenida por celda o la velocidad de transmisión de datos que puede ser lograda por un usuario dentro una celda en el sistema y que es entregada sin errores en el destino.

<sup>2</sup> Red heterogénea: hace referencia al uso de múltiples tipos de nodos de acceso en una red inalámbrica. Una red de área amplia puede utilizar macroceldas, microceldas, picoceldas y femtoceldas para ofrecer cobertura inalámbrica en un ambiente con amplias y diferentes zonas de cobertura inalámbrica, las cuales van desde escenarios abiertos en exteriores, a edificios de oficinas, casas y lugares subterráneos. HetNet es una red con una interrelación compleja entre macroceldas y pequeñas celdas y en algunos casos hasta elementos de redes WiFi, utilizados para proveer un mosaico de cobertura y brindar la posibilidad de traspaso entre los diferentes elementos de red [14].



Las redes heterogéneas, donde la macrocelda convencional interactúa con múltiples nodos de acceso de diferentes rangos de cobertura, prevén un incremento significativo en el desempeño de la red en términos de capacidad y cobertura. No obstante, la Interferencia Co-canal<sup>3</sup> (CCI, *Co-channel Interference*) generada entre los distintos nodos puede limitar dicho desempeño, lo cual pone de manifiesto la importancia de analizar escenarios donde se determine el impacto de dicho fenómeno sobre la red y generar posibles soluciones que mitiguen el efecto de la misma.

Este trabajo de grado analiza el impacto de la interferencia Co-canal en una red heterogénea basada en LTE para el enlace de bajada haciendo uso del software de simulación LTE-Sim<sup>4</sup>, bajo unos escenarios definidos, donde se efectúa la interacción entre una macrocelda, femtoceldas y sus correspondientes usuarios, haciendo énfasis en el estudio de la capacidad y cobertura de la red en términos de *throughput* por usuarios, *throughput* promedio y probabilidad de degradación del servicio.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente oferta de dispositivos habilitados con interfaces radio para hacer parte de sistemas de comunicaciones móviles tales como teléfonos inteligentes, tabletas, computadores portátiles, acompañados de la innumerable cantidad de servicios y aplicaciones, mantienen en constante crecimiento la demanda de servicios de datos, imponiendo a los operadores de comunicaciones móviles la necesidad de mantenerse en una constante evolución, en una planeación y optimización continua, y en la definición de nuevas estrategias para obtener mayores velocidades de transmisión de datos, menor latencia<sup>5</sup>, mayor cobertura y mejor Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*). La tecnología LTE con todas sus características y funcionalidades busca alcanzar dichas características enmarcada en un esquema donde las redes de comunicaciones móviles se han convertido en una necesidad básica y determinante en el desarrollo de la sociedad.

En este contexto, el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*), ha propuesto dentro de las especificaciones de Evolución a Largo Término-Avanzado (LTE Advance, *Long Term Evolution Advanced*) la posibilidad de implementación de Redes Heterogéneas, mediante las cuales se proponen mejoras significativas en términos de capacidad, cobertura y calidad de servicio en interiores y lugares de difícil acceso [3] [4].

Una red heterogénea plantea la convivencia de celdas de distinto tamaño bajo una arquitectura centralizada donde el Nodo B Evolucionado (eNB, *Evolved Node B*) administra una celda principal de tamaño considerable (macrocelda), en la cual están contenidas las

---

<sup>3</sup> Interferencia Co-canal: interferencia entre comunicaciones que usan la misma frecuencia de operación.

<sup>4</sup> LTE-Sim: software de código abierto para simular redes LTE, desarrollado por G. Piro y F. Capozzi del Politécnico di Bari. Este abarca varios aspectos de las redes LTE, incluyendo la Red de Acceso Radio UMTS Evolucionada (E-UTRAN, Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) y la Red de Transporte o Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, Evolved Packet Core). Este soporta escenarios de una sola macrocelda, múltiples femtoceldas, gestor de QoS, escenario multiusuario, movilidad de usuario, procedimientos de traspaso (HO, Handover) y técnicas de reuso de frecuencias [33].

<sup>5</sup> Latencia: periodo de inactividad y retraso producido durante el procesamiento, transmisión y recepción de paquetes de datos.



celdas de menor tamaño (femtoceldas) gestionadas por los Nodos B Evolucionados para el Hogar (HeNB, *Home Evolved Node B*), donde el objetivo principal es proveer cobertura privada en escenarios de interiores y de esta forma aumentar significativamente la capacidad total de la red y mejorar la experiencia del usuario en su interacción con la misma [4].

Las funciones de instalación y administración del HeNB son exclusivas del usuario y el operador no tiene ningún control sobre estas, es decir, los HeNB pueden ser distribuidos de una manera aleatoria, además los recursos usados por los Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*) de la macrocelda también son los mismos usados por los UE pertenecientes a las femtoceldas, aquí es donde el fenómeno de la Interferencia Co-canal toma importancia debido a que esta afectará de manera dinámica la capacidad, cobertura y calidad de servicio del sistema. Por lo tanto el estudio de los efectos de la interferencia sobre la red y el análisis de métodos para la mitigación de la misma son factores importantes para el correcto desarrollo y posterior implementación de las redes heterogéneas [5].

Para el presente trabajo de grado se hizo uso de la herramienta de simulación LTE-Sim cuyas funcionalidades permiten crear diferentes escenarios con diferentes características de red, y a partir de estas obtener resultados que permitan analizar los efectos de la interferencia sobre la capacidad y cobertura de una red heterogénea.

Por consiguiente se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se ve afectada la capacidad y cobertura de una red heterogénea basada en LTE en función de la Interferencia Co-canal para el enlace de bajada?

La reciente adjudicación de bandas de espectro para el despliegue e implementación de redes de banda ancha móvil en Colombia, encamina actualmente a los operadores de telecomunicaciones en la tarea de encontrar una mejor forma de administrar los recursos asignados y brindar a los usuarios una mayor calidad en la prestación de servicios, con el ánimo de alcanzar una posición ventajosa en el mercado colombiano de los servicios de comunicaciones móviles. La tecnología LTE y las redes heterogéneas son relativamente recientes dentro del contexto tecnológico colombiano, lo cual evidencia la importancia del tema dentro de los ámbitos académico e investigativo. Bajo este argumento, el presente trabajo de grado analiza el impacto de la interferencia sobre la capacidad y cobertura de las redes heterogéneas, contribuyendo a los temas de interés de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, grupos de investigación y materias afines, así mismo dejando una ventana abierta a futuras investigaciones o propuestas relacionadas referentes al tema [6].





### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo General

- Analizar a nivel de sistema una red heterogénea basada en la tecnología Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*).

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la capacidad de una red heterogénea basada en LTE en función de la interferencia para unas características de escenario y red definidas.
- Evaluar la cobertura de una red heterogénea basada en LTE en función de la interferencia para unas características de escenario y red definidas.

### 1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

**Capítulo 2:** en este capítulo se abordan las generalidades de las redes heterogéneas, factores que las impulsan, características de conexión y métodos de acceso, arquitectura de red, asignación de recursos y características generales de la tecnología LTE pertinentes a la adaptación de las redes heterogéneas a esta.

**Capítulo 3:** en esta sección se aborda la metodología de desarrollo empleada para la realización del trabajo de grado, se describen las fases para la definición del sistema, elección del simulador, utilización y validación de los resultados con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados.

**Capítulo 4:** en este capítulo se presenta en forma detallada el análisis de resultados obtenidos bajo los escenarios simulados.

**Capítulo 5:** contiene las conclusiones relacionadas con el análisis a nivel de sistema de una red heterogénea basada en LTE y las propuestas para futuros trabajos de investigación.

#### APENDICES:

**Apéndice A:** se realiza una descripción general de la forma de uso y configuración de parámetros en el simulador LTE-Sim.

**Apéndice B:** tabla con información técnica de los escenarios de simulación implementados.



# CAPITULO 2

## CONCEPTOS GENERALES

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de red inalámbricas han evolucionado para proveer mayores velocidades de transmisión de datos y mayor rango de cobertura, en un contexto donde el consumo masivo de contenido multimedia a través de dispositivos móviles con interfaz inalámbrica (en particular *smartphones*) se mantiene en constante crecimiento. La tecnología evolución a largo termino LTE, para la cual se proyecta un incremento anual del 237% de suscripciones, acompañada de importantes características como MIMO, Agregación de Portadoras y la implementación de Redes Heterogéneas, jugarán un importante papel en el cumplimiento de los retos actuales de demanda de servicios de datos inalámbricos [7] [8].

Los operadores de telecomunicaciones son conscientes de este hecho, razón por la cual algunos de ellos están realizando despliegues de redes heterogéneas y ofreciendo ciertos tipos de servicios, llevando a cabo diferentes investigaciones enfocadas en encontrar un punto de estandarización de las redes heterogéneas entre los distintos proveedores y en determinar los ambientes idóneos donde estas provean al usuario final las mejores condiciones en términos de capacidad, calidad y cobertura, por lo que el 98% de los operadores están de acuerdo en que las redes heterogéneas son esenciales para el futuro de las redes inalámbricas [9] [10].

### 2.2 PEQUEÑAS CELDAS (*SMALL CELLS*)

Término que agrupa nodos de acceso inalámbrico cuyas características principales son bajas potencias de transmisión, rangos de cobertura a partir de diez metros hasta 1 o 2 kilómetros y la capacidad de operar en espectro licenciado y no licenciado. Dentro de este concepto se encuentran las metroceldas, microceldas, picoceldas, femtoceldas y redes de acceso Wi-Fi [10].

#### 2.2.1 Metroceldas

Un reciente integrante dentro del grupo de las pequeñas celdas, diseñadas para proveer alta capacidad y cobertura en áreas metropolitanas y escenarios de exteriores, las cuales pueden ser instaladas en postes de alumbrado público, en interiores de estadios, líneas de transporte, con bajas potencias de transmisión que abarcan rangos de cobertura de hasta 100 metros [11] [10].

#### 2.2.2 Microceldas

Con un rango de cobertura entre 100m y 200 m y potencias de transmisión de 5 W (37 dBm), este tipo de estaciones base son usadas para proveer cobertura inalámbrica en escenarios exteriores de ambientes urbanos, las cuales son desplegadas por los



operadores en espectro licenciado para ayudar a las macroceldas principales a gestionar el tráfico en una zona de alta congestión [10] [12].

### 2.2.3 Picoceldas

Pensadas para proveer cobertura en escenarios de interiores públicos, tales como centros comerciales o estadios deportivos, donde la cobertura de la macrocelda es insuficiente o inexistente; pueden operar con potencias de transmisión de 250 mW hasta de 1 W (24 dBm hasta 30 dBm), abarcando rangos de cobertura entre 20m y 100 m. Se puede apreciar que presentan características similares a las metroceldas, sin embargo, la principal diferencia radica en que estas últimas son diseñadas para escenarios exteriores [10] [12].

### 2.2.4 Femtoceldas

Estos nodos de acceso inalámbrico, también conocidos como Puntos de Acceso de Femtoceldas (FAPs, *Femtocells Access points*), se caracterizan por presentar las más bajas potencias de transmisión y por consiguiente los menores rangos de cobertura entre el grupo de las pequeñas celdas, alrededor de 200 mW (23 dBm) como máximo y 10 m de cobertura respectivamente, características pensadas para brindar cobertura y conectividad inalámbrica en entornos de interiores, principalmente ambientes residenciales y oficinas empresariales [13].

Un FAP puede brindar conectividad a un número máximo de 10 usuarios, realizar la conexión al *backhaul*<sup>6</sup> de la red mediante la conexión a internet del propietario, usar espectro licenciado del operador y ser desplegado y administrado por los usuarios; estas dos últimas ideas hacen de las FAP un gran reto para los operadores, debido a las consecuencias de interferencia y administración de las mismas. Las femtoceldas pueden ofrecer las siguientes características:

- Las FAPs deben tener capacidades de instalación *Plug and Play*, autoconfiguración a la red inalámbrica y fácil administración por parte del usuario sin ninguna intervención del operador.
- Características de fácil movilidad a conveniencia del usuario.
- Conexión a la red de transporte (*Backhaul*) haciendo uso de tecnologías como Línea de Subscriptor Digital (ADSL, *Digital Subscriber Line*), fibra óptica o conexiones a banda ancha por cable.
- El usuario puede determinar que dispositivos pueden acceder al FAP.
- Posibilidad de que el dispositivo pueda pertenecer al usuario o que el operador estipule cláusulas para el préstamo del dispositivo [13].

La Tabla 2-1 [12] [11] resume algunas de las características principales de las pequeñas celdas.

---

<sup>6</sup> Backhaul: Parte de la red que actúa como enlace intermedio entre el Núcleo de la red (*Core Network*) y las subredes en sus bordes.

Tabla 2-1 Características principales de las pequeñas celdas.

	<b>Femtocelda</b>	<b>Picocelda</b>	<b>Metrocelda</b>	<b>Microcelda</b>	<b>Macrocelda</b>
<b>Ubicación</b>	Interiores	Interiores	Exteriores	Exteriores	Exteriores
<b>Número de Usuarios</b>	5	64-128	16-32	128-256	-
<b>Potencia de transmisión</b>	20 dBm	24-30 dBm	30-37 dBm	37 dBm	43 dBm
<b>Radio Celda</b>	10 m	20-100 m	100 m	100-200 m	1.5 Km
<b>Backhaul</b>	DSL, Cable, Fibra óptica	Microondas, cable, fibra óptica.	Fibra óptica, microondas	Fibra óptica microondas	Fibra óptica microondas

### 2.3 REDES HETEROGÉNEAS

El concepto de redes heterogéneas implica la convivencia de múltiples nodos de acceso en una red inalámbrica, es decir, una red de área amplia que pueda utilizar macroceldas, microceldas, picoceldas y femtoceldas para proveer cobertura y capacidad en un ambiente con diferentes zonas de cobertura inalámbrica, las cuales van desde escenarios abiertos en exteriores, a edificios de oficinas, casas y lugares subterráneos. El concepto de red heterogénea considera una interrelación compleja entre macroceldas, pequeñas celdas y redes Wi-Fi, teniendo en cuenta aspectos de traspaso y asignación de recursos entre los diferentes elementos de red de una forma que se garantice un incremento en la capacidad y rango de cobertura de la red [14]. Adicionalmente, se considera un ambiente jerárquico, en donde la macrocelda principal actúa como ente administrador de la red, en la cual están contenidas distintos tipos de pequeñas celdas, como se muestra en la Figura 2-1, donde la gestión de recursos radio y todos los elementos que intervienen en el funcionamiento de la red deben efectuarse sin ningún problema, garantizando la convivencia y complementariedad de las pequeñas celdas a la celda principal.

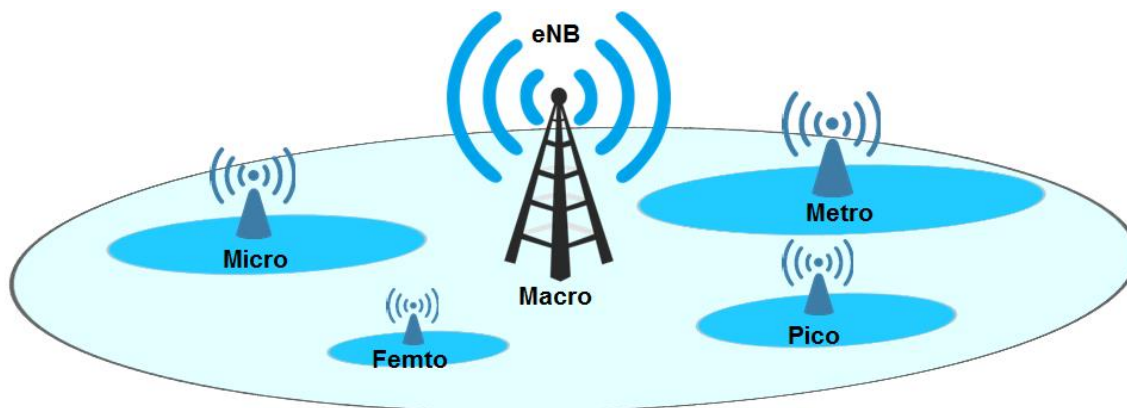


Figura 2-1 Red heterogénea considerando pequeñas celdas y relays [1].

Cabe destacar que el anterior es el término más extendido de una red heterogénea, sin embargo, estas también implican la convivencia de diferentes tecnologías y tipos de acceso, por ejemplo una red donde coexistan las tecnologías de Sistema Global para las Telecomunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile communications*), Acceso de



Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High-Speed Packet Access*) o Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code División Múltiple Access*), todas funcionando de tal forma que no haya conflicto entre una u otra.

Durante los últimos años las femtoceldas han tomado fuerza dentro de las redes heterogéneas; por un lado son las que prometen mayores beneficios tanto para el usuario como el operador, además representan los mayores retos en su implementación según las características mencionadas y la interferencia Co-canal, se espera de estas que sean las más numerosas entre las pequeñas celdas y en las cuales se concentre la mayor atención por parte de los operadores y proveedores [15].

En este trabajo de grado se estudió el impacto de la interferencia en una red heterogénea realizando un enfoque en la relación entre la macrocelda y las femtoceldas.

### 2.3.1 Factores que Impulsan a las Redes Heterogéneas

#### A. Cobertura

Un usuario promedio pasa la mayor parte de su tiempo en lugares interiores (*Indoors*), principalmente su hogar o entornos laborales. La Figura 2-2 muestra como el 80% del tráfico total de datos se concentra en este tipo de escenarios.

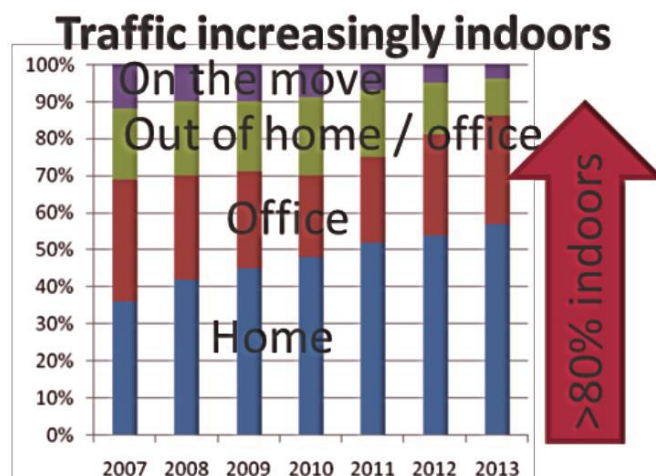


Figura 2-2 Incremento de Tráfico en interiores [15].

Por otro lado, la Figura 2-3, representa la frecuencia con que los usuarios perciben problemas relacionados con conexiones lentas de internet y pérdida de llamadas en sus teléfonos celulares, principalmente cuando éstos se encuentran en algún lugar interior, como su hogar u oficina, lo que sugiere que las características de ubicación, materiales de construcción y forma de edificios pueden afectar significativamente la potencia de recepción percibida por el UE y por ende en la calidad del servicio solicitado.

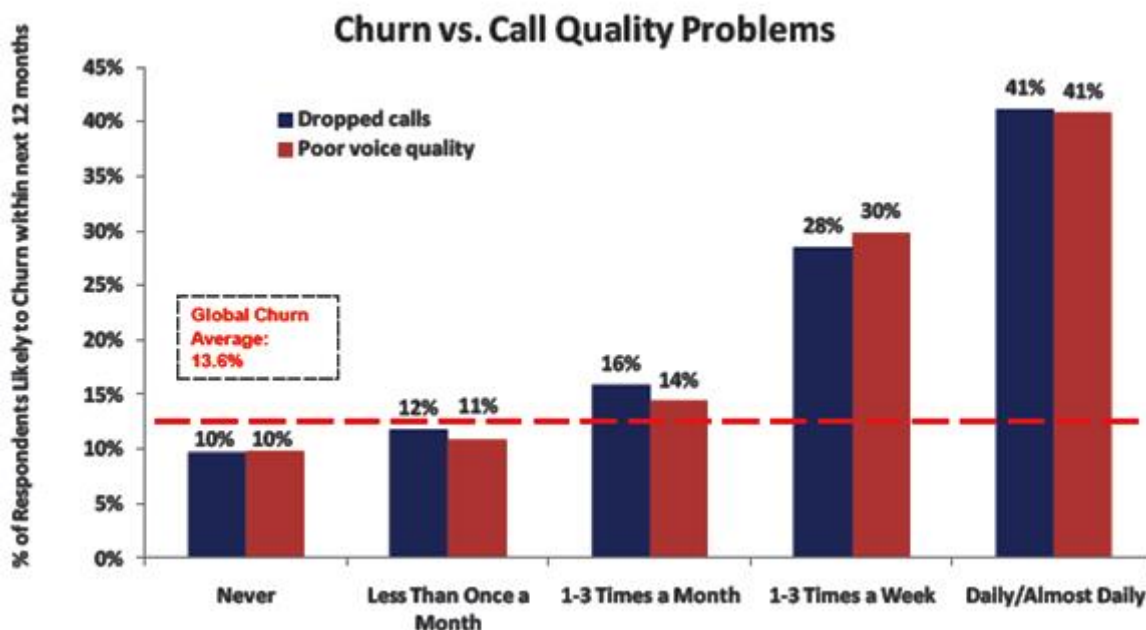


Figura 2-3 Frecuencia de problemas con telefonía celular en interiores [39].

Para un operador de telecomunicaciones es de gran importancia la posición que se tiene sobre el mercado de suscriptores, y teniendo en cuenta que uno de los factores principales que influye en la preferencia de un usuario es la cobertura del servicio, los operadores se ven en la necesidad de implementar nuevos esquemas para incrementar la cobertura en lugares de interiores y de difícil acceso, donde el cliente obtenga la prestación de un servicio óptimo y a su vez el operador gane fiabilidad y credibilidad en el mercado.

### B. Capacidad y calidad de experiencia de usuario

La velocidad con la cual cualquier servicio multimedia, ya sea un video, una imagen o una canción son transmitidos al usuario final, afecta la visión positiva o negativa que éste tiene sobre su proveedor e influye en la experiencia sobre dicho servicio, adicionalmente, el incremento de la demanda de teléfonos inteligentes, el desarrollo de ilimitadas aplicaciones para los mismos y la infinidad de contenido multimedia, han llevado a un considerable crecimiento en la demanda de servicios inalámbricos, donde el 97% del tráfico total son datos, inclusive se proyecta que para el año 2015 la demanda de datos por redes inalámbricas superará a la demanda de datos por redes cableadas [15] [16].

Aumentar la capacidad de una red implica un reto enorme para los operadores, requiriéndose la actualización de las redes existentes para proveer mejor eficiencia espectral, y la implementación de nuevas tecnologías de altas capacidades tales como 4G; sin embargo, a pesar de todas las ventajas de tecnologías como LTE, es ampliamente aceptado que para afrontar el despliegue en el mundo real y el crecimiento de la demanda de servicios de datos, se hacen necesarios el desarrollo e implementación de un mayor número de celdas, donde las pequeñas celdas presentan los mejores beneficios costo-efectivos<sup>7</sup> [10].

<sup>7</sup> Costo-efectivo: Relación entre el costo de una actividad y los beneficios o resultados esperados.



## C. Economía

Las redes heterogéneas se presentan como una alternativa costo eficiente en términos de OPEX<sup>8</sup> y CAPEX<sup>9</sup> para los operadores de telecomunicaciones; en el primero los costos de operación y mantenimiento de las pequeñas celdas son relativamente inferiores comparados a los de una macrocelda, además de la posibilidad de distribución de una manera eficiente de los recursos de la red y la disminución de la carga de tráfico de las macroceldas; y en el segundo, las posibilidades de aumento en la capacidad, cobertura y calidad representan un prometedor incremento en el número de suscriptores, implementación de nuevos servicios, planes de tarifas diferenciadas y servicios de valor agregado [17].

### 2.4 INTERFERENCIA EN REDES HETEROGÉNEAS

Las redes heterogéneas proveen una mayor eficiencia espectral, reuso de frecuencia espacial y mejor cobertura; sin embargo, la presencia de múltiples capas (*Layers*<sup>10</sup>) como macroceldas, microceldas y femtoceldas, aumenta la probabilidad de transmisiones simultáneas de dispositivos de red o usuarios que comparten la mismas bandas de frecuencia, lo que puede generar que el receptor no distinga cual es la señal del transmisor después de que ésta se combine con las demás señales no deseadas. Teniendo en cuenta la estructura de múltiples capas se pueden distinguir dos tipos de interferencia, interferencia Co-capa (*Co-layer*) e interferencia Intercapa (*Cross-layer*), a continuación se describen estos conceptos realizando un enfoque en la interferencia que se presenta para el enlace de bajada, el cual es el tópico de investigación en este trabajo de grado.

#### 2.4.1 Interferencia *Co-layer*

La interferencia *Co-layer* se presenta cuando el nodo interferente y el nodo interferido se encuentran en la misma capa de red como lo muestra la Tabla 2-2, se describe como la suma de las señales indeseadas recibidas por un HeNB<sup>11</sup> y originadas por otros HeNBs, esta interferencia se origina en ambientes con alta densidad de femtoceldas, como edificios o arreglos de apartamentos, es posible que apartamentos adyacentes (horizontal y verticalmente) tengan implementadas femtoceldas, lo que genera una alta probabilidad de interferencia [18].

---

<sup>8</sup> OPEX: Gastos permanentes de funcionamiento, operación y mantenimiento de un sistema, negocio o producto.

<sup>9</sup> CAPEX: Inversiones de capital que pueden generar futuros beneficios

<sup>10</sup> Layer o capa en redes heterogéneas identifica los diferentes tipos de celdas que pueden ser integrados como macroceldas, microceldas y femtoceldas.

<sup>11</sup> Nodo B Evolucionado para el hogar (HeNB): nodo de acceso y transmisión inalámbrica encargado de administrar una femtocelda.

Tabla 2-2 Interferencia Co-canal en redes heterogéneas para el enlace de bajada.

	Capa	Enlace	Nodo Interferente	Nodo Interferido
<b>Interferencia Cross-layer</b>	Macrocelular y femtocelular	Bajada	HeNB	Macrousuario
			eNB	Femtousuario
<b>Interferencia Co-layer</b>	Femtocelular	Bajada	HeNB(1)	Femtousuario(2)

Ya que LTE utiliza Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA<sup>12</sup>, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) la interferencia Co-layer depende de la relación de los subcanales que utilizan los femtousuarios<sup>13</sup>, es posible que dos femtousuarios compartan una posición geográfica y que solo uno de ellos sufra la interferencia generada por los HeNBs vecinos, en la Figura 2-4 se observa este caso, suponiendo 8 subcanales OFDMA, el HeNB1 asigna los subcanales del 1 al 4 al femtousuario 1 en el enlace e1, el HeNB2 asigna los canales del 1 al 4 al femtousuario 2 en el enlace e2 y los canales del 5 al 8 al femtousuario 3 en enlace e3, en este ejemplo la ubicación de los usuarios 2 y 3 es una zona de alta interferencia, sin embargo el usuario 3 no percibe ninguna señal indeseada, mientras que el usuario 2 ve afectada su comunicación.

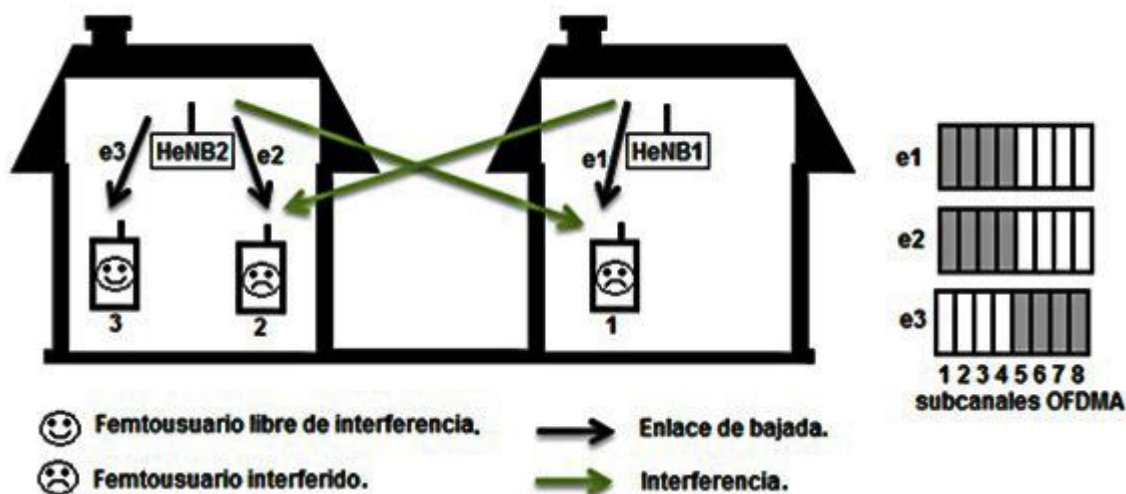


Figura 2-4 Interferencia Co-Layer en el enlace de bajada [18].

<sup>12</sup>Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA): Esquema de acceso que distribuye el espectro entre un grupo de usuarios mediante la asignación de subportadoras ortogonales.

<sup>13</sup> Femtousuario: equipo de usuario gestionado por una femtocelda.



## 2.4.2 Interferencia *Cross-Layer*

En redes heterogéneas la interferencia *Cross-layer* se presenta cuando el nodo interferente y el nodo interferido se encuentran en capas diferentes como se puede apreciar en la Tabla 2-2, el caso más representativo en una red LTE es cuando los macrouusuarios<sup>14</sup> perciben en el enlace de bajada una señal más fuerte de los HeNBs que se encuentran en su cercanía y que utilizan los mismos subcanales OFDMA que la señal que proviene del eNB de la macrocelda [18].

En la Figura 2-5 se observa un ejemplo de interferencia *Cross-layer*, el HeNB1 asigna los subcanales del 1 al 4 en el enlace e1 para garantizar el servicio al femtousuario 1, el HeNB2 asigna los subcanales del 1 al 4 en el enlace e2 para garantizar el servicio al femtousuario 2, la macrocelda asigna los canales del 5 al 8 en el enlace e3 al macrouusuario 3 y los canales del 1 al 4 en el enlace e4 al macrouusuario 4; el macrouusuario 3 se moviliza en las cercanías del HeNB1 pero no percibe ninguna señal indeseada ya que los subcanales del enlace e3 no coinciden con los del enlace e1, en cambio el macrouusuario 4 que se moviliza cerca del HeNB2 se ve afectado porque los enlaces e2 y e4 utilizan los mismos canales OFDMA.

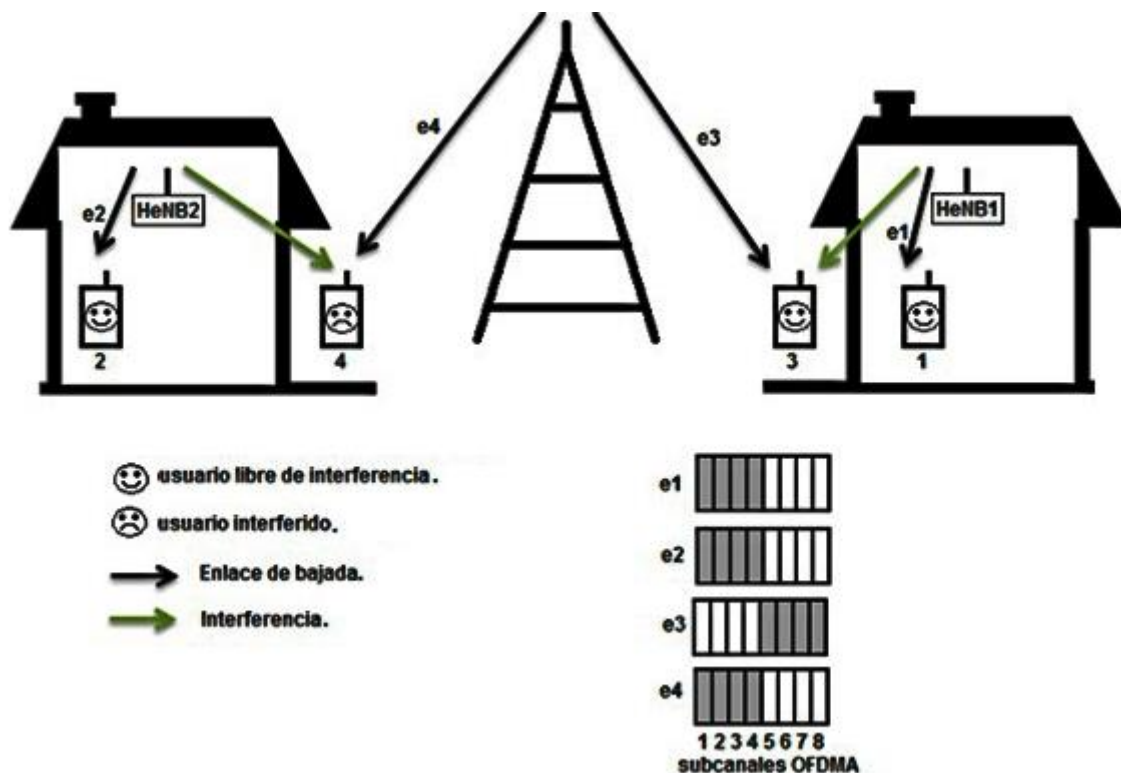


Figura 2-5 Interferencia *Cross-Layer* en el enlace de bajada [18].

<sup>14</sup> Macrouusuario: equipo de usuario gestionado por una macrocelda.



## 2.5 FEMTOCELDAS EN LTE

Las redes heterogéneas y en particular las femtoceldas, presentan nuevas características de arquitectura, movilidad y control de acceso, además deben operar bajo todas las características funcionales de LTE. A continuación se presenta en forma general algunas de estas características, en particular las que se consideran más relevantes para este trabajo de grado.

### 2.5.1 Arquitectura

La adaptación del Subsistema HeNB (HNS, *Home NodeB Subsystem*) en la arquitectura LTE, es el cambio que permite a LTE incorporar Femtoceldas en su arquitectura, el Subsistema HeNB consiste de un Nodo B evolucionado de Hogar y opcionalmente de una Pasarela de Nodo B evolucionado para el Hogar (HeNB-GW, *Home eNodeB Gateway*).

#### A. HeNB

El HeNB es un Equipo Local de Usuario (CPE, *Customer Premises Equipment*) de fácil instalación que permite la conexión de un usuario a través de la interfaz inalámbrica E-UTRAN a la red LTE de un operador usando un *backhaul* IP, incluye las funciones del eNB y soporta funciones de autenticación, administración y registro a través de las interfaces de Operación, Administración y Mantenimiento (OAM, *Operations, Administration and Management*) [19].

#### B. HeNB-GW

La HeNB-GW es una pasarela opcional a través de la cual el HeNB accede a la red de núcleo de LTE, puede estar conectada al núcleo únicamente a través de una interfaz S1-MME<sup>15</sup>, en este caso la interfaz S1-U<sup>16</sup> conecta directamente al HeNB y a la pasarela de servicios (S-GW, *Serving Gateway*) [19].

### 2.5.2 Posibles Variantes para la Arquitectura de una Red Heterogénea en LTE

Existen tres variantes de la arquitectura de una red heterogénea en LTE, que dependen de la presencia o ausencia de la HeNB-GW y de cómo se conecta el subsistema HeNB con el núcleo de la red.

La primera variante de la arquitectura se muestra en la Figura 2-6, la HeNB-GW sirve como concentrador en los planos de control y de usuario para los HeNBs que se conectan a la Entidad de Administración de Movilidad<sup>17</sup> (MME, *Mobility Management Entity*) y a la S-GW, en este caso el HeNB se conecta a la HeNB-GW a través de una interfaz S1<sup>18</sup>, esta

---

<sup>15</sup> S1-MME: canal de señalización físico entre la HeNB GW y la MME, incluye funciones de enrutamiento, control de flujo y congestión.

<sup>16</sup> S1-U: interfaz en el plano de usuario entre HeNB GW y la S-GW, provee confiabilidad en el transporte de información de servicios de usuario.

<sup>17</sup> Entidad de Administración de Movilidad (MME): responsable de iniciar la paginación y la autenticación del dispositivo de usuario, también se encarga seguimiento por zonas a cada usuario y está involucrada en el proceso de registro inicial.

<sup>18</sup> S1: interfaz que incluye las funciones del plano de usuario y de control entre el HeNB y la HeNB-GW, provee control de flujo y enrutamiento.

arquitectura permite mayor seguridad ya que el HeNB está aislado de la MME y de la S-GW<sup>19</sup>, mayor escalabilidad ya que el aumento de HeNBs no aumenta el número de enlaces entre la S-GW y la HeNB-GW [20].

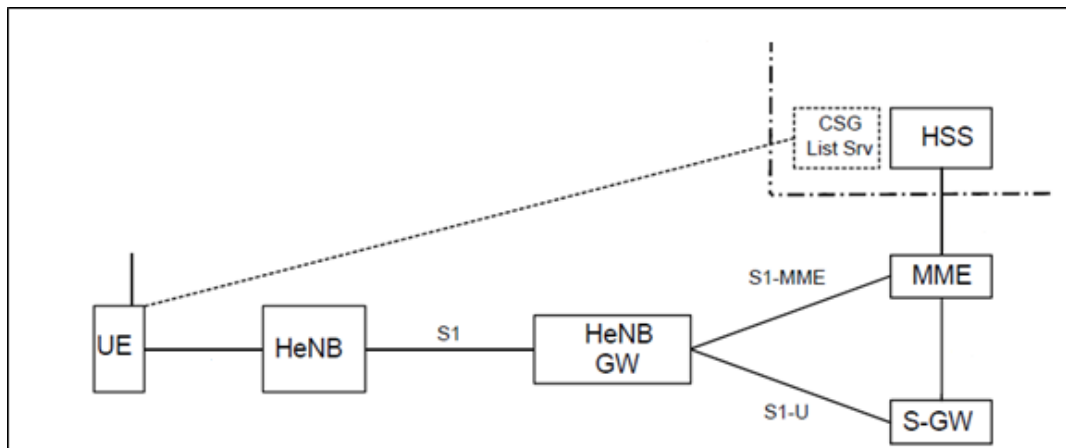


Figura 2-6 Variante 1 de arquitectura una red heterogénea basada en LTE [20].

