

SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE



**Claudia Shirley Paz Arteaga
Eileen Johana Martínez Gómez**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL
Popayán, 2014**

SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE



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

**Claudia Shirley Paz Arteaga
Eileen Johana Martínez Gómez**

**Director
Ing. Claudia Milena Hernández Bonilla**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL
Popayán, 2014**



TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3. MOTIVACION	2
1.4. OBJETIVOS	2
1.4.1. Objetivo General.....	2
1.4.2. Objetivos Específicos	2
1.5. CONTRIBUCION.....	3
1.6. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO	3
CAPÍTULO 2: GENERALIDADES	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA LTE	5
2.3. ARQUITECTURA DE LTE	7
2.3.1. Equipo de Usuario	8
2.3.2. Red de Acceso E-UTRAN	9
2.3.3. Núcleo de Red EPC.....	10
2.4. CARACTERÍSTICAS DE LTE	11
2.4.1. Bloque de Recursos Físicos	11
2.4.2. Estrategia de Planificación de Paquetes	12
2.4.3. Reúso de Frecuencia.....	12
2.4.4. Ancho de Banda Variable	14
2.4.5. Diversidad Espacial	14
2.5. INTERFERENCIA INTERCELDA.....	15
2.6. INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA LTE	16
2.6.1. Relación Señal a Interferencia más Ruido.....	16
2.6.2. Probabilidad de Degradación	17
2.6.3. Probabilidad de Interrupción.....	17
2.6.4. Índice de Calidad del Canal.....	17



2.6.5.	Esquema de Modulación y Codificación (MCS).....	19	
2.6.6.	Tamaño del Bloque de Transporte	19	
2.6.7.	<i>Throughput</i>	21	
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL SIMULADOR BÁSICO			
A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE			23
3.1.	INTRODUCCIÓN	23	
3.2.	ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	24	
3.2.1.	Problema de Estudio	24	
3.2.2.	Requerimientos.....	25	
3.3.	DISEÑO	26	
3.3.1.	Definición del Modelo del Sistema.....	26	
3.3.2.	Algoritmo del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE ..	27	
3.3.3.	Consideraciones del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE	34	
3.3.4.	Entradas y Salidas del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE	43	
3.4.	IMPLEMENTACIÓN	45	
3.4.1.	Herramienta de Simulación	45	
3.4.2.	Cálculo de Cobertura	45	
3.4.3.	Cálculo de Capacidad.....	48	
3.4.4.	Resumen de Parámetros de Entrada al Simulador.....	55	
3.5.	PRUEBAS	56	
CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO			57
4.1.	INTRODUCCION	57	
4.2.	CASO DE ESTUDIO 1	58	
4.2.1.	Resultados y Análisis de Cobertura.....	58	
4.2.2.	Resultados y Análisis de Capacidad.....	59	
4.3.	CASO DE ESTUDIO 2.....	71	
4.3.1.	Resultados y Análisis de Cobertura.....	72	
4.3.2.	Resultados y Análisis de Capacidad.....	80	



4.4.	CASO DE ESTUDIO 3.....	86
4.4.1.	Resultados y Análisis de Cobertura.....	86
4.4.2.	Resultados y Análisis de Capacidad.....	87
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		94
5.1.	INTRODUCCION	94
5.2.	CONCLUSIONES.....	94
5.3.	TRABAJOS FUTUROS	97
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		98



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Evolución de los sistemas móviles celulares hasta LTE	6
Figura 2.2	Arquitectura del sistema LTE o EPS	8
Figura 2.3	Dominios del Equipo de Usuario	9
Figura 2.4	Arquitectura E-UTRAN	10
Figura 2.5	Arquitectura de la red troncal de LTE - EPC	11
Figura 2.6	Bloque de recursos físicos	12
Figura 2.7	Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC	13
Figura 2.8	Configuraciones de antena para LTE	15
Figura 2.9	Asignación de CQI	18
Figura 2.10	Tamaño del bloque de transporte.....	20
Figura 3.1	Modelo de desarrollo de software lineal secuencial	23
Figura 3.2	Diagrama de flujo para cálculo de cobertura	29
Figura 3.3	Diagrama de flujo del escenario para cálculo de capacidad	33
Figura 3.4	Distribución de PRB por celda.....	35
Figura 3.5	Patrón de radiación antena K742215	39
Figura 3.6	Patrón de radiación de antena K80010681	40
Figura 3.7	Ganancia normalizada de la antena TR 36.942	41
Figura 3.8	Ángulo formado entre un eNB y UE	42
Figura 3.9	Diagrama de entradas y salidas del simulador básico a nivel de sistema para LTE	44
Figura 3.10	Configuración de celdas para bloque de cálculo de capacidad.....	49
Figura 3.11	Sectorización de las celdas para bloque de cálculo de capacidad	50
Figura 4.1	Patrón de ganancia teórico y cobertura en función de la potencia	60
Figura 4.2	Patrón de ganancia teórico y cobertura en función de la potencia	60
Figura 4.3	Patrón de ganancia teórico y cobertura en función de la potencia	61



Figura 4.4 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para la antena TR 36.942..... 63

Figura 4.5 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para la antena Katherein 742215 63

Figura 4.6 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para la antena Katherein 80010681 64

Figura 4.7 Función de distribución acumulativa de la SINR del sistema para el caso de estudio 1 66

Figura 4.8 Función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema para el caso de estudio 1 69

Figura 4.9 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 10 Km 73

Figura 4.10 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 6 Km 73

Figura 4.11 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 2 Km 74

Figura 4.12 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 500m..... 74

Figura 4.13 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 10 Km 76

Figura 4.14 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 6 Km 76

Figura 4.15 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 2 Km 77

Figura 4.16 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 500 m..... 77

Figura 4.17 Función de distribución acumulativa de la SINR del sistema para el caso de estudio 3 79

Figura 4.18 SINR promedio del sistema para el caso de estudio 2 82

Figura 4.19 Función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema para el caso de estudio 2 83

Figura 4.20 *Throughput* promedio del sistema para el caso de estudio 2 85

Figura 4.21 Función de distribución acumulativa de la SINR del sistema para el caso de estudio 3 88



Figura 4.22 SINR promedio del sistema para el caso de estudio 3..... 90

Figura 4.23 Función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema para el caso de estudio 3 91