En la segunda variante mostrada en la Figura 2-7, no está presente la HeNB-GW y el HeNB se conecta directamente a la MME a través de una interfaz S1-MME y a la S-GW a través de una interfaz S1-U, esta arquitectura es más robusta ya que tiene un elemento menos que puede fallar, presenta menores latencias y es compatible con tecnologías anteriores ya que no es necesario implementar la HeNB-GW [20].

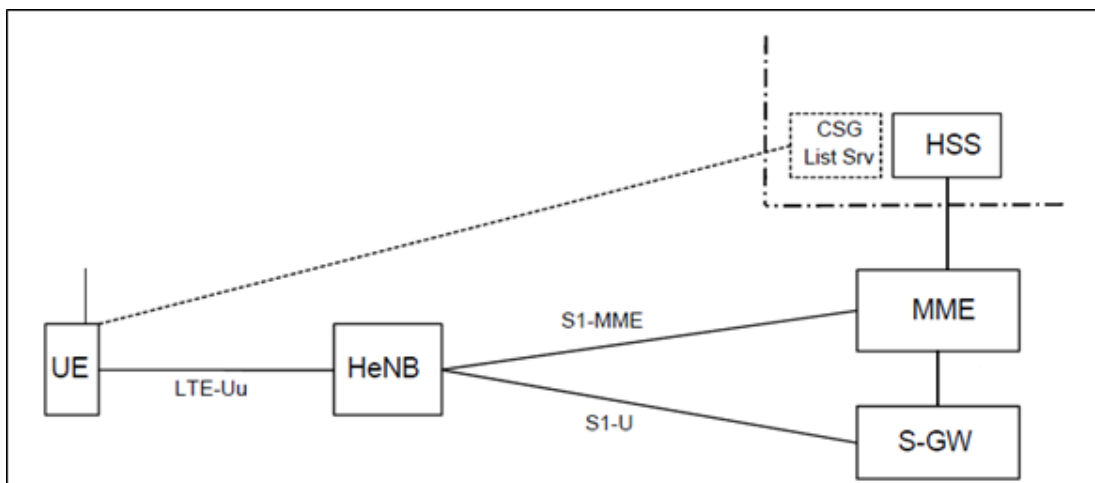


Figura 2-7 Variante 2 de arquitectura una red heterogénea basada en LTE [20].

En la tercera variante representada en la Figura 2-8, la HeNB-GW concentra el plano de control a través de interfaces S1-MME entre ella y los HeNBs, una interfaz S1-U de los HeNBs termina en la S-GW, esta arquitectura brinda escalabilidad en el campo de control ya que el número de HeNBs no afecta la asociación entre la MME y la HeNB-GW y robustez en el campo de usuario ya que tiene un elemento menos que puede fallar [20].

<sup>19</sup> S-GW: nodo de enrutamiento y reenvío de paquetes, incluye funciones de traspaso.

El subsistema HeNB se conecta mediante una interfaz S1 al EPC, más específicamente a la MME por medio de una interfaz S1-MME y a la S-GW por medio de una interfaz S1-U [20].

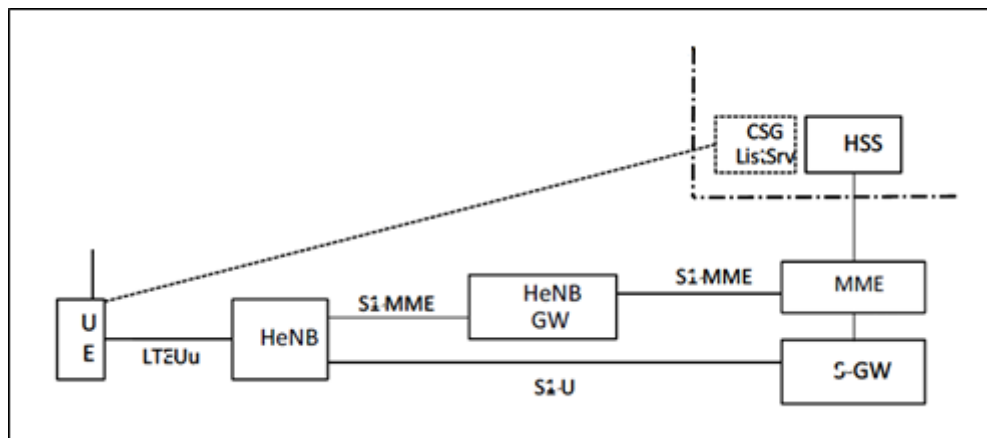


Figura 2-8 Variante 3 de arquitectura una red heterogénea basada en LTE [20].

### 2.5.3 Control de Acceso

Hay tres posibles políticas de acceso en las redes heterogéneas, el acceso abierto, cerrado e híbrido, la elección de una de estas políticas se basa principalmente en la densidad de femtoceldas y en la necesidad de cumplir con requerimientos de cobertura. El control de acceso se realiza de acuerdo al Grupo Cerrado de Suscriptores (CSG, *Closed Subscriber Group*) que identifica a los usuarios que tienen permitido conectarse a una femtocelda [21].

#### A. Acceso Abierto (*Open Access*)

Con acceso abierto los macrouusuarios que reciben una señal más fuerte de una femtocelda cercana pueden establecer una conexión con ella, este tipo de acceso en general se utiliza en zonas con señal deficiente o puntos ciegos del eNB, la femtocelda con acceso abierto no realiza ningún tipo de control de acceso y permite la conexión de todos los usuarios que la soliciten [18].

El acceso abierto también permite que los femtousuarios de HeNB vecinos se conecten a un HeNB diferente en caso de que perciban una mejor señal, para esto las listas de control de acceso no restringen este tipo de trasposos.

#### B. Acceso Cerrado (*Close Access*)

En este escenario el propietario de la femtocelda no desea compartir el acceso a ésta, ya sea por el límite del *backhaul IP* o por motivos de seguridad, en este caso el control se realiza cada vez que un usuario está intentando conectarse a la femtocelda [18].

En acceso cerrado, solo los usuarios registrados en el CSG pueden conectarse a la femtocelda, cualquier otro usuario que no se encuentre en la CSG será rechazado, en

general esta política aumenta la interferencia a los macrousuarios que se encuentren cerca las femtoceldas.

### C. Acceso Híbrido (*Hybrid Access*)

El modo de acceso híbrido es una combinación entre el acceso abierto y cerrado, una femtocelda con acceso híbrido brinda a conexión a los usuarios en su CSG y a otros usuarios que lo soliciten; sin embargo los usuarios que están en su CSG tienen mayor prioridad, mientras que los usuarios que no pertenecen a la CSG solo acceden a los servicios con un QoS limitado.

#### 2.5.4 Estructura Celular Jerárquica

La Estructura Celular Jerárquica (HCS, *Hierarchical Cell Structure*) permite la identificación de dos capas en una red heterogénea en LTE, ésto a través de la separación de estas capas como diferentes Redes Terrestres Públicas Móviles (PLMN, *Public Land Mobil Network*), es decir que los usuarios tienen la capacidad de saber en que capa de la red se encuentran gracias al PLMN ID<sup>20</sup> [18].

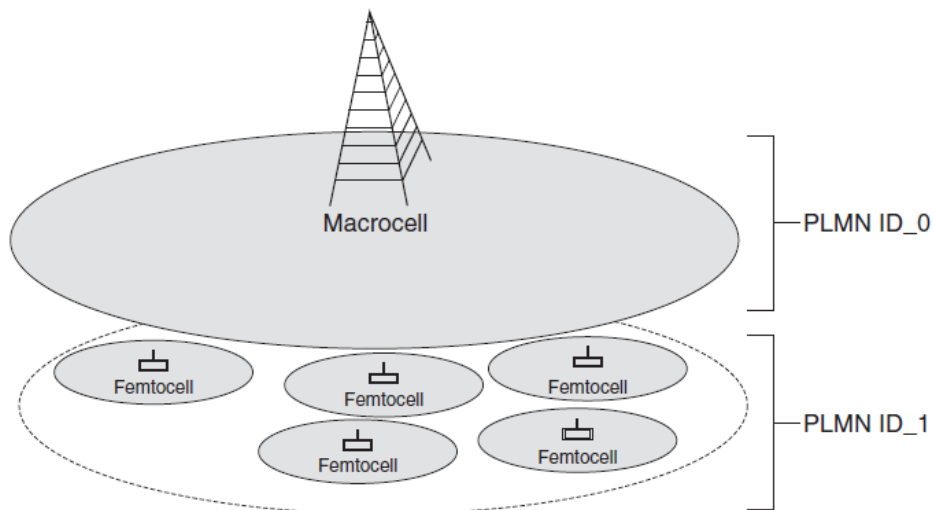


Figura 2-9 Estructura celular jerárquica [18].

Es posible que la capa de la macrocelda use frecuencias diferentes a la de las femtoceldas, lo que disminuiría la probabilidad de interferencia pero afecta la eficiencia espectral, el caso más común es que ambas capas usen todo el espectro disponible.

#### 2.5.5 Procedimientos de *Handover*

El handover para redes heterogéneas basadas en LTE se encuentra en estudio, aun no hay un estándar para los procesos de movilidad de usuarios de femtoceldas CSG. La Figura 2-10 muestra los posibles escenarios en los procedimientos de handover.

<sup>20</sup>PLMN ID es un identificador único que incluye el código móvil del país (MCC, *Mobile Country Code*) y el código de la red móvil (MNC, *Mobile Network Code*).

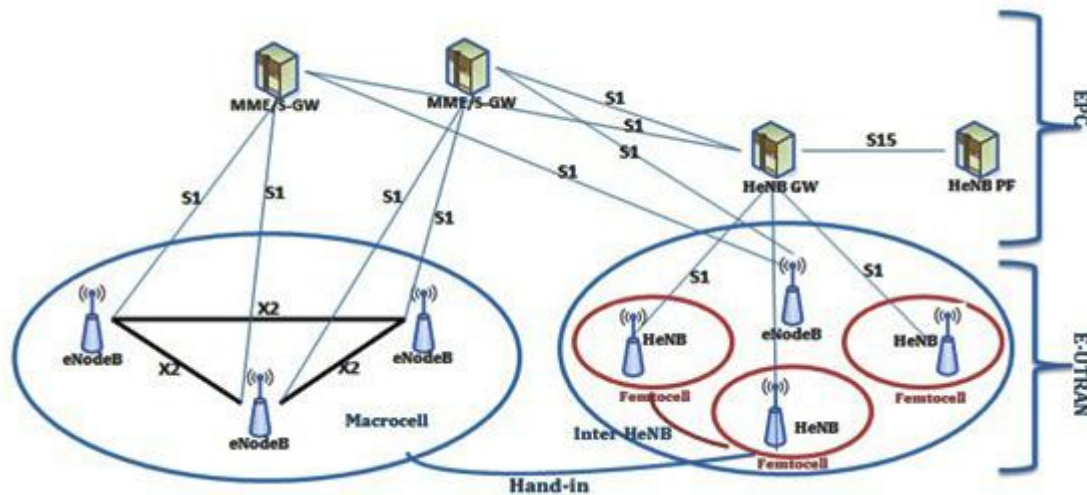


Figura 2-10 Escenarios de handover [23].

### A. Handover Macrocella a Femtocelda

En este escenario un usuario que está conectado al eNB cambia a un HeNB, este es el tipo de handover más complicado, ya que el macrousoario tiene múltiples HeNBs a los cuales conectarse, así mismo hay múltiples HeNBs interfiriéndolo; además se debe tener en cuenta que no todos los HeNBs brindan la misma prioridad en el momento que solicite la asignación de sus recursos [23].

### B. Handover Femtocelda a Macrocella

Este es el escenario más simple de handover, ya que solo hay un eNB objetivo al cual conectarse, por lo tanto no son necesarios mecanismos complejos de decisión, cuando el usuario percibe una mejor señal del eNB que del HeNB, este se conecta al eNB, un ejemplo es cuando un usuario de una Femtocelda de hogar abandona su casa por algún motivo [23].

### C. Handover Femtocelda a Femtocelda

En este escenario el usuario cuenta con múltiples HeNBs objetivos a medida que se aleja de la cobertura de su HeNB, por lo tanto es necesario aplicar mecanismos de *handover* para seleccionar el objetivo con mayor calidad y nivel de potencia en la señal de transmisión [23].

## 2.5.6 Capa Física y Asignación de *Throughput*

Uno de los objetivos del trabajo de grado es analizar la capacidad de una red heterogénea en función de la interferencia, entendiéndose por capacidad la cantidad de información que es capaz de entregar un nodo en un tiempo determinado y sin errores, concepto que se resume en *Throughput*. A continuación se presenta una descripción de algunos conceptos importantes de la capa física que juegan un papel determinante en como LTE realiza la asignación de recursos a un UE.

## A. Concepto de Bloques de Recursos Físicos

- **Elemento de Recurso (RE, Resource Element):** la unidad mínima de transmisión en LTE, se compone por una subportadora OFDM en el dominio de la frecuencia y 1 símbolo OFDM en el dominio del tiempo [24].
- **Prefijo cíclico (CP, Cyclic Prefix):** se realiza una copia de la última parte de un símbolo OFDM y se coloca al inicio de este, esto con el fin de evitar la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) debido a la multitrayectoria de la señal. Tiene una duración de 5  $\mu$ S y 17  $\mu$ S para el CP normal y CP extendido respectivamente [24].
- **Ranura temporal (Time Slot):** periodo de 0.5 ms de una trama LTE, que corresponden a 6 símbolos OFDM con CP normal o 7 símbolos OFDM con CP extendido [24].
- **Bloque Físico de Recursos (PRB, Physical Resource Block):** corresponde a la mínima unidad de transmisión que puede ser asignada a un equipo de usuario, en el dominio de la frecuencia representa 180 KHz compuestos por 12 portadoras OFDM equiespaciadas 15 KHz. En el dominio del tiempo tiene una duración de 0.5 ms con 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo del Prefijo Cíclico utilizado, es decir la duración de un Slot o ranura temporal [24].

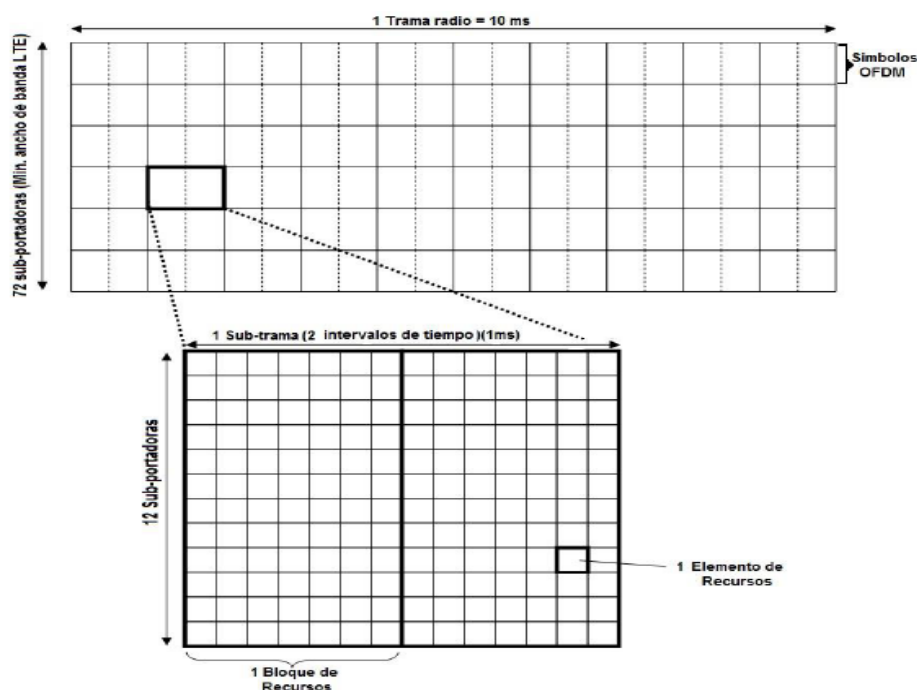


Figura 2-11 Estructura de recursos tiempo-frecuencia [25].

- **Subtrama LTE:** constituye un intervalo de tiempo de 1 ms y es igual al mínimo Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*), compuesto por dos ranuras de tiempo o 2 PRB y representa la mínima granularidad de transmisión hacia un usuario [24].





## B. Relación entre Ancho de Banda y PRB

Una de las características principales de LTE es la flexibilización del ancho de banda, pudiéndose elegir entre 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz. Ya que un PRB contiene un total de 180 KHz en el dominio de la frecuencia, la cantidad de PRB que pueden ser usados depende directamente del ancho de banda, la Tabla 2-3 resume la relación entre el ancho de banda y el número de PRBs. Se debe considerar que el número de subportadoras totales será de 12 veces el número de PRB más 1, ya que se debe tener en cuenta la portadora DC (*Direct Current*), utilizada como mecanismo de ajuste y sincronización en frecuencia en el receptor [24].

Tabla 2-3 Número de PRBs en función del ancho de banda.

Ancho de Banda (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Numero de PRBs	6	15	25	50	75	100

## C. Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

Teniendo en cuenta las especificaciones del *release* 8, LTE soporta las modulaciones de QPSK, 16QAM y 64QAM para el enlace de bajada, QPSK y 16QAM para el enlace de subida. La elección de un esquema de modulación en particular define una mayor tasa de transmisión de datos y por consiguiente una mayor eficiencia espectral. LTE combina diferentes tipos de modulación con distintas tasas de codificación, a lo cual se le denomina Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Codification Scheme*). En la Tabla 2-4 se muestra un total de 32 diferentes tipos de MCS para el enlace de bajada, la columna Orden de Modulación especifica el tipo de modulación, donde 2, 4 y 6 corresponden a QPSK, 16QAM y 64QAM respectivamente [24]. La columna TBS index (*Transport Block Size*) está relacionada con el tamaño de bloque de transporte que se puede asignar según el esquema de modulación y codificación seleccionado. En el apéndice E se presenta este aspecto de manera detallada.





Tabla 2-4 Índice de Modulación y TBS para el PDSCH [26].

MCS Index	Modulation Order	TBS index
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	<i>reserved</i>
30	4	
31	6	

#### D. Indicador de Calidad del Canal (CQI)

Para determinar cuál MCS se asigna a un usuario, se hace uso del Indicador de la Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), el cual determina el UE de acuerdo a las medidas de referencia del enlace de bajada, capacidades del equipo y la velocidad de transmisión de datos que éste es capaz de recibir.

El CQI describe 16 posibles Esquemas de Modulación y Codificación como se muestra en la Tabla 2-5, de esta manera el UE le informa el eNB cuál es el índice máximo de modulación y codificación que permite garantizar una Tasa de Error de Bloques (BLER, *Block Error Rate*) en el bloque de transporte recibido inferior a  $10^{-1}$  (10%), de acuerdo con ello el eNB podrá escoger cualquier MCS igual o inferior al indicado garantizando una BLER menor del 10% [24].



Tabla 2-5 Índice CQI [26].

Indice CQI	Modulación	Tasa de Codificación x 1024	Eficiencia espectral Bits/Simbolo/Hz
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

### E. Asignación de *Throughput*

El proceso a seguir para la asignación de un *throughput* determinado a un UE se muestra en la Figura 2-12 y se describe a continuación:

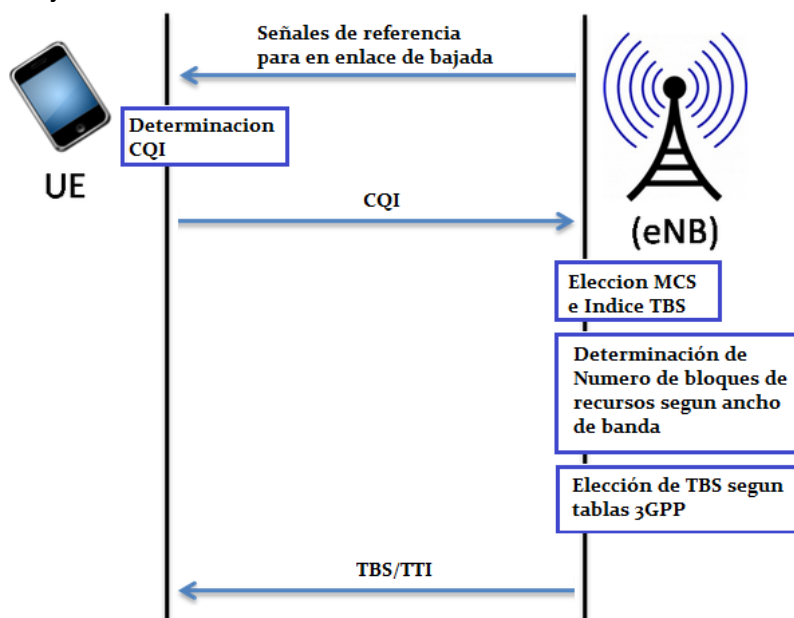


Figura 2-12 Asignación de TBS a un UE en el enlace de bajada.

El UE recibe del eNB las señales de referencia del enlace de bajada, con las cuales determina el CQI apropiado para que posteriormente el eNB decida cuál es el MCS



conveniente para dicho usuario según las condiciones del canal. Según la Tabla 2-4 a cada índice MCS se le asocia un Índice de Tamaño de Bloque de Transporte, cuyo valor representa la primera columna de la tabla 7.1.7.2-1 de la especificación 32.213 del 3GPP [26]. La primera fila de la tabla 7.1.7.2-1 representa el número de bloques de recursos asignados, elemento que depende del ancho de banda según lo muestra la Tabla 2-3, interpolando estos dos factores se obtiene el valor del TBS, cuyo valor indica el número de bits que pueden ser transmitidos en una subtrama dado un ancho de banda determinado después de considerar la información de cabecera.

De acuerdo a lo anterior, la tasa de transmisión de datos  $R$  puede calcularse según la ecuación (2-1) [27]. Por ejemplo, suponiendo un índice MCS de 28, a este le corresponde un índice TBS de 26, si se asume un ancho de banda de 20 MHz se tienen un total de 100 PRBs, finalmente estos valores darán como resultado un TBS de 75376 bits. Con una configuración MIMO 4x4, para un solo usuario, en un segundo se obtendría una tasa pico aproximada de 301,5 Mbps.

$$R(\text{Mbps}) = \frac{(TBS [\text{bits}/TTI]) \left(\frac{TTI}{ms}\right) \left(\frac{1000ms}{sec}\right) (\text{Numero de antenas})}{10^6} \quad (2-1)$$

Dónde:

$R$  [Mbps]: Tasa de velocidad de datos.

TBS [bits/TTI]: Tamaño del bloque de transporte, número de bits que pueden ser transmitidos en una subtrama por TTI.



## CAPITULO 3

# METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para la realización del trabajo de grado fue de vital importancia considerar una metodología de desarrollo que se adaptara a los requerimientos del problema de estudio, que tuviera en cuenta limitaciones y se ajustara a las características del mismo, de tal forma que de una manera ordenada y estructurada se lograran obtener resultados y por ende dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

En este capítulo, se plantea la metodología de desarrollo empleada para diseñar, estructurar y controlar el proceso de análisis de una red heterogénea basada en LTE, teniendo en cuenta los distintos aspectos que conforman una red de este tipo, la elección de un simulador, características de simulación y el diseño de un conjunto de escenarios de acuerdo a los objetivos y limitaciones.

### 3.1 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para el desarrollo e implementación del trabajo de grado, se seleccionó la metodología de desarrollo lineal secuencial, la cual se caracteriza por el desarrollo de diferentes etapas que se concatenan una seguida de la otra, de tal forma que la ejecución de una etapa posterior dependerá del correcto cumplimiento de las etapas anteriores [28], como es mostrado en la Figura 3-1. Es importante resaltar que se realizó una adaptación de dicha metodología sin modificar el sentido de la misma, de acuerdo a las características y objetivos del trabajo de grado. Las etapas de la metodología lineal secuencial son las siguientes:

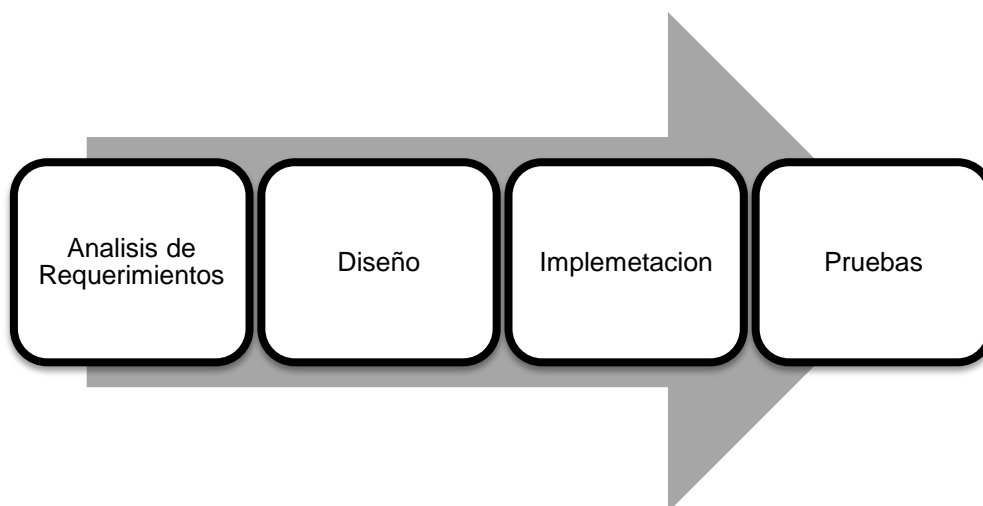


Figura 3-1 Modelo Lineal Secuencial.



- **Análisis de requerimientos:** se define el problema de estudio, para posteriormente definir características, procedimientos y recolección de información que permitan abordar el problema planteado, especificar metas y localizar limitaciones.
- **Diseño:** se modela el sistema, se definen parámetros de evaluación y se selecciona la herramienta de simulación más apropiada según los requerimientos planteados.
- **Implementación:** se ejecutan una serie de actividades con el fin de dar cumplimiento a las consideraciones de la etapa de diseño, entre ellas se adapta y configura el simulador y se implementan mecanismos para la obtención de los resultados propuestos.
- **Pruebas:** se define un conjunto de escenarios con diferentes características de red, se define la forma de simulación y se obtienen resultados.

### 3.1.1 Análisis de requerimientos

#### A. Problema de estudio

La implementación de femtoceldas en una red LTE promete grandes ventajas en el incremento de la capacidad y cobertura de la misma, sin embargo, el despliegue aleatorio de femtoceldas por parte de los usuarios y el uso de las mismas bandas frecuencia de operación de la macrocelda, afectan de manera dinámica la capacidad, calidad y cobertura de la red, de esta forma se proyectan nuevos desafíos en el futuro despliegue y gestión de la interferencia de las redes heterogéneas, razones por las cuales se hace necesario realizar un estudio sobre el impacto de la interferencia Co-canal en una red heterogénea basada en LTE, con el fin de obtener resultados y a partir de estos establecer posibles conclusiones que permitan crear soluciones al problema planteado.

#### B. Requerimientos

Para analizar y evaluar el impacto de la interferencia Co-canal sobre la capacidad y cobertura en una red heterogénea basada en LTE se perfilan los siguientes requerimientos para realizar un correcto estudio y lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos:

- Modelar el sistema a implementar, de tal forma que se forme una idea básica de los elementos que éste debe incluir, identificar variables y posibles aspectos que se deben tener en cuenta en relación con la interferencia y las redes heterogéneas basadas en LTE.
- Realizar un análisis de los diferentes simuladores en el mercado, teniendo en cuenta su modo de uso, tipo de licencia, muestra de los resultados y características relacionadas con LTE y las redes heterogéneas, de acuerdo al modelo de sistema planteado.
- Seleccionar el simulador más adecuado de acuerdo a los requerimientos planteados anteriormente.
- Analizar en el simulador seleccionado, características de propagación, elementos de red, funcionalidades de LTE, redes heterogéneas, implementación de interferencia y



demás características que aseguren la confiabilidad de resultados y cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado.

- Evaluar el modo de uso y funcionamiento del simulador seleccionado, configuración de parámetros, elementos de red y muestra de resultados, de tal forma que se permitan establecer las limitaciones del simulador.
- Identificar parámetros de desempeño con los cuales se pueda realizar un análisis de la capacidad y cobertura de la red.
- Verificar la fiabilidad del simulador seleccionado, teniendo en cuenta pruebas de funcionalidad, referencias de estudios previos y coherencia de los resultados.
- Definir un conjunto de escenarios de simulación de acuerdo a las características y limitaciones del simulador seleccionado.
- Realizar un análisis estadístico en términos de la Función de Densidad de Probabilidad para la SINR.
- Evaluar la capacidad de la red en términos de *throughput* promedio y la Función de Distribución Acumulativa Complementaria de *throughput*.
- Evaluar la cobertura de la red en términos de probabilidad de degradación del servicio en función de la SINR.

### 3.1.2 Diseño

Se realiza el modelado del sistema a implementar, se estudian diferentes herramientas de simulación para posteriormente seleccionar la más conveniente, finalmente se presentan los parámetros de desempeño seleccionados para analizar adecuadamente la capacidad y cobertura de una red heterogénea basada en LTE en función de la interferencia co-canal.

#### A. Modelado del sistema

En una red heterogénea basada en LTE, se deben tener en cuenta tres características importantes, en primer lugar se encuentran todos los elementos de la red que la componen, en segundo lugar la forma como dichos elementos interactúan con la red, es decir, las características básicas de funcionamiento de LTE, y por último la interacción que se efectúa entre los distintos elementos de la red, en particular la interferencia generada entre dichos elementos. De acuerdo a lo anterior, se modela una red heterogénea basada en LTE consistente con las siguientes características:

- Una capa superior compuesta por una macrocelda, a la cual está asociada un eNB y sus correspondientes macrousuarios.
- Una capa inferior compuesta por distintas femtoceldas, integradas por los HeNB cada uno con uno o más femtousuarios asociados a estos. Los HeNB pueden estar contenidos en diferentes estructuras, tales como apartamentos o edificios.

- Los distintos elementos de red obedecen a las características esenciales de la tecnología LTE, tales como mecanismos de handover, modelo de propagación, planificador de paquetes, gestión de recursos radio.
- Uso de la misma banda de frecuencia de operación entre la macrocelda y las femtoceldas, presentándose la interferencia co-canal como factor determinante en la interacción entre las capas de la red.
- Posibilidad de configurar el método de control de acceso de los usuarios a los nodos de la red, siendo estos *open access* o *close access*.
- Interacción entre eNB, macrouusuarios, HeNB y femtousuarios únicamente en el enlace de bajada.
- Estudio de la interferencia Cross-layer, donde elementos de diferentes capas de la red pueden interferirse unos a otros, en el caso del enlace de bajada el eNB puede interferir a los femtousuarios o los HeNB pueden interferir a los macrouusuarios, como se puede apreciar en la Figura 3-2 y la Tabla 3-1.

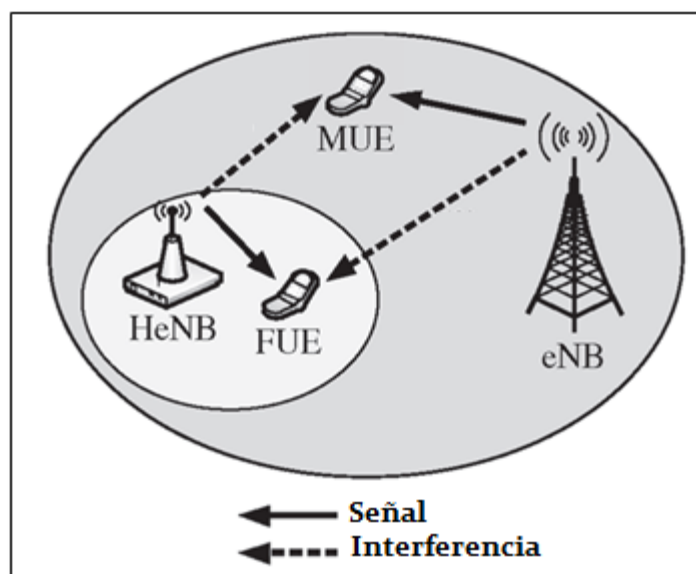


Figura 3-2 Interferencia Cross-Layer para el enlace de bajada [29].

- Estudio de la interferencia Co-layer, donde elementos de la misma capa de la red se interfieren unos a otros, debido a que el sistema se compone por una sola celda, esta interferencia solo se estudia para el caso de la capa inferior, en el caso del enlace de bajada donde un HeNB puede interferir a un femtousuario asociado a otro HeNB, la Tabla 3-1 y la Figura 3-3 resumen este aspecto.

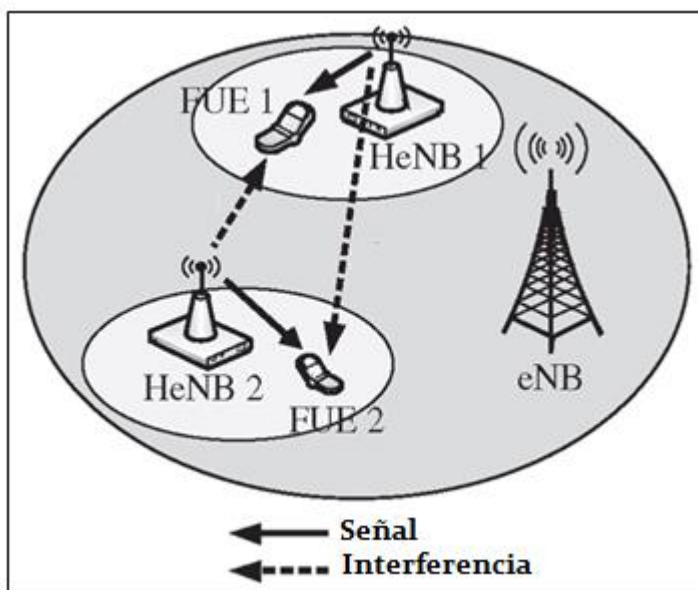


Figura 3-3 Interferencia *Co-layer* para el enlace de bajada [29].

Tabla 3-1 Tipos de interferencia Co-canal en el enlace de bajada.

	<b>Nodo Interferente</b>	<b>Nodo Interferido</b>
<b>Interferencia Cross-layer</b>	HeNB	Macrouuario
	eNB	Femtousuario
<b>Interferencia Co-layer</b>	HeNB(1)	Femtousuario(2)

## B. Elección del simulador

De acuerdo a los requerimientos descritos y al modelado del sistema, es necesario hacer uso de una herramienta software de simulación que cuente con todas las características descritas, esta actividad es muy importante debido de que de ella dependen la ejecución y cumplimiento de los objetivos propuestos. Los criterios para la selección de la herramienta software de simulación fueron los siguientes:

- Cumplimiento de características de la tecnología LTE y redes heterogéneas.
- Tipo de licencia y derechos de autor del software, principalmente por cuestiones de presupuesto esta debe ser de libre uso y código abierto.
- Simulador a nivel de sistema.
- Forma de uso y facilidad de configuración.
- Facilidad de obtención de resultados, los cuales deben ser parámetros de desempeño relacionados con el análisis de la interferencia, capacidad y cobertura de una red heterogénea basada en LTE.
- Referencias de funcionamiento y valides de los resultados.
- Facilidad para obtener asesoría relacionada con el funcionamiento, características y configuración del software.





A continuación se describen brevemente algunos de los simuladores encontrados según los criterios mencionados.

**LENA (LTE-EPC Network Simulator):** es un simulador de código abierto, basado en el simulador ns-3 para sistemas de internet, orientado a la tecnología LTE y el EPC, cuyo objetivo es permitir a desarrolladores, investigadores y proveedores una herramienta capaz de diseñar, implementar y probar soluciones para la tecnología LTE y Redes Auto organizadas (SON, *Self Organized Networks*). Entre las principales características implementadas se encuentran planificadores de paquetes, algoritmos de gestión de recursos radio, coordinación de interferencia intercelda, movilidad de usuarios, redes heterogéneas, entre otras [30].

Esta herramienta cuenta con una página web donde se puede encontrar soporte y documentación relacionada con su modo de uso y características. Cuenta con un módulo orientado a la implantación de redes heterogéneas, sin embargo, este aún se encuentra en desarrollo y provee configuraciones muy limitadas.

**LTE Downlink System Level Simulator:** simulador a nivel de sistema desarrollado por el Instituto de Telecomunicaciones (TC) de la Universidad Tecnológica de Viena, bajo una licencia académica no comercial e implementado bajo la herramienta de simulación Matlab®. Este simulador implementa características funcionales de la tecnología de LTE [31], documentación de modo de uso y configuración, además de un foro dedicado a la solución de dudas por parte de los usuarios. Con respecto a las redes heterogéneas se implementa un módulo cuyas características son la posibilidad de configurar la potencia de transmisión, distribución y modelo de propagación de femtoceldas, sin embargo, diversas características como el control de acceso y movilidad de usuarios aún no se encuentran implementadas [32].

**LTE-Sim:** software de código abierto para simular redes LTE, desarrollado por G. Piro y F. Capozzi del Politécnico di Bari. Abarca varios aspectos de las redes LTE, incluyendo la Red de Acceso Radio UMTS Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y la Red de Transporte o Núcleo de Paquetes Evolucionado. Soporta escenarios de una sola macrocelda, múltiples femtoceldas, gestor de QoS, escenario multiusuario, movilidad de usuario, procedimientos de traspaso y técnicas de reuso de frecuencias. LTE-Sim contiene un módulo dedicado a la simulación de femtoceldas, con características de control de acceso, movilidad de usuarios, escenarios *indoor*, modelo de propagación y características de interferencia entre las capas de la red. Los autores proveen documentación de sus características, modo de uso y un foro dedicado a la solución de preguntas por parte de los usuarios, muestran pruebas de escalabilidad y realizan un estudio de redes heterogéneas con el fin de verificar y validar su funcionamiento [4] [33].

Cabe mencionar que en la literatura se encuentran diferentes tipos de simuladores LTE con redes heterogéneas, pero en la mayoría de los casos los autores no proveen ninguna información sobre la herramienta utilizada o simplemente no la comparten, por otro lado existen simuladores a nivel de sistema que se encuentran bajo licencias privadas y la adquisición del producto es costosa y por lo tanto inviable según los recursos disponibles para la realización del trabajo de grado.

Luego de poner a prueba cada uno de los simuladores bajo los criterios de selección mencionados, se seleccionó la herramienta de simulación LTE-Sim como la más adecuada



para el desarrollo de las actividades y objetivos propuestos. Las características principales del simulador se describen en la sección 3.1.3 A, su modo de uso y configuración se detallan en el apéndice A. Además se hizo necesario realizar algunas implementaciones adicionales con el fin de ajustar el simulador a las necesidades presentadas, las cuales se describen en la sección 3.1.3 D.

### C. Identificación de los parámetros de desempeño

Teniendo en cuenta que se busca evaluar la capacidad y cobertura en función de la interferencia de una red heterogénea basada en LTE, se definen los siguientes parámetros de desempeño:

- **SINR:** se busca evaluar el nivel de interferencia percibida por los distintos elementos de una red heterogénea bajo diferentes condiciones de escenario definidas, por lo tanto, se hace uso del rango de valores mostrados en la Tabla 3-2 a) para agrupar el número de repeticiones de SINR obtenidas en un número determinado de simulaciones, a partir de estos construir la función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulativa, con las cuales realizar un análisis estadístico acerca del comportamiento de la red en función de la interferencia según el caso de estudio.
- **Throughput:** se pretende evaluar la capacidad de la red en función de la interferencia haciendo uso de la cantidad de información enviada y recibida sin errores en un tiempo determinado. Según la tabla 7.1.7.2-1 de la especificación 32.213 del 3GPP [26] se han seleccionado los valores de TBS correspondientes a la columna de 25 bloques de recurso propios a 5 MHz de ancho de banda el cual será un parámetro por defecto, la Tabla 3-2 b) muestra los valores de TBS y por consiguiente de *throughput* para los cuales se obtienen el número de repeticiones según el escenario dado, y a partir de estos obtener el *throughput* promedio y la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF, *Complementary Cumulative Distribution Function*).



Tabla 3-2 a) Rango de valores de SINR seleccionado. b) Valores TBS y su correspondiente *throughput*.

Rango SINR (dB)	
-60	-55
-55	-50
-50	-45
-45	-40
-40	-35
-35	-30
-30	-25
-25	-20
-20	-15
-15	-10
-10	-5
-5	0
0	5
5	10
10	15
15	20
20	25
25	30
30	35
35	40

a)

TBS (Bits)	Throughput (Mbps)
680	0,68
904	0,904
1096	1,096
1416	1,416
1800	1,8
2216	2,216
2600	2,6
3112	3,112
3496	3,496
4008	4,008
4392	4,392
4968	4,968
5736	5,736
6456	6,456
7224	7,224
7736	7,736
7992	7,992
9144	9,144
9912	9,912
10680	10,68
11448	11,448
12576	12,576
13536	13,536
14112	14,112
15264	15,264
15840	15,84
18336	18,336

b)

- **Probabilidad de degradación del servicio:** debido a restricciones del simulador en la obtención de resultados, los cuales se detallan en la Sección 3.1.3 y en el apéndice A, la cobertura de una red heterogénea en función de la interferencia será evaluada haciendo uso de la probabilidad de degradación del servicio, la cual se define estableciendo un valor de SINR objetivo. Para la obtención de este valor, se tiene en cuenta la Figura 3-4, la cual muestra la BLER objetivo del 10% en función de la SNR con distintos valores de CQI para un ancho de banda de 5 MHz, así mismo la Tabla 3-3 representa la SINR que LTE requiere para configurar los distintos valores de CQI.

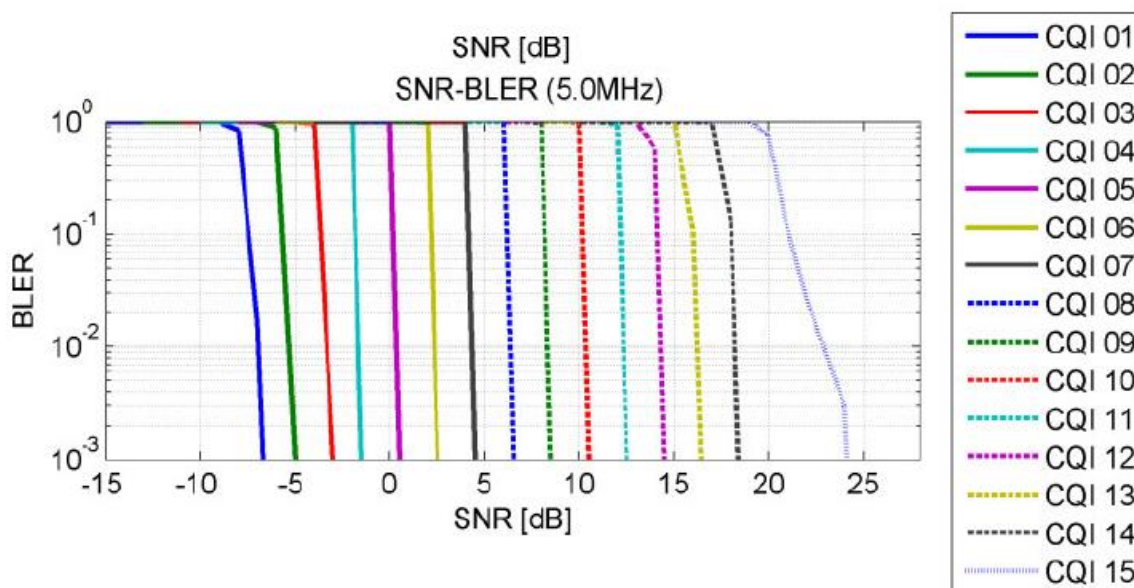


Figura 3-4 Curvas SNR-BLER para 5 MHz [34].

Tabla 3-3 Índice CQI y requerimientos de SINR de referencia [35].

Índice CQI	Modulación	SINR de referencia (dB)	Eficiencia espectral
0	Fuera de rango		
1	QPSK	-6.7	0.1523
2	QPSK	-4.7	0.2344
3	QPSK	-2.3	0.3770
4	QPSK	0.2	0.6016
5	QPSK	2.4	0.8770
6	QPSK	4.3	1.1758
7	16QAM	5.9	1.4766
8	16QAM	8.1	1.9141
9	16QAM	10.3	2.4063
10	64QAM	11.7	2.7305
11	64QAM	14.1	3.3223
12	64QAM	16.3	3.9023
13	64QAM	18.7	4.5234
14	64QAM	21.0	5.1152
15	64QAM	22.7	5.5547

Por lo tanto, se define el valor de SINR objetivo de -6 dB, el cual es el mínimo valor requerido por LTE para configurar el valor de CQI de 1, recordando que este valor representa el índice mínimo de Modulación y Codificación en el bloque de transporte que permite garantizar una BLER inferior al 10% [24].

Finalmente se define la probabilidad de degradación del servicio de acuerdo a la Ecuación (3-1), que indica que todos los usuarios que tengan un valor de SINR igual o mayor a -6 dB



se encontraran en una región de cobertura donde se es posible garantizar una correcta prestación de servicio, en caso contrario se asume que los usuarios están fuera de la zona de cobertura y no hay garantía de la prestación de un servicio en óptimas condiciones.

$$\text{Probabilidad de degradación} \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ SINR} \geq -6 \text{ dB} \quad \text{Usuarios en región de cobertura.} \\ \bullet \text{ SINR} < -6 \text{ dB} \quad \text{Usuarios no se encuentran en región de cobertura.} \end{array} \right. \quad (3-1)$$

### 3.1.3 Implementación

En esta etapa se describen las principales características del simulador LTE-Sim, se establecen las restricciones del sistema y se detallan los mecanismos implementados que permiten la obtención de resultados y el diseño de escenarios de simulación.

#### A. Características principales del simulador LTE-SIM

A continuación se presentan algunas de las características del simulador LTE-Sim que se consideran más relevantes en relación a los objetivos del trabajo de grado y que juegan un papel importante en el diseño de los escenarios de simulación y análisis de resultados. La descripción completa del simulador LTE-Sim y su módulo de femtoceldas pueden ser encontradas en [4] y [33].

##### I. Topología de red

LTE-Sim utiliza el plano cartesiano para desplegar los diferentes elementos que componen la red, donde generalmente el eNB se encuentra en el centro de la misma. Cuando se trata de macroceldas, pueden ser simuladas una celda o multiceldas, las cuales están compuestas por la cantidad requerida de macrousuarios, uno o más MME/GW y el número de eNB según corresponda, como se puede apreciar en la Figura 3-5.

LTE-Sim integra un módulo dedicado a la simulación de femtoceldas, las cuales pueden ser representadas por dos tipos de configuración de edificios, la Figura 3-6 a) muestra la configuración *dual stripe*, la cual consta de dos edificios de 1 piso, cada uno compuesto de 20 apartamentos, en donde son desplegados un HeNB en el centro de cada apartamento, para un total de 40 femtoceldas. La segunda configuración de edificio es mostrada en la Figura 3-6 b), la cual representa un edificio de 1 piso y 25 apartamentos, en cada uno de los cuales es desplegado un HeNB para un total de 25 femtoceldas. Para ambas configuraciones cada apartamento tiene un total de 100 m<sup>2</sup> y cada uno puede contener uno o más femtousuarios.

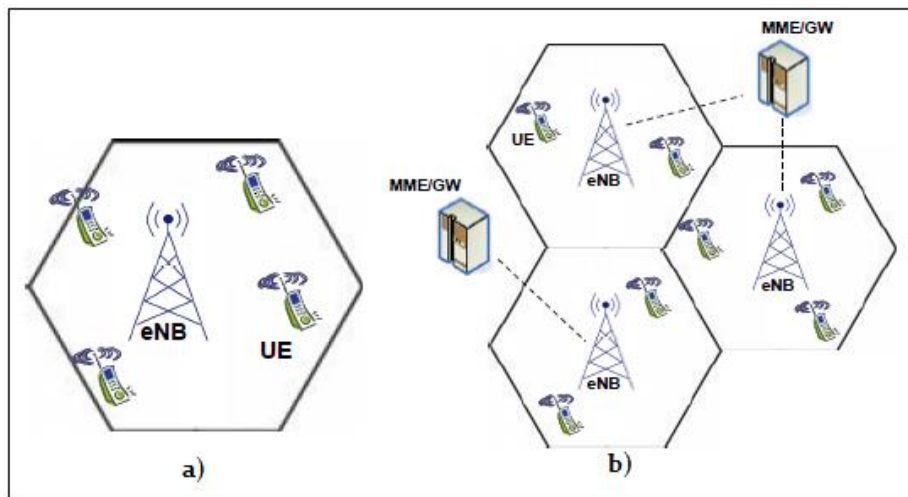


Figura 3-5 a) Escenario única celda b) Escenario multicelda [33].

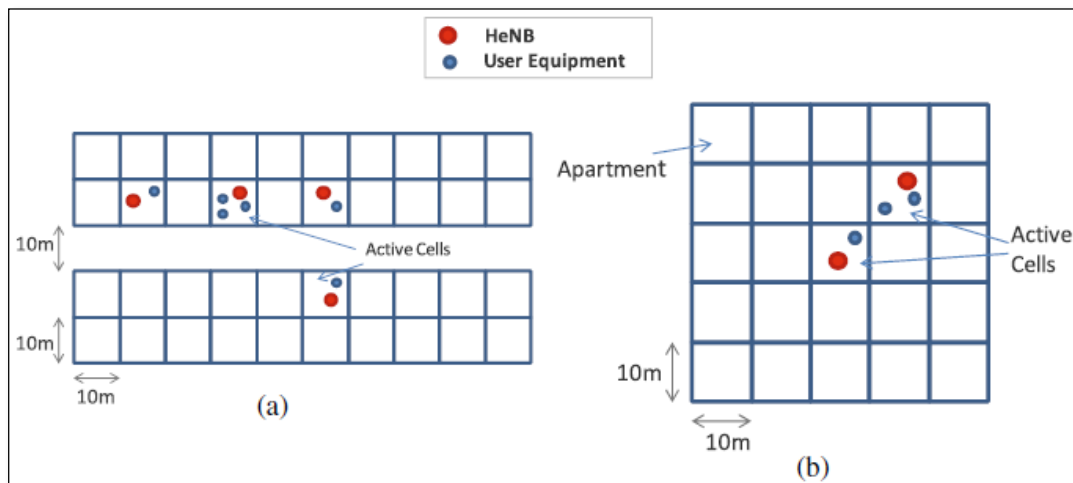


Figura 3-6 a) Edificio tipo Dual Stripe b) Edificios tipo Grilla 5x5 [4].

Para el caso del escenario de una red heterogénea solo es posible configurar una sola macrocelda, compuesta por un eNB ubicado en el centro del plano cartesiano y sus correspondientes macrouusuarios, un número determinado de edificios dentro de los cuales se encuentran las femtoceldas, sus HeNB y sus femtousuarios asociados.

## II. Movilidad de usuarios

Con la intención de implementar características reales en el comportamiento de los usuarios, estos cuentan con la capacidad de realizar dos tipos de movimientos a lo largo del escenario, la Figura 3-7 a) muestra la configuración *Random Direction*, en la cual los usuarios representados con tres colores, eligen una dirección aleatoriamente y caminan en línea recta hasta los bordes del escenario para posteriormente cambiar de dirección. En la Figura 3-7 b) se ilustra el movimiento *Random Walk*, donde los usuarios cambian la dirección aleatoria en un tiempo así mismo aleatorio. Para ambos tipos de movilidad se



puede configurar las velocidades de 0, 3, 30 y 120 Km/h, equivalentes a escenarios estáticos, peatonales o vehiculares.

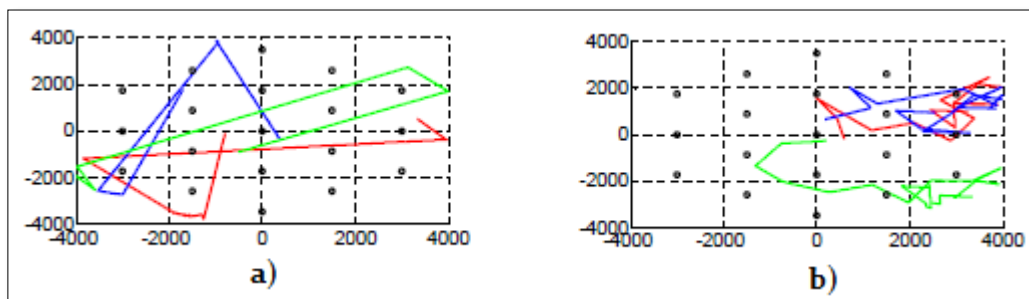


Figura 3-7 Movilidad de usuarios a) *Random Direction* b) *Random Walk* [4].

### III. Aplicaciones

La información que viaja entre los distintos elementos de la red, tanto en el enlace de subida como en el de bajada es generada por cuatro tipos de generadores de tráfico: *trace-based*, *VoIP*, *CBR* y *infinite-buffer*.

*Trace based* envía paquetes con información de archivos de trazas de video reales, las cuales pueden ser cargadas en el simulador. La aplicación VoIP genera flujos de voz en formato G.729<sup>21</sup>, constituida por una cadena de Markov<sup>22</sup> y periodos de transmisión ON y OFF, en el periodo ON se transmiten paquetes de 20 bytes cada 20 ms mientras que en periodo OFF no se transmite información. La aplicación CBR genera paquetes con una tasa de bits constante. En último lugar la aplicación *infinite-buffer* modela un estado donde un nodo siempre tiene paquetes para enviar [33].

Para el desarrollo de este trabajo se empleó la aplicación *Infinite-buffer*, con el fin de que los nodos siempre se encuentren enviando y recibiendo paquetes, y de esta forma asegurar el máximo flujo de información en la red.

### IV. Estructura de canal y asignación de recursos

El acceso radio está basado en la técnica de acceso OFDMA haciendo uso de los mecanismos de división tiempo-frecuencia mencionados en la sección 2.5.6, la comunicación entre los nodos de la red puede ser establecida mediante las técnicas de Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) o Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*), esta última utiliza las bandas de operación de espectro abarcada entre 1920-1980 MHz para el enlace de subida y 2110-2170 MHz para en el enlace de bajada, por otro lado, en cada escenario puede ser usado cada uno de los anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz de acuerdo a las especificaciones de ancho de banda adaptativo establecidas para LTE [33].

<sup>21</sup> G.729: algoritmo de compresión de datos de audio para voz y usada principalmente en aplicaciones VoIP por sus bajos requerimientos en ancho de banda.

<sup>22</sup> Cadena de Markov: Proceso estocástico discreto donde la probabilidad que suceda un evento depende del evento inmediatamente anterior.



Para realizar la asignación de recursos a cada usuario, el simulador soporta 3 tipos de planificadores de paquetes para el enlace de bajada, *Proportional Fair* (PF), *Modified Largest Weighted Delay First* (M-LWDF) y *Exponential Proportional Fair* (EXP).

Para la implementación de los escenarios de simulación y analizar el efecto de la interferencia co-canal en el enlace de bajada, se emplea el algoritmo simulador del planificador de paquetes *Proportional Fair*, debido a que este distribuye los recursos tiempo-frecuencia teniendo en cuenta el estado de calidad del canal de cada usuario. Asimismo, se hace uso de la técnica de duplexación FDD y un ancho de banda de 5 MHz, donde este último es usado bajo el mecanismo de espectro compartido, es decir, el eNB y los distintos HeNB utilizan esta misma proporción de ancho de banda para realizar los procedimientos de la interfaz radio, de esta forma asegurar el peor caso de la interferencia co-canal.

## V. Modelo de propagación

El modelo de propagación implementado tiene en cuenta las consideraciones mostradas en la ecuación (3-2).

$$PRx_{i,j} = PTx_j - M_{i,j} - L_i - T_i - S_{i,j} \quad (3-2)$$

Dónde:

$PRx_{i,j}$  [dB]: Potencia de recepción del usuario i en el subcanal j.

$PTx_j$  [dBm]: Potencia de transmisión del eNB en el subcanal j.

$M_{i,j}$  [dB]: Desvanecimiento por multitrayecto para el usuario i en el subcanal j.

$L_i$  [dB]: Pérdidas de trayecto del usuario i.

$T_i$  [dB]: Pérdidas por penetración de paredes.

$S_{i,j}$  [dB]: Desvanecimiento sombra para el usuario i en el subcanal j.

Para el desvanecimiento rápido debido a la multitrayectoria se hace uso de la distribución Rayleigh y las consideraciones de la ITU para los canales peatonal A, peatonal B, vehicular A y Vehicular B [36]. El desvanecimiento por sombra se modela mediante la distribución normal teniendo en cuenta una media de 0 y desviación estándar de 8 dB. Cuando el usuario se encuentra en el interior de un edificio se tienen en cuenta las pérdidas debido a la absorción de paredes, la cual tiene un valor de 20 dB [33].

Para la determinación de las pérdidas por trayecto  $L_i$ , se tienen en cuenta 2 tipos de modelos de canal, dependiendo de si el usuario se encuentra bajo una cobertura macrocelular o femtocelular, los cuales se muestran en la Tabla 3-4, las ecuaciones (3-3) y (3-4) asumen una frecuencia de operación de 2 GHz [37].





Tabla 3-4 Modelo de pérdidas por trayecto [4] [33].

Escenario	Modelo de pérdidas por trayecto.
Macrocelular Urbano y suburbano	$L_i = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d)$ ( 3-3)
Femtocelular Urbano-Interiores	$L_i = 127 + 30 \log_{10}\left(\frac{R}{1000}\right)$ ( 3-4)

Dónde:

$d[km]$ : Distancia entre el transmisor y receptor expresada en kilómetros.

$R [m]$ : Distancia entre el transmisor y receptor expresada en metros.

## VI. Determinación de la SINR

Cada vez que un usuario recibe un paquete de datos, éste realiza la medida de la SINR de cada subcanal de acuerdo a la ecuación (3-5) [33].

$$SINR_{i,j} = \frac{PRx_{i,j}}{(FN_0B) + I} \quad (3-5)$$

Dónde:

$SINR_{i,j}$ : Relación señal a interferencia más ruido para el usuario  $i$  en el subcanal  $j$ .

$PRx_{i,j}$ : Potencia de recepción del usuario  $i$  en el subcanal  $j$ .

$F$ : Figura de ruido (Por defecto 2.5).

$N_0$ : Densidad espectral de ruido (-174 dBm).

$B$ : Ancho de banda de un bloque de recursos (180 KHz).

$I$ : Interferencia, la cual es la suma de la potencia de recepción de todos los nodos que comparten la misma porción de ancho de banda. Los desarrolladores del simulador LTE-Sim señalan que en esta no se computan los efectos del desvanecimiento rápido y por sombra con el fin de disminuir los requerimientos computacionales [32].

Posteriormente, LTE-Sim ejecuta una función adicional, donde toma el conjunto de valores de SINR de los subcanales usados por el usuario y los promedia para obtener finalmente el valor de SINR efectiva, siendo este valor el que se representa en los resultados del simulador.

## VII. CQI, MCS y TBS

Una vez obtenida la SINR, para cada usuario se realiza el procedimiento de envío de CQI al eNB o HeNB para consecutivamente determinar el MCS y obtener el TBS con el cual se transmite la información al usuario en el enlace de bajada, tal como se mencionó en la sección 2.5.6.



### VIII. Procedimiento de *Handover*

El procedimiento para determinar la conexión de un usuario a una femtocelda o macrocelda en particular, es implementado en el simulador utilizando el mecanismo de *handover* basado en potencia, es decir, un usuario se conectara al HeNB o eNB que provea la señal con la potencia de recepción más fuerte, la Figura 3-8 muestra el diagrama de flujo que ilustra este proceso.

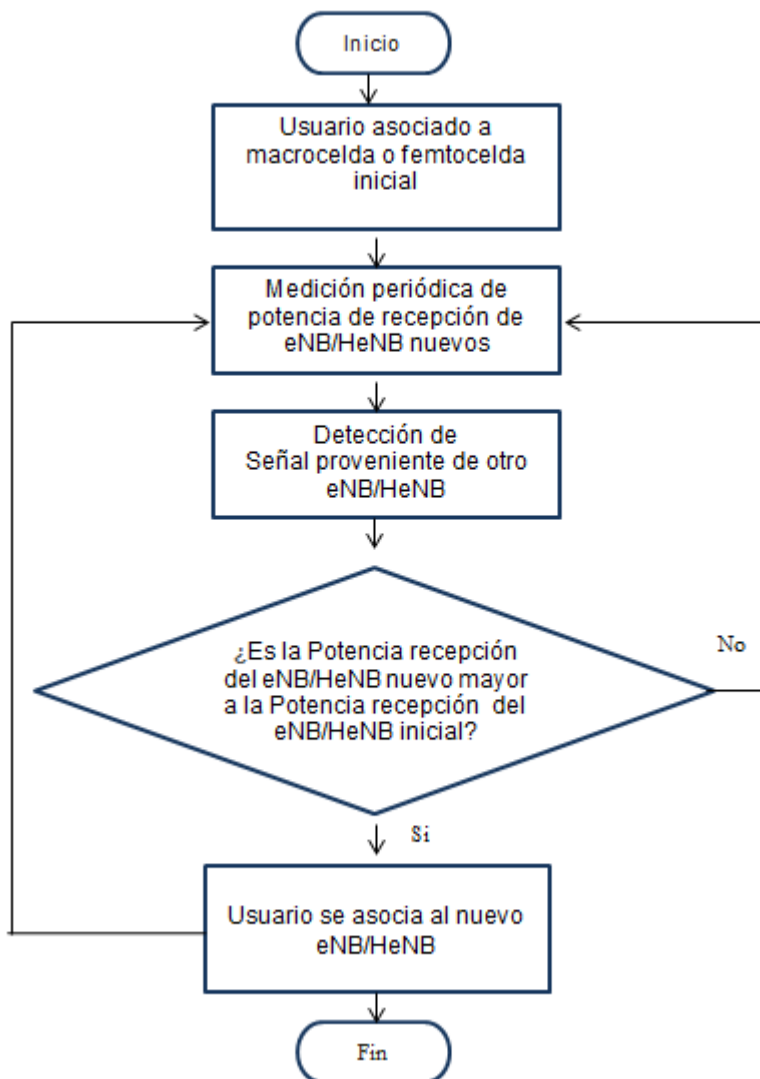


Figura 3-8 Proceso de *handover* basado en potencia.

### IX. Control de acceso

Se implementan los mecanismos de *Close Access* y *Open Access*, donde los macrouusuarios y femtousuarios pueden o no tener la capacidad de conectarse a femtoceldas cercanas. Cuando un usuario no tiene permisos de acceder a un HeNB en particular, los efectos de la interferencia pueden ser más intensos, a pesar de esto se presenta como la característica más probable en ambientes residenciales y por lo tanto de especial interés de estudio en este trabajo de grado. Para el caso de que un macrouusuario



o un femtousuario este configurado bajo las políticas de *Open Access* a un HeNB, el mecanismo de handover se realiza bajo el procedimiento basado en potencia, descrito en la sección anterior.

#### **X. Factor de Actividad (*Activity Ratio*)**

Representa la probabilidad de que las femtoceldas de un edificio se encuentren en funcionamiento, éste puede configurarse con valores entre 0 y 1, donde 0 representa que ninguna femtocelda se encuentra activa y 1 indica la máxima probabilidad de que las femtoceldas se encuentran transmitiendo [4].

#### **XI. Arquitectura**

El simulador LTE-Sim hace uso de la arquitectura mostrada en la Figura 2-7, es decir que este no hace uso de la pasarela HeNB-GW y el HeNB se conecta directamente al núcleo de la red.

#### **B. Restricciones del sistema**

Una vez analizadas las características, usabilidad, configuración y muestra de resultados del simulador LTE-Sim, se identificaron las siguientes restricciones que pueden representar algún tipo de limitación en los objetivos propuestos:

- El simulador no tiene una interfaz gráfica definida, la configuración de los parámetros de la red deben realizarse por medio de la consola del sistema operativo Linux y en algunos casos modificar el código del programa.
- Los resultados de una simulación se representan en formato texto, el cual dependiendo de las características configuradas puede llegar a ocupar un espacio en disco de hasta 10 Gb. Por tal razón se deben crear mecanismos que permitan la obtención y representación adecuada de los resultados según el tipo de simulación y los parámetros de desempeño estipulados.
- Las femtoceldas del sistema solo pueden ser desplegadas por cantidad de edificios, es decir, si se configuran edificios tipo grilla 5x5, la cantidad de femtoceldas desplegadas varía en grupos de 25 femtoceldas según la cantidad de edificios configurada, para el caso de edificios tipo *dual stripe* las femtoceldas varían en grupos de 40. Para disminuir el número de femtoceldas activas en un edificio tipo grilla 5x5 se hace uso del factor de actividad, cuyo mínimo valor configurable de 10% corresponde a 3 femtoceldas por edificio.
- LTE-Sim no tiene implementado un mecanismo de detección de umbral que distinga el valor de SINR objetivo de -6 dB, el cual corresponde al mínimo valor de CQI y por consiguiente el mínimo valor de TBS, esta característica se encuentra en proceso de desarrollo. Cuando se registra una SINR menor al valor umbral el simulador continúa asignando valores de CQI y TBS a los usuarios, a pesar de que en realidad LTE no realiza dicho proceso de asignación. Por esta razón, para los escenarios donde la probabilidad de degradación sea alta, los valores de throughput obtenidos se consideran representativos para el análisis de capacidad de acuerdo a las características simuladas.



### C. Método Montecarlo

Con el fin de realizar un análisis estadístico de los distintos escenarios para una simulación estática a nivel de sistema, se acordó usar el método Montecarlo<sup>23</sup>, en donde se repiten las simulaciones con un parámetro aleatorio el número de veces que sea necesario hasta obtener una muestra estadística representativa.

Para este trabajo de grado se estipuló que 10000 simulaciones son suficientes para obtener tendencias estadísticas representativas de los distintos parámetros de desempeño. Para la mayoría de escenarios se hace uso del método Montecarlo exceptuando dos casos donde se hace uso de las características de movilidad de usuario que permite el simulador.

### D. Muestra de resultados

La muestra final de resultados de una compilación en el simulador LTE-Sim se representan en un archivo texto, generalmente en los formatos .TR o .TXT, en la Figura 3-9 se aprecia una pequeña muestra de los resultados.

```
DL_SINR 47 441.697 372.266 22.1956 22 11448
RX_INF_BUF ID 1 B 21 SIZE 1226 SRC -1 DST 47 D 0.001 0
DL_SINR 48 449.897 370.89 20.9843 20 9912
RX_INF_BUF ID 2 B 22 SIZE 986 SRC -1 DST 48 D 0.001 0
DL_SINR 49 451.349 376.256 -16.2582 0 680
DL_SINR 50 464.936 380.014 -6.45789 0 680
TX_INF_BUF ID 3 B 0 SIZE 1226 SRC 1 DST 26 T 0.101 0
TX_INF_BUF ID 4 B 21 SIZE 1226 SRC 22 DST 47 T 0.101 0
TX_INF_BUF ID 5 B 22 SIZE 986 SRC 23 DST 48 T 0.101 0
DL_SINR 26 434.462 425.425 22.7242 22 11448
RX_INF_BUF ID 3 B 0 SIZE 1226 SRC -1 DST 26 D 0.001 0
DL_SINR 27 443.08 413.157 -12.598 0 680
DL_SINR 28 455.569 421.066 -8.55562 0 680
```

Figura 3-9 Muestra de resultados del simulador LTE-Sim.

La Figura 3-9 muestra dos tipos de información, en primer lugar indica la SINR en el enlace de bajada de un usuario identificado con su ID, la posición en X y Y del plano cartesiano, su índice MCS y el TBS asociado al usuario en ese instante. En segundo lugar se pueden apreciar trazas de recepción y transmisión (RX y TX) de la aplicación que se esté ejecutando (en este caso *Infinite Buffer*).

Una sola línea de DL\_SINR representa la SINR efectiva medida para un usuario en un bloque de recursos, lo que quiere decir que esta se mide cada 0.5 ms. Ahora, para un grupo de femtousuarios y macrouusuarios, que reciben información en un tiempo de simulación de 1 segundo y esto a su vez es simulado 10000 veces, se obtiene finalmente un archivo de texto que puede contener entre 9 y 10 millones de líneas de texto con datos sobre la SINR, información de aplicaciones y configuración de la red. Por lo tanto, teniendo en cuenta lo

<sup>23</sup> Método Montecarlo: método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico y es muy utilizado en los lenguajes de programación para hallar la probabilidad de un suceso [12].



anterior, se crean una serie de archivos en formato Shell de Linux (.sh) bajo el lenguaje de programación BASH, cuyo objetivo principal es la obtención de los parámetros de desempeño definidos, facilitar su manejo y análisis. A continuación, se realiza una descripción de los archivos y procedimientos más importantes implementados.

## E. Implementación del método Montecarlo

La Figura 3-10 muestra las principales líneas de código implementadas para ejecutar el método Montecarlo en el simulador LTE-SIM.

```
2 NUMSIM=10000 #Numero total de simulaciones
3 BEGIN=0 #Simulacion comienza en cero
4 INTERVAL=1
5 #Parametros de LTE-Sim para el escenario de Unica Celda con femtoceldas "SingleCellWithfemto"
6
7
8 RADIUS=0.5 # Radio de la Macrocelda en Kilometros
9 NBUILDS=2 # Numero total de edificios
10 BTYPE=0 # Tipo de edificio Grilla 5x5 = 0 ; Dual stripe=1
11 ARATIO=0.1 # Factor de actividad (Activity Ratio) 0.1=10%
12 NBUE=M # Numero total de macrousuarios
13 NBFEMTOUE=0 # Numero total de Femtousuarios
14 NBVOIP=0 # Numero de paquetes de datos tipo VoiP
15 NBVIDEO=0 # Numero de paquetes de datos tipo Video
16 NBBE=1 # Numero de paquetes de datos tipo Best Effort Flows
17 NBCBR=0 # Numero de paquetes de datos tipo CBR flows
18 SCHAT=1 # Planificador de paquetes ; Proportionañ fair=1, MLWDF=2 EXP= 3
19 FRAME_STRUCT=1 # Estructura de trama de datos ; FDD=1, TDD=0
20 SPEED=3 # Velocidad de usuario en Km/h
21 ACCESP=1 # Esquema de control de acceso; OPEN ACCESS = 0, CLOSED ACCESS=1
22 MAXDELAY=0.1 # Maximo tiempo permitido de retardo en milisegundos
23 VIDEOBITRATE=128 # Tamaño de paquetes de datos tipo video en bytes
24
25 until [ $BEGIN -gt $NUMSIM ]; do # Bucle en el cual se ejecutan las simulaciones desde 0 a 10000
26 #
27 ./LTE-Sim SingleCellWithFemto $RADIUS $NBUILDS $BTYPE $ARATIO $NBUE $NBFEMTOUE $NBVOIP $NBVIDEO $NBBE $NBCBR
28 | | | | | | | | | | $SCHAT $FRAME_STRUCT $SPEED $ACCESP $MAXDELAY $VIDEOBITRATE >> temp.tr
29
30 let BEGIN=BEGIN+INTERVAL
31 done
```

Figura 3-10 Implementación método Montecarlo.

Inicialmente se asignan los valores del número de veces que se desea realizar la simulación (NUMSIM), se ajusta cada uno de los parámetros del sistema solicitados por el simulador, para que finalmente bajo un ciclo repetitivo que termina una vez se cumpla el número de simulaciones, se ejecute la línea principal del código de compilación del programa y se guarden los resultados de cada una de las simulaciones en un archivo temporal (temp.tr), del cual posteriormente se extraen los distintos resultados deseados.



## F. Obtención de la SINR

Una vez terminado el proceso del método Montecarlo, a continuación se ejecutan las líneas de código mostradas en la Figura 3-11, en donde se realiza una búsqueda de todas las líneas de texto con la forma “DL\_SINR” y capturar su valor, posteriormente agruparlos en los diferentes rangos de valores mostrados en la Tabla 3-2 y contar el número de veces que se repite la SINR en dichos rangos de valores, los cuales finalmente permiten construir las gráficas de PDF y CDF.

```
grep DL_SINR temp.tr > sinr.txt
awk '$5 >= -60.0 && $5 < -55 { count8++ } END { print count8 ? count8 : 0 }' sinr.txt > sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -55.0 && $5 < -50 { count9++ } END { print count9 ? count9 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -50.0 && $5 < -45 { count10++ } END { print count10 ? count10 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -45.0 && $5 < -40 { count11++ } END { print count11 ? count11 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -40.0 && $5 < -35 { count12++ } END { print count12 ? count12 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -35.0 && $5 < -30 { count13++ } END { print count13 ? count13 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -30.0 && $5 < -25 { count14++ } END { print count14 ? count14 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -25.0 && $5 < -20 { count15++ } END { print count15 ? count15 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -20.0 && $5 < -15 { count++ } END { print count ? count : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -15.0 && $5 < -10 { count1++ } END { print count1 ? count1 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -10.0 && $5 < -5 { count2++ } END { print count2 ? count2 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= -5.0 && $5 < 0 { count3++ } END { print count3 ? count3 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 0 && $5 < 5 { count4++ } END { print count4 ? count4 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 5 && $5 < 10 { count5++ } END { print count5 ? count5 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 10 && $5 < 15 { count6++ } END { print count6 ? count6 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 15 && $5 < 20 { count7++ } END { print count7 ? count7 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 20 && $5 < 25 { count16++ } END { print count16 ? count16 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 25 && $5 < 30 { count17++ } END { print count17 ? count17 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 30 && $5 < 35 { count18++ } END { print count18 ? count18 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
awk '$5 >= 35 && $5 <= 40 { count19++ } END { print count19 ? count19 : 0 }' sinr.txt >> sinrconsolidado.txt
rm -r temp.tr
```

Figura 3-11 Obtención de la SINR en rangos de valores y numero de repeticiones.

Cabe resaltar que el formato de la Figura 3-11 es usado para encontrar las líneas de código de todos los usuarios que contengan la expresión “DL\_SINR”, sin embargo, esta se modifica de acuerdo al tipo de escenario, parámetro y tipo de usuario al cual se le está realizando el análisis, pero en esencia se conserva la estructura mostrada para todos los escenarios simulados.