Figura 4.24 *Throughput* promedio del sistema para el caso de estudio 3 93



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Bloques de recursos vs ancho de banda.....	14
Tabla 2.2	CQI.....	18
Tabla 2.3	Índice TBS.....	21
Tabla 3.1	Modelo de propagación y ambiente relacionado	37
Tabla 3.2	Parámetros de simulación según TR 25996.....	37
Tabla 3.3	Parámetros de antena K742215.....	38
Tabla 3.4	Parámetros de antena K80010681.....	39
Tabla 3.5	Resumen parámetros de entrada al simulador.....	56
Tabla 4.1	Parámetros de entrada al simulador para el caso de estudio 1.....	59
Tabla 4.2	Cobertura máxima caso de estudio 1- Sin desvanecimiento.....	61
Tabla 4.3	Potencia promedio caso de estudio 1- Sin desvanecimiento	62
Tabla 4.4	Cobertura máxima caso de estudio 1- Desvanecimiento rápido	65
Tabla 4.5	Potencia promedio caso de estudio 1- Desvanecimiento rápido.....	65
Tabla 4.6	Probabilidad de degradación e interrupción caso de estudio 1	67
Tabla 4.7	Medidas estadísticas caso de estudio 1	68
Tabla 4.8	Rango de throughput de sistema caso de estudio 1	70
Tabla 4.9	Medidas estadísticas caso de estudio 1	71
Tabla 4.10	Parámetros de entrada al simulador para el caso de estudio 2.....	72
Tabla 4.11	Posición del eNB 1 caso de estudio 2	72
Tabla 4.12	Potencia promedio caso de estudio 2- Sin desvanecimiento	75
Tabla 4.13	Potencia promedio caso de estudio 2- Con desvanecimiento rápido ..	78
Tabla 4.14	Probabilidad de degradación e interrupción caso de estudio 2	80
Tabla 4.15	Medidas estadísticas caso de estudio 2	81
Tabla 4.16	Rango de throughput de sistema caso de estudio 2	84
Tabla 4.17	Medidas estadísticas caso de estudio 2	85
Tabla 4.18	Parámetros de entrada al simulador para el caso de estudio 3.....	86
Tabla 4.19	Probabilidad de degradación e interrupción caso de estudio 3	88



Tabla 4.20 Medidas estadísticas caso de estudio 3	89
Tabla 4.21 Rango de throughput de sistema caso de estudio 3	92
Tabla 4.22 Medidas estadísticas caso de estudio 3	92



LISTA DE ACRÓNIMOS

1G	Primera Generación, <i>First Generation</i>
2G	Segunda Generación, <i>Second Generation</i>
3G	Tercera Generación, <i>Third Generation</i>
3GPP	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación, <i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	Cuarta Generación, <i>Fourth Generation</i>
BER	Tasa de Error de Bit, <i>Bit Error Rate</i>
BLER	Tasa de Error de Bloques de Transporte, <i>Transport Block Error Rate</i>
BS	Estación Base, <i>Base Station</i>
CP	Plano de Control, <i>Control Plane</i>
CQI	Índice de Calidad del Canal, <i>Channel Quality Indication</i>
CS	Conmutación de Circuitos, <i>Circuit Switching</i>
DL	Enlace Descendente, <i>Downlink</i>
eNB	Nodo B Evolucionado, <i>evolved Node B</i>
EPC	Núcleo de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet Core</i>
EPS	Sistema de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet System</i>
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones, <i>European Telecommunications Standards Institute</i>
E-UTRAN	Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada, <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	Duplexación por División de Frecuencia, <i>Frequency Division Duplex</i>
FRF	Factor de Reúso de Frecuencia, <i>Frequency Reuse Factor</i>
HSDPA	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Descendente, <i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad, <i>High Speed Packet Access</i>
HSPA+	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad Evolucionado, <i>High Speed Packet Access Plus</i>
HSS	Servidor de Suscriptor Local, <i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Ascendente, <i>High Speed Uplink Packet Access</i>
ICI	Interferencia Inter Celda, <i>Inter Cell Interference</i>
ICIC	Coordinación Interferencia Inter Celda, <i>Inter Cell Interference Coordination</i>



IMT 2000	Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000, <i>International Mobile Telecommunications-2000</i>
IP	Protocolo de Internet, <i>Internet Protocol</i>
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones, <i>International Telecommunication Union</i>
LTE	Evolución de Largo Término, <i>Long Term Evolution</i>
MAC	Control de Acceso al Medio, <i>Medium Access Control</i>
MCS	Esquema de Modulación y Codificación, <i>Modulation and Coding Scheme</i>
ME	Equipo Móvil, <i>Mobile Equipment</i>
MIMO	Múltiples Entradas, Múltiples Salidas, <i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MISO	Múltiples Entradas y Única Salida, <i>Multiple-Input and Single-Output</i>
MME	Entidad de Gestión de Movilidad, <i>Management Mobility Entity</i>
MR	Máxima Velocidad, <i>Maximum Rate</i>
MT	Terminación Móvil, <i>Mobile Termination</i>
O&E	Operación y Mantenimiento, <i>Operation and Maintenance</i>
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia, <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OLSM	Multiplexación Espacial en Lazo Abierto, <i>Open Loop Spatial Multiplexing</i>
P-GW	Puerta de Enlace de la Red de Paquetes de Datos, <i>Packet Data Network Gateway</i>
PCEF	Función de Control de la Aplicación y de las Políticas, <i>Policy and Charging Enforcement Function</i>
PCRF	Función de Control de Políticas y Normas de Cobro, <i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
PDCP	Protocolo de Compresión de Paquete de Datos, <i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDU	Unidad de Datos de Protocolo, <i>Protocol Data Unit</i>
PF	Proporcional y Justa, <i>Proportional Fair</i>
PLMN	Red Pública Móvil Terrestre, <i>Public Land Mobile Network</i>
PR	Reuso Parcial, <i>Partial Reuse</i>
PRB	Bloque de Recursos Físicos, <i>Physical Resource Block</i>
PS	Conmutación de Paquetes, <i>Packet Switching</i>
PUSCH	Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente, <i>Physical Uplink</i>



	<i>Shared Channel</i>
QoS	Calidad del Servicio, <i>Quality of Service</i>
R5	<i>Release 5</i>
R6	<i>Release 6</i>
R7	<i>Release 7</i>
R8	<i>Release 8</i>
R99	<i>Release 99</i>
RB	Portador Radio, <i>Radio Bearer</i>
RF	Radio Frecuencia, <i>Radio Frequency</i>
RLC	Control de Enlace Radio, <i>Radio Link Control</i>
ROI	Región De Interés, <i>Region Of Interest</i>
RRM	Gestión de Recursos Radio, <i>Radio Resource Management</i>
RS	Señales de Referencia, <i>Reference Signals</i>
S-GW	Puerta de Enlace de Servicio, <i>Serving Gateway</i>
SAE	Evolución de la Arquitectura del Sistema, <i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única, <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SIMO	Única Entrada, Múltiples Salidas, <i>Single-Input and Multiple-Output</i>
SINR	Relación Señal a Interferencia más Ruido, <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SISO	Única Entrada, Única Salida, <i>Single-Input and Single-Output</i>
SR	Reúso de frecuencia Suave, <i>Soft-frequency Reuse</i>
TBS	Tamaño del Bloque de Transporte, <i>Transport Block Size</i>
TDD	Duplexación por División de Tiempo, <i>Time Division Duplex</i>
TE	Equipo Terminal, <i>Terminal Equipment</i>
TR	Reporte Técnico, <i>Technical Report</i>
TS	Especificación Técnica, <i>Technical Specification</i>
UE	Equipo de Usuario, <i>User Equipment</i>
UICC	Tarjeta Universal de Circuito Integrado, <i>Universal Integrated Circuit Card</i>
UL	Enlace Ascendente, <i>Uplink</i>
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móvil, <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USIM	Módulo de Identificación del Abonado Universal, <i>Universal Subscriber Identity Module</i>



MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.1. INTRODUCCIÓN

El auge de las comunicaciones móviles y su gran acogida a nivel mundial han impulsado su evolución a un ritmo acelerado, reflejando la existencia de un mercado dinámico que requiere de una elevada capacidad de adaptación para satisfacer los requerimientos de nuevas aplicaciones y servicios demandados por los usuarios, impulsando la investigación de nuevas tecnologías de red capaces de brindar altas velocidades de transmisión de datos y calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) [1] [2]. La tecnología de Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) surge como solución a los anteriores requerimientos y abre paso a la Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) de comunicaciones móviles celulares, garantizando la continuidad de la competitividad en la cadena de evolución del Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*), gracias a características como: baja latencia, movilidad intersistemas, tráfico basado en IP, ancho de banda adaptativo, mayor eficiencia espectral a bajo costo, entre otras [3].

Para cumplir con las características que exige la implementación de una red LTE es necesario el uso de herramientas software de planeación que permitan el análisis del desempeño en capacidad y cobertura. A diferencia de lo que sucede en el ambiente comercial, en la academia las soluciones orientadas a la simulación de redes LTE son escasas, por tal razón este trabajo de grado presenta un simulador estático básico a nivel de sistema para el análisis de capacidad y cobertura de una red LTE en el entorno académico [4].

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es vital para las instituciones educativas de nivel superior con programas en telecomunicaciones mantenerse vigentes a los cambios tecnológicos, lo que motiva a la implementación de simuladores con fines académicos que permitan al profesor y estudiante recrear e interactuar una situación real que de otro modo no sería posible, el uso de herramientas de simulación en la enseñanza permite el aprendizaje de temas de difícil comprensión y demostración [5].



Pese a su importancia en el ámbito académico el acceso a este tipo de herramientas es restringido debido a los altos costos de las licencias, que solo pueden ser pagadas por las grandes empresas de telecomunicaciones. En la actualidad existen pocas herramientas software de uso libre que permiten realizar análisis de cobertura y capacidad en una red LTE.

Teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas surge la necesidad de diseñar e implementar un software para uso en el ámbito académico que permita analizar la cobertura y capacidad de un sistema LTE con características de red y escenario definidas.

1.3. MOTIVACION

A diferencia de lo que sucede en el ambiente comercial, en la academia las soluciones orientadas a la simulación de redes LTE son escasas, entre las que se destacan: *System Level Simulation of LTE Networks* desarrollado por la Universidad Tecnológica de Vienna y LTE-SIM de la Universidad Politécnica Di Bari [6] [7], ambas pese a las múltiples características que ofrecen de la tecnología LTE carecen de documentación detallada y de una interfaz gráfica para que usuarios con conceptos básicos de la tecnología las usen. A nivel empresarial existen múltiples herramientas que brindan características completas de la tecnología LTE, documentación e interfaces amigables sin embargo el alto costo hace que no puedan ser usadas en la academia.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Implementar un simulador estático básico¹ a nivel de sistema para la tecnología Evolución de Largo Término.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un simulador estático básico a nivel de sistema basado en las especificaciones del *Release 8 (R8)* del 3GPP para LTE.

¹ Simulador estático básico: simulador que permita representar el sistema en un instante de tiempo determinado y obtener las pérdidas de propagación con la distancia, potencias recibidas, *throughput* por usuario y por celda según las condiciones del canal y la SINR a diferentes distancias considerando el patrón de radiación de antena.



- Analizar la cobertura y capacidad² de un sistema LTE para unas características de escenario y de red definidas.

1.5. CONTRIBUCIÓN

A continuación se presentan las contribuciones del trabajo de grado desarrollado:

- El presente trabajo de grado brinda una herramienta software con licencia académica, detallada en el Apéndice A, capaz de simular sistemas LTE con características de red y escenario definidas, siendo la primera versión de un simulador a nivel de sistema para LTE.
- A diferencia de los simuladores con licencia académica existentes, este simulador cuenta con una interfaz gráfica de usuario para la configuración de parámetros lo que mejora su usabilidad y ofrece documentación que presenta sus funcionalidades y características específicas.
- Se aplicó un procedimiento de verificación con el objetivo de comprobar la veracidad de los resultados ofrecidos por el simulador básico a nivel de sistema para LTE como se presenta en el Apéndice B.
- A partir de este trabajo de grado se desarrolló el artículo “*Simulador Básico a Nivel de Sistema para Cálculo de Capacidad en una Red LTE*” que fue aceptado para ser presentado como un artículo técnico en el evento “*2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM 2014)*” y publicado en las actas de la conferencia en IEEE Xplore®.

1.6. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

Este trabajo de grado se divide en cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta la motivación y objetivos del trabajo de grado. El segundo capítulo explica las generalidades de la tecnología LTE y los parámetros e indicadores más importantes en el desempeño a nivel de sistema considerados en el simulador. El tercer capítulo describe la metodología seguida para el desarrollo del simulador. El cuarto capítulo consigna tres casos de estudio en los que se varían las

²Capacidad: 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.



CAPÍTULO 1: MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

características de un sistema LTE para luego analizar los resultados en capacidad y cobertura obtenidos. Por último, en el quinto capítulo se muestran las conclusiones y los trabajos futuros.



GENERALIDADES

2.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se describen las características más relevantes de la tecnología LTE estudiadas para el desarrollo del simulador propuesto, adicionalmente se presentan los indicadores de desempeño a nivel de sistema usados en la implementación del simulador para realizar los cálculos y análisis del desempeño en capacidad y cobertura.