## G. Obtención del Throughput

Teniendo en cuenta la Tabla 3-2 se implementa el código mostrado en la Figura 3-12, donde se cuenta el número de veces que se repite cada uno de los valores de TBS, para posteriormente determinar la función de distribución acumulativa complementaria del throughput.



```
awk '$7 == 680 { count8++ } END { print count8 ? count8 : 0 }' sinr.txt > tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 904 { count9++ } END { print count9 ? count9 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 1096 { count10++ } END { print count10 ? count10 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 1416 { count11++ } END { print count11 ? count11 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 1800 { count12++ } END { print count12 ? count12 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 2216 { count13++ } END { print count13 ? count13 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 2600 { count14++ } END { print count14 ? count14 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 3112 { count15++ } END { print count15 ? count15 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 3496 { count++ } END { print count ? count : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 4008 { count1++ } END { print count1 ? count1 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 4392 { count2++ } END { print count2 ? count2 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 4968 { count3++ } END { print count3 ? count3 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 5736 { count4++ } END { print count4 ? count4 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 6456 { count5++ } END { print count5 ? count5 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 7224 { count6++ } END { print count6 ? count6 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 7736 { count7++ } END { print count7 ? count7 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 7992 { count16++ } END { print count16 ? count16 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 9144 { count17++ } END { print count17 ? count17 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 9912 { count18++ } END { print count18 ? count18 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 10680 { count19++ } END { print count19 ? count19 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 11448 { count20++ } END { print count20 ? count20 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 12576 { count21++ } END { print count21 ? count21 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 13536 { count22++ } END { print count22 ? count22 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 14112 { count23++ } END { print count23 ? count23 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 15264 { count24++ } END { print count24 ? count24 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 15840 { count25++ } END { print count25 ? count25 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
awk '$7 == 18336 { count26++ } END { print count26 ? count26 : 0 }' sinr.txt >> tbsconsolidado.txt
```

Figura 3-12 Obtención del *throughput*.

## H. Obtención del *Throughput* promedio

En la Figura 3-13 se muestra las líneas de código implementadas para obtener el *throughput* promedio a partir todas las simulaciones realizadas. Se ejecuta la suma de todos los valores de la columna de TBS y se divide por la cantidad de valores encontrados.

```
rm -r averagetbs.txt
awk '{sum+=$7} END { print "Average = ",sum/NR}' sinr.txt > averagetbs.txt
```

Figura 3-13 Obtención del *throughput* promedio.

### 3.1.4 Pruebas

En esta etapa se definen los escenarios de simulación y los parámetros generales del sistema, teniendo en cuenta las características del simulador, las restricciones del sistema y los mecanismos para la obtención de resultados, de tal manera que de una forma estructurada y controlada sea posible obtener unos resultados confiables.





## A. Escenarios de simulación

Se diseñó el conjunto de escenarios mostrados en la Tabla 3-5 a modo de resumen y se numeran de acuerdo a la nomenclatura del capítulo 4. En la Tabla B-1 del apéndice B se muestran los escenarios de simulación especificando cada uno de los parámetros de red utilizados, para los cuales se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se realiza un estudio estrictamente para el enlace de bajada, por lo tanto se tiene en cuenta la configuración mostrada en la Tabla 3-1, donde el análisis de resultados se centra en el nodo interferido de dicho escenario.
- El estudio del impacto de la interferencia en una red heterogénea se divide en dos escenarios principales, por un lado la interferencia *cross-layer* donde se estudia la relación entre las capas macrocelular y femtocelular de la red, por otro lado la interferencia *co-layer* donde se estudian diferentes escenarios donde se relacionan los elementos de la capa femtocelular.
- Para la mayoría de escenarios se hace uso del método Montecarlo exceptuando dos casos donde se hace uso de las características de movilidad de usuario que permite el simulador, tanto para los escenarios de interferencia *co-layer* y *cross-layer* se realiza una prueba de movilidad con diferentes parámetros de acuerdo al tipo de escenario.
- Para los escenarios de simulación se utilizan las características mostradas en la Tabla 3-5 y a menos que se especifique lo contrario todos los escenarios implementan los parámetros generales de red mostrados en la Tabla 3-6.
- El tiempo de simulación de cada iteración es de 1 segundo, tiempo suficiente en el que los usuarios pueden realizar traspaso a los distintos nodos de accesos de acuerdo a la potencia de recepción percibida.





Tabla 3-5 Escenarios de simulación.

Tipo de interferencia	Título	Escenario	Descripción
4.1 Interferencia Cross-layer	4.1.1 Macrouuario interferido por HeNB	4.1.1.1. Efecto del número de femtoceldas.	Se varía el número de femtoceldas presentes en la macrocelda con el fin de determinar el nivel de interferencia generada hacia el macrouuario.
		4.1.1.2 Efecto de la posición del macrouuario.	Se varía la posición del macrouuario mientras se despliegan 100 femtoceldas con posición aleatoria en la macrocelda.
	4.1.2 Femtousuario interferido por el eNB	4.1.2.1 Femtousuarios en el interior del apartamento.	Los femtousuarios toman posiciones aleatorias en el interior de su apartamento mientras éste toma distintas posiciones en la macrocelda.
		4.1.2.2 Femtousuarios en el exterior del apartamento.	Los femtousuarios toman posiciones aleatorias en el exterior de su apartamento mientras éste toma distintas posiciones en la macrocelda.
	4.1.3 Movilidad macrouuario	4.1.3 Prueba de movilidad de macrouuario.	Se realiza el recorrido de un macrouuario a través de un conjunto definido de femtoceldas bajo distintas esquemas de acceso y niveles de potencia de HeNB.
4.2 Interferencia Co-layer	4.2 Femtousuarios interferidos por HeNB	4.2.1 Efecto de la potencia de HeNB.	Se varía la potencia de HeNBs interferentes bajo distintas posiciones aleatorias de un femtousuario en el interior de su apartamento.
		4.2.2 Efecto del número de femtoceldas.	Un edificio con 25 femtoceldas tiene diferentes probabilidades de que estas se encuentren activas.
	4.2 Movilidad femtousuario	4.2.3 Prueba de movilidad de femtousuario.	Se realiza el recorrido de un femtousuario de su apartamento hasta otro bajo distintos esquemas de acceso y niveles de potencia de HeNB.



## B. Parámetros generales del sistema

A continuación en la Tabla 3-6 se muestran los parámetros generales del sistema, estos se aplican a los todos los escenarios de simulación a menos que se especifique lo contrario.

Tabla 3-6 Parámetros generales del sistema.

Parámetro	Configuración
Número de estaciones base	1 eNB, 1 macrocelda
Tipo de edificio	Grilla 5x5
Tamaño de edificio	100 m <sup>2</sup>
Apartamentos en edificio, femtoceldas por edificio	25
Número de usuarios	De acuerdo al escenario.
Numero de edificios	De acuerdo al escenario.
Posición eNB en plano cartesiano	X=0 Y=0
Posición de usuarios	De acuerdo al escenario.
Potencia de transmisión eNB	De acuerdo al escenario.
Potencia de transmisión HeNB	De acuerdo al escenario.
Potencia de transmisión Usuarios	23 dBm (200 mW)
Radio de macrocelda	500 m
Esquema de multiplexación	FDD
Planificador de paquetes	<i>Proportional fair</i>
Esquema de handover	Basado en potencia
Control de acceso	De acuerdo al escenario
Esquema de antenas	1x2
Aplicación, modelo de trafico	<i>Infinite Buffer</i>
Velocidad de usuario	0 Km/h, Posición constante
Factor de actividad	1
Factor de reuso de frecuencia	1
Frecuencia de operación	2000 Mhz
Tipo de enlace	Enlace de bajada ( <i>Downlink</i> )
Frecuencia de enlace de bajada	2110-2170 Mhz
Ancho de banda	5 Mhz
Uso de ancho de banda	Espectro compartido
Número de bloques de recurso	25
Modelo de propagación	Ver sección 3.1.3 A
Figura de ruido	2.5
Densidad espectral de ruido	-174 dBm
Antena eNB	Omnidireccional
Ganancia de antenas	No implementada
Numero de antenas de recepción usuarios	2



## CAPITULO 4

# ANALISIS DE RESULTADOS

Con el fin de realizar el análisis de una red heterogénea basada en LTE en función de la interferencia, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los escenarios mostrados en la tabla 3.5, los cuales se realizaron bajo la implementación del método Montecarlo, simulando 10000 veces con el objetivo de obtener resultados estadísticos representativos que permitan analizar la calidad y cobertura de la red mediante los siguientes resultados:

- **Histograma:** frecuencia con que una variable aleatoria se encuentra en un rango definido de valores, para este trabajo de grado se hace uso del rango de valores de SINR definido en la Tabla 3.2 a). A partir de ésta se obtienen la media, mediana, moda y desviación estándar.
- **Media:** representa la SINR promedio de la distribución de datos.
- **Mediana:** indica la SINR central de la distribución de datos.
- **Moda:** representa la SINR con mayor frecuencia absoluta de la distribución de datos.
- **Desviación estándar:** dispersión de la SINR respecto de la media de la distribución de datos.
- **Probabilidad de degradación del servicio:** haciendo uso de la función de distribución acumulativa se obtiene la probabilidad de que la SINR sea menor o igual al valor de SINR objetivo de -6 dB, con el fin de determinar el porcentaje de cobertura de los usuarios para cada escenario.
- **CCDF del *throughput*:** representa la probabilidad de que el *throughput* sea mayor o igual a un valor determinado, la CCDF se implementa utilizando el rango de valores definido en la Tabla 3.2 b).
- ***Throughput* promedio:** indica el *throughput* promedio de todas las iteraciones para cada uno de los escenarios simulados.

Para la representación y análisis de resultados, en primer lugar se muestra el histograma de la SINR con sus medidas de tendencia central y dispersión, que permiten realizar un análisis estadístico del fenómeno estudiado, a continuación se muestra la probabilidad de degradación del servicio con el fin de realizar un análisis de cobertura para el escenario simulado, por último se muestra la CCDF y promedio del *throughput* con el objetivo de estudiar la capacidad de la red.



## 4.1 INTERFERENCIA CROSS-LAYER

Para el estudio de la interferencia *cross-layer* en el enlace de bajada se perfilan dos tipos de escenarios dependiendo del nodo interferente y el nodo interferido, primero se tiene el caso donde el macrouusuario es interferido por los HeNB de las femtoceldas, segundo donde los femtousuarios son interferidos por el eNB de la macrocelda principal, para cada uno se realizan diferentes variaciones.

### 4.1.1 Macrouusuario Interferido por HeNBs

En el marco de la interferencia *cross-layer* en el enlace de bajada, se realiza el análisis de cobertura y capacidad para un macrouusuario que es interferido por femtoceldas que transmiten usando la misma porción de espectro, considerando el número de femtoceldas desplegadas y la posición del macrouusuario en la macrocelda.

#### 4.1.1.1 Efecto del número de femtoceldas

Como lo muestra la Figura 4-1, un macrouusuario y un grupo de edificios se ubican en posiciones aleatorias del plano cartesiano para cada simulación, el eNB ubicado en la posición  $X=0$  y  $Y=0$  transmite información al macrouusuario que a su vez es interferido por los HeNBs, los cuales transmiten en la misma porción de espectro bajo el esquema de acceso *close access*. Se varía el número de edificios para obtener 50, 100, 200 y 400 femtoceldas desplegadas en el escenario, con el fin de analizar el impacto del número de femtoceldas sobre el desempeño del macrouusuario a partir de la interferencia generada por los HeNBs.

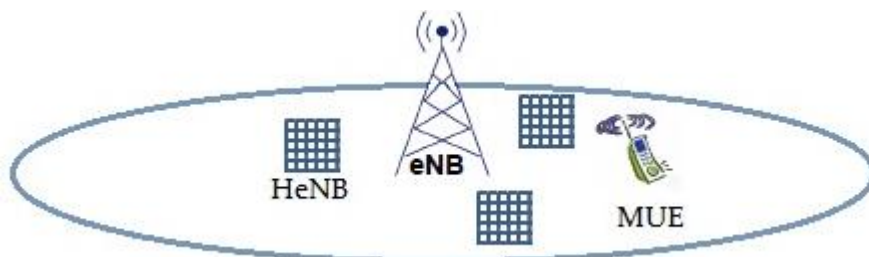


Figura 4-1 Escenario 4.1.1.1 (Efecto del número de femtoceldas).

La Figura 4-2 y la Tabla 4-1 muestran el histograma de la SINR y los resultados estadísticos obtenidos, donde se identifica un corrimiento hacia la izquierda y mayor dispersión de la distribución de datos a medida que se aumenta el número de femtoceldas.

Tabla 4-1 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.1.1).

Edificios (#Femtoceldas)	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
2 edificios(50)	12,57	12,50	8	13,885
4 edificios(100)	9,93	7,50	8	11,026
8 edificios(200)	2,94	2,50	3	14,695
16 edificios(400)	3,34	-2,50	-3	15,534

Se observa como la SINR del macrouusuario presenta los peores resultados a partir de 200 femtoceldas desplegadas, donde el corrimiento de los datos es significativo hacia la izquierda (media y mediana) y la dispersión de los datos (desviación estándar) aumenta



considerablemente, resaltándose el peor caso de 400 femtoceldas, para el cual el valor más frecuente de SINR obtenido es de -3 dB, muy cercano al límite de la SINR objetivo de -6 dB. Este efecto se genera por el aumento de la potencia de recepción de todos los nodos que comparten la misma porción de ancho de banda que el eNB, el aumento del número de femtoceldas genera un aumento de la interferencia y por lo tanto una disminución en la SINR de acuerdo a la ecuación 3-5.

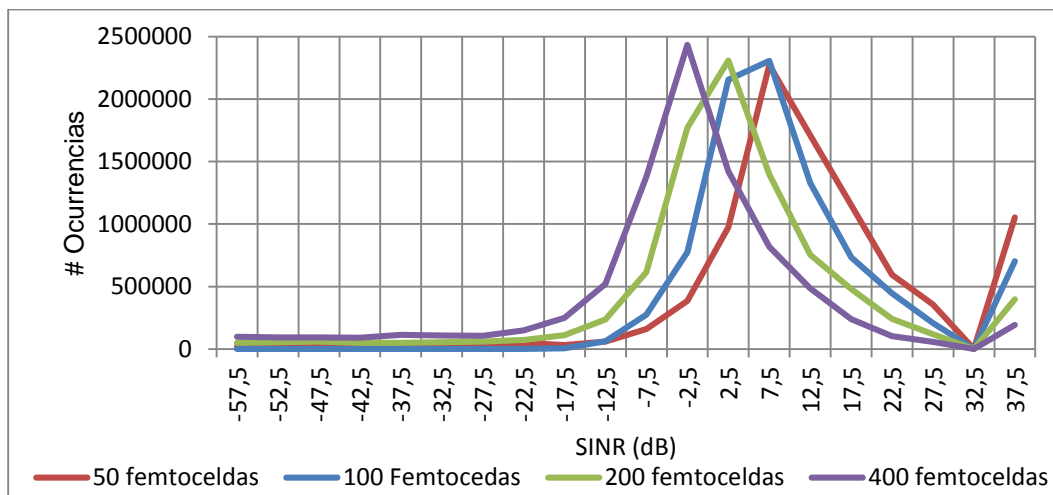


Figura 4-2 Histograma de SINR (Escenario 4.1.1.1).

Para la cobertura, en la Figura 4-3 se aprecia la probabilidad de degradación para los escenarios, donde para 50 femtoceldas desplegadas existe la probabilidad del 7,2% de no recibir adecuadamente el servicio, para 100, 200 y 400 femtoceldas se obtienen las probabilidades del 8,1%, 25,8% y 48,35% respectivamente. Nuevamente se resaltan los casos de 200 y 400 femtoceldas, cuya probabilidad de degradación del servicio es alta, lo cual pone de manifiesto la necesidad de un límite en el número de femtoceldas que pueden ser desplegadas en una celda. De acuerdo a los resultados para este escenario se recomienda no implementar más de 200 femtoceldas en una macrocelda con un radio de 500 m.

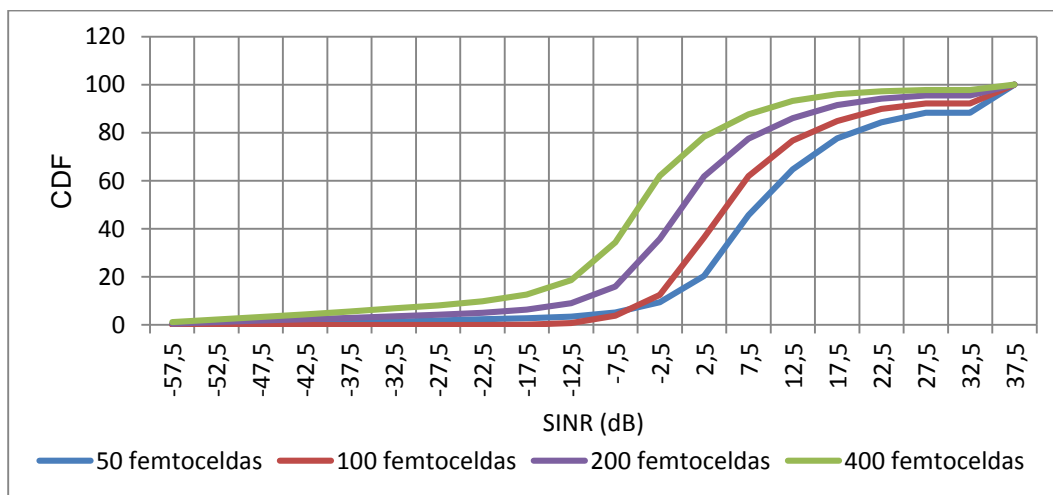


Figura 4-3 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.1.1).



En la Figura 4-4 se aprecia el *throughput* promedio del macrousuario para cada una de las variaciones, se observa cómo éste disminuye a medida que aumenta el número de femtoceldas, lo que resalta la dependencia directa que existe entre la interferencia percibida y la cantidad de información correctamente recibida. El valor máximo de *throughput* obtenido es de 7 Mbps para el caso de 50 femtoceldas desplegadas, el peor caso es de 2.3 Mbps con 400 Femtoceldas, se puede apreciar que duplicar el número de femtoceldas genera una disminución aproximada de 1.5 Mbps en el valor del *throughput* promedio.

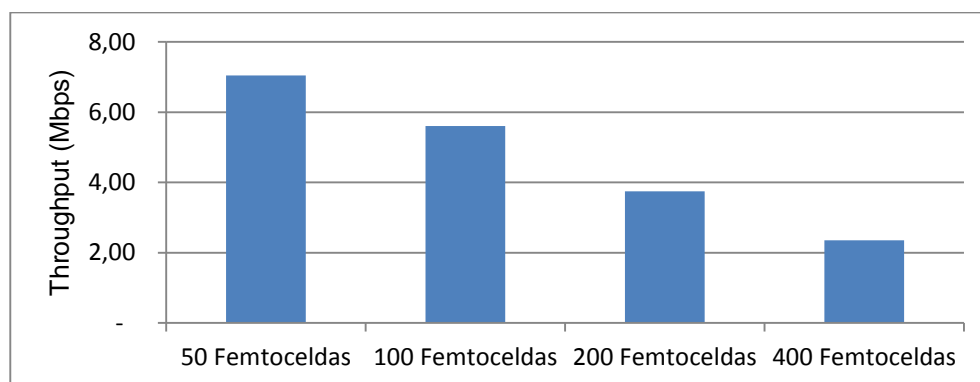


Figura 4-4 *Throughput* promedio (Escenario 4.1.1.1).

Así mismo la Figura 4-5 presenta por medio de la función de distribución acumulativa complementaria la probabilidad de que el *throughput* del macrousuario sea igual o mayor a cierto valor específico, a medida que aumenta el número de femtoceldas desplegadas la probabilidad de obtener velocidades mayores es cada vez más reducida, para los casos de 50 y 100 femtoceldas hay una probabilidad mayor al 95% de obtener velocidades de datos mayores a 0.6 Mbps, con 200 femtoceldas este valor disminuye a 75% y con 400 femtoceldas existe una probabilidad de tan solo el 50% de obtener velocidades de datos mayores de 0.6 Mbps. Aumentar de 50 a 400 el número de femtoceldas desplegadas, genera que la mitad de las comunicaciones establecidas por el macrousuario tengan las condiciones mínimas y la peor calidad de servicio.

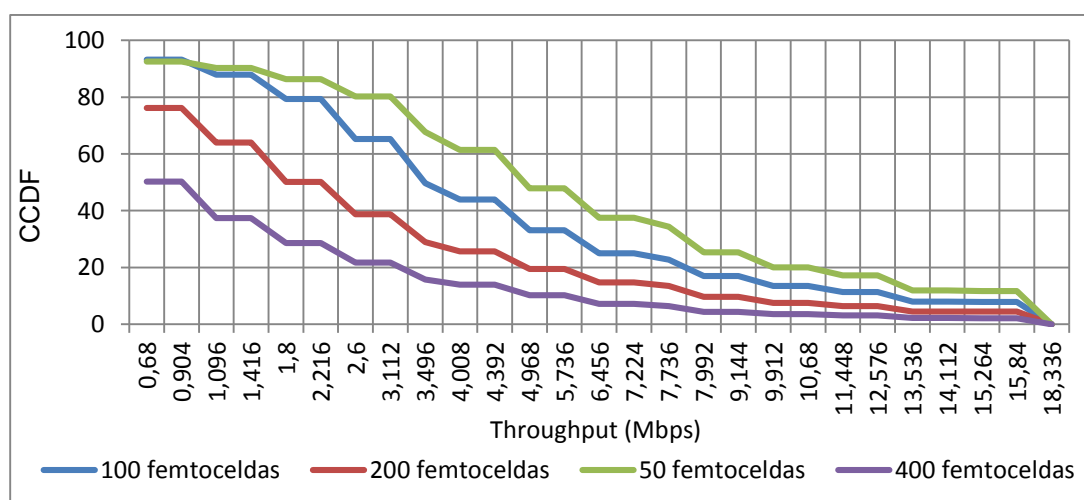


Figura 4-5 CCDF del *throughput* (Escenario 4.1.1.1).

#### 4.1.1.2 Efecto de la posición del macrouuario

En este escenario, se busca estudiar el efecto de la posición del macrouuario con respecto al eNB, al tiempo que es interferido por 100 femtoceldas con posición aleatoria alrededor del escenario. El eNB se ubica en el centro de la macrocelda, posición  $X=0$  y  $Y=0$ , el macrouuario se ubica en las posiciones (100,100), (200,200), (300,300) y (400,400) del plano cartesiano, como se aprecia en la Figura 4-6.

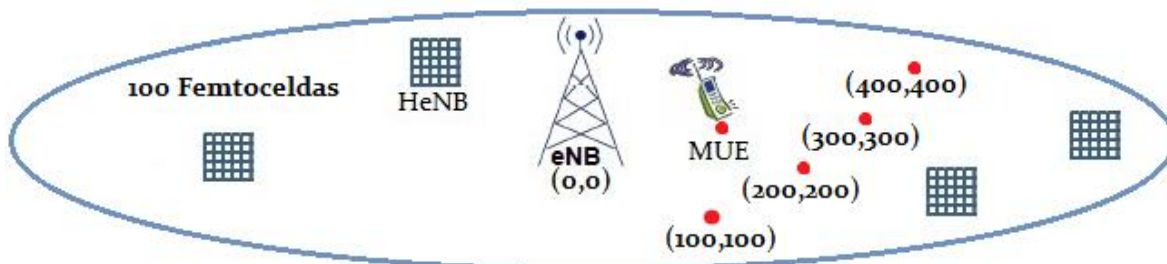


Figura 4-6 Escenario 4.1.1.2 (Efecto de la posición del macrouuario).

Tabla 4-2 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.1.2).

Posición (X,Y)	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
(100,100)	8,2159	12,50	12,50	11,99
(200,200)	2,5729	2,50	7,50	5,53
(300,300)	0,1379	2,50	2,50	4,15
(400,400)	-1,1930	-2,50	-2,50	3,34

La Figura 4-7 y la Tabla 4-2 muestran el histograma de la SINR y las medidas de dispersión y tendencia central obtenidas para este escenario, a medida que el macrouuario se aleja del eNB se reporta un corrimiento hacia la izquierda en los valores de la SINR, para la posición (100,100) la media tiene un valor de 8.2 dB, la mediana 12.50 dB y la moda 12.50 dB, para la posición más alejada de (400,400) estos valores se reducen a -1.1 dB, -2.5 dB y -2.5 dB para la media, mediana y moda respectivamente. Sin embargo, se aprecia por medio de la desviación estándar que la dispersión de los valores alrededor de la media tiende a concentrarse a medida que el usuario se aleja de la estación base, desde 11.9 dB en la posición (100,100) hasta 3.34 dB en la posición (400,400).

Lo anterior, teniendo en cuenta la ecuación 3.2, se presenta debido a que a medida que el macrouuario se aleja de la estación base recibe con menor intensidad la potencia de transmisión del eNB y por ende la potencia de recepción es cada vez más baja, lo que finalmente se ve reflejado en una reducción de la SINR, cuyo valor depende de la potencia de recepción del macrouuario y de la potencia de los HeNBs interferentes, de acuerdo a la ecuación 3.5.

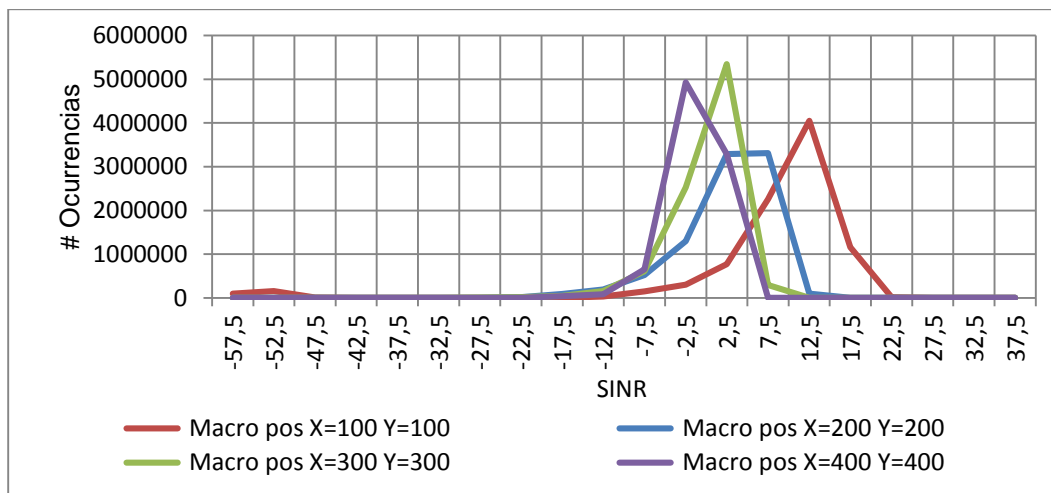


Figura 4-7 Histograma de SINR (Escenario 4.1.1.2).

En la Figura 4-8 se presenta la cobertura, observándose bajas probabilidades de degradación del servicio, siendo del 4% para la posición más cercana y del 20% para la más alejada, es decir, aunque el nivel de potencia de recepción del macrousuario es cada vez menor, es posible mantener una cobertura aceptable para los macrousuarios, según su posición en el escenario con 100 femtoceldas desplegadas.

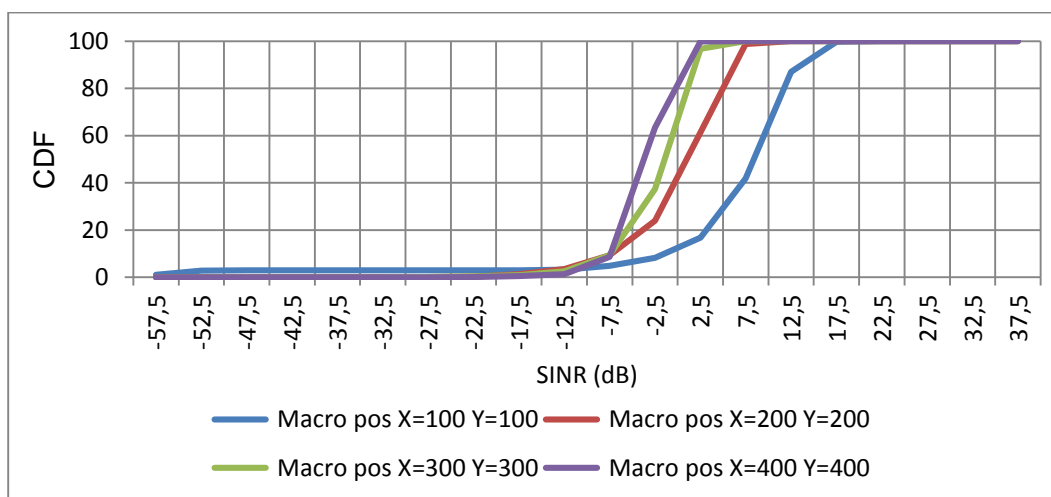


Figura 4-8 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.1.2).

La Figura 4-9 muestra cómo el *throughput* promedio del macrousuario disminuye según aumenta su distancia de la estación base, el cual es de 5.2 Mbps para la posición (100,100) y de 1.3 Mbps para la posición (400,400), se puede ver una reducción de más del 50% en el valor del *throughput* promedio debido al efecto de la distancia con respecto del eNB y 100 femtoceldas interferentes. En la Figura 4-10 se aprecia la CCDF del *throughput*, donde la probabilidad de obtener velocidades mayores de datos es cada vez más pequeña, resaltándose el caso de la posición más cercana donde la velocidad máxima alcanzada es de tan solo 7.5 Mbps, y para el caso de la posición (400,400) esta se reduce notablemente a 2.3 Mbps. Lo que denota la importancia de la cercanía del macrousuario al eNB a la hora de obtener altas velocidades de transmisión de datos, específicamente cuando es interferido por 100 femtoceldas alrededor del escenario.



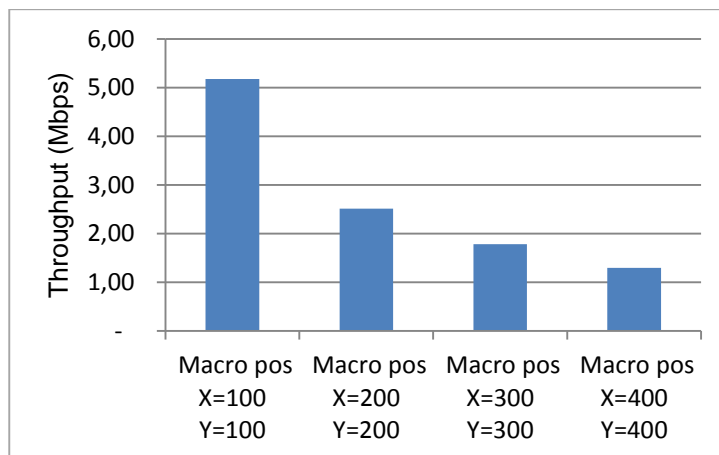


Figura 4-9 *Throughput* promedio (Escenario 4.1.1 B).

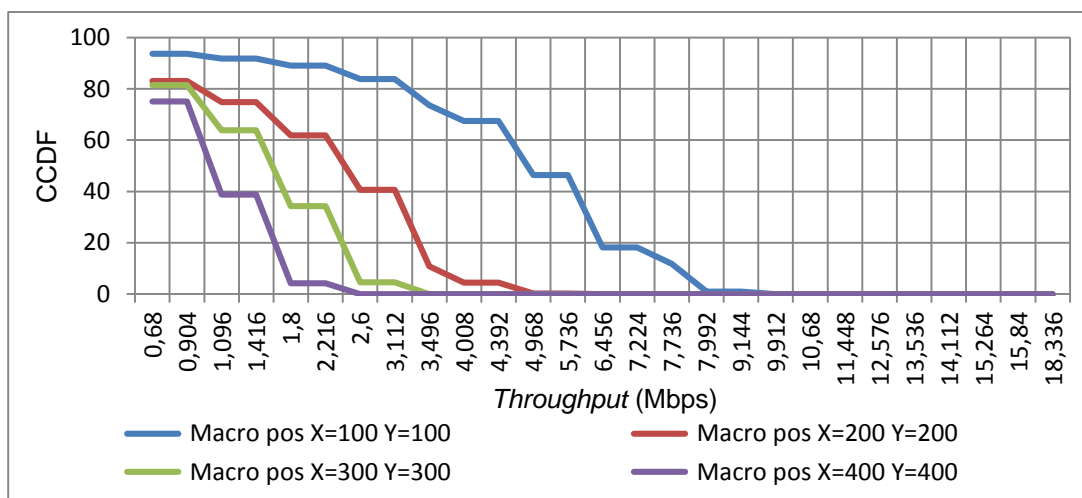


Figura 4-10 CCDF del *throughput* (Escenario 4.1.1.2).

#### 4.1.2 Femtousuario Interferido por el eNB

El segundo tipo de interferencia *cross-layer* en el enlace descendente se caracteriza porque los femtousuarios son interferidos por la estación base que transmite en la misma banda de espectro. El simulador LTE-Sim ubica los HeNBs al interior de un apartamento y a los femtousuarios en una posición aleatoria por dentro o fuera del mismo, además asocia un valor de pérdidas por penetración de paredes como un factor determinante en la interferencia percibida por los femtousuarios. De lo anterior, se evalúan dos escenarios, el primero en el que el femtousuario se mantiene dentro del apartamento y conectado a su HeNB, el segundo en el que el usuario se encuentra por fuera del apartamento pero se mantiene conectado a su HeNB. Se estudian los efectos causados por la potencia de los HeNB, el *handover* y la posición del edificio respecto a la estación base.

Se configura el *activity ratio* de un edificio en 10%, de tal forma que solo se encuentren activas la menor cantidad de HeNBs para reducir el efecto de la interferencia ocasionada por otras femtoceldas y garantizar el estudio de la interferencia generada por el eNB sobre los femtousuarios.

#### 4.1.2.1 Femtousuarios en el Interior del Apartamento Efecto de la posición del edificio y potencia de transmisión de HeNB

Cada apartamento tiene asociado un femtousuario que toma una posición aleatoria para cada simulación, con una probabilidad del 90% de encontrarse en las cercanías de su HeNB sin salir de su apartamento, en la Figura 4-11 se puede apreciar un apartamento con su HeNB en la posición central y las posibles posiciones que puede tomar el femtousuario, siempre en el interior del apartamento. Se considera que el femtousuario siempre está conectado al HeNB, por lo cual no se tiene en cuenta la posible conexión del femtousuario al eNB (*Handover* femtocelda a macrocelda) y se configura el esquema de control de acceso cerrado.



Figura 4-11 Posibles posiciones del femtousuario en el interior del apartamento.

Se busca evaluar el efecto de la potencia de transmisión del HeNB bajo distintas posiciones de los femtousuarios con respecto al eNB, mientras que son interferidos por este, por lo tanto se varía la potencia de transmisión de los HeNB en 0 y 20 dBm bajo diferentes posiciones del edificio, donde el eNB radia con la máxima potencia de transmisión de 43 dBm, como se muestra en la Figura 4-12.

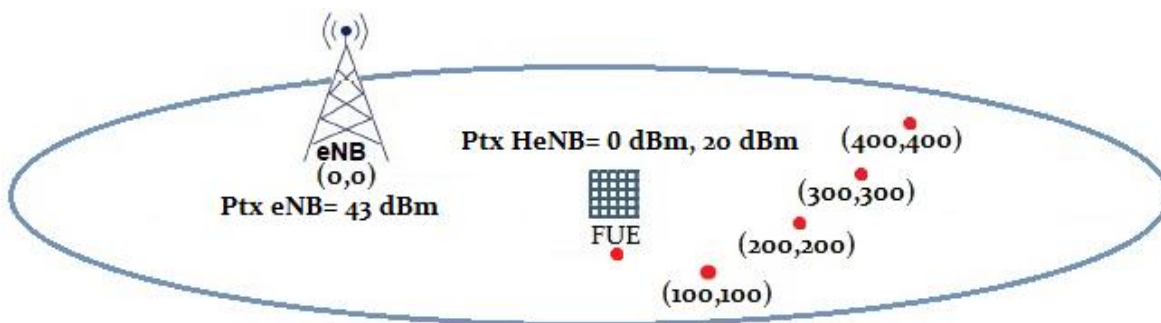


Figura 4-12 Escenario 4.1.2.1 (Efecto de la posición del edificio y potencia de transmisión de HeNB).



### A. Potencia de transmisión de HeNB=20 dBm

Tabla 4-3 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.1 A).

Posición (X,Y)	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
(25,25)	12,57	12,50	17,50	6,15
(100,100)	13,06	17,50	17,50	5,73
(200,200)	12,96	17,50	17,50	5,82
(300,300)	13,01	17,50	17,50	5,76
(400,400)	13,01	17,50	17,50	5,81

Cuando los femtousuarios se encuentran en el interior del apartamento con una potencia de transmisión de HeNB de 20 dBm, en la Tabla 4-3 y la Figura 4-13 se puede observar que no se presentan cambios representativos para las distintas variaciones. La media varía de 12.5 dB a 13.01 dB, valores muy cercanos entre sí, mientras que la moda y la mediana son iguales para todas las posiciones del edificio. La desviación estándar presenta el mayor valor de dispersión para la posición (25,25) de 6.15 dB, sin embargo la variación es pequeña a medida que el edificio se aleja del eNB. Los resultados de la Tabla 4-3 se corroboran en la Figura 4-13, donde se aprecia que para cada una de las posiciones del edificio la SINR muestra un comportamiento similar, cuyos valores se ubican en el rango de -2.5 dB a 27.5 dB para todas las variaciones. En otras palabras, la posición del edificio con respecto al eNB afecta levemente a los femtousuarios mientras estos se encuentren dentro del mismo.

Esto debido a que el femtousuario se encuentra protegido en el interior de su edificio, recibe la señal del HeNB adecuadamente y las pérdidas por penetración de paredes limitan considerablemente la potencia de transmisión interferente del eNB.

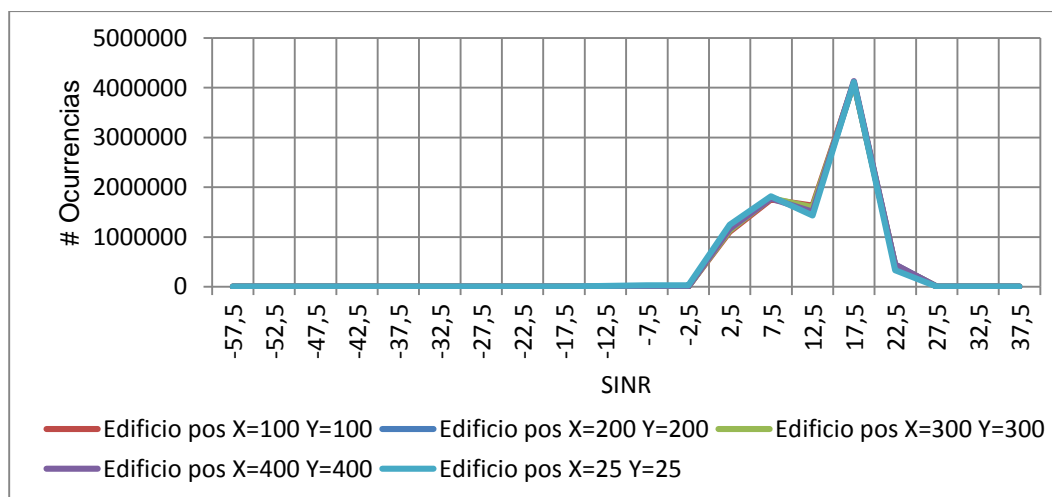


Figura 4-13 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.1 A).

La Figura 4-14 muestra que para el valor umbral de -6 dB de SINR la probabilidad de degradación del servicio para cada una de las variaciones es del 0.5%, es decir que los femtousuarios tienen garantizada la cobertura cuando se encuentran en el interior de su apartamento y la potencia de transmisión de HeNB es de 20 dBm.



Las pérdidas por trayecto son mínimas para la señal transmitida por el HeNB a su femtousuario asociado, debido a que la distancia entre ellos varía entre 0 y 7.5 metros, la probabilidad de que el femtousuario este por fuera de su apartamento es nula, es decir, nunca habrá una pared entre él y su HeNB, por lo tanto las pérdidas por penetración de paredes son inexistentes. Por otra parte, por lo menos siempre existe una pared entre el eNB y la zona donde está ubicado el femtousuario, lo que genera una caída considerable en la potencia de transmisión del eNB, por lo tanto, la potencia de transmisión interferente percibida por los femtousuarios es baja y la SINR se ve poco afectada de acuerdo a la ecuación 3-5, sin importar qué tan cercano se encuentre el edificio de la estación base.

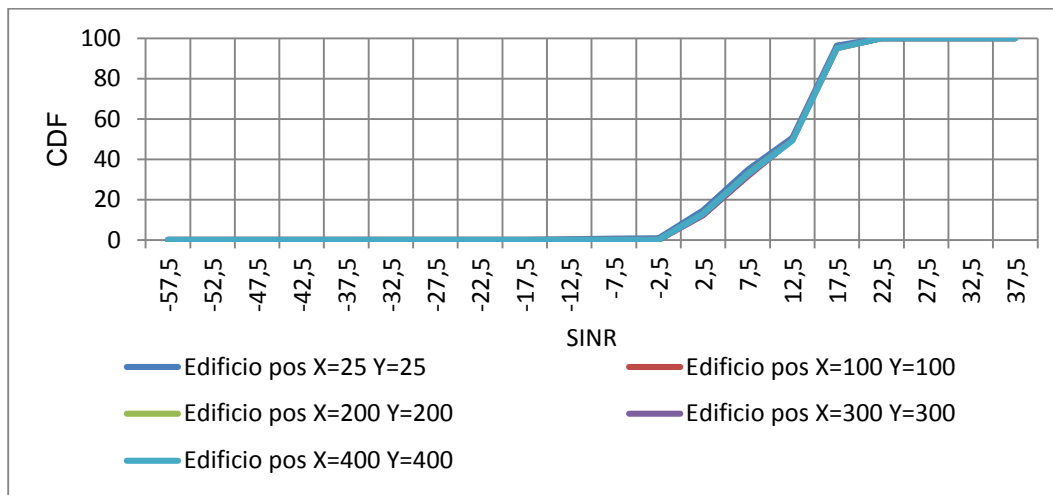


Figura 4-14 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.1 A).

La Figura 4-15 muestra el *throughput* promedio obtenido por los femtousuarios en el interior del edificio, se observa el menor valor de 6.05 Mbps para el caso de la posición (25,25) debido a la cercanía a la estación base, no obstante, para los demás casos se presentan valores de *throughput* similares con pequeñas variaciones, cuyo valor máximo se obtiene para la posición (100,100) con 6.25 Mbps de *throughput* promedio.

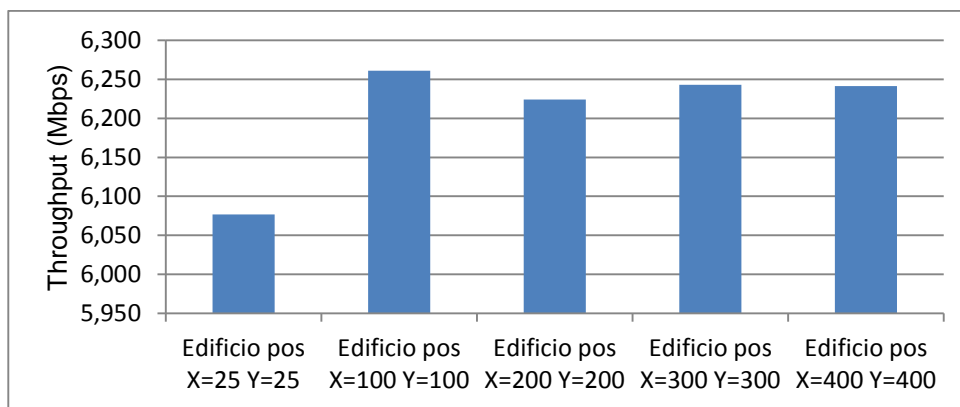


Figura 4-15 *Throughput* promedio (Escenario 4.1.2.1 A).

Lo anterior se comprueba observando la CCDF del *throughput* de la Figura 4-16, donde para cada una de las posiciones de edificio la probabilidad de obtener cierto valor de velocidad de transmisión presenta una tendencia equivalente para todos los casos, existe un 100% de probabilidad de obtener velocidades mayores a 1.8 Mbps, es decir, todas las



comunicaciones establecidas entre el femtousuario y su HeNB tienen velocidades de datos aceptables, lo que se traduce en un servicio con favorables condiciones de capacidad.

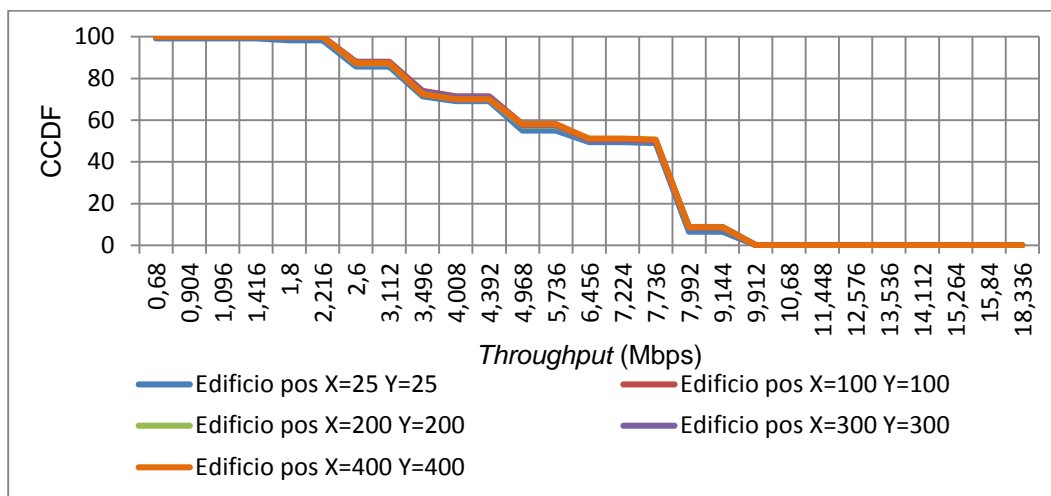


Figura 4-16 CCDF del *Throughput* (Escenario 4.1.2.1 A).

### B. Potencia de transmisión de HeNB=0 dBm

A continuación se muestran los resultados cuando los femtousuarios se encuentran en el interior del edificio con una potencia de transmisión de HeNB de 0 dBm bajo distintas posiciones de edificio con respecto del eNB.

En la Tabla 4-4 se observan los resultados estadísticos para las posiciones de (100,100) hasta la (400,400), se observa una tendencia similar en cuanto a la media, moda, mediana y desviación estándar, los cuales se encuentran dentro de valores de SINR aceptables para la prestación del servicio.

Tabla 4-4 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.1 B).

Posición (X,Y)	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
(25,25)	7,14	7,50	12,50	8,42
(100,100)	13,02	17,50	17,50	5,78
(200,200)	13,08	17,50	17,50	5,79
(300,300)	13,04	17,50	17,50	5,79
(400,400)	13,03	12,50	17,50	5,76

Sin embargo, para el caso donde el edificio y por ende los femtousuarios se encuentran en la posición más cercana al eNB de (25,25), se registra un cambio representativo en los valores de SINR percibidos cuyo media es de 7.14 dB, casi la mitad de lo que se registra para los demás casos. Lo anterior se puede ver detalladamente en el histograma de SINR de la Figura 4-17, donde se presenta un marcado corrimiento hacia la izquierda en la media, moda y mediana para la posición (25,25), mientras que las posiciones más alejadas presentan un comportamiento similar de SINR entre el rango de -2.5 dB y 27.5 dB. Lo anterior teniendo en cuenta las ecuaciones 3.2 y 3.5, donde la recepción de la señal del HeNB con un nivel más bajo de potencia y la disminución en las pérdidas por trayecto de la



señal del eNB, facilitan la degradación de la señal deseada del HeNB frente a la señal interferente de la estación base.

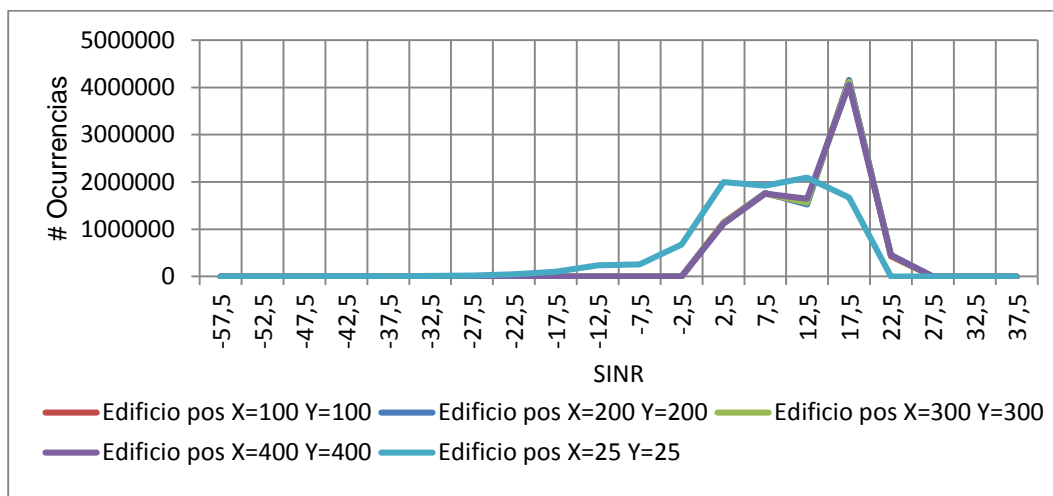


Figura 4-17 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.1 B).

Para el caso de la cobertura de los femtousuarios, de acuerdo a la Figura 4-18 se aprecia que para las posiciones de (100,100) en adelante, la probabilidad de degradación del servicio y por lo tanto de no cobertura es del 0%, mientras que en la posición (25,25) esta se incrementa al 6%. Con los resultados se evidencia como la posición del femtousuario y la potencia de transmisión de su HeNB juegan un papel importante en el desempeño y calidad del servicio recibido.

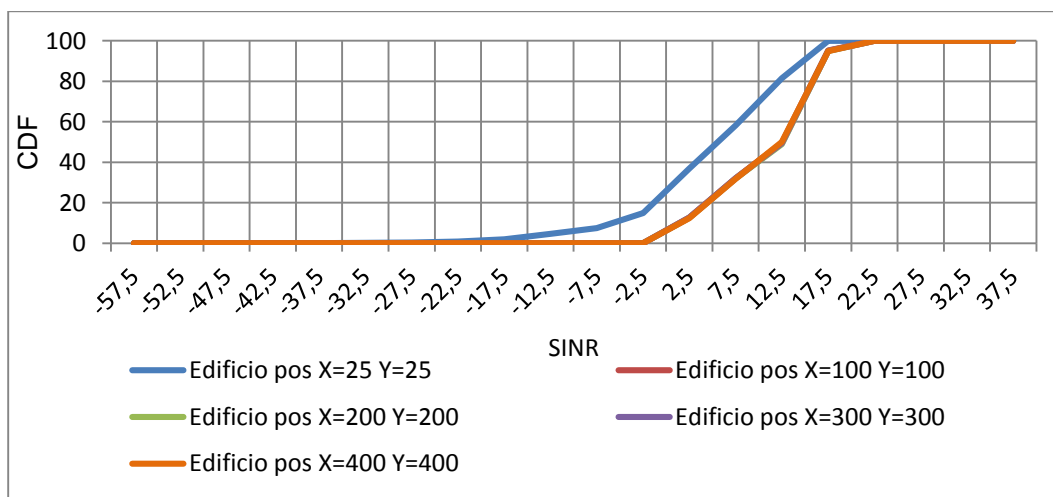


Figura 4-18 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.1 B).

El *throughput* promedio que se muestra en la Figura 4-19, presenta un desempeño equivalente para las posiciones de (100,100) hasta la (400,400) con valores de *throughput* de 6 Mbps aproximadamente, se aprecia el menor valor para el caso más cercano al eNB en la posición (25,25) con 4.5 Mbps, aunque es resaltable que dicho valor se encuentra en un nivel no muy inferior con respecto a los otros casos.

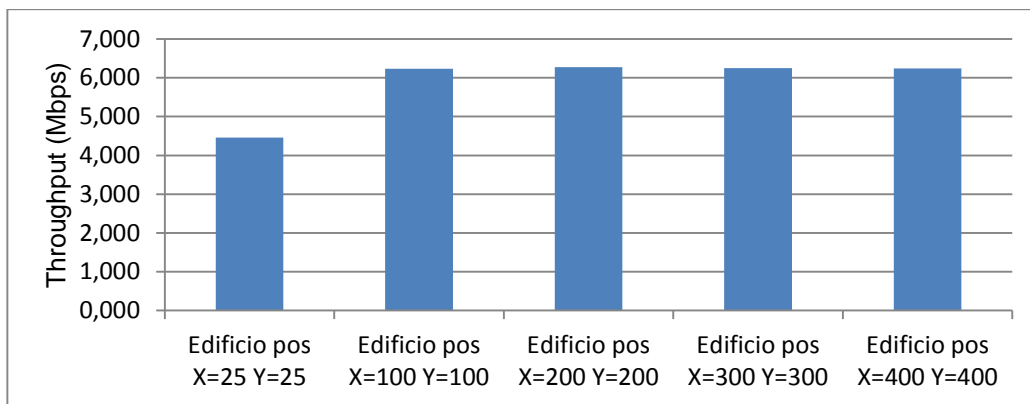


Figura 4-19 *Throughput* promedio (Escenario 4.1.2.1 B).

Así mismo la CCDF del *throughput* mostrada en la Figura 4-20 indica que las probabilidades para obtener ciertas velocidades de transmisión para las posiciones de (100,100) hasta (400,400) son parecidas entre sí, para las posiciones de (100,100) hasta la (400,400) hay una probabilidad del 100% de obtener velocidades de datos mayores a 1.8 Mbps, para la posición (25,25) este valor disminuye al 75%. Si se observan las condiciones mínimas de capacidad, en la posición (25,25) se tiene una probabilidad del 90% de obtener velocidades mayores a 0.6 Mbps, lo que demuestra que a pesar de que el edificio esté muy cerca del eNB, las comunicaciones del femtousuario que no sale de su apartamento no se ven afectadas severamente, ya que por lo menos el 90% obtienen velocidades mayores a la mínima de 0.6 Mbps.

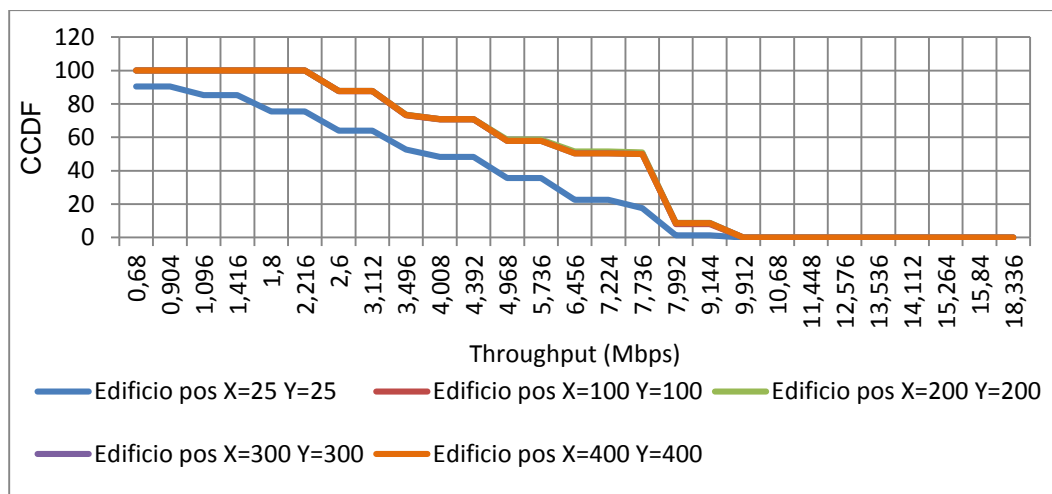


Figura 4-20 CCDF del *Throughput* (Escenario 4.1.2.1 B).



#### 4.1.2.2 Femtousuarios en el exterior del Apartamento

Un usuario se encuentra en el exterior de su apartamento, donde existe la posibilidad de que este se conecte a su HeNB o que realice el proceso de *handover* para conectarse a la macrocelda. En la Figura 4-21 se muestra un femtousuario que tiene la probabilidad del 90% de encontrarse en el exterior de su apartamento, se simulan distintos escenarios teniendo en cuenta la potencia de transmisión del HeNB, la posibilidad de conexión a la macrocelda (*Handover On* y *Off*) y la posición del edificio con respecto al eNB, el cual radia a la mayor potencia de transmisión, como se aprecia en la Figura 4-22.



Figura 4-21 Posibles posiciones del Femtousuario en el exterior del apartamento.

Se busca realizar la comparación entre las distintas alternativas que tiene un femtousuario al encontrarse en el exterior de su apartamento, tales como potencia de transmisión de HeNB y posibilidad de realizar *handover* a la macrocelda, mientras es interferido por el eNB y se encuentra ubicado en las posiciones (25,25) y (400,400) con respecto a éste.

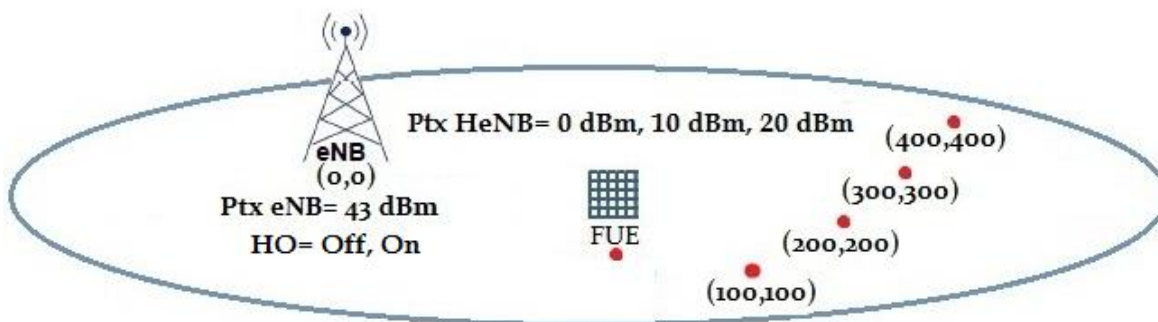


Figura 4-22 Escenario 4.1.2.2 (Efecto de la posición del edificio, potencia y Handover de los femtousuarios en el exterior del edificio)

##### A. Posición (X=25 Y=25)

Los femtousuarios se encuentran en el exterior de su apartamento, ubicado en la posición (25,25) con respecto al eNB, se tienen en cuenta los casos donde los femtousuarios tienen la posibilidad de conectarse a la macrocelda (HO *on*) o no tienen permitido realizar el procedimiento de traspaso (HO *off*), lo anterior bajo distintos valores de potencia de transmisión de HeNBs.





Tabla 4-5 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.2 A).

Ptx HeNB y HO	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
0 dBm HO off	-23,41	-22,50	-22,50	7,053
10 dBm HO off	-20,36	-22,50	-22,50	6,80
20 dBm HO off	-17,37	-17,50	-22,50	8,53
0 dBm HO on	-2,44	-12,50	-22,50	23,52
10 dBm HO on	-7,39	17,50	-22,50	21,13
20 dBm HO on	-10,76	-17,50	-22,50	17,54

La Tabla 4-5 muestra los resultados estadísticos y la Figura 4-23 representa el histograma de la SINR obtenidos para este escenario. Cuando el *handover* está desactivado se puede ver que la media, mediana y moda presentan valores negativos de SINR inferiores a -17 dB, siendo el peor caso donde la potencia de transmisión de HeNB es de 0 dBm. Cuando los femtousuarios tienen permitido conectarse a la macrocelda se puede apreciar una mejora en los valores de la media y la mediana, sin embargo, la moda es la misma para todos los escenarios, es decir que el valor de SINR más frecuente fue de -22,50 dB, valor que está muy por debajo del umbral de degradación del servicio.

Teniendo en cuenta la desviación estándar se puede ver cómo la SINR presenta una mayor dispersión para las situaciones donde el *handover* está activado, esto debido a que en las diferentes simulaciones los femtousuarios bien pudieron haberse conectado su HeNB o por el contrario pudieron haber realizado el procedimiento de traspaso hacia el eNB.

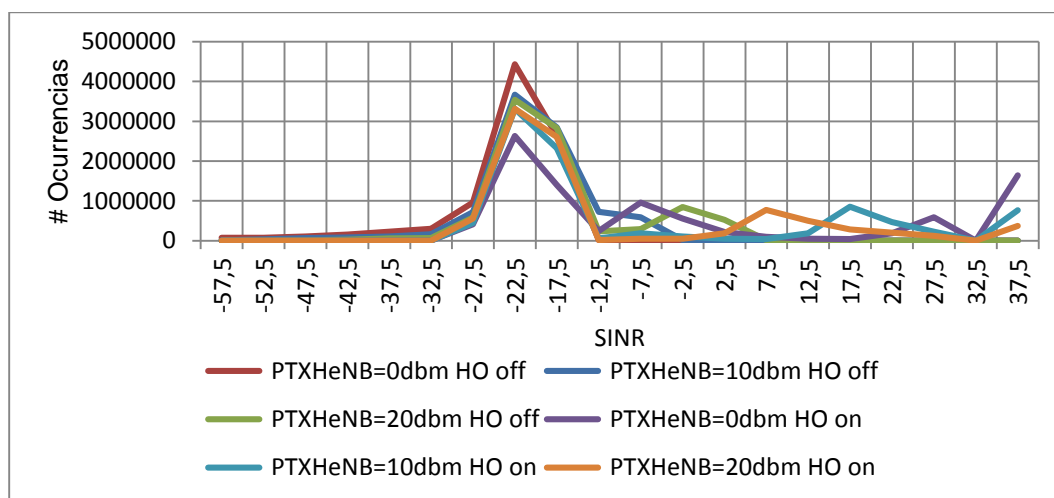


Figura 4-23 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.2 A).

La cobertura representada con la probabilidad de degradación de la Figura 4-24 muestra valores altos para todos los escenarios, cuando el *handover* está activo y la potencia de HeNB es de 0 dBm se presenta el mejor caso con una probabilidad de degradación del 62%, finalmente dicha probabilidad tiende a aumentar hasta los casos donde el *handover* no está activo, cuyos valores de probabilidad de degradación son del 100%, es decir, todos los usuarios se encuentran sin cobertura y sin garantías de una prestación óptima del servicio.



Se debe recordar que:

LTE-Sim no tiene implementado un mecanismo de detección de umbral que distinga el valor de SINR objetivo de -6 dB, el cual corresponde al mínimo valor de CQI y por consiguiente el mínimo valor de TBS, esta característica se encuentra en proceso de desarrollo. Cuando se registra una SINR menor al valor umbral el simulador continua asignando valores de CQI y TBS a los usuarios, a pesar de que en realidad LTE no realiza dicho proceso de asignación. Por esta razón, para los escenarios donde la probabilidad de degradación sea alta, los valores de throughput obtenidos no representan valores reales en la práctica y se consideran representativos para el análisis de capacidad de acuerdo a las características simuladas.

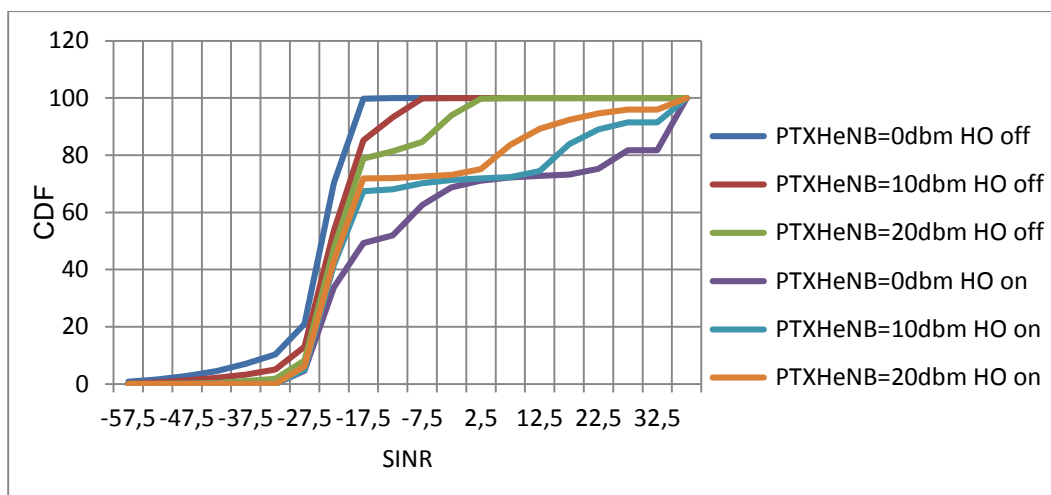


Figura 4-24 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.2 A).

De acuerdo a los resultados de probabilidad de degradación, el desempeño de capacidad que se presenta a continuación se considera representativo, puesto que para algunos escenarios la cobertura es prácticamente nula.

El *throughput* promedio mostrado en la Figura 4-25 indica el desempeño de capacidad para los femtousuarios, se presentan los peores casos cuando el *handover* está desactivado y éstos perciben mayor interferencia por parte del eNB. Cuando el *handover* está activo los femtousuarios obtienen mejores desempeños de *throughput*, debido a que éstos se encuentran cercanos al eNB, donde la situación más favorable es conectarse al eNB y la potencia ahora interferente de los HeNBs sea baja. Teniendo en cuenta la ecuación 3.2, los resultados obtenidos se deben a la ubicación en el exterior del edificio de los femtousuarios, cuyas pérdidas por penetración por paredes disminuyen la potencia de transmisión de los HeNBs y ésta no es suficiente para gestionar una conexión con una calidad aceptable, además, las pérdidas por trayecto de la señal del eNB son pequeñas debido a la cercanía de este a los femtousuarios, la cual cuenta con un nivel alto para ser una señal generadora de interferencia o por el contrario ser la señal deseada.

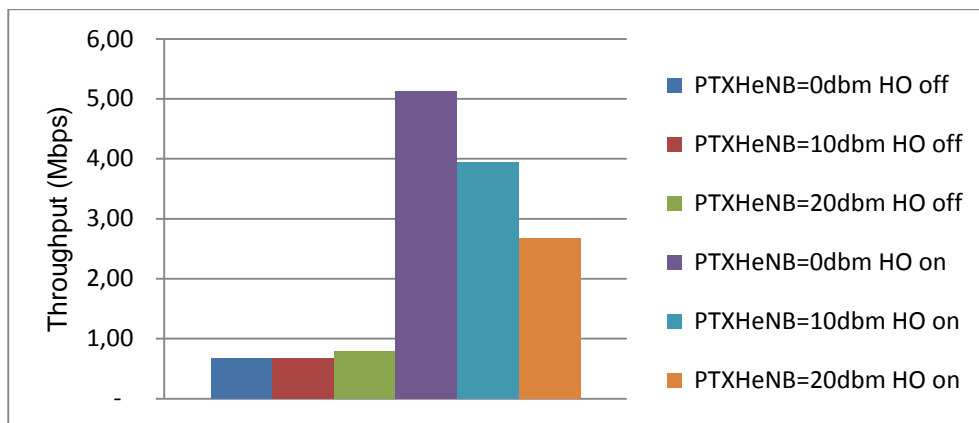


Figura 4-25 Throughput promedio (Escenario 4.1.2.2 A).

Para complementar el resultado anterior, en la Figura 4-26 se aprecia la CCDF del *throughput*, donde se observa como la probabilidad de obtener cierto valor de velocidad de transmisión aumenta a medida que la potencia de HeNB disminuye y el *handover* se encuentra activado, cuyo mejor caso se presenta para la potencia de transmisión de 0 dBm, cuya probabilidad de obtener valores de *throughput* mayores o iguales a 0.6 Mbps es del 34%. Por otra parte si el *handover* se encuentra desactivado la probabilidad disminuye radicalmente y es deseable que la potencia de HeNB sea la mayor posible, para los casos de 0 y 10 dBm la probabilidad de obtener velocidades de transmisión mayores o iguales a 0.6 Mbps es del 0%, lo cual indica la imposibilidad de establecer comunicación.

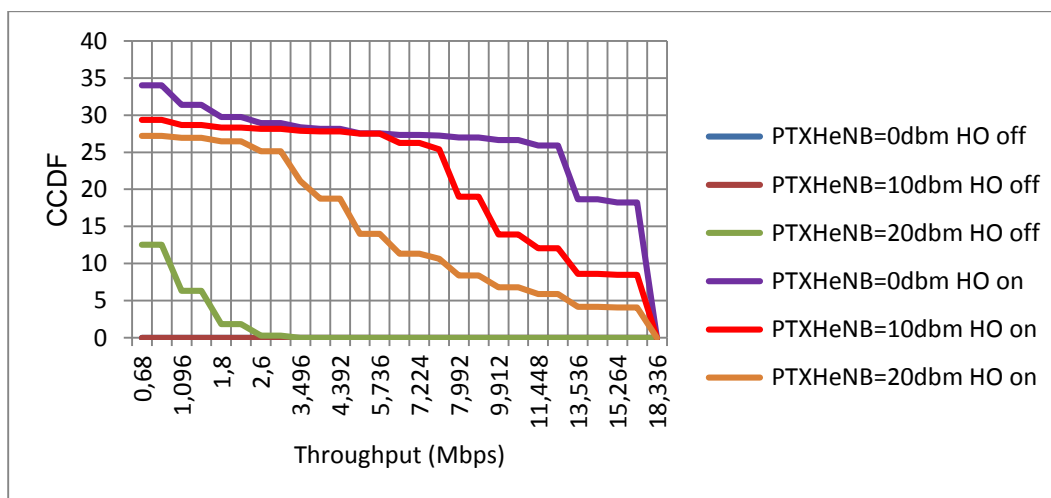


Figura 4-26 CCDF del *throughput* (Escenario 4.1.2.2 A).



## B. Posición (X=400 Y=400)

A continuación se exponen los resultados para el caso donde el edificio y los femtousuarios se encuentran más alejados del eNB, en la posición (400,400).

Tabla 4-6 Resultados estadísticos (Escenario 4.1.2.2 B).

Ptx HeNB y HO	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
0 dBm HO <i>off</i>	-12,28	-17,50	-22,50	14,38
10 dBm HO <i>off</i>	-11,87	-17,50	-22,50	15,32
20 dBm HO <i>off</i>	-11,77	-17,50	-22,50	15,57
0 dBm HO <i>on</i>	-16,71	-17,50	-22,50	7,67
10 dBm HO <i>on</i>	-11,60	-17,50	-22,50	15,52
20 dBm HO <i>on</i>	-11,66	-17,50	-22,50	15,69

La Tabla 4-6 muestra los resultados estadísticos para el histograma de SINR de la Figura 4-27, donde se aprecia como la media y mediana presentan valores similares para cada una de las simulaciones, -17.50 y -22.5 dB de SINR respectivamente, mientras que la media y desviación estándar muestran distintos valores pero con pequeñas variaciones entre sí.

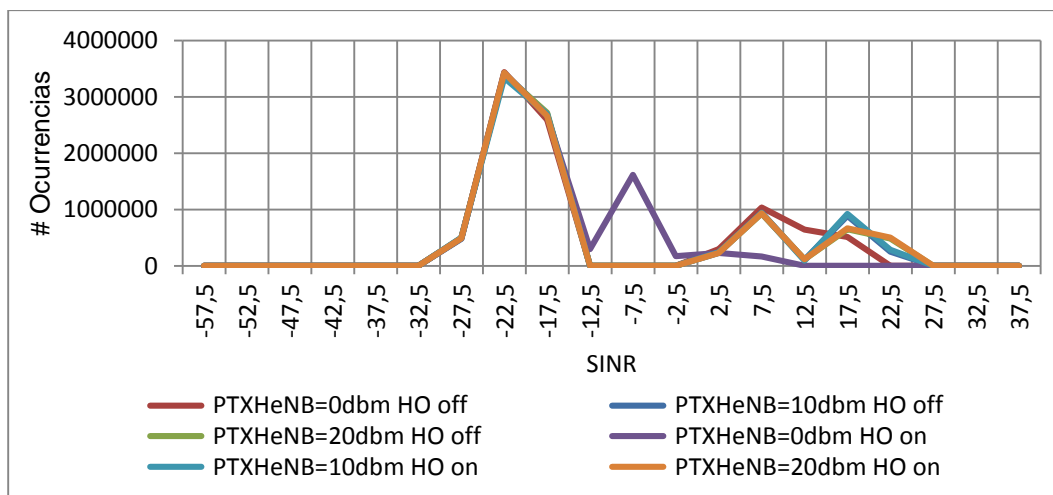


Figura 4-27 Histograma de SINR (Escenario 4.1.2.2 B).

Al analizar la cobertura, de acuerdo a la CDF de la SINR mostrada en la Figura 4-28, se observa cómo para la mayoría de variaciones la probabilidad de degradación del servicio es de aproximadamente el 70%, presentándose el peor desempeño para el caso de 0 dBm de potencia de transmisión de HeNB y *handover* activado, con una probabilidad de degradación de 90%. Esto debido a que los femtousuarios tienen una potencia de HeNB muy baja para recibir la señal de su HeNB, a su vez el eNB se encuentra demasiado lejos para brindar una buena calidad de señal.

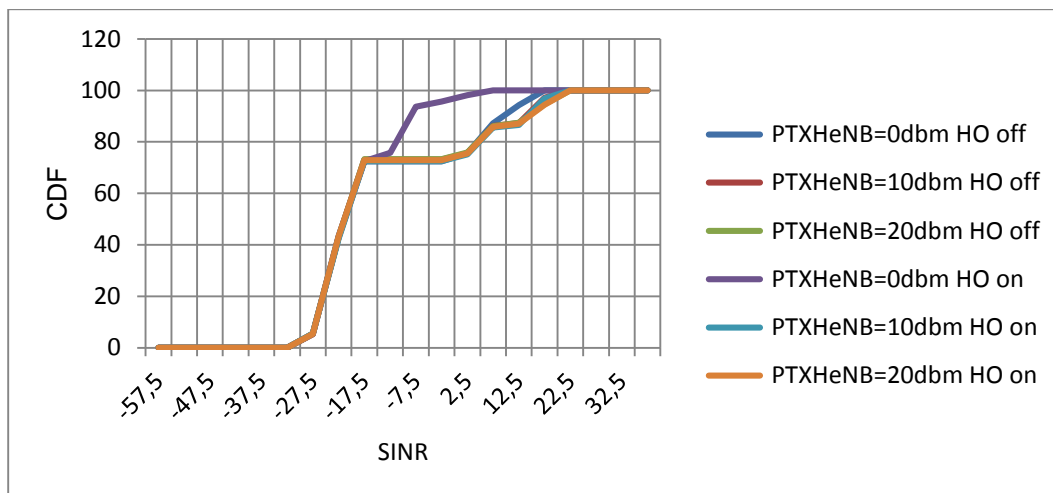


Figura 4-28 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.2 B).

Teniendo en cuenta que la probabilidad de degradación para todos los escenarios oscila entre el 70% y 90%, el desempeño de capacidad que se muestra a continuación constituye una medida aproximada y representativa.

La Figura 4-29 muestra el *throughput* promedio, donde se observan valores bajos en relación con escenarios anteriores, registrándose el peor caso cuando los femtousuarios tienen una potencia de transmisión de 0 dBm y el *handover* hacia la macrocelda está activo, con un valor de 0.7 Mbps, el mejor caso se obtiene para 20 dBm y *handover* activado, con un valor de 2.3 Mbps.