2.2. GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA LTE

Las tecnologías de comunicación móvil con el tiempo han evolucionado para adaptarse a la demanda creciente de aplicaciones y servicios con exigencias de velocidades de transmisión mayores y calidad de servicio. El camino evolutivo de estas tecnologías está representado en diferentes generaciones, todas enfocadas en maximizar el rendimiento y eficiencia en el entorno de las comunicaciones móviles.

Los sistemas móviles de Primera Generación (1G, *1st Generation*) utilizaron técnicas de transmisión analógica para ofrecer el servicio de voz. La Segunda Generación (2G, *2nd Generation*) apuntó a los primeros sistemas digitales, introdujo capacidad, cobertura, mayor eficiencia espectral y dispositivos más pequeños y económicos, además permitió la mensajería corta y los datos de baja velocidad [8].

Las tecnologías de Tercera Generación (3G, *3rd Generation*) fueron la respuesta por parte del 3GPP a la especificación del estándar global de Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000, *International Mobile Telecommunications - 2000*) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*). Los objetivos incluyeron garantía de la itinerancia mundial, interoperabilidad entre distintas tecnologías, velocidades más altas, experiencia de banda ancha móvil y mayor capacidad de la red [9].

El Sistema Universal de Telecomunicaciones Móvil (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) presentado en el *Release* de 1999 (R99) del 3GPP es la primera versión de las tecnologías de tercera generación, la evolución de UMTS conocida como Acceso por Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High Speed*



Packet Access) representa las mejoras en la interfaz radio y combina las tecnologías: Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Descendente (HSDPA ,High Speed Downlink Packet Access) y Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Ascendente (HSUPA , High Speed Downlink Packet Access) especificadas respectivamente en el Release 5 (R5) y Release 6 (R6) del 3GPP [10] [11]. A fin de mejorar el desempeño de las redes radio basadas en HSPA en términos de eficiencia espectral, velocidad de datos máxima y latencia, el Release 7 (R7) describe HSPA evolucionado (HSPA+, High Speed Packet Access Plus).

La creación y el desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones para dispositivos móviles motivó al 3GPP a definir la tecnología móvil celular evolución de largo término como la solución que representa el paso hacia la cuarta generación (4G, 4th Generation). La figura 2.1 muestra el camino de evolución de las tecnologías de comunicación móvil con sus características principales hasta llegar a LTE.



Release 3GPP	R99	R5	R6	R7	R8
Velocidad pico de transmisión de datos	0.384 Mbps DL	14 Mbps DL	14 Mbps DL	28/42 Mbps DL	160 Mbps DL
Velocidad de transmisión	0.064 Mbps DL	0.384 Mbps DL	6 Mbps DL	12 Mbps DL	50 Mbps DL
Años de especificación	1999	2002	2004	2007	2008
Disponibilidad comercial	2001	2005	2006	2008	2009

Figura 2.1 Evolución de los sistemas móviles celulares hasta LTE
Modificada de: [12]

Los requerimientos más importantes establecidos en el Reporte Técnico 25.913 (TR, Technical Report) [12] del 3GPP para LTE son:

- Altas tasas de transmisión de datos: 100 Mbps en el Enlace Descendente (DL, Downlink) y 50 Mbps en el Enlace Ascendente (UL, Uplink).
- Incremento en la eficiencia espectral: dos a cuatro veces mejor que la de HSPA.



- Disminución en latencia: acceso a la red radio por debajo de los 10 milisegundos y reducción significativa en latencia del plano de control.
- Ancho de banda escalable: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz o 20 MHz.
- Introducción de nuevos esquemas de transmisión y tecnologías multi antena avanzadas.
- Soporte eficiente de diversos tipos de servicio, especialmente los del dominio de Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switching*).
- Soporte de espectro par y dispar en los modos de Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*) y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*).
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP existentes.

2.3. ARQUITECTURA DE LTE

A diferencia de las anteriores tecnologías de comunicaciones móviles orientadas a la Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*), la arquitectura de LTE ha sido diseñada para soportar servicios completamente orientados a la conmutación de paquetes debido a la demanda creciente de servicios del Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) que marcaron la tendencia mundial de los usuarios en los últimos años [13].

LTE abarca la tecnología de acceso radio de la red móvil, definida por el 3GPP como Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) que se complementa con la evolución en la arquitectura del núcleo de red, denominada Evolución de Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*) o Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*), caracterizada por ser más plana, totalmente IP, permitir mayor velocidad de datos, presentar baja latencia de paquetes, ser compatible con todos los servicios incluyendo voz, permitir múltiples tecnologías de acceso radio y calidad de servicio extremo a extremo [14].

La integración de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC constituyen la red del sistema LTE denominada Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [2].

La arquitectura del sistema EPS se divide en tres partes principales, el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*), la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC, como se ilustra en la figura 2.2.

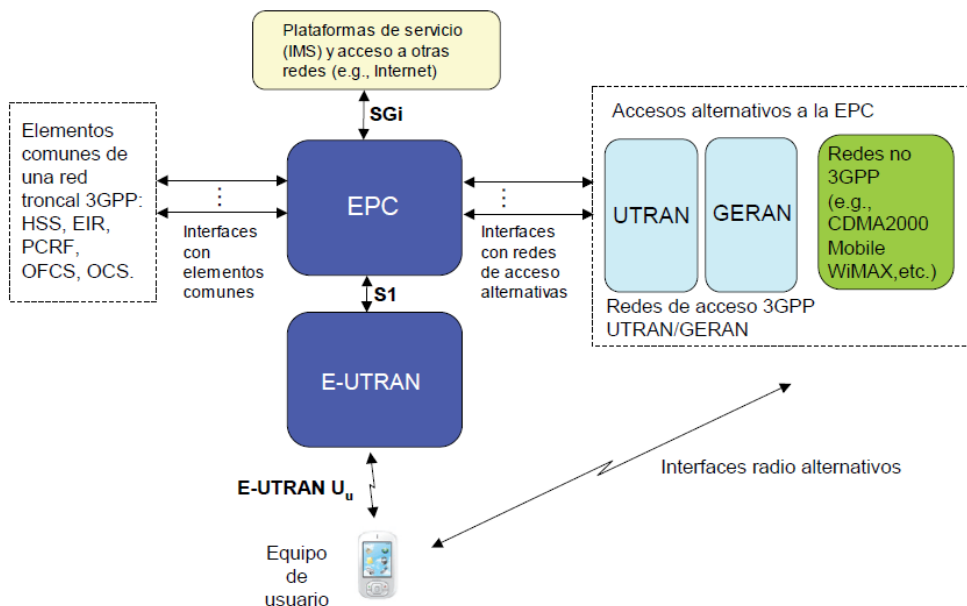


Figura 2.2 Arquitectura del sistema LTE o EPS
Tomada de: [2]

2.3.1. Equipo de Usuario

El equipo de usuario de una red LTE permite a un usuario del sistema acceder a los servicios de la red móvil, para el propósito de las especificaciones del proyecto 3GPP, la interfaz entre el UE y la red de comunicaciones móviles es denominada interfaz radio. Un equipo de usuario puede dividirse en dominios, y este a su vez en entidades. Actualmente, para las tecnologías de red móvil del 3GPP, el equipo de usuario se divide en dos dominios: el de Tarjeta Universal de Circuito Integrado (UICC, *Universal Integrated Circuit Card*) y el de Equipo Móvil (ME, *Mobile Equipment*) [15]. La figura 2.3 ilustra los dominios del UE.

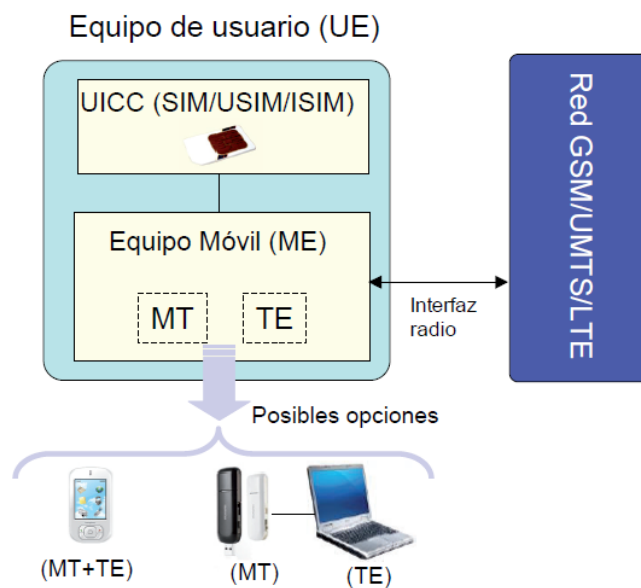


Figura 2.3 Dominios del Equipo de Usuario
Tomada de: [2]

2.3.2. Red de Acceso E-UTRAN

La red de acceso de LTE, E-UTRAN consta de una única entidad de red denominada Nodo B Evolucionado (eNB, *Evolved Node B*) que constituye la estación base de E-UTRAN e integra todas las funcionalidades de acceso a diferencia de los sistemas 3GPP anteriores (GSM, UMTS), en los que la red de acceso está compuesta por estaciones base y equipos controladores [2]. Esta característica permite que E-UTRAN sea más plana y presente menor latencia al reducir el número de nodos que procesan los paquetes.

El eNB establece conexiones con nodos lógicos periféricos a él mediante tres interfaces, una de ellas para interconectar diferentes eNB entre sí, denominada interfaz X2, otra para conectar a cada eNB con la red de núcleo de paquetes evolucionado, denominada interfaz S1 [16] y la tercera interfaz, que permite la transferencia de información entre el UE y el eNB a través del canal radio, denominada interfaz radio (Uu). La arquitectura de E-UTRAN y las tres interfaces de comunicación se ilustran en la figura 2.4.

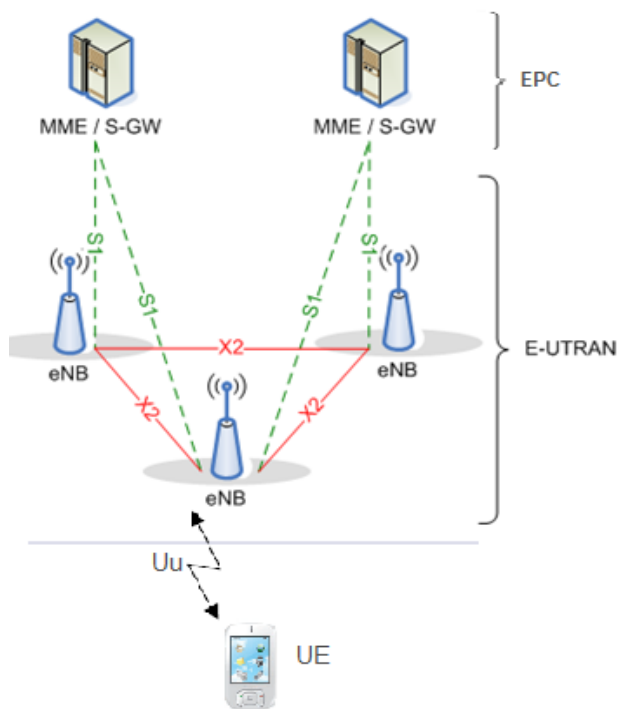


Figura 2.4 Arquitectura E-UTRAN

Modificada de: [16]

2.3.3. Núcleo de Red EPC

El núcleo de red de LTE o EPC se caracteriza por soportar tráfico totalmente IP y está formado por entidades independientes que realizan: la conmutación de paquetes, conexión con otras redes, tarificación y provisión de servicios a usuarios de redes de acceso 3GPP como E-UTRAN, UTRAN o GERAN y de redes de acceso no 3GPP como CDMA-2000 o Wi-Max.

Como se ilustra en la figura 2.5, el núcleo de la red EPC está formado por tres entidades: la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Management Mobility Entity*); la Puerta de Enlace del servicio (S-GW, *Serving Gateway*); y la Puerta de Enlace de la Red de Paquetes de Datos (P-GW, *Packet Data Network Gateway*), a su vez, estas entidades establecen conexiones con otras, como la base de datos principal del sistema 3GPP denominada Servidor de Suscriptor Local (HSS, *Home Subscriber Server*) y la Función de Control de Políticas y Normas de Cobro (PCRF, *Policy Control and Charging Rules Function*) que proporcionan la conectividad IP a los usuarios de la red y prestan servicios de administración.