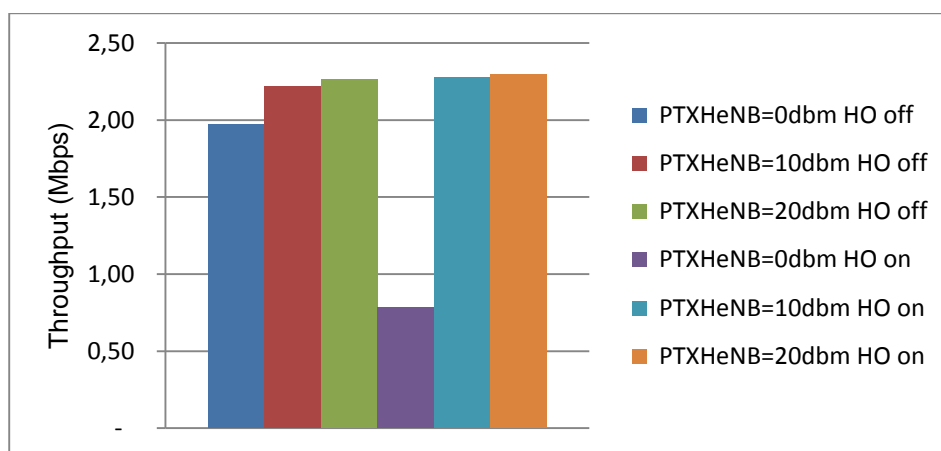


Figura 4-29 *Throughput* promedio (Escenario 4.1.2.2 B).

La CCDF del *throughput* mostrada en la Figura 4-30 indica que la probabilidad de obtener la menor velocidad de transmisión de 0.6 Mbps es del 27% para la mayoría de las variaciones, y del 4% para el caso de potencia de transmisión de 0 dBm de HeNB y *handover* activo.

Los anteriores resultados evidencian la importancia de contar con esquemas de mitigación de interferencia y mecanismos eficientes de *handover*.

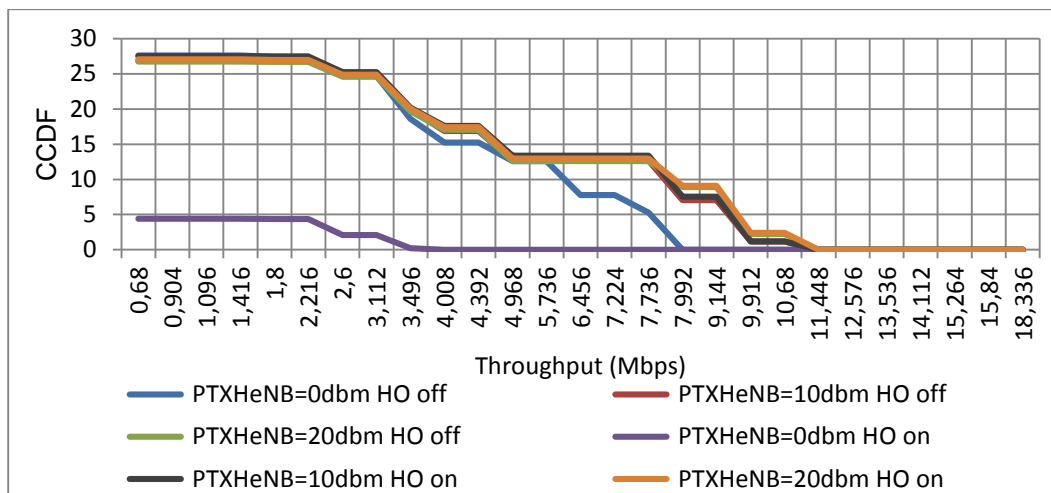


Figura 4-30 CCDF del throughput (Escenario 4.1.2.2 B).

#### 4.1.2.3 Comparación de Capacidad y Cobertura de Femtousuarios en el Interior y Exterior del Apartamento

Teniendo en cuenta los resultados de los escenarios anteriores de la *interferencia cross-layer* para el caso de femtousuarios interferidos por el eNB, se realiza un estudio comparando la posición de los usuarios al interior y exterior de su apartamento bajo diferentes posiciones con respecto al eNB, mientras los HeNB radian con una potencia de transmisión de 0 dBm y el handover hacia la macrocelda se encuentra desactivado.

En la Figura 4-31 se observa cómo la probabilidad de degradación del servicio aumenta cuando los usuarios están en el exterior de su edificio y la distancia al eNB disminuye, la cual es del 73% para la posición (400,400), el peor desempeño se obtiene para la posición (25,25), cuya probabilidad de que los femtousuarios se encuentren fuera de cobertura es del 100%. En contraste, cuando los femtousuarios están en el interior de su apartamento se obtienen las probabilidades de degradación del servicio de 0% y 7% en las posiciones (400,400) y (25,25) respectivamente.

Para el caso de la capacidad, se puede apreciar cómo en la CCDF del *throughput* mostrada en la Figura 4-32 la probabilidad de obtener velocidades mayores se reduce a medida que la distancia al eNB disminuye, presentándose los peores casos cuando los femtousuarios se encuentran en el exterior del apartamento, por ejemplo, en la posición (400,400) se alcanza la probabilidad del 27% de obtener velocidades mayores o iguales a 0.6 Mbps, mientras que para la posición (25,25) se tiene el 0% de probabilidad de alcanzar dicha velocidad. Por otra parte, cuando los femtousuarios se encuentran en el interior de su apartamento en las posiciones (400,400) y (25,25), las probabilidades de obtener velocidades mayores o iguales a 0.6 Mbps son del 100% y 90%.

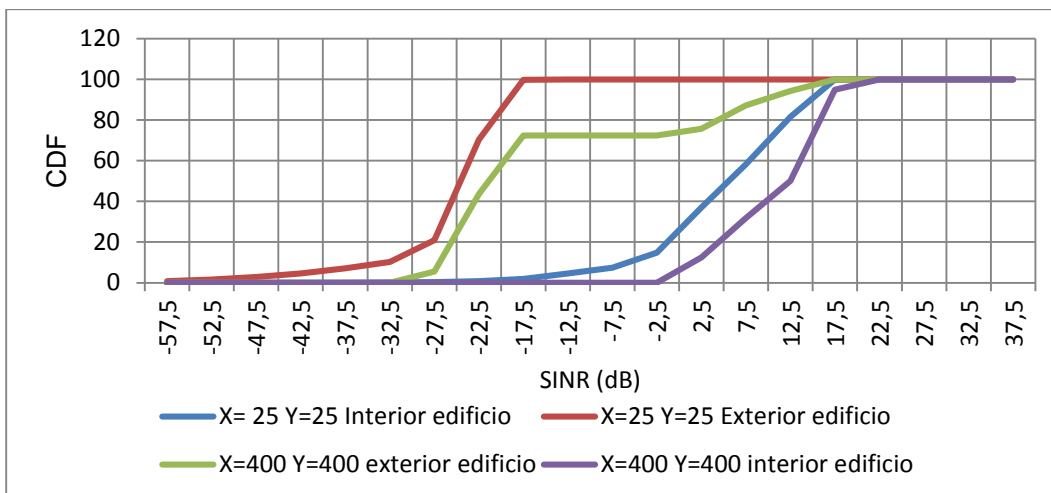


Figura 4-31 Probabilidad de degradación (Escenario 4.1.2.3).

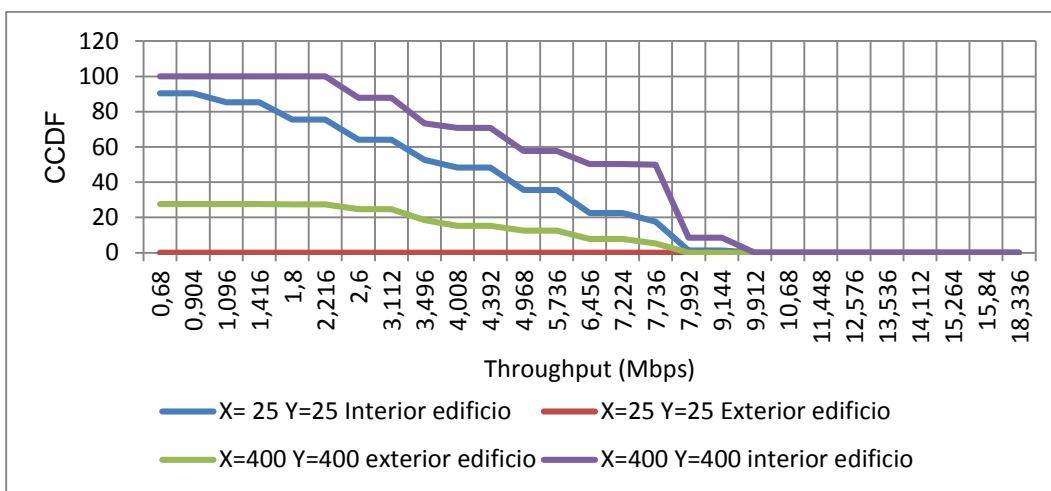


Figura 4-32 CCDF del *Throughput* (Escenario 4.1.2.3).

Los resultados anteriores muestran cómo las pérdidas por absorción de paredes (interior o exterior de edificio) pueden afectar drásticamente la cobertura y capacidad de un usuario, así mismo se deben establecer mecanismos eficientes para la gestión de potencia de HeNB y *handover* según sea la posición con respecto al eNB de la macrocelda.

### 4.1.3 Prueba de Movilidad de Macrouuario

El simulador LTE-Sim permite el uso de la movilidad de usuario con diferentes velocidades y modos de trayectoria, con el fin de aprovechar esta funcionalidad y realizar un estudio de la interferencia percibida por el macrouuario debido a los HeNB, se coloca un usuario a recorrer en línea recta a través del eje X un trayecto de aproximadamente 330 m con una velocidad de 3 km/h, comenzando en la posición (-155,173) y finalizando en la (178,173) del plano cartesiano, en donde se encuentra con 5 edificios ubicados desde la posición (-155,183) hasta la (178,183), los cuales contienen HeNB radiando a una potencia determinada, como se muestra en la Figura 4-33. Se estudian los casos donde los HeNB

se encuentran bajo el esquema de acceso *close access* y *open access*. Cabe recordar que este escenario no se rige bajo los criterios de simulación tipo Montecarlo.

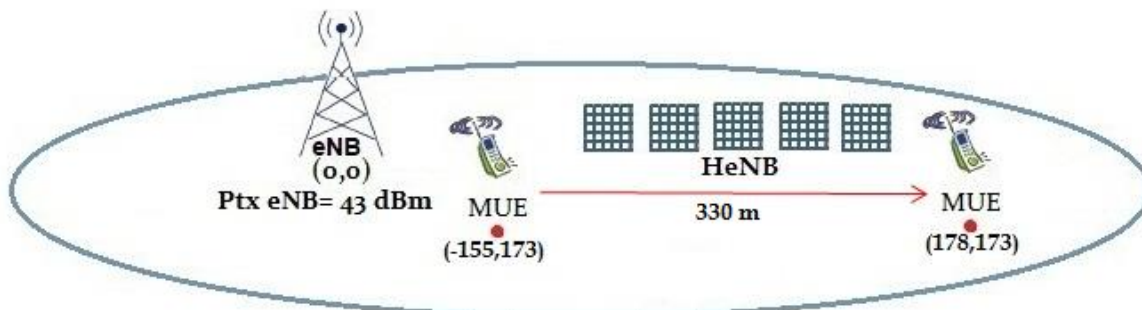


Figura 4-33 Escenario 4.1.3 (Prueba de Movilidad de Macrousuario)

#### 4.1.3.1 Close access

En la Figura 4-34 se muestra la SINR percibida por el macrousuario durante su recorrido paralelo a los edificios a través del eje X, la cual varía para cada una de las potencias de transmisión de los HeNB interferentes, donde se obtienen los mejores resultados para el caso de 0 dBm y los peores para 20 dBm, denotándose la importancia de la gestión correcta de la potencia de transmisión de los HeNB para mitigar la interferencia percibida por los actores del escenario.

Debido a la cantidad de femtoceldas desplegadas paralelas al macrousuario, en el caso de 20 dBm de potencia de transmisión, se obtienen valores de SINR comprendidos entre 0 dB y -30 dB, se resaltan los picos donde la SINR presenta los valores más bajos, correspondientes a los puntos donde los HeNBs interfieren con mayor intensidad al femtousuario, con valores de hasta -30 dB donde no se alcanza el valor de SINR objetivo de -6 dB y por lo tanto el macrousuario se encuentra en condición de no cobertura. Con 0 dBm de potencia de transmisión de HeNB, la SINR oscila entre los 0 dB y 20 dB, es decir que el macrousuario se mantiene en la zona de SINR objetivo de -6 dB y por lo tanto en región de cobertura.



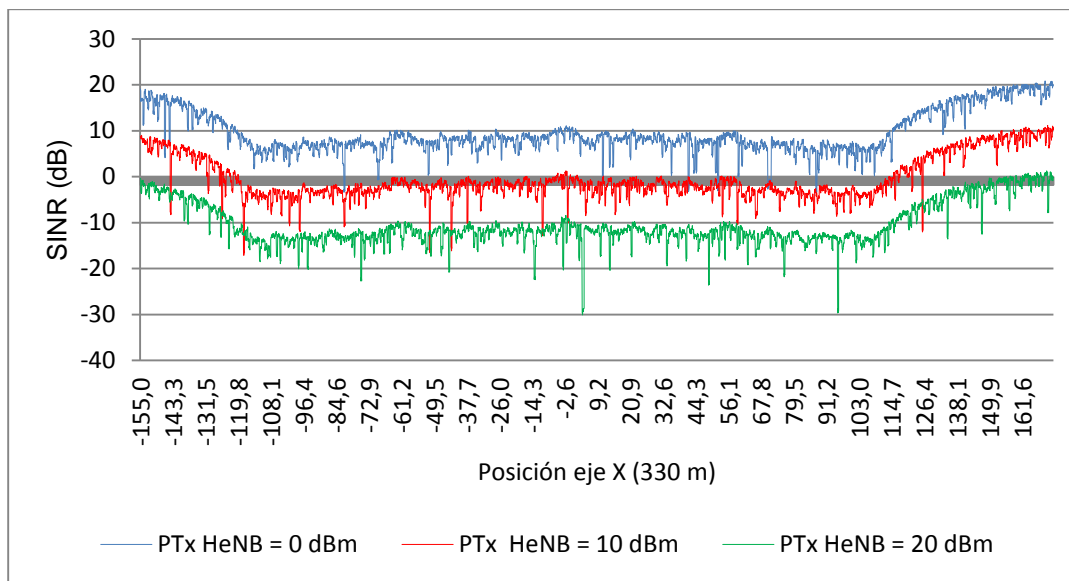


Figura 4-34 SINR vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 A).

En la Figura 4-35 se aprecia el *throughput* obtenido por el macrousuario a lo largo de su recorrido a través del eje X, presentándose el mejor caso para la potencia de transmisión de HeNB de 0 dBm y el peor para el de 20 dBm, es decir, entre más potencia de transmisión de HeNB más interferencia percibida, lo que se ve reflejado en la información correctamente recibida por el macrousuario, evidenciándose una vez más la dependencia directa entre la SINR y el *throughput*.

Se identifican tres zonas, la primera de aproximación al edificio entre X=-155 y X=-118, en la cual el *throughput* disminuye a medida que el macrousuario se acerca a los edificios, para el caso de 0 dBm cae de 10 Mbps a 4 Mbps. La segunda zona comprende desde X=-118 a X=115, donde el macrousuario se ve expuesto a la señal interferente proveniente de los HeNBs, para los casos de 10 y 20 dBm el *throughput* se mantiene en valores inferiores a 1 Mbps. La tercera zona comprende desde X=115 a X=162, se observa que el *throughput* aumenta a medida que el macrousuario se aleja de los edificios, por ejemplo para el caso de 0 dBm éste pasa de 4 Mbps a 9 Mbps aproximadamente.

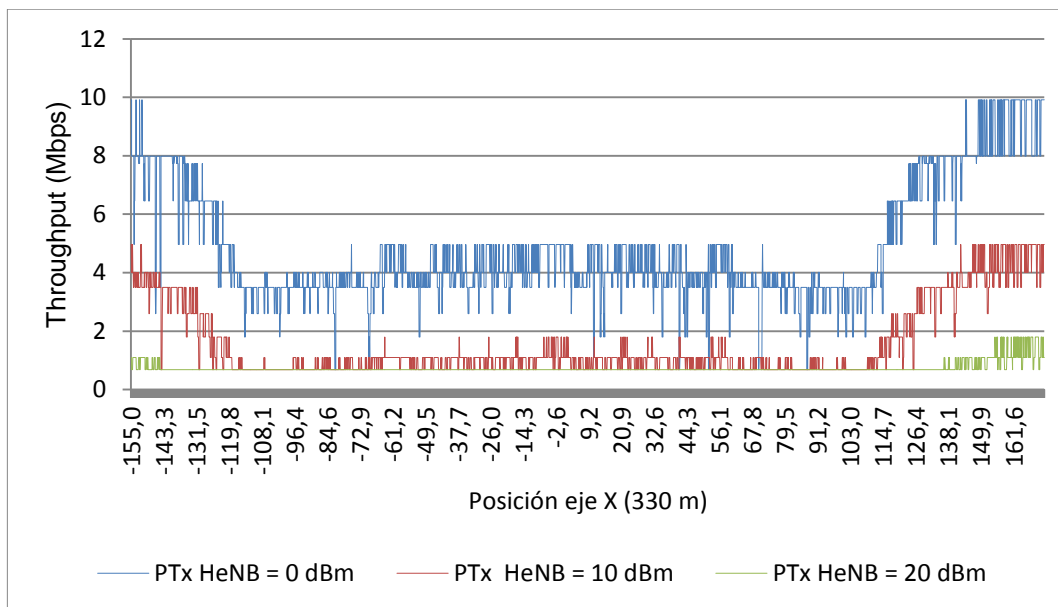


Figura 4-35 *Throughput* vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 A).

El comportamiento de la figura anterior, se complementa con el *throughput* promedio del macrousuario a lo largo de recorrido que se muestra en Figura 4-36, donde se obtiene el mejor desempeño para una potencia de transmisión de HeNB de 0 dBm con 4.9 Mbps, para 10 dBm se obtienen 1.5 Mbps, mientras que para el caso de 20 dBm el promedio de *throughput* es la mínima velocidad permitida de 0,6 Mbps.

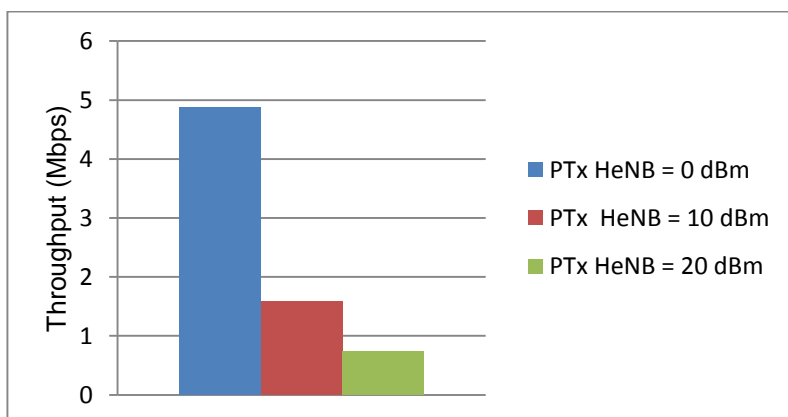


Figura 4-36 *Throughput* promedio (Escenario 4.1.3 A).

Es evidente que el desempeño obtenido en este escenario depende de la distancia del macrousuario a los HeNBs y la cantidad de femtoceldas desplegadas en los edificios, que en este caso son 125, pero se realiza con el fin de resaltar que la potencia de transmisión, el número de femtoceldas y la distancia de usuarios a fuentes de interferencia, son factores clave de estudio en futuras implementaciones de mecanismos de mitigación de interferencia.



### 4.1.3.2 Open access

A continuación, el macrousoario sigue el mismo procedimiento descrito para la Figura 4-33, sin embargo, los HeNBs contenidos en los edificios se encuentran funcionando bajo el esquema de acceso *open access*, es decir, aceptan la conexión de femtousuarios y macrousoarios cercanos. Para este caso el macrousoario que recorre paralelo a los edificios se conecta a los diferentes HeNBs según sea posible.

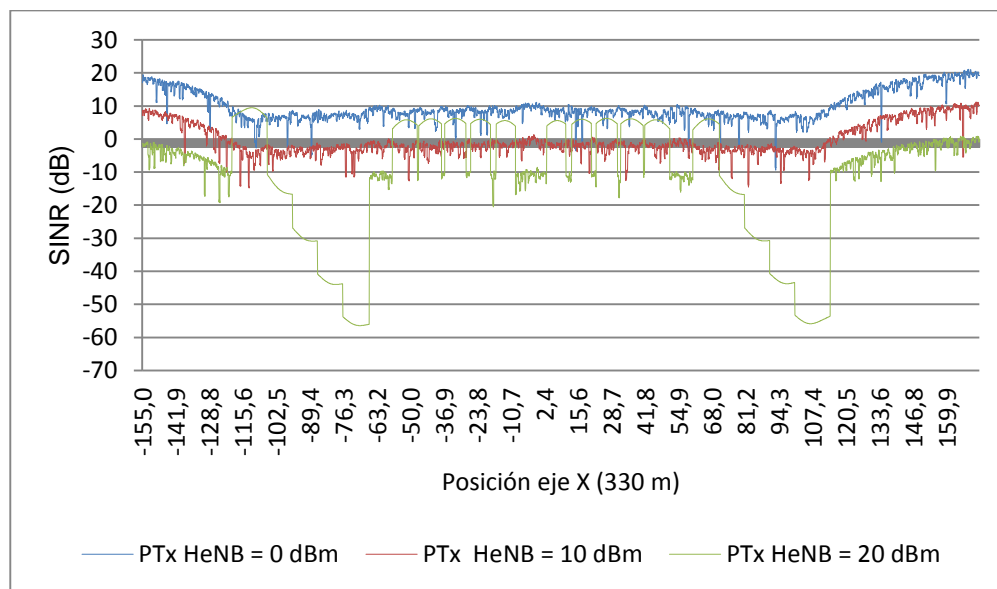


Figura 4-37 SINR vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 B).

En la Figura 4-37 se muestra la SINR percibida por el macrousoario para las potencias de transmisión de HeNB de 0,10 y 20 dBm en su recorrido paralelo a los edificios en el eje X. Se observa que para el caso de 0 dBm la SINR oscila entre los 20 dB y 0 dB, para el caso de 10 dBm la SINR fluctúa entre 10 dB y -10 dB, se presenta un comportamiento similar al de la Figura 4-34, esto debido a que el macrousoario no se conecta a los HeNBs, es decir que estos valores de potencia de transmisión no son suficientes para que se realice el proceso de traspaso del macrousoario hacia las femtoceldas.

Para el caso de 20 dBm de potencia de HeNB, se aprecian dos situaciones, la primera donde el macrousoario no se conecta a las femtoceldas y se presentan valores muy bajos de SINR, picos de hasta -50 dB. La segunda situación, donde el macrousoario se conecta a las femtoceldas y se pueden apreciar valores altos de SINR, picos de 10 dB, los cuales representan la conexión y desconexión hacia las distintos HeNBs encontrados en el trayecto. En el primer tramo entre las posiciones -128 y -76, el macrousoario se conecta al HeNB y presenta valores altos de SINR, pero a medida que continua con su trayecto pasa a ser interferido por las femtoceldas vecinas, hasta que nuevamente logra realizar *handover* hacia la femtoceldas siguientes.

Al final del recorrido se evidencia una caída de la SINR, donde el macrousoario realiza nuevamente los procedimientos de *handover* hacia la macrocelda.

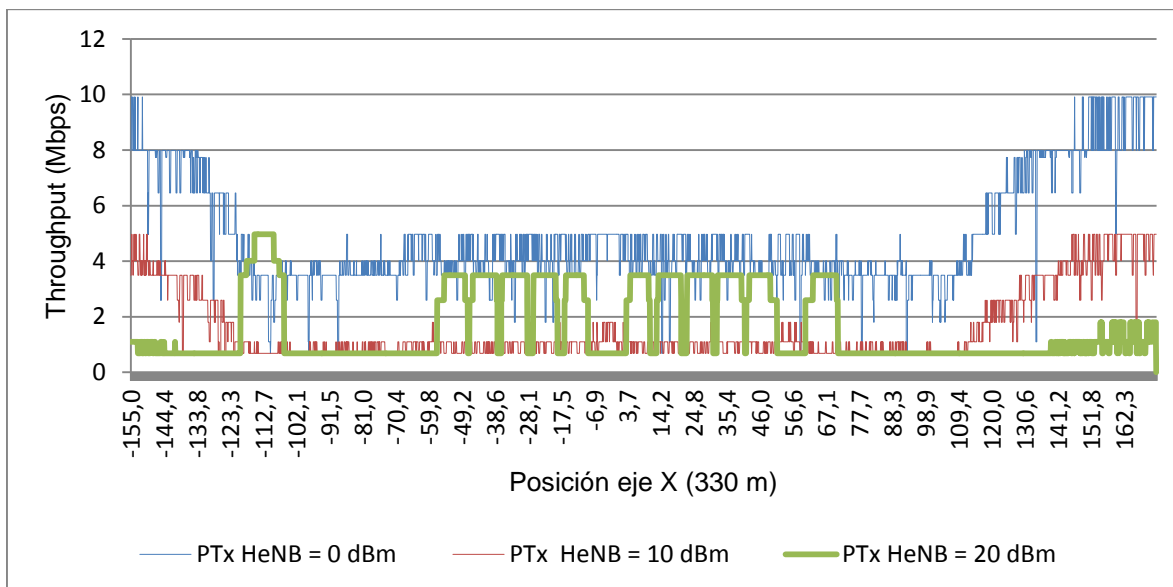


Figura 4-38 Throughput vs Posición eje X (Escenario 4.1.3 B).

En la Figura 4-38 se muestra el *throughput* obtenido por el macrousuario a lo largo de su recorrido a través del eje X, se aprecia que para los casos de 0 y 10 dBm presenta un comportamiento similar al caso de *close access*, debido a que el macrousuario no ha realizado el traspaso hacia las femtoceldas.

Cuando los HeNBs radian a 20 dBm de potencia de transmisión, se puede ver que en la posición X=-112 y el recorrido comprendido entre X=-59.8 y X= 67.1 el macrousuario se conecta hacia las distintas femtoceldas, lo que se ve reflejado en un aumento significativo de *throughput*, de los 0.6 Mbps a 4.5 Mbps. Se aprecia que se obtiene un desempeño superior a los niveles obtenidos cuando las femtoceldas radian con 10 dBm y no se realiza el procedimiento de traspaso hacia estas.

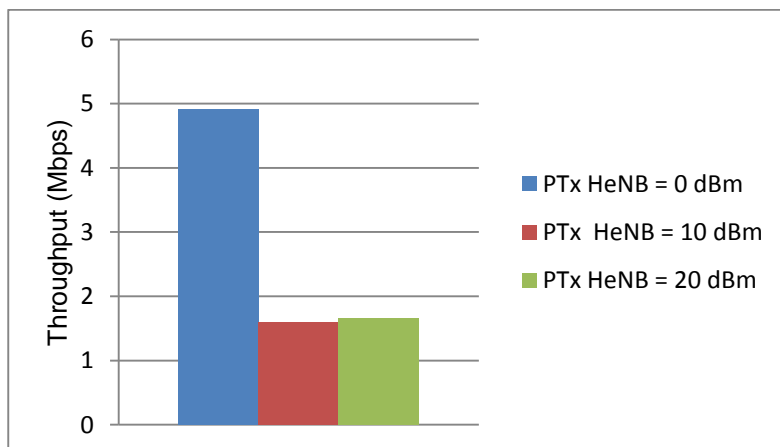


Figura 4-39 Throughput promedio (Escenario 4.1.3 B).



La Figura 4-39 muestra el *throughput* promedio obtenido para el recorrido bajo los distintos valores de potencia de transmisión, para 0 dBm se obtienen 4.9 Mbps, con 10 dBm 1.5 Mbps y 1.7 Mbps para 20dBm. Se puede observar que el caso de 10 dBm es superado por el de 20 dBm, debido a que en el último se realiza traspaso hacia las femtoceldas.

Lo anterior pone en evidencia los beneficios que se pueden obtener a partir del uso del mecanismo *open access* y de la correcta gestión de la potencia de transmisión de los HeNBs, también se resalta la importancia del mecanismo de *handover* utilizado en los diferentes procedimientos de traspaso, donde el uso de un mecanismo eficiente puede ser un factor clave en la implementación efectiva de futuros mecanismos de mitigación de interferencia.

## 4.2 INTERFERENCIA CO-LAYER

En el contexto de la interferencia en redes heterogéneas para el enlace de bajada, se tiene el caso donde los femtousuarios son interferidos por femtoceldas cercanas que transmiten bajo el esquema de espectro compartido (Interferencia *co-layer*), a continuación se presentan tres casos, donde se evalúa el efecto del número de femtoceldas, potencia de transmisión y movilidad de usuario, para cada uno se desactiva el eNB con el fin de realizar el estudio de la interferencia causada por femtoceldas hacia femtoceldas.

### 4.2.1 Efecto del Número de Femtoceldas Activas

Se configura el parámetro *activity ratio* del simulador para evaluar el impacto del número de femtoceldas en la capacidad y cobertura de un femtousuario, el cual transmite en la misma porción de espectro que los HeNBs cercanos. La Figura 4-40 muestra un HeNB ubicado en la posición central de un edificio de 2500 m<sup>2</sup>, cuyo femtousuario asociado puede tomar una posición aleatoria en un radio de 10m alrededor de este. A su vez, 25 HeNB pueden estar activos con probabilidades de: 0.2%, 0.4%, 0.6% y 0.8%, para 5, 10, 15, y 20 femtoceldas respectivamente. Los HeNBs interferentes radian con una potencia de transmisión de 20 dBm y sus posiciones son aleatorias en el interior del edificio para cada simulación.

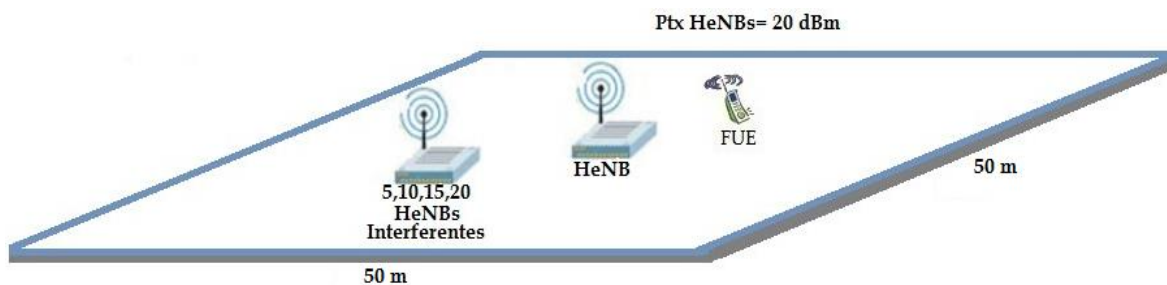


Figura 4-40 Escenario 4.2.1 (Efecto del número de femtoceldas).

Luego de simular este escenario 10.000 veces bajo el factor aleatorio de las posiciones del femtousuario y femtoceldas, se construye el histograma de SINR mostrado en la Figura 4-41, a partir de la cual se obtienen los resultados estadísticos de la Tabla 4-7, en los cuales se puede apreciar la incidencia de aumentar el número de femtoceldas sobre la SINR percibida por el femtousuario, la media y mediana presentan un corrimiento hacia la izquierda a medida que se aumenta el factor de actividad, la moda pasa de 37.5 dB para el factor de actividad de 0.2 a 7.5 dB en los siguientes escenarios donde mantiene este valor. La desviación estándar indica una tendencia a menor dispersión de datos al efecto de aumentar el número de femtoceldas presentes en el edificio, de 12.76 dB a 7.66 dB.

Lo anterior se debe a que el aumento de HeNBs incrementa el valor de fuentes interferentes en la ecuación 3.5, sin embargo, para el peor caso con 20 femtoceldas interferentes se registran valores aceptables de SINR muy por encima del valor de SINR objetivo, esto debido a dos factores de acuerdo a la ecuación 3.2, primero, las femtoceldas interferentes se encuentran contenidas en sus respectivos apartamentos y las pérdidas por penetración de paredes disminuyen la potencia de transmisión de las fuentes interferentes, segundo, el femtousuario toma posiciones aleatorias en un radio máximo de 10 m alrededor de su HeNB, lo que disminuye las pérdidas por trayecto de la señal deseada.



Tabla 4-7 Resultados estadísticos (Escenario 4.2.1).

Activity Ratio (%)	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
0.2	24,36	22,50	37,50	12,76
0.4	17,03	17,50	7,50	11,05
0.6	12,53	12,50	7,50	9,12
0.8	10,08	7,50	7,50	7,66

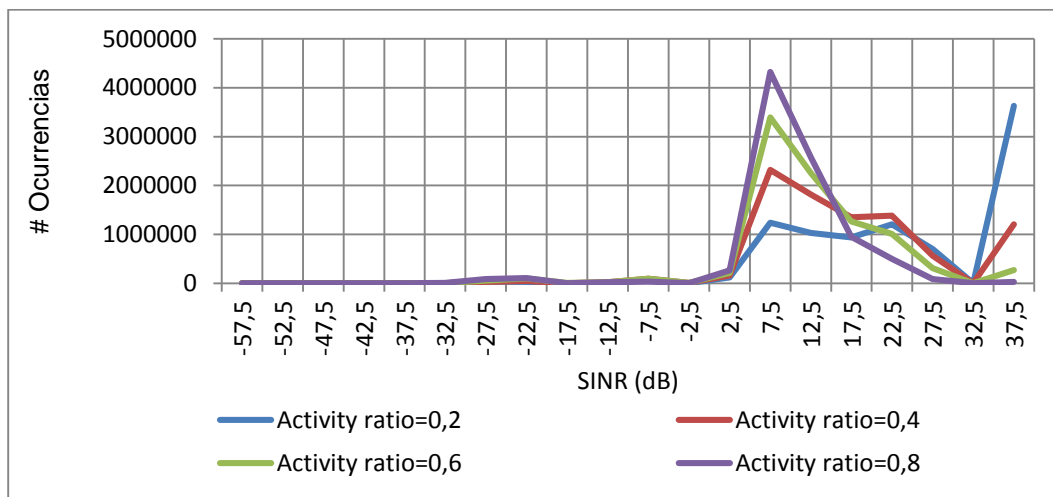


Figura 4-41 Histograma de SINR (Escenario 4.2.1).

La Figura 4-42 muestra que para cada variación del factor de actividad la probabilidad de degradación aumenta gradualmente, siendo de 1.5%, 2.1%, 2.9% y 3% para 5, 10, 15 y 20 femtoceldas respectivamente. Según lo anterior, para este escenario se puede asegurar un nivel aceptable de cobertura para el femtousuario asociado en el interior de su apartamento, teniendo en cuenta que la cantidad máxima de HeNBs que pueden estar activos compartiendo la misma porción de espectro es de 20, asimismo, estos se encuentran contenidos en el interior de sus apartamentos, donde su nivel de señal interferente es reducida sustancialmente debido a las pérdidas por penetración de paredes.

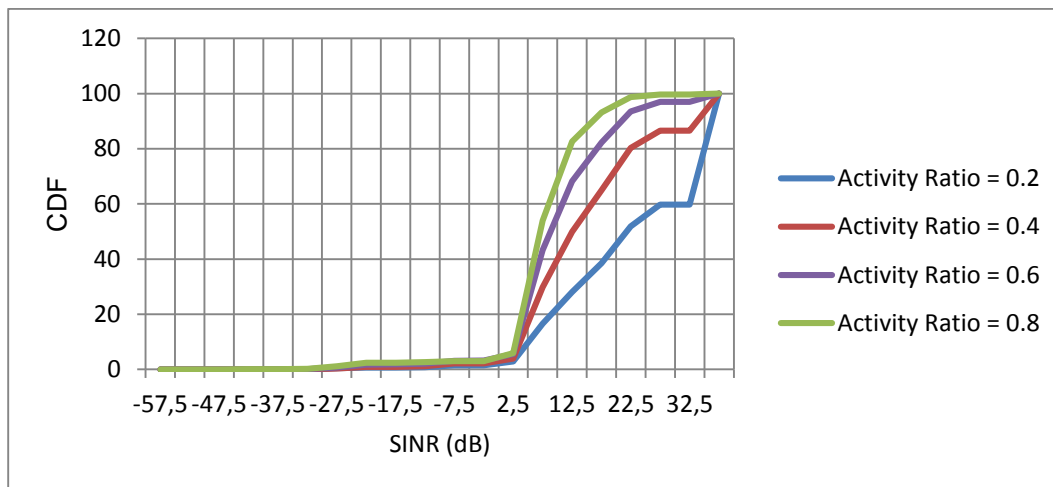


Figura 4-42 Probabilidad de degradación (Escenario 4.2.1).



El *throughput* promedio que se muestra en la Figura 4-43 indica cómo la cantidad de femtoceldas cercanas afectan el tamaño del bloque de transporte que puede recibir el femtousuario, el cual disminuye a la mitad para un aumento de 4 veces más femtoceldas activas, es decir, para 5 femtoceldas el *throughput* obtenido es de 12 Mbps, mientras que para 20 femtoceldas se obtiene un *throughput* de 6 Mbps.