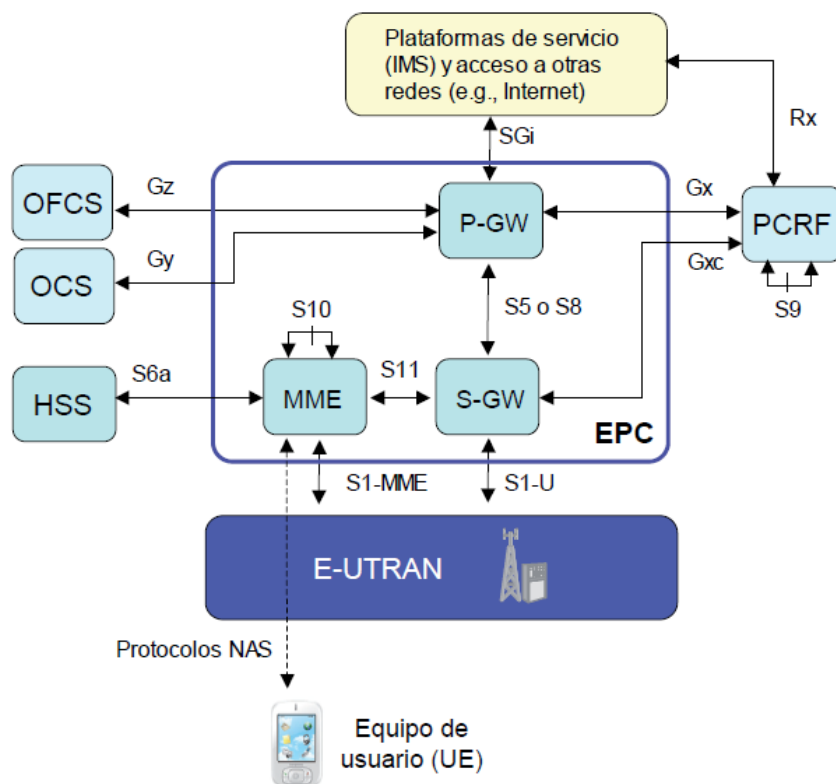


Figura 2.5 Arquitectura de la red troncal de LTE - EPC
Tomada de: [2]

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LTE

LTE es una tecnología que brinda alta eficiencia espectral, reducción de latencia, mayor velocidad de transmisión de datos, mayor capacidad y cobertura del sistema, por lo que requiere de características específicas y de la implementación de múltiples tecnologías tanto en la interfaz radio como en el núcleo de red [17]. A continuación, se detallan las características de LTE más relevantes para el desarrollo de este trabajo de grado.

2.4.1. Bloque de Recursos Físicos

Un Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*) es la mínima unidad de recursos que un eNodeB puede asignar a un equipo de usuario y tiene componentes en tiempo y en frecuencia, como se muestra en la figura 2.6, un PRB está formado por 12 subportadoras equiespaciadas 15 KHz y por 7 símbolos OFDM en un slot de 0.5 ms, a su vez, un PRB se compone de 84 partes

denominadas elementos de recurso que pueden transportar 2, 4 o 6 bits dependiendo de la modulación asignada al usuario [18].

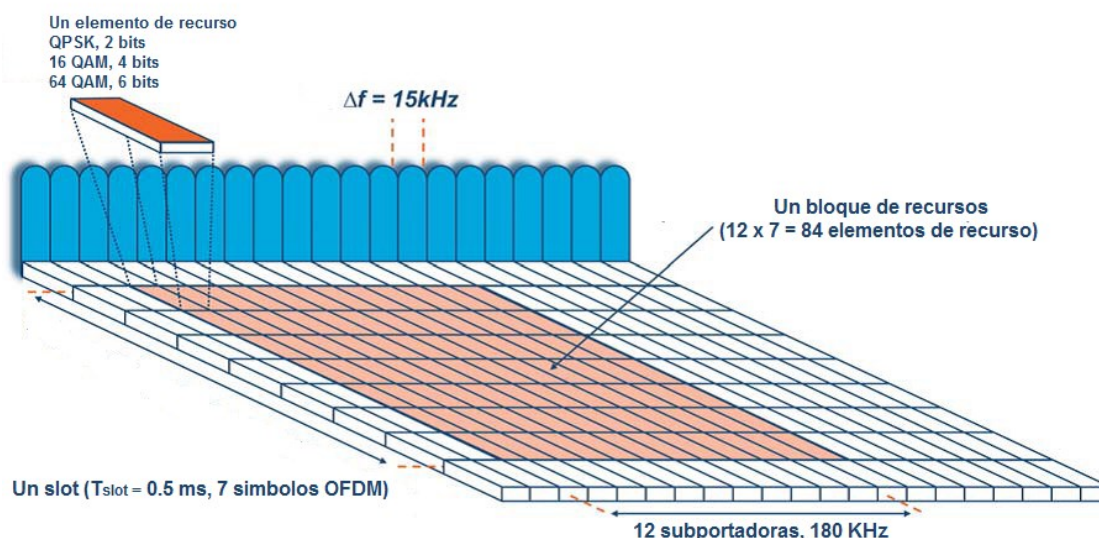


Figura 2.6 Bloque de recursos físicos
Modificada de: [19]

2.4.2. Estrategia de Planificación de Paquetes

La estrategia de planificación de paquetes determina qué usuarios de una celda pueden transmitir información y en qué bloques de recursos físicos de una subtrama [2], esta función es realizada por el eNB tanto para el DL como para el UL. En LTE se consideran tres estrategias de planificación de paquetes: Máxima Velocidad (MR, *Maximum Rate*), Proporcional y Justa (PF, *Proportional Fair*), y *Round Robin* (RR), las dos primeras usan el estado del canal radio para asignar recursos a los usuarios [20] mientras que *Round Robin* asigna equitativamente los recursos disponibles del eNB a los usuarios servidos por él sin tener en cuenta el estado del canal radio.

2.4.3. Reúso de Frecuencia

Una de las características clave de una red celular es la habilidad de reutilizar frecuencias con el fin de aumentar tanto capacidad como cobertura, de esta manera en la comunicación móvil LTE a fin de ofrecer un servicio multimedia de alta calidad, es vital el uso inteligente de los recursos de frecuencia a través de la gestión de los niveles de Interferencia Inter Celda (ICI, *Inter Cell Interference*) [21].

LTE define una función de gestión de recursos radio denominada Coordinación de Interferencia Inter Celda (ICIC, *Inter Cell Interference Coordination*) que a través de estrategias gestiona la interferencia intercelular entre transmisiones de o para usuarios de distintas celdas con el mismo PRB asignado en la misma subtrama [18]. La ICIC establece esquemas de mitigación de interferencia que representan algoritmos de planeación de reuso de frecuencia usados por la red para asignar o restringir recursos y niveles de potencia a los usuarios en diferentes celdas [22].

La figura 2.7 muestra los esquemas de reuso de frecuencia implementados en LTE a través de una estrategia ICIC, cada conjunto de recursos está reservado para un cierto Factor de Reuso de Frecuencia (FRF, *Frequency Reuse Factor*) y se asocia con un perfil de potencia de transmisión en particular [23].