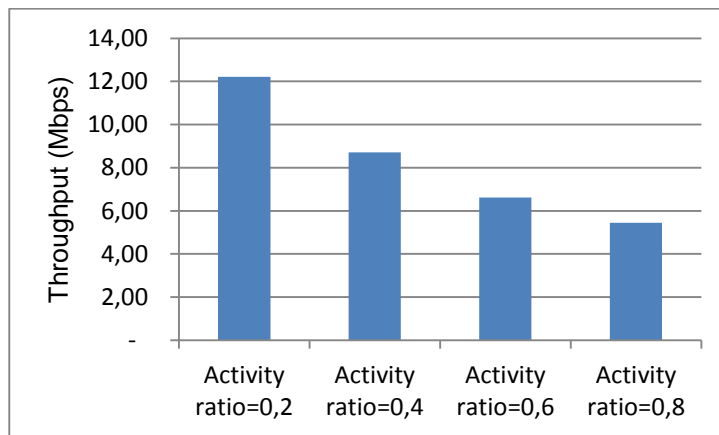


Figura 4-43 *Throughput* promedio (Escenario 4.2.1).

En la Figura 4-44 se observa como para todos los casos existe una probabilidad aproximada del 95% de obtener un *throughput* de 3 Mbps, a partir de este punto dichas probabilidades caen según el factor de actividad configurado, siendo el peor caso donde se despliegan 20 femtoceldas (*Activity ratio* = 0.8%).

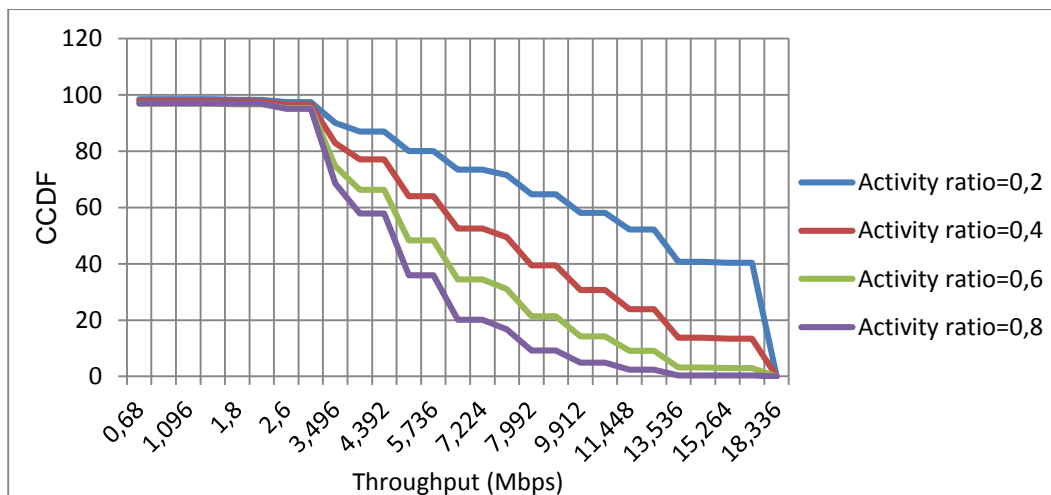


Figura 4-44 CCDF del *Throughput* (Escenario 4.2.1).

#### 4.2.2 Efecto de la Potencia de Transmisión de HeNB

Se simula el escenario que se muestra en la Figura 4-45, donde en la posición central de un edificio de 2500 m<sup>2</sup> se ubica un HeNB con potencia de transmisión de 20 dBm, asociado a este, un femtousuario que puede tomar posiciones aleatorias en un radio de 10 m alrededor del apartamento. Además, se despliegan 25 femtoceldas aleatoriamente bajo el esquema de acceso *Close Access*, con factor de actividad igual a 1, las cuales radian bajo las potencias de transmisión de 0, 10 y 20 dBm, se busca evaluar el efecto de la potencia





de transmisión de HeNBs sobre el desempeño de un femtousuario que transmite bajo el esquema de espectro compartido.

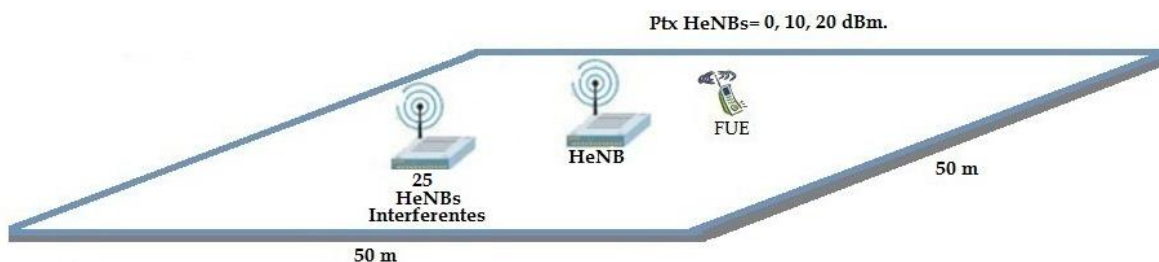


Figura 4-45 Escenario 4.2.2 (Efecto de la potencia de transmisión de HeNB).

El histograma de la SINR para este escenario se muestra en la Figura 4-46, de la cual se obtienen los resultados estadísticos de la Tabla 4-8. Se aprecia como la media, mediana y moda presentan una disminución en sus valores a medida que se aumenta el nivel de potencia de transmisión de HeNBs, donde el caso de 20 dBm presenta la mayor cantidad de ocurrencias en el menor valor de SINR de 7.50 dB. La desviación estándar por su parte, muestra como los valores de SINR tienden a agruparse según se aumenta el valor de potencia de transmisión de HeNBs.

Tabla 4-8 Resultados estadísticos (Escenario 4.2.2).

Ptx HeNB (dBm)	SINR (dB)			
	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
0	26,74	27,50	37,50	9,34
10	15,50	17,50	17,50	7,22
20	8,45	7,50	7,50	5,97

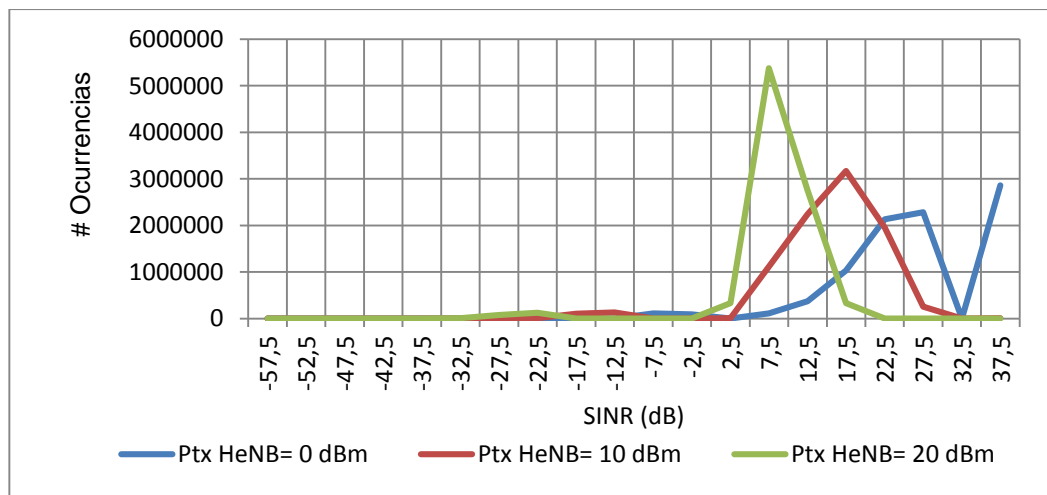


Figura 4-46 Histograma de SINR (Escenario 4.2.2).

La Figura 4-47 muestra la probabilidad de degradación del servicio del femtousuario para cada variación, las cuales son de 1.2%, 2.7% y 2.3% para las potencias de HeNBs de 0, 10 y 20 dBm respectivamente. Para este caso se obtienen probabilidades de degradación bajas, debido a que las femtoceldas interferentes alrededor del edificio están contenidas en el interior de un apartamento, cuyas paredes reducen significativamente la potencia de



transmisión interferente hacia el femtousuario, el cual tiene una probabilidad del 90% de encontrarse en las cercanías de su HeNB.

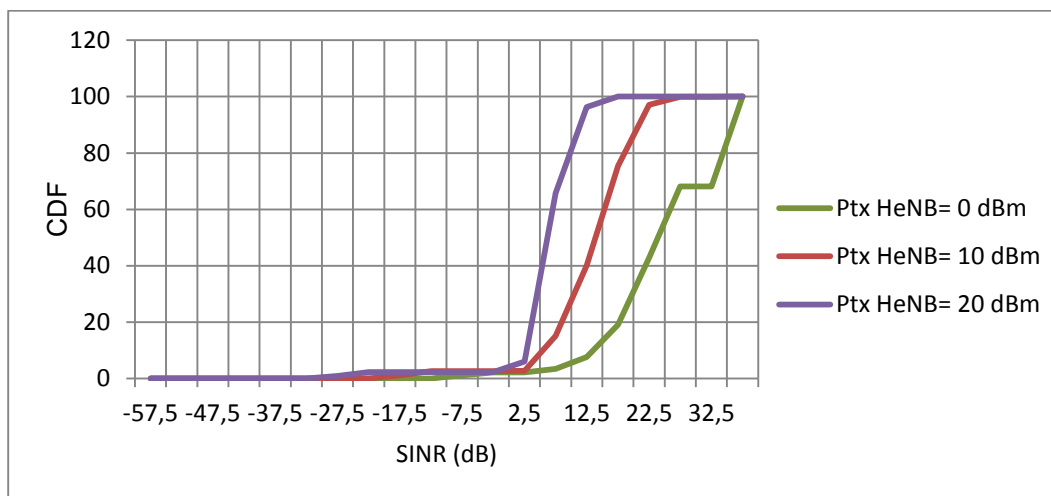


Figura 4-47 Probabilidad de degradación (Escenario 4.2.2).

El *throughput* promedio mostrado en la Figura 4-48 indica cómo la cantidad de información permitida en el bloque de transporte disminuye según se aumenta la potencia de transmisión de los HeNBs. Observando los resultados de *throughput* promedio de la Figura 4-48 y la Figura 4-43, se aprecia como es comparable tener 25 femtoceldas radiando a 0 dBm de potencia de transmisión contra 5 femtoceldas radiando a 20 dBm, ambos escenarios muestran un *throughput* promedio de 12 Mbps aproximadamente.

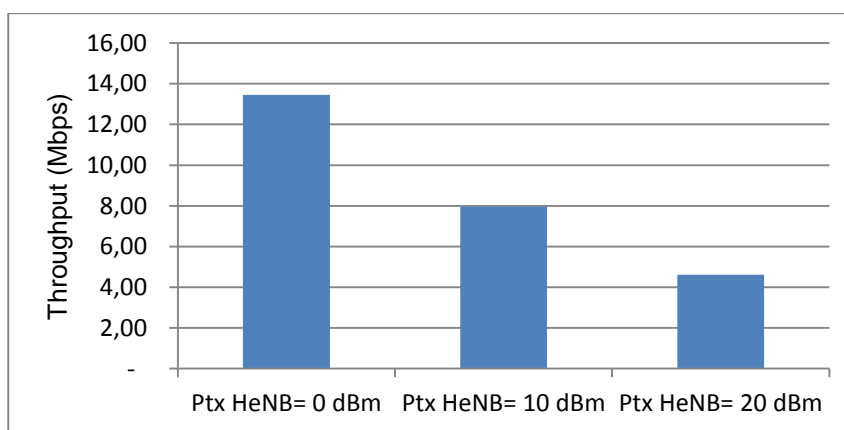


Figura 4-48 *Throughput* promedio (Escenario 4.2.2).

La CCDF de *throughput* obtenida para éste escenario se muestra en la Figura 4-49, inicialmente para los tres casos se obtiene una probabilidad del 97% de alcanzar una velocidad de transmisión igual o mayor a 2.2 Mbps, después de este punto se aprecia como a medida que disminuye el nivel de la potencia de transmisión de los HeNBs interferentes, la probabilidad de obtener mayor tamaño en el bloque de transporte permitido aumenta, presentándose el mejor desempeño para el caso donde todas las femtoceldas interferentes transmiten a 0 dBm de potencia de transmisión.

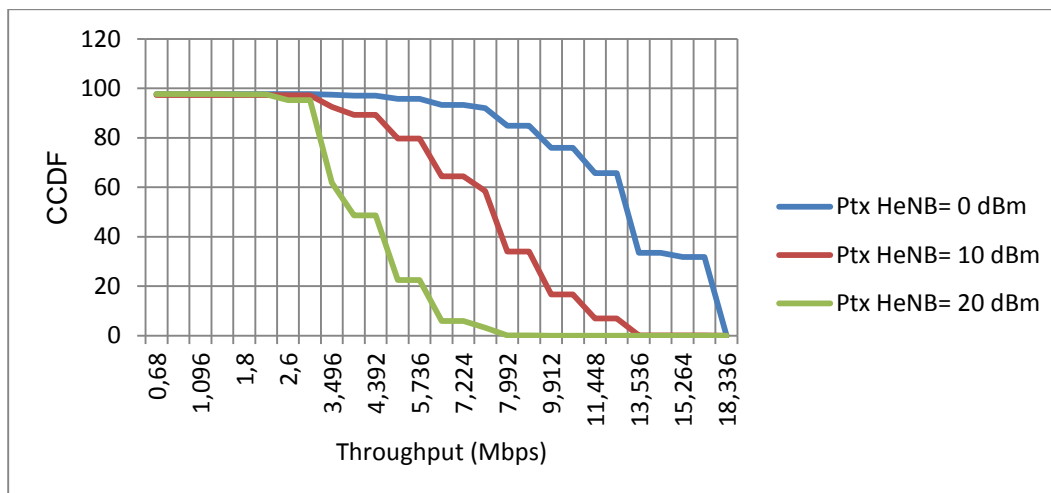


Figura 4-49 CCDF del *throughput* (Escenario 4.2.2).

### 4.2.3 Prueba de Movilidad de Femtousuario

Con el fin de usar las características de movilidad implementadas en el simulador LTE-Sim, se realiza un estudio de la SINR y *throughput* de un femtousuario a lo largo de un trayecto para distintos valores de potencia de transmisión de HeNB y esquemas de acceso. Se simula el escenario mostrado en la Figura 4-50, donde 2 edificios se encuentran ubicados en la posición (X=0, Y=220) con espaciamiento de calle de 10 m, el femtousuario inicia su recorrido en el centro del apartamento uno y finaliza en el centro del apartamento 2, realizando un trayecto total de 20 m, bajo las potencias de transmisión de HeNB de 0,10 y 20 dBm y los esquemas de acceso *close access* y *open access*, mientras que el eNB ubicado en la posición (0,0) radia con una potencia de transmisión de 43 dBm.

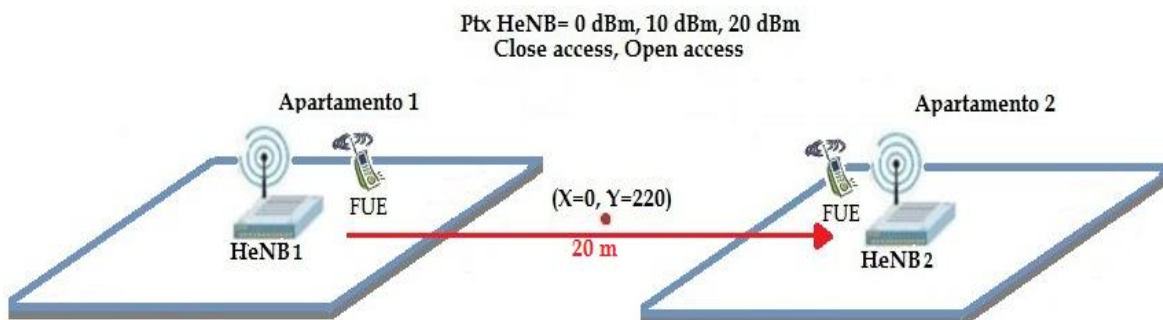


Figura 4-50. Escenario 4.2.3 (Prueba de movilidad de femtousuario).

#### 4.2.3.1 Close Access

El femtousuario realiza el recorrido desde el apartamento 1 hasta el apartamento 2 bajo distintas potencias de transmisión, el HeNB2 no permitirá la conexión de usuarios no autorizados (*close access*).

La Figura 4-51 muestra la SINR percibida por el femtousuario a lo largo de su recorrido, la cual disminuye a medida que éste se aleja de su propio HeNB. Cuando traspasa la pared de su apartamento a los 5 m de recorrido, la SINR percibe un aumento debido a que las



señales interferentes de otros HeNB son atenuadas por las pérdidas por penetración de paredes.

Entre los 5 m y 15 m, correspondientes al recorrido en la calle, se presentan dos situaciones, la primera para el caso de 20 dBm, donde el femtousuario continua conectado al HeNB1 y la SINR disminuye debido al acercamiento hacia el HeNB interferente. La segunda se presenta para las potencias de 0 y 10 dBm, donde el femtousuario realiza el procedimiento de traspaso hacia el eNB, debido a que detecta mejores niveles de potencia de recepción, sin embargo, ahora es interferido por los HeNBs cercanos y se perciben niveles bajos de SINR. Para la potencia de 10 dBm se entra en una región de no cobertura a lo largo de la calle con niveles de SINR inferiores a -6 dB.

A los 15 m de recorrido se presenta una situación similar para las potencias de transmisión de 0 dBm y 10 dBm, el femtousuario cruza la pared del edificio del HeNB2 y la SINR cae a valores menores del umbral objetivo de -6 dB, es decir que la mínima distancia de acercamiento hacia un HeNB interferente es de aproximadamente 6 m.

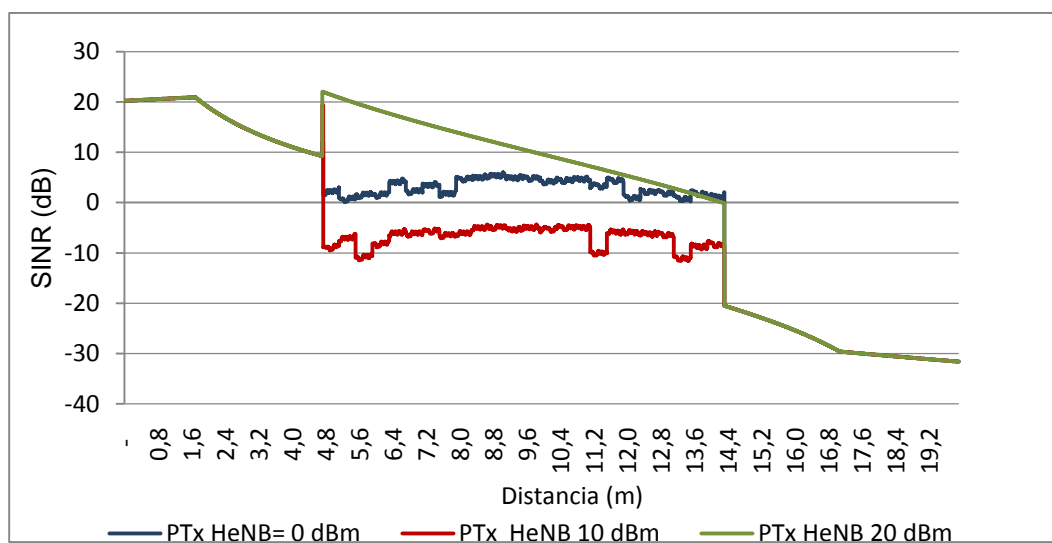


Figura 4-51 SINR vs Distancia (Escenario 4.2.3 A).

En Figura 4-52 se muestra el comportamiento de *throughput* del femtousuario a lo largo de su recorrido, el cual fluctúa de una manera similar al descrito anteriormente para la SINR debido a la dependencia que existe entre estos dos factores para LTE. La menor velocidad obtenida para los tres casos, con un valor de 0.6 Mbps, se registra en los límites del apartamento 2 a 6 metros del HeNB interferente. Cuando los HeNBs radian a 10 dBm, se presenta el peor desempeño de *throughput* con 0.6 Mbps entre los 5m y 15 m de recorrido, debido a que el femtousuario se encuentra conectado al eNB y ahora es interferido por las femtoceldas cercanas.

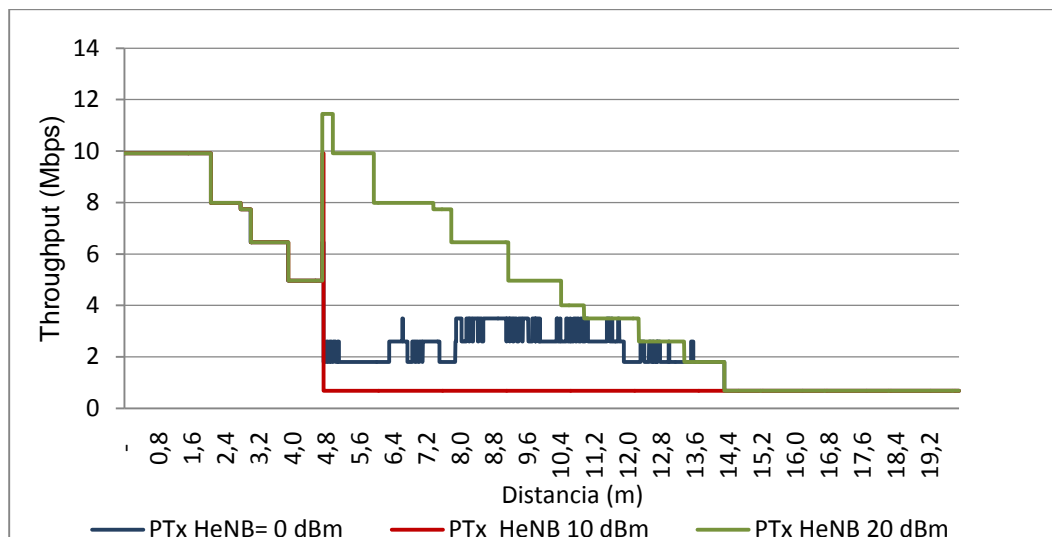


Figura 4-52 *Throughput* vs Distancia (Escenario 4.2.3 A).

El *throughput* promedio obtenido por el femtousuario a lo largo del trayecto se muestra en Figura 4-53, donde se aprecia el mejor desempeño para el caso de la potencia de transmisión de 20 dBm con 4.7 Mbps, en el cual el femtousuario no se conectó al eNB. Para 10 dBm y 0 dBm donde el femtousuario realizó traspaso hacia la estación base, se obtienen 3.2 Mbps y 2.4 Mbps respectivamente, debido a que éstas ahora son fuentes de interferencia para el femtousuario.

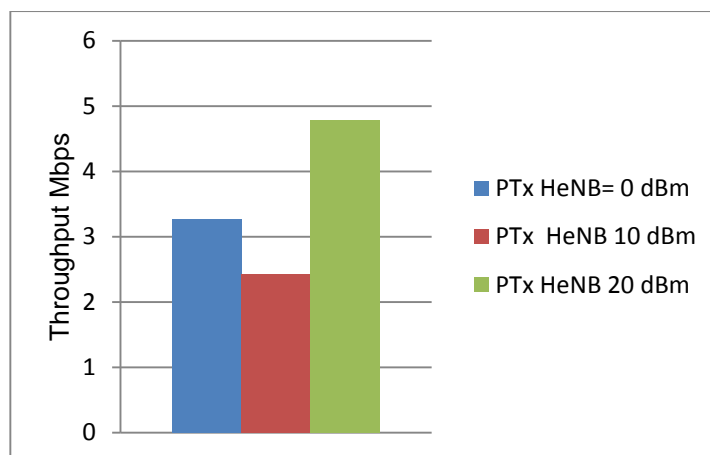


Figura 4-53 *Throughput* promedio (Escenario 4.2.3 A).

Es destacable mencionar cómo el desempeño del femtousuario es afectado negativamente debido a la conexión hacia el eNB, lo que muestra una falla notable en el mecanismo de *handover* basado en potencia.

#### 4.2.3.2 Open Access

El femtousuario realiza el recorrido desde el apartamento 1 hasta el apartamento 2 bajo distintas potencias de transmisión, con la particularidad de que el HeNB2 se encuentra configurado para permitir la conexión de usuarios cercanos (*open access*).



Debido a que el factor de actividad mínimo equivale a un 10% del total de femtoceldas activas, en cada uno de los edificios se encuentran por lo menos dos o tres femtoceldas interferentes ubicadas aleatoriamente, y debido a que solo se simula una vez, la ubicación de HeNBs interferentes en el primer edificio genera un nivel más alto de interferencia hacia el femtousuario con respecto a la ubicación de femtoceldas interferentes en el segundo edificio, lo cual favorece mejores valores de SINR y *throughput* al final del recorrido.

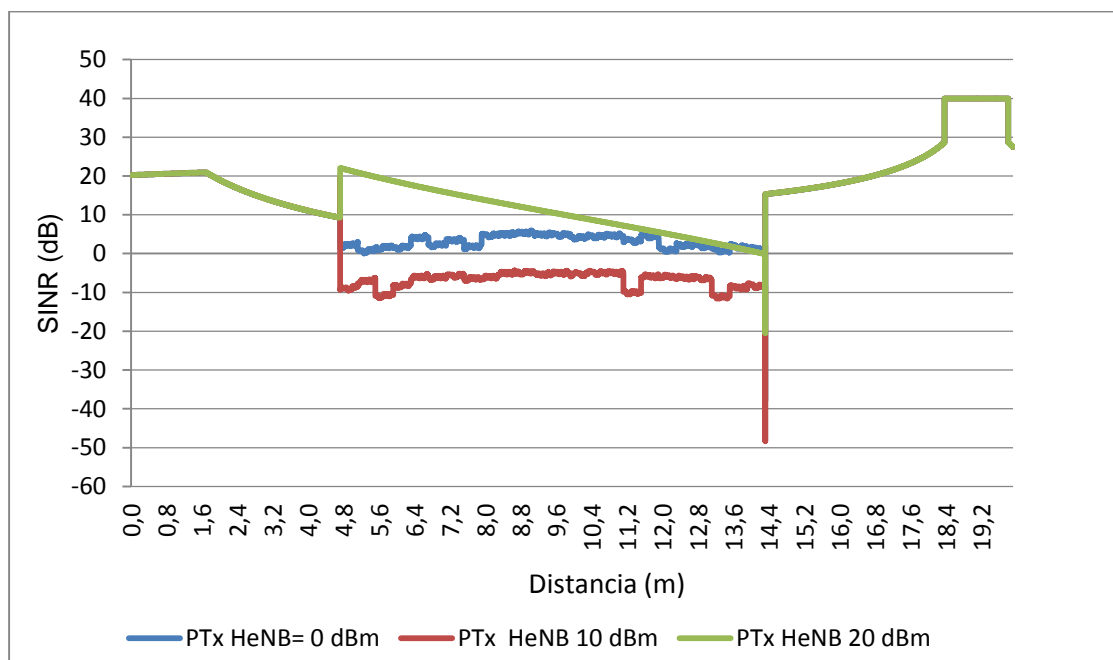


Figura 4-54 SINR vs Distancia (Escenario 4.2.3 B).

Como se aprecia en la Figura 4-54, la SINR del femtousuario disminuye a medida que se aleja de su HeNB, una vez sale de su edificio a los 5 m de recorrido se presentan los siguientes comportamientos para los distintos casos de potencia de transmisión. Para el caso de 0 y 10 dBm el femtousuario realiza el procedimiento de traspaso hacia el eNB de la macrocelda, el cual se verifica en los resultados en formato texto del simulador, esto debido a que encuentra al eNB con un mejor nivel de señal de potencia que los HeNB cercanos. Luego a los 15 m de trayecto se encuentra la pared del segundo apartamento, el femtousuario realiza el traspaso hacia el HeNB2, donde se aprecia un aumento significativo en la SINR percibida.

Cuando los HeNBs radian con una potencia de transmisión de 20 dBm, el femtousuario sale de su edificio y continúa conectado a su HeNB, debido a un mayor nivel de señal de potencia percibido, posteriormente a los 15 m ingresa al apartamento 2 y realiza el procedimiento de traspaso hacia el HeNB2, lo que se ve reflejado en un aumento de la SINR del femtousuario.

Se resalta que cuando la potencia de HeNBs es de 10 dBm, el umbral de probabilidad de degradación de SINR de -6 dB es superado entre los 5m y 15 m del recorrido, es decir, en este tramo el femtousuario no se encuentra con cobertura del servicio, debido a que este se conecta al eNB pero es interferido por los HeNBs cercanos y la potencia recibida no es suficiente para contrarrestar los efectos de la interferencia.

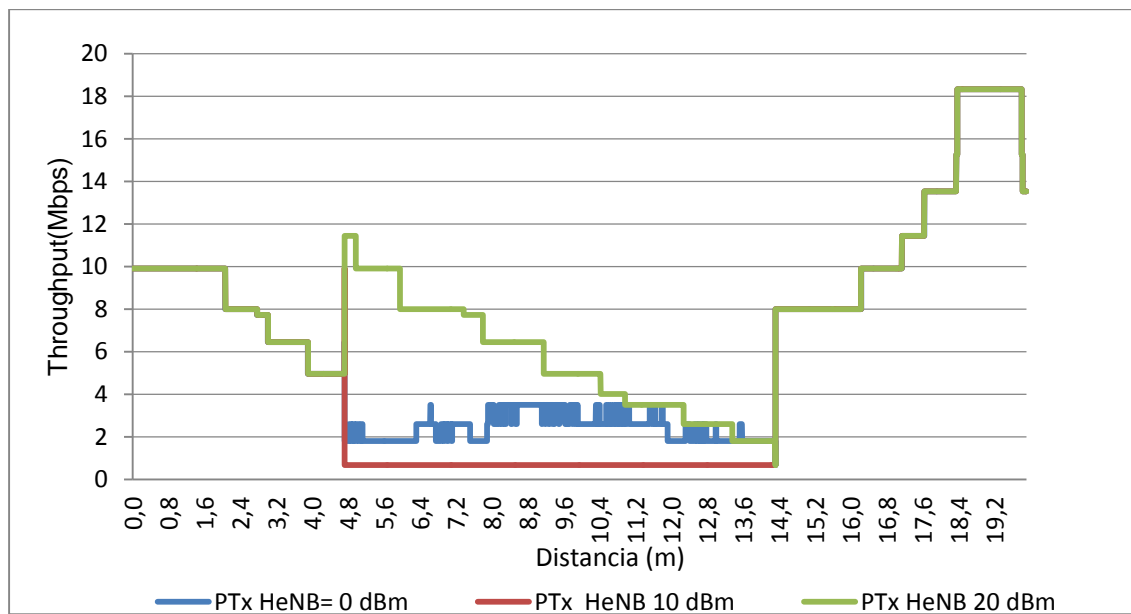


Figura 4-55 *Throughput* vs Distancia (Escenario 4.2.3 B).

El *throughput* obtenido por el femtousuario a lo largo del recorrido se muestra en la Figura 4-55, para la potencia de 20 dBm entre los 0 m y 4 m en el interior del apartamento 1, se alcanzan los 10 Mbps, en el área de la calle entre los 5 m y 14 m, el *throughput* oscila entre los 11 Mbps y los 2 Mbps, debido a la interferencia generada por el eNB y el HeNB2. Finalmente entre los 15 m y 20 m el femtousuario ingresa al apartamento 2 y realiza el procedimiento de traspaso al HeNB2, se obtienen los valores más altos de *throughput* entre los 8 Mbps y 18 Mbps, debido a la cercanía del punto de acceso y que el femtousuario se encuentra más alejado del HeNB1 y del eNB, los cuales ahora actúan como fuentes de interferencia.

Los peores valores de *throughput* se presentan para el caso de 10 dBm de potencia de transmisión, especialmente en el tramo de la calle donde se realiza el procedimiento de handover hacia el eNB, con el valor mínimo de 0.6 Mbps, debido a la interferencia generada entre los HeNBs 1 y 2.

En la Figura 4-56 se muestra el *throughput* promedio para cada uno de los recorridos, se observa el mejor desempeño para la potencia de 20 dBm, con un valor de 8 Mbps, debido a que con un mayor nivel de señal el femtousuario se mantiene conectado a su HeNB el tiempo suficiente para luego realizar el traspaso a otro HeNB, sin la necesidad de conectarse al eNB de la macrocelda. Se obtiene un *throughput* promedio de 6.4 Mbps y 5.6 Mbps para 0 dBm y 10 dBm de potencia de transmisión de HeNB respectivamente, valores inferiores debido a que al conectarse el femtousuario a la macrocelda, los HeNBs 1 y 2 ahora actúan como fuentes de interferencia.

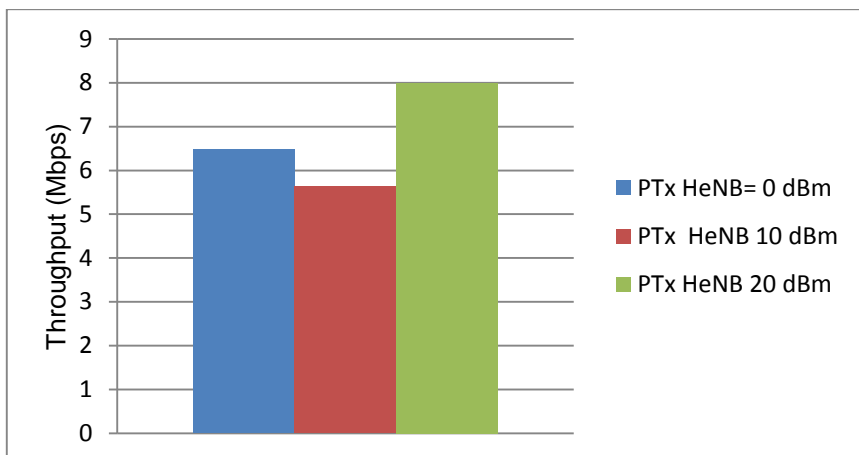


Figura 4-56 *Throughput promedio* (Escenario 4.2.3 B).





## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos para el trabajo de grado Análisis a Nivel de Sistema de una Red Heterogénea Basada en LTE, además se proponen trabajos futuros que continúen esta línea de investigación.

### 5.1 CONCLUSIONES

- La evaluación de la SINR para distintas capas de red y la variación de los parámetros de potencia de transmisión, handover y posición de usuarios, determinó que la interferencia *cross-layer* de la macrocelda hacia los femtousuarios en el exterior de los apartamentos presenta los peores resultados en cuanto a capacidad y cobertura, la cual amerita mayor énfasis en la futura implementación de mecanismos de mitigación de interferencia para LTE.
- El análisis de un macrouuario interferido por femtoceldas en el enlace de bajada, en una celda de radio de 500m, permitió determinar que la posición del macrouuario con respecto al eNB no representa un factor determinante en el impacto sobre la capacidad y cobertura, en comparación, la interferencia generada por el número de femtoceldas desplegadas en la macrocelda indica valores de probabilidad de degradación altos a razón de su incremento, factor que debe ser tenido en cuenta para el correcto despliegue de redes heterogéneas.
- Los resultados obtenidos a partir de la interferencia generada por el eNB hacia los femtousuarios, demuestran que la capacidad y cobertura no se afecta cuando los femtousuarios se encuentran en posiciones al interior de su apartamento, donde los parámetros de posición de edificio y potencia de transmisión de HeNB no representan un factor determinante en la variación de los resultados.
- La interferencia generada por el eNB hacia los femtousuarios se vuelve perjudicial cuando éstos se encuentran en el exterior de sus apartamentos, los resultados en capacidad y cobertura demuestran que para una celda de 500 m de radio, la mejor opción para posiciones cercanas a la estación base es conectarse al eNB y que la potencia de HeNB sea la más baja posible, para posiciones alejadas es deseable que la potencia de HeNB sea la más alta posible y no realizar handover hacia el eNB. Para ambas situaciones los resultados en capacidad y cobertura presentan los menores valores de todos los escenarios simulados.
- Las pruebas de movilidad de usuario implementadas, a pesar de su relativa sencillez, demuestran en tiempo real cómo es afectada la capacidad y cobertura de los usuarios para distintos escenarios definidos, además sirven como base para analizar futuros esquemas de mitigación de interferencia en LTE basados en potencia, handover y posición de usuarios.