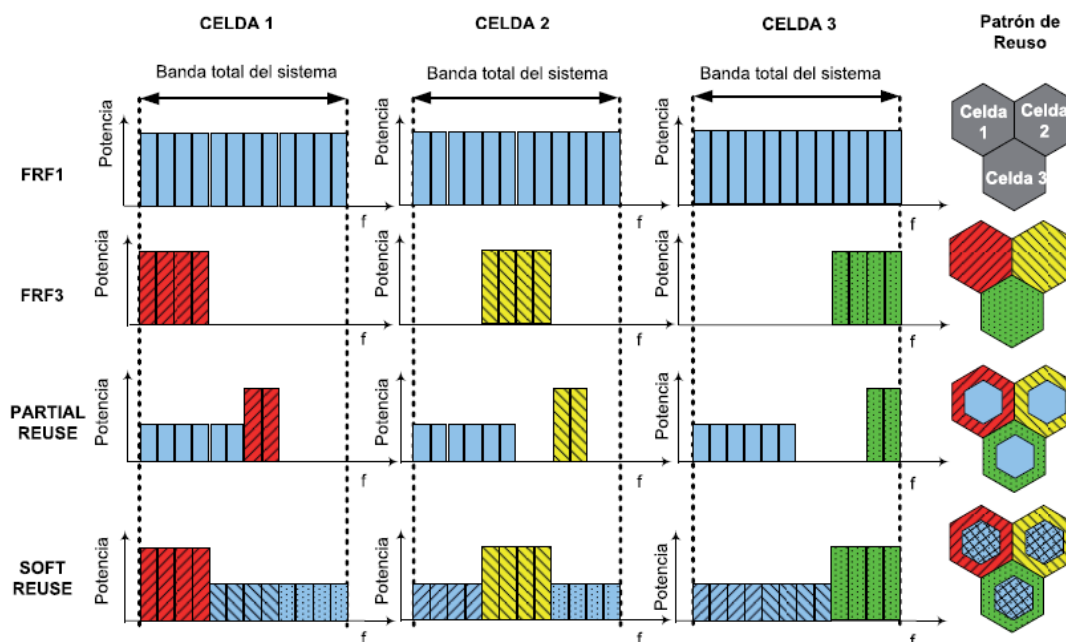


Figura 2.7 Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC
Tomada de: [2]

La figura 2.7 ilustra el reuso de factor 1 (FRF1) donde todos los PRB están disponibles en todas las celdas. El reuso de factor 3 (FRF3), donde los PRB se dividen en 3 partes que se asignan a agrupaciones de 3 celdas y finalmente como soluciones intermedias el Reuso Parcial (PR, *Partial Reuse*) y el Reuso de frecuencia Suave (SR, *Soft-frequency Reuse*) que son combinaciones de FRF1 y FRF3, donde el espacio de la celda se divide en dos regiones: interior, que está cerca de la Estación Base (BS, *Base Station*) y exterior que está situada en la



frontera de la celda. La banda de frecuencia entera se divide en varias sub-bandas, y cada sub-banda se asigna de manera diferente a la región interior y exterior de la celda [24].

2.4.4. Ancho de Banda Variable

La tecnología LTE permite operar en diferentes anchos de banda, aprovechando así el espectro disponible de acuerdo a las exigencias y condiciones de la red. Las especificaciones para LTE definen parámetros de ancho de banda del sistema de: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz o 20 MHz [25]. La tabla 2.1 muestra la relación entre el ancho de banda y el número de PRB que el planificador del eNB puede distribuir entre los usuarios servidos por él.

Ancho de banda del canal (MHz)	Número de PRB
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Tabla 2.1 Bloques de recursos vs ancho de banda
Tomada de: [25]

2.4.5. Diversidad Espacial

Con el objetivo de incrementar la capacidad del sistema o la calidad de la señal, LTE define estrategias de diversidad espacial al usar N antenas en transmisión y M antenas en recepción, lo que permite tener L canales independientes entre transmisor y receptor siendo L el número menor entre N y M. Cuando N y M son de valor 1, se tiene un sistema de Una Entrada y Una Salida (SISO, *Single Input-Single Output*) cuando N es 1 y M mayor a 1 se tiene un sistema de Una Entrada y Múltiples Salidas (SIMO, *Single Input-Multiple Output*), cuando N es mayor a 1 y M es 1 se tiene un sistema de Múltiples Entradas y Una Salida (MISO, *Multiple Input-Single Output*) y cuando N y M son mayor a 1 se tiene un sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input-Multiple Output*) obteniendo mayor desempeño con la última configuración. La figura 2.8 muestra las diferentes configuraciones de diversidad espacial definidas para LTE [2].

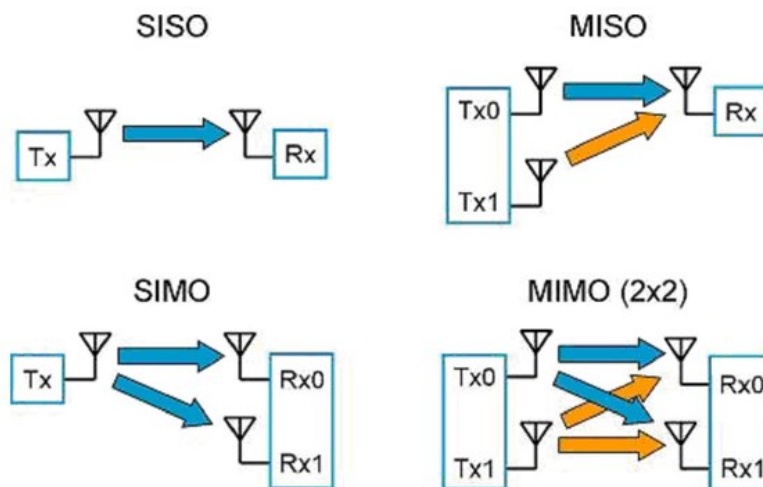


Figura 2.8 Configuraciones de antena para LTE
Tomada de: [26]

2.5. INTERFERENCIA INTERCELDA

Calcular la interferencia inter celda y analizar sus efectos es de interés en los sistemas de comunicaciones celulares. En el enlace ascendente la interferencia inter celda es producida por fuentes que no tienen una posición fija sobre receptores que si la tienen, es decir la interferencia es producida por los equipos de usuario sobre los eNB y no está condicionada a la posición del usuario. Sin embargo en el enlace descendente se tiene la situación contraria; la fuente son los eNB y los receptores son los usuarios que no tienen una posición fija, por lo tanto en el enlace descendente la interferencia inter celda depende de la posición del usuario [27].