- Las pruebas de movilidad de un macrouusuario y femtousuario muestran cómo el mecanismo de acceso *open access* aumenta la cobertura para los distintos escenarios simulados, ofreciendo acceso en las distintas zonas de conexión cercanas a los HeNBs, sin embargo, el mecanismo de handover basado en potencia no efectúa eficientemente el traspaso para los distintos casos simulados.
- Los resultados en capacidad y cobertura para los escenarios donde los usuarios pueden encontrarse al interior o exterior del apartamento, demuestran como las pérdidas por penetración de paredes influyen determinadamente en el nivel de interferencia percibida por macrouusuarios y femtousuarios, ya sea disminuyendo el valor de la potencia de recepción deseada o limitando el de la potencia interferente. Éste factor debe ser tenido en cuenta para la implementación de mecanismos de gestión de interferencia en escenarios reales.
- Según los resultados en capacidad y cobertura obtenidos para los escenarios donde los femtousuarios se encuentran al exterior de su apartamento, se determina que el mecanismo de handover basado en potencia implementado en el simulador LTE-Sim es ineficiente para los distintos casos de traspaso de femtocelda a femtocelda, macrocelda a femtocelda y viceversa. Debido a que del correcto funcionamiento de éste depende la interferencia percibida por los usuarios, para futuros mecanismos de mitigación de interferencia se debe tener en cuenta mecanismos de handover que tengan en cuenta potencia de transmisión, ubicación de usuarios y asignación de espectro.
- El estudio de la interferencia *co-layer*, bajo los parámetros de potencia de transmisión de HeNB y número de femtoceldas activas en el edificio, presenta resultados en capacidad y cobertura superiores (mejor desempeño en SINR, probabilidad de degradación y *throughput*) a los obtenidos para los escenarios de la interferencia *cross-layer*, debido a la relativa cercanía de los femtousuarios a sus femtoceldas y las pérdidas por penetración de paredes asociadas al edificio, según lo anterior, se establece que la interferencia *co-layer* es la menos perjudicial y amerita una implementación moderada de mecanismos de mitigación de interferencia para LTE.
- En el contexto de la interferencia *co-layer*, de acuerdo a los escenarios simulados y los resultados de *throughput* promedio obtenidos, se puede decir que es comparable tener 25 femtoceldas radiando a 0 dBm de potencia de transmisión a tener 5 femtoceldas radiando a 20 dBm. De ésta manera se comprueba la relación existente entre el número de femtoceldas y la potencia de transmisión, cuya gestión correcta debe ser un factor predominante en futuros mecanismos de mitigación de interferencia.
- El escenario de movilidad de femtousuario simulado, para el caso particular de dos edificios contiguos, muestra el mejor desempeño cuando el HeNB radia con una potencia de transmisión de 20 dBm y se mantiene conectado a éste, y el peor caso donde el HeNB radia con 10 dBm y el femtousuario realiza el procedimiento de traspaso hacia el eNB. Lo anterior demuestra como el mecanismo de handover basado en potencia es ineficiente, además resalta la importancia de implementar mecanismos de mitigación de interferencia acompañados de esquemas eficientes



de handover basados en potencia de transmisión, posición e interferencia percibida por los usuarios.

- La prueba de movilidad de femtousuario, bajo las características de escenario implementadas, determina que la máxima distancia de acercamiento de un femtousuario hacia un HeNB interferente, teniendo en cuenta las pérdidas por penetración de paredes, es de aproximadamente 6 m, a partir de ésta el femtousuarios se considera fuera de cobertura.
- El simulador a nivel de sistema LTE-Sim es una herramienta útil para la simulación y diseño de redes heterogéneas basadas en LTE, debido a la robustez de su código, módulos y características implementadas. No obstante, la no disponibilidad de una interfaz gráfica para la configuración de parámetros y obtención de resultados, se convierten en un punto en contra en cuanto a la usabilidad de la herramienta.

## 5.2 TRABAJOS FUTUROS

- Analizar la capacidad y cobertura de una red heterogénea basada en LTE en función de la interferencia para el enlace de subida.
- Realizar el análisis de la capacidad y cobertura de una red heterogénea basada en LTE bajo la implementación de mecanismos de mitigación interferencia, basados en potencia, reúso de frecuencias, entre otros.
- Implementar y analizar mecanismos de Handover en redes heterogéneas basadas en LTE, ya sea femtocelda a femtocelda, femtocelda a macrocelda y viceversa.
- Analizar el impacto de la interferencia cross-layer y co-layer teniendo en cuenta las pérdidas por penetración de paredes, considerando diferentes tipos de materiales y estructuras.
- Desarrollar y adicionar un módulo de femtoceldas al Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE, desarrollado previamente en el trabajo de grado del mismo nombre [38].
- Desarrollar algoritmos basados en Redes Auto Organizadas (SON, *Self Organized Networks*) basados en LTE, que permitan reducir la interferencia y aumentar la capacidad y cobertura de la red.
- Analizar diferentes parámetros de desempeño de una red LTE haciendo uso del simulador LTE-Sim, considerando sus diferentes características funcionales, como son planificador de paquetes, esquema de multiplexación, número de usuarios, tipo de aplicaciones, entre otras.



## REFERENCIAS

- [1] Qualcomm, "LTE Advanced: Heterogeneous Networks," Qualcomm, Enero 2011.
- [2] Nokia Siemens Networks, "The advance LTE toolbox for more efficient delivery of better user experience," Nokia Siemens Networks, Finlandia, Technical White paper 2011.
- [3] A. Damnjanovic, et al, "A survey on 3gpp heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, 2011.
- [4] F. Capozzi, et al, "On accurate simulations of LTE femtocells using an open source simulator," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012.
- [5] M. Iturralde, et al, "Interference Mitigation by Dynamic Self-Power Control in Femtocell Scenarios in LTE networks," *Globcom 2012 Wireless Communications Symposium*, 2012.
- [6] Telesemana. (2013, Septiembre) Colombia concluye subasta 4G, preparando el escenario para el crecimiento de banda ancha movil. [Online]. Disponible en: <http://www.telesemana.com/blog/2013/06/27/colombia-concluye-subasta-4g-preparando-el-escenario-para-el-crecimiento-de-banda-ancha-movil/>
- [7] 4gamericas. (2014, Enero) 4gamericas. [Online]. <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page&pageid=2042>
- [8] Small Cell Forum, "The Business Case for Femtocells in the Mobile Broadband Era," White paper 2013.
- [9] Small Cell Forum. (2014, Enero) Small Cell Forum. [Online]. <http://www.smallcellforum.org/newsstory-98-percent-of-mobile-operators-say-small-cells-essential-for-future-of-networks>
- [10] Small Cell Forum, "Small cells – big ideas," Small Cell Forum, Reino Unido, Reporte 030.02.02, 2013.
- [11] Alcatel-Lucent, "Metro Cells, A cost-effective option for meeting growing capacity demands," Alcatel-Lucent, White paper 2012.
- [12] J. Valdez, M. Martinez, Analisis de Interferencia Co-canal en Redes Heterogeneas, 2013, Tesis de pregrado, Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2012.
- [13] Femto Forum, *Interference Management in OFDMA Femtocells*. Reino Unido, Marzo 2010.
- [14] A. Khan, M, Lewis, "Hetnet Market Summary & Forecast: Macro Cells, Small Cells & Wi-Fi Offload," ARCchart, Londres, Sector Report 2012.
- [15] Small Cell Forum, *Release One: Home*, 1010101st ed. Reino Unido, 2013.
- [16] Cisco and/or its affiliates, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012–2017 ," CISCO, White Paper Mayo 29 2013.
- [17] Signal Research Group, "Femto Forum Femtocell bussiness case whitepaper," Femto Forum, White Paper 2009.
- [18] Jie Zhang - Guillaume de la Roche, *Femtocells: Technologies and Deployment*. Bedfordshire, UK: Wiley, 2010.



- [19] 3GPP, "TS 36.300 E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage 2,".
- [20] Small Cell Forum, "025.02.01 HeNB (LTE Femto) Network," Dursley, 3GPP TS 36.300, 2013.
- [21] 3GPP, "TR 21.905: Vocabulary for 3GPP Specifications,".
- [22] 3GPP ETSI 3rd Generation Partnership Project, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Mobility procedures for Home Node B (HNB); Overall description; Stage 2, 2011, Versión 10.0.0.
- [23] S. Rachid, Mohammed Wahbi Tijane Fatima Zohra, "HANDOVER MANAGEMENT SCHEME IN LTE," *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, vol. 5, no. 3, Junio 2013.
- [24] R. Agusti, F. Alvarez, F. Casadevall, R. Ferrus, J. Perez, O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Telecomunicaciones Móviles*, Primera ed. España: Fundacion Vodafone, 2010.
- [25] S. Sesia, I. Toufik, M Baker, *LTE, The UMTS Long Term Evolution, From Theory to Practice*, 2009th ed.: Wiley, 2009.
- [26] 3GPP, TS 36.213 Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures, Version 10.1.0 Release 10, Marzo. 2011.
- [27] H. Holma, A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ed., 2011.
- [28] R. Pressman, *Ingeniería del software, un enfoque práctico*, Quinta edición ed.: Mc Graw Hill, 2002.
- [29] S. Bae, et al, Femtocell interference analysis based on the development of system-level LTE simulator, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2012 2012:287.
- [30] CTTC - Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya. (2014, Marzo) LENA. [Online]. <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/>
- [31] Instituto de Telecomunicaciones (TC), Universidad Tecnologica de Viena. (2014) Vienna LTE System Level Simulator v1.7r1119. [Online]. [http://www.nt.tuwien.ac.at/fileadmin/topics/simulators/FeatureList\\_SL.pdf](http://www.nt.tuwien.ac.at/fileadmin/topics/simulators/FeatureList_SL.pdf)
- [32] Instituto de Telecomunicaciones (TC), Universidad Tecnologica de Viena. (2014) LTE Downlink System Level Simulator. [Online]. <http://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/lte-downlink-system-level-simulator/>
- [33] G. Piro, et al, "Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source," *IEEE TRANS. VEH. TECHNOL*, Octubre 2010.
- [34] A. Alexiou, et al, "Efficient MCS Selection for MBSFN Transmissions over LTE Networks," *Wirelessdays*, Octubre 2010.
- [35] R. Ratasuk A. Ghosh, *Essentials of LTE and LTE-A*, 1st ed. Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2011.
- [36] 3GPP, TR 25.890 Technical Specification Group Radio Access Network; High Speed Downlink Packet Access:UE Radio Transmission and Reception (FDD), Version 1.0.0 Release 5, Mayo. 2002.
- [37] 3GPP, TR 36 942 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios, Version 8.2.0 Release 8, Julio 2009.



- [38] E. Martinez, C. Paz, Simulador Basico a Nivel de Sistema para LTE, Tesis de pregrado, Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2014.
- [39] Small Cell Forum, "Global Consumer Survey of In-Home Mobile Services and Femtocells," Small Cell Forum, Reino Unido, Documento 2013.



# APENDICE A INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SIMULADOR LTE-SIM

## A.1 INSTALACION DE LTE-Sim

LTE-Sim funciona en diferentes distribuciones de Linux y de Windows, lo más recomendable es utilizar una versión de Ubuntu Desktop igual o superior a la 9.

Se debe abrir la página del Departamento de Telemática del Politécnico de Bari, "[http://telematics.poliba.it/index.php/en/?option=com\\_content&view=article&id=158&Itemid=&lang=en](http://telematics.poliba.it/index.php/en/?option=com_content&view=article&id=158&Itemid=&lang=en)," y descargar la versión actual de LTE-Sim, en este caso el *release 5* como se puede apreciar en la Figura A-1.

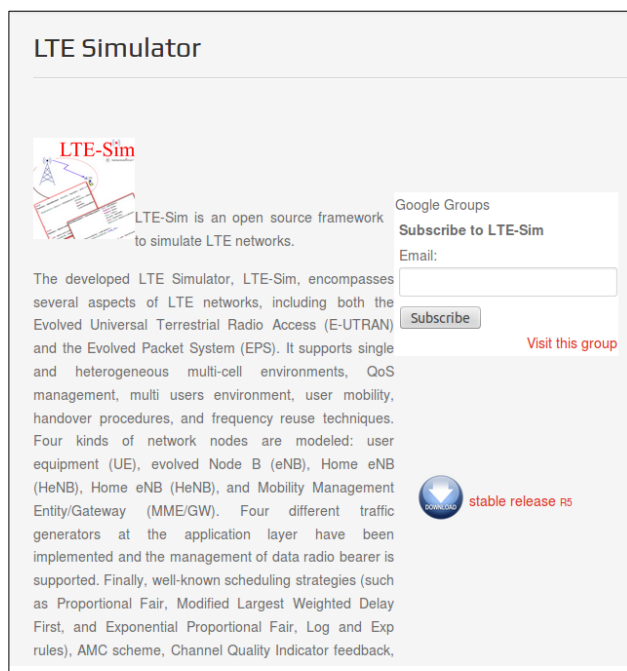


Figura A-1 Pagina Web de descarga del simulador LTE-Sim.

En primer lugar se debe instalar el compilador gcc que Linux utiliza para interpretar el lenguaje C++, desde la consola de Linux se accede con permisos de root y se escriben los siguientes comandos:

```
# apt-get update  
# apt-get install gcc
```

En caso de que no se encuentre en el repositorio gcc se puede utilizar:



```
# apt-get install c++
```

Si aparece el error:

E: Encountered a section with no Package: header

E: Problem with MergeList

/var/lib/apt/lists/linux.dropbox.com\_ubuntu\_dists\_precise\_main\_i18n\_Translation-es

E: No se pudieron analizar o abrir las listas de paquetes o el archivo de estado

Se debe utilizar el siguiente comando:

```
# rm /var/lib/apt/lists/* -vf
```

Después de que el proceso de instalación de gcc haya terminado con éxito, se accede a la carpeta donde se ha guardado el archivo.zip de LTE-Sim descargado anteriormente como lo muestra la Figura A-2.

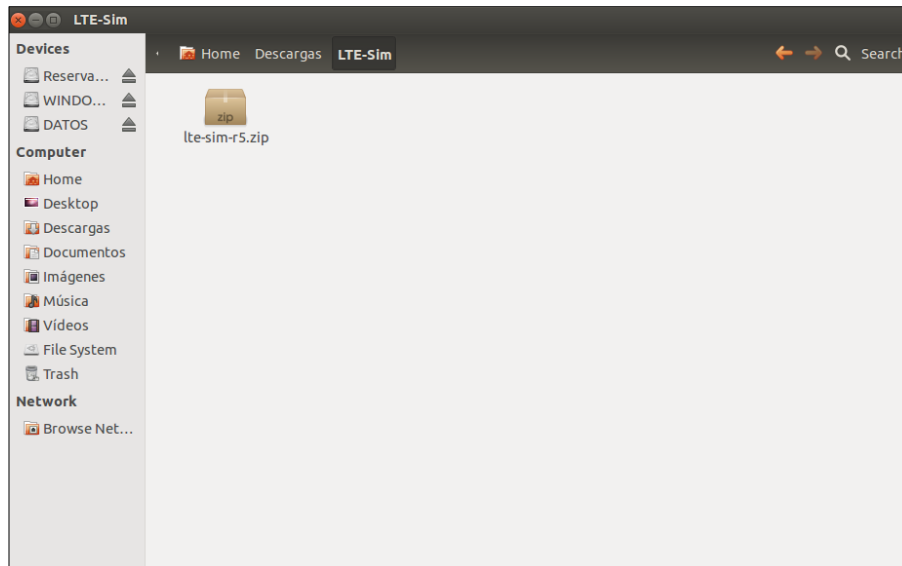


Figura A-2 Archivo .zip descargado de LTE-Sim.

Extraer el contenido del archivo utilizando el administrador de archivos de Ubuntu:

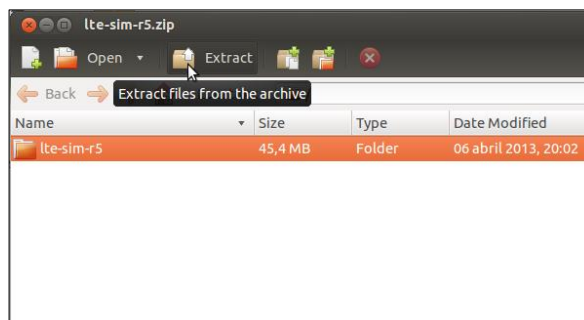


Figura A-3 Extracción de paquetes del simulador.





También es posible extraer la información con el siguiente comando:

```
# unzip lte-sim-r5.zip
```

Después es necesario dar permisos de ejecución al archivo `make_load-parameter-file.sh`, para esto se accede a la ruta `../LTE-Sim/CONFIG` y se utiliza el comando `chmod`:

```
# cd CONFIG  
# chmod 777 make_load-parameter-file.sh
```

El archivo ahora debe tener permisos de ejecución, resaltado en color verde como se puede apreciar en la Figura A-4:

```
root@diego-K45VD:/home/diego/Descargas/LTE-Sim/lte-sim-r5# cd CONFIG/  
root@diego-K45VD:/home/diego/Descargas/LTE-Sim/lte-sim-r5/CONFIG# ls  
global_config      LTE-Sim             make_load-parameter-file.sh  
load-parameters.h.back  LTE-Sim-end  
load-parameters-start  LTE-Sim-end-clear
```

Figura A-4 Permisos de ejecución.

Se procede a iniciar el simulador, para esto se regresa al directorio raíz de LTE-Sim mostrado en la Figura A-5 :

```
root@diego-K45VD:/home/diego/Descargas/LTE-Sim/lte-sim-r5# ls  
AUTHORS  CONFIG      Debug  LICENSE  README      RUN  TOOLS  
bugs     CONTRIBUTORS  DOC    Makefile  RELEASE NOTES  src
```

Figura A-5 Directorio raíz de instalación del simulador LTE-Sim.

Y se escribe el siguiente comando:

```
# make
```

En el caso que una versión anterior del simulador ya hubiese estado instalada en Ubuntu o que se realice un cambio en los archivos de configuración, es necesario utilizar el comando:

```
# make clean
```

Cada vez que se realice una modificación a los archivos del simulador, es necesario guardar los archivos modificados, usar el comando “`make clean`” y posteriormente volver a compilar el programa con el comando “`make`”. De no hacer lo anterior los cambios realizados no tendrán efecto.

Después de realizar este proceso el simulador ya está listo para trabajar con la configuración que trae por defecto, la Figura A-6 muestra la ventana principal del simulador en la terminal de comandos de Ubuntu.



```
Author: Giuseppe Piro
<g.piro@poliba.it, peppe@giuseppepiro.com>

*****
LTE-Sim has been installed correctly on your mashine!
*****

Now you can star using LTE-Sim.

Link:
web:          http://telematics.poliba.it/LTE-Sim
mailing list: http://groups.google.com/group/lte-sim

+++++ ENJOY the LTE-Sim +++++

root@diego-K45VD:/home/diego/Descargas/LTE-Sim/lte-sim-r5# ls
AUTHORS  CONFIG          Debug  LICENSE  Makefile  RELEASE_NOTES  src
bugs     CONTRIBUTORS    DOC    LTE-Sim  README    RUN            TOOLS
```

Figura A-6 Ventana principal del simulador LTE-Sim.

## A.2 CONFIGURACIÓN GLOBAL DE LTE-Sim

El archivo de configuración “global\_config” que se encuentra en la ruta “/LTE-Sim/CONFIG” contiene una serie de banderas generales que permiten activar o desactivar módulos del simulador, en la Figura A-7 se muestran las líneas 18 a 26 donde se encuentran los modelos de canal que soporta el simulador:

```
18 /* channel model type*/
19 static bool _simple_jakes_model_ = true;
20 static bool _PED_A_ = false;
21 static bool _PED_B_ = false;
22 static bool _VEH_A_ = false;
23 static bool _VEH_B_ = false;
24 static bool _channel_TU_ = true;
25 static bool _channel_AWGN_ = false;
```

Figura A-7 Líneas de configuración de modelo de canal del archivo "global\_config".

Se utiliza la bandera “true” para seleccionar un tipo de canal, se usa la bandera “false” para desactivar los demás tipos de canales, como se observa en la Figura A-7 los modelos de canal seleccionados son “\_PED\_A\_” y “\_channel\_TU\_” que corresponden al modelo Peatonal A y Urbano Típico definidos por la ITU.

En la Figura A-8 se aprecian las líneas 27 a 54 donde se encuentran los diferentes módulos del simulador que pueden ser mostrados en el archivo de resultados de una simulación.



```
27 /* debugging */
28 //#define APPLICATION_DEBUG
29 //#define BEARER_DEBUG
30 //#define RLC_DEBUG
31 //#define MAC_QUEUE_DEBUG
32 //#define FLOW_MANAGER_DEBUG
33 //#define FRAME_MANAGER_DEBUG
34 //#define ENODEB_DEBUG
35 //#define UE_DEBUG
36 //#define PHY_DEBUG
37 //#define SINR_DEBUG
38 //#define BLER_DEBUG
39 //#define MOBILITY_DEBUG
40 //#define MOBILITY_DEBUG_TAB
41 //#define HANDOVER_DEBUG
42 //#define TRANSMISSION_DEBUG
43 //#define CHANNEL_REALIZATION_DEBUG
44 //#define TEST_DEVICE_ON_CHANNEL
45 //#define TEST_START_APPLICATION
46 //#define TEST_ENQUEUE_PACKETS
47 //#define TEST_PROPAGATION_LOSS_MODEL
48 #define INTERFERENCE_DEBUG
49 //#define TEST_CQI_FEEDBACKS
50 //#define SCHEDULER_DEBUG
51 //#define AMC_MAPPING
52 //#define PLOT_USER_POSITION
53 //#define TEST_UL_SINR
54 #define TEST_DL_SINR
```

Figura A-8 Módulos de depuración de resultados.

Si se desea que en el archivo de resultados se muestre la información sobre alguno de los procesos de la lista se deben borrar los signos de *forwardslash* “/”, por ejemplo, en la Figura A-8 el archivo de resultados de una simulación solo se mostrará información sobre la SINR en el enlace de bajada (`#define TEST_DL_SINR`) y la Interferencia (`#define INTERFERENCE_DEBUG`). Cabe aclarar que activar o desactivar cualquiera de los módulos solo determina la representación de los resultados, de ninguna manera afecta las características funcionales del simulador.

### A.3 PARAMETRIZACION Y SIMULACION DE ESCENARIOS

En general para simular una vez un escenario con nombre “ESCENARIO” y parámetros P1 P2 P3... Pn y obtener el resultado de la simulación en el archivo RESULTADO.txt se utiliza la siguiente sintaxis en la consola de Ubuntu:

```
#. /LTE-Sim ESCENARIO P1 P2 P3... Pn > RESULTADO.txt
```

Para compilar un escenario de prueba incluido en LTE-Sim, se utiliza el siguiente comando:  
`#. /LTE-Sim Simple`



Para acceder a la información de ayuda y a los parámetros de simulación por escenario se utiliza el comando:

```
#. /LTE-Sim -h
```

LTe-Sim provee la posibilidad de simulación de los siguientes escenarios:

- *Simple.*
- *Multicell.* (Escenario de múltiples macroceldas).
- *Single cell with femto.* (Una macrocelda con femtoceldas).
- *Single cell with interference.* (Una macrocelda con interferencia).
- *Single cell without interference.* (Una macrocelda sin interferencia).
- *Single cell with streets.* (Unica macrocelda con calles)

Para el caso del escenario SingleCellWithFemto los parámetros configurables son los siguientes:

```
/LTE-Sim SingleCellWithFemto radius nbBuildings BuildingType activityRatio nbMacroUE  
nbFemtoUE nbVoip nbVideo nbBE nbCBR sched_type frame_struct speed accessPolicy maxDelay  
videoBitRate seed(optional)
```

Dónde:

- **radius:** tamaño de la macrocelda dado en kilómetros.
- **nbBuildings:** número de edificios en la macrocelda.
- **BuildingType:** configura el tipo de edificio, donde 0 es la grilla 5\*5 y 1 *dual stripe*.
- **activityRatio:** es la probabilidad de que las femtoceldas estén activas, va de 0 a 1, siendo 0 equivalente a 0% de probabilidad de femtoceldas activas (ninguna activa) y 1 equivale a 100% de probabilidad de femtoceldas activas (todas activas).
- **nbMacroUE:** número de usuarios por macrocelda.
- **nbFemtoUE:** número de usuarios por femtocelda.
- **nbVoip:** activar o desactivar la aplicación VoiP.
- **nbVideo:** activar o desactivar la aplicación de video.
- **nbBE:** activar o desactivar la aplicación infinite buffer.
- **nbCBR:** activar o desactivar la aplicación CBR.
- **Sched\_type:** seleccionar el tipo de planificador de paquetes.
- **Frame\_struct:** seleccionar el esquema de multiplexación.
- **Speed:** velocidad en Km/h del usuario.
- **accessPolicy:** esquema de acceso, close access y open access.
- **maxDelay:** máximo retardo permitido.
- **videoBitRate:** tasa de bits de paquetes de video.

Un ejemplo de sintaxis para simular el escenario SingleCellWithFemto y obtener el resultado en un archivo llamado trace.tr es el siguiente:

```
--> ./LTE-Sim SingleCellWithFemto 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 3 0 0.1 128 > trace.tr
```



## A.4 CONFIGURACION DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACION A TRAVES DE LOS ARCHIVOS DE LTE-Sim

Los escenarios de simulación además de la configuración de los parámetros mostrados en la sección A.3, requieren la edición de otros aspectos del sistema, para esto es necesario modificar los archivos de LTE-Sim, los aspectos a editar se detallan a continuación.

### A.4.1 Posición de los macro usuarios

En el archivo "SingleCellWithFemto.h" en la ruta "../LTE-Sim/src/scenarios" desde la línea 320 hasta la 360 se encuentra el método que crea los usuarios asignados a la macrocelda, en las líneas 322 y 323 mostrado en la Figura A-9 se observa la asignación de las posiciones en los ejes Y y X.

```
318 //Create UEs
319 for (int i = 0; i < nbUE; i++)
320 {
321     //ue's random position
322     double posX = positions->at (idUE - totalNbCell)->GetCoordinateX ();
323     double posY = positions->at (idUE - totalNbCell)->GetCoordinateY ();
324     double speedDirection = (double)(rand() %360) * ((2*3.14)/360);;
```

Figura A-9 Configuración de posición de macrousuarios.

Donde nbUE es el número de macrousuarios asignados, así el ciclo for permite que a cada macrousuario que se crea (desde 0 a nbUE-1), se le asigne un par de coordenadas de un vector que contiene pares de coordenadas aleatorias. En algunos casos es necesario que el usuario se ubique para todas las simulaciones en la misma posición, para esto es necesario editar el código, por ejemplo si se va a simular con un solo usuario y se desea que en cada simulación se ubique en la posición X=100 y Y=100, el código correspondiente es:

```
//Create UEs
for (int i = 0; i < nbUE; i++)
{
    //ue's random position
    double posX = 100;
    double posY = 100;
```

Con más de un usuario se hace necesario agregar una lógica simple que permita la asignación de acuerdo al identificador "i", por ejemplo si en cada simulación se fuese a asignar 3 usuarios, el primero en X=100 y Y=100, el segundo en X=200 y Y=200, el tercero en X=300 y Y=300, el código implementado sería:

```
//Create UEs
for (int i = 0; i < nbUE; i++)
{
    //ue's random position
    if (i==0)
```



```
{  
    double posX = 100;  
    double posY = 100;  
}  
else if (i==1)  
{  
    double posX = 200;  
    double posY = 200;  
}  
else if (i==2)  
{  
    double posX = 300;  
    double posY = 300;  
}
```

#### A.4.2 Potencia de transmisión de los HeNB

La potencia de transmisión de los HeNBs es por defecto 20 dBm, en el archivo “henb-lte-phy.cpp” en la ruta “../LTE-Sim/src/phy” este valor está en la línea 26 mostrado en Figura A-10.

```
24 HenbLtePhy::HenbLtePhy()  
25 {  
26     SetTxPower(20); //dBm  
27 }  
28  
29 HenbLtePhy::~HenbLtePhy()  
30 {}
```

Figura A-10 Configuración de potencia de transmisión de HeNB.

Solo es necesario cambiar el argumento que utiliza la función SetTxPower, por ejemplo si se desea que la potencia de transmisión de los HeNB sea de 10 dBm solo se realizan los siguientes cambios:

```
HenbLtePhy::HenbLtePhy()  
{  
    SetTxPower(10);  
}
```

#### A.4.3 Potencia de transmisión del eNB

La potencia de transmisión del eNB es por defecto 43 dBm, en el archivo “enb-lte-phy.cpp” en la ruta “../LTE-Sim/src/phy” este valor se encuentra en la línea 60 como se aprecia en la Figura A-11.



```
51 EnbLtePhy::EnbLtePhy()  
52 {  
53     SetDevice(NULL);  
54     SetDlChannel(NULL);  
55     SetUlChannel(NULL);  
56     SetBandwidthManager(NULL);  
57     SetTxSignal(NULL);  
58     SetErrorModel(NULL);  
59     SetInterference(NULL);  
60     SetTxPower(43); //dBm  
61 }
```

Figura A-11 Configuración de potencia de transmisión de eNB.

Solo es necesario cambiar el argumento que utiliza la función SetTxPower, por ejemplo si se desea que la potencia de transmisión del eNB sea de 30 dBm se realizan los siguientes cambios:

```
EnbLtePhy::EnbLtePhy()  
{  
    SetDevice(NULL);  
    SetDlChannel(NULL);  
    SetUlChannel(NULL);  
    SetBandwidthManager(NULL);  
    SetTxSignal(NULL);  
    SetErrorModel(NULL);  
    SetInterference(NULL);  
    SetTxPower(30); //dBm  
}
```

#### A.4.4 Posición de los edificios

En el archivo "IndoorScenarios.h" en la ruta "../LTE-Sim/src/utility" desde la línea 47 hasta la 77 se encuentra el método que crea los edificios en la macrocelda, en las líneas 52 y 53 de la Figura A-12 se observa la asignación de las posiciones en los ejes Y y X para la posición central de cada edificio.

```
47     for (int i = 0; i < nbBuilding; i++)  
48     {  
49         r = (double)(rand() % (int)radius);  
50         angle = (double)(rand() % 360) * ((2 * 3.14) / 360);  
51         double x = r * cos(angle);  
52         double y = r * sin(angle);
```

Figura A-12 Configuración de la posición de edificios.

Donde nbBuilding es el número de edificios por macrocelda, este código crea cada edificio en una posición X y Y que se genera al convertir una coordenada polar (r,angle) a coordenadas cartesianas, donde r es un valor aleatorio entre 0 y el radio de la macrocelda,



angle es un valor de ángulo aleatorio entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , si se desea ubicar el edificio en las coordenadas cartesianas 400,400 el código debe ser modificado de la siguiente forma:

```
for (int i = 0; i < nbBuilding; i++)  
{  
    double x = 400;  
    double y = 400;
```

Con más de un edificio se hace necesario agregar una lógica simple que permita la asignación de acuerdo al identificador “i”, por ejemplo si en cada simulación se desea crear 3 edificios, el primero en X=400, Y=400, el segundo en X=500, Y=500 y el tercero en X=600, Y=600, el código implementado sería:

```
for (int i = 0; i < nbBuilding; i++)  
{  
    if (i == 0)  
    {  
        x = 400;  
        y = 400;  
    }  
    if (i == 1)  
    {  
        x = 500;  
        y = 500;  
    }  
    if (i == 2)  
    {  
        x = 600;  
        y = 600;  
    }  
}
```

#### A.4.5 Handover

LTE-Sim permite activar o desactivar el handover para los macrouusuarios y femtousuarios, en el caso del escenario SingleCellWithFemto es posible permitir al macrouusuario realizar el traspaso a las femtoceldas (acceso abierto), o negarle esta posibilidad (acceso cerrado).

En el archivo el archivo SingleCellWithFemto.h en la ruta “./LTE-Sim/src/scenarios” desde la línea 326 hasta la 331 se encuentra el método que crea los macrouusuarios mostrado en la Figura A-13.

```
326 UserEquipment* ue = new UserEquipment (idUE,  
327     posX, posY, speed, speedDirection,  
328     cells->at (j),  
329     eNBs->at (j),  
330     0, //HO deactivated!  
331     Mobility::CONSTANT_POSITION);
```

Figura A-13 Configuración de handover de macrouusuarios.





Uno de los argumentos de este método es una bandera booleana en la línea 330, cuando está en 0 el macrouuario no puede conectarse a ninguna femtocelda y cuando está en 1 el macrouuario si puede realizar el traspaso y conectarse a la femtocelda.

De igual manera el método que activa o desactiva el handover de los femtousuarios se encuentra entre las líneas 380 y 385 mostrado en la :

```
379      UserEquipment* ue = new UserEquipment (idUE,  
380          posX, posY, speed, speedDirection,  
381          femtocells->at (j),  
382          HeNBs->at (j),  
383          0, //HO deactivated!  
384          Mobility::CONSTANT_POSITION);
```

Figura A-14 Configuración de handover de femtousuarios.

El control de la posibilidad de conectarse a una femtocelda o macrocelda también está determinada por una bandera booleana en la línea 384, cuando está en 0 el femtousuario no puede realizar el procedimiento de traspaso hacia una femtocelda o macrocelda diferente, cuando está en 1 el femtousuario si puede realizar el traspaso y conectarse a otra femtocelda o macrocelda.

#### A.4.6 Movilidad de usuario

Además de establecer la posición del macrouuario o de los femtousuarios es posible fijar la dirección de su movimiento, en el archivo SingleCellWithFemto.h en la ruta “../LTE-Sim/src/scenarios” desde la línea 320 hasta la 360 mostrado en la Figura A-15 se encuentra el método que crea los usuarios asignados a la macrocelda, en la línea 324 se define la dirección del movimiento.

```
318      //Create UEs  
319      for (int i = 0; i < nbUE; i++)  
320      {  
321          //ue's random position  
322          double posX = positions->at (idUE - totalNbCell)->GetCoordinateX ();  
323          double posY = positions->at (idUE - totalNbCell)->GetCoordinateY ();  
324          double speedDirection = (double)(rand() %360) * ((2*3.14)/360);;
```

Figura A-15 Configuración de movilidad de usuarios.

La variable “speedDirection” define el ángulo del vector movimiento, en el caso de la configuración mostrada el ángulo es un valor aleatorio entre 0° y 360°, si se desea por ejemplo establecer la dirección del movimiento para todas las simulaciones en 180° el código sería:



```
//Create UEs
for (int i = 0; i < nbUE; i++)
{
    //ue's random position
    double posX = positions->at (idUE - totalNbCell)->GetCoordinateX ();
    double posY = positions->at (idUE - totalNbCell)->GetCoordinateY ();
    double speedDirection = (double)(180) * ((2*3.14)/360);;
```

#### A.4.7 Zonas de distribución de los femtousuarios

Por defecto en LTE-Sim los femtousuarios se distribuyen uniformemente en una zona circular cuyo centro es el mismo del apartamento asignado, la probabilidad de que el femtousuario este en el interior del apartamento donde se encuentra su HeNB es del 80%, la probabilidad de que el femtousuario se encuentre en las vecindades exteriores es del 20%, la distribución de los femtousuarios viene definida en el archivo UserDistribution.h, entre las líneas 87 y 99 de la Figura A-16:

```
87     for (int i = 0; i < nbUE; i++)
88     {
89         r = (double)(rand() % (int)side);
90         angle = (double)(rand() % 360) * ((2*3.14)/360);
91
92         CartesianCoordinates *newCoordinates = GetCartesianCoordinatesFromPolar (r, angle);
93
94         //Compute absoluteCoordinates
95         newCoordinates->SetCoordinateX (cellCoordinates->GetCoordinateX () + newCoordinates->GetCoordinateX ());
96         newCoordinates->SetCoordinateY (cellCoordinates->GetCoordinateY () + newCoordinates->GetCoordinateY ());
97
98         vectorOfCoordinates->push_back(newCoordinates);
99     }
```

Figura A-16 Configuración zonas de distribución de los femtousuarios.

Para algunos escenarios es necesario que la probabilidad de que el femtousuario se encuentre en el interior del apartamento donde se encuentra su HeNB sea del 100%, para esto se debe cambiar el código de las líneas 90 y 91 de la Figura A-16 por el siguiente:

```
//angle = (double)(rand() % 360) * ((2*3.14)/360);
//double k = sin (2*angle);
//double kabs = fabs(2*k);
//r = (double)((rand() % 4) + kabs);
```

Si se desea que la probabilidad de que el femtousuario se encuentre en las vecindades exteriores de su apartamento sea del 100%, se debe cambiar el código de las líneas 90 y 91 de la Figura A-16 por el siguiente:

```
//angle = (double)(rand() % 360) * ((2*3.14)/360);
//double k = sin (2*angle);
//double kabs = fabs(2*k);
//r = (double)(5 + kabs + rand() % 5);
```



## **APENDICE B**

# **ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

A continuación, en la Tabla B-1 se muestran los escenarios de simulación realizados, donde se detallan específicamente cada uno de los parámetros configurados.



Escenario	Descripción	Número de usuarios	Posición usuarios	Densidad de femtoceldas (Número de edificios)	Potencia transmisión	Posición de edificios en plano cartesiano	Control de acceso
Interferencia Cross-layer	Macrouuario interferido por HeNB	1 Mue	Aleatoria	25,100,200,400 (2,4,8,16)	Ptx HeNB=20 dBm	Aleatoria	Close Access
			X=100 Y=100	25,100,200,400 (2,4,8,16)			
			X=100,200,300,400 Y=100,200,300,400	100 (4)			
	Femtousuarios interferido por eNB	1 Fue por Femtocelda	Interior edificio	25 (1)	Ptx HeNB=0,10,20 dBm	X=100,200,300,400 Y=100,200,300,400	Close Access
			Exterior edificio		Ptx eNB= 43 dBm	X=25,400 Y=25,400	Close Access HO OFF Close Access HO ON
	Movilidad	1	Recorrido paralelo a edificios	100 (4)	Ptx HeNB=0,10,20 dBm	X=0 Y=200	Close Access Open acces HO ON HO OFF

Tabla B-1 Escenarios de simulación con parámetros técnicos.



Interferencia Co-layer	Femtousuarios (AP1) interferidos por HeNBs(AP2)	1 Fue por Femtocel da	Aleatoria	25 (1)	Ptx HeNB= 20 dBm eNB desactivado	X=200 Y=200 Activity Ratio= 0,2, 0.5, 1	Close Access
			Aleatoria		Ptx HeNB=0,10,2 0 dBm eNB desactivado	X=200 Y=200 Activity Ratio=1	
	Movilidad	1 Fue por Femtocel da	Recorrido de Fue1 hacia zona de AP2	50 (2)	Ptx HeNB=0,10,2 0 dBm eNB desactivado	X=200 Y=200	Close Access Open Access
Siglas	Ptx: Potencia de transmisión Fue: Femtousuario Mue: Macrousuuario AP: Punto de acceso (Access Point)				X=Posición en el eje X del plano cartesiano. Y= Posición en el eje X del plano cartesiano. HO OFF: Handover desactivado. HO ON: Handover activado.		