La ecuación 2.1 muestra la interferencia inter celda en el enlace descendente producida sobre un usuario de interés UE_o , que resulta de la sumatoria de las potencias interferentes de todos los otros eNB.

$$P_i = \sum_{eNB_i=1}^K \frac{P_{TXi} G_i}{L_i}$$



Donde,

- P_i Potencia de interferencia co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNB vecinos. Se mide en watts
- P_{Tx_i} Potencia de transmisión del eNB vecino que afecta al usuario objetivo. Se mide en watts
- G_i Ganancia de antena del eNB vecino percibida por el usuario objetivo. Es adimensional
- L_i Perdidas de trayectoria desde el eNB vecino hasta el usuario objetivo. Es adimensional

2.6. INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA LTE

Existen múltiples parámetros que permiten evaluar el rendimiento en cobertura y capacidad de una red LTE, denominados indicadores de desempeño. A continuación se explican los indicadores que son analizados en el simulador básico a nivel de sistema para LTE.

2.6.1. Relación Señal a Interferencia más Ruido

La Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) es uno de los factores más importantes que determina el desempeño del enlace [28], este indicador permite cuantificar que tanto se afecta la señal que envía un eNB a determinado UE en su área de cobertura por señales interferentes, moduladas con portadoras de igual valor provenientes de otros eNB y por el ruido térmico. La ecuación 2.2 permite calcular la SINR percibida por un equipo de usuario en la red LTE.

$$sinr = \frac{P_{rx}}{P_i + P_N} \quad (2.2)$$

Donde,

- $sinr$ Valor de la relación señal a interferencia más ruido percibida por un usuario objetivo en un eNB objetivo. Es adimensional
- P_{rx} Potencia de la señal recibida por un usuario objetivo de un eNB objetivo, medida en watts.
- P_i Potencia interferente co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNB vecinos, medida en watts.
- P_N Potencia de ruido térmico, medida en watts.



En LTE se define el indicador SINR requerida, siendo el valor que debe percibir un equipo de usuario para alcanzar determinada Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*). Este factor depende del esquema de modulación, codificación y del modelo de propagación. La SINR requerida puede ser calculada por dos métodos, a saber, el primero es mediante tablas de SINR promedio contra *throughput* obtenidas de simulaciones a nivel de enlace para LTE. El segundo, mediante la fórmula de Alpha-Shannon que provee cálculos aproximados a nivel de enlace para LTE, en este último se requieren factores Alpha-Shannon para cada escenario a simular [29].

2.6.2. Probabilidad de Degradación

La probabilidad de degradación es uno de los parámetros más importantes para evaluar el desempeño de los sistemas móviles celulares sujetos a la interferencia co-canal [30] y se define como la probabilidad de que la SINR percibida por los usuarios del sistema sea inferior a una SINR objetivo.

2.6.3. Probabilidad de Interrupción

La probabilidad de interrupción en un sistema de comunicación móvil celular se define como la probabilidad de que la SINR percibida por los usuarios sea menor a un valor de SINR mínimo e indica que a estos usuarios no se les presta servicio.

2.6.4. Índice de Calidad del Canal

El Índice de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indication*) indica el estado del canal de comunicación en el enlace descendente y determina la velocidad de datos máxima que el equipo de usuario puede manejar con una Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) del 10% o menos. El CQI depende principalmente de la SINR. Una tasa alta de datos sólo puede ser recibida exitosamente con un valor alto de SINR [31].

El método usado para calcular el CQI se observa en la figura 2.9, el eNB envía periódicamente Señales de Referencia (RS, *Reference Signals*) al equipo de usuario para determinar la calidad del canal en el DL, con esta información el UE realiza el cálculo de la SINR, posteriormente mapea el valor de SINR a un índice CQI que es enviado en el Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*) al eNB que determina qué esquema de modulación y codificación se debe asignar al usuario de acuerdo al CQI recibido o a criterios propios.

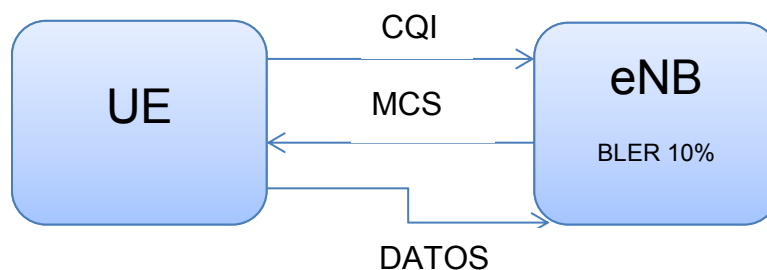


Figura 2.9 Asignación de CQI
Modificada de: [51]

La tabla 2.2 presenta la relación entre el índice CQI, la modulación, la codificación y la eficiencia.

CQI	Modulación	Codificación x1024	Eficiencia	SINR de referencia
0	Fuera de rango			
1	QPSK	78	0.1523	-6.7
2	QPSK	120	0.2344	-4.7
3	QPSK	193	0.3770	-2.3
4	QPSK	308	0.6016	0.2
5	QPSK	449	0.8770	2.4
6	QPSK	602	1.1758	4.3
7	16 QAM	378	1.4766	5.9
8	16 QAM	490	1.9141	8.1
9	16 QAM	616	2.4063	10.3
10	64 QAM	466	2.7305	11.7
11	64 QAM	567	3.3223	14.1
12	64 QAM	666	3.9023	16.3
13	64 QAM	772	4.5234	18.7
14	64 QAM	873	5.1152	21.0
15	64 QAM	948	5.5547	22.7

Tabla 2.2 Índice de CQI
Tomada de: [32]



2.6.5. Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

El Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) es determinado por el eNB de acuerdo al CQI recibido del UE. Este parámetro le informa al usuario la tasa de codificación, el esquema y orden de modulación para la transmisión de datos. El eNB puede asignar cualquier MCS cuyo índice sea inferior o igual al indicado en el CQI, lo cual garantiza una BLER inferior al 10% [2].

2.6.6. Tamaño del Bloque de Transporte

El Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) define la cantidad de bits que pueden transmitirse en una subtrama de 1 ms y depende del MCS y del número de bloques de recursos asignados a cada equipo de usuario.

La figura 2.10 muestra las diferentes capas por las que pasa un paquete en el equipo de usuario, los datos se reciben primero en la capa de Protocolo de Compresión de Paquete de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*). Esta capa realiza la compresión y el cifrado del paquete y transmite los datos al siguiente nivel. La capa de Control de Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*) que concatena o segmenta los paquetes en una Unidad de Datos de Protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) con el tamaño de bloque adecuado y lo trasmite a la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) que añade un encabezado, selecciona el esquema de modulación y codificación y configura la capa física. En este punto los datos ya tienen el tamaño del bloque de transporte y se transmiten en una subtrama de 1 ms [33].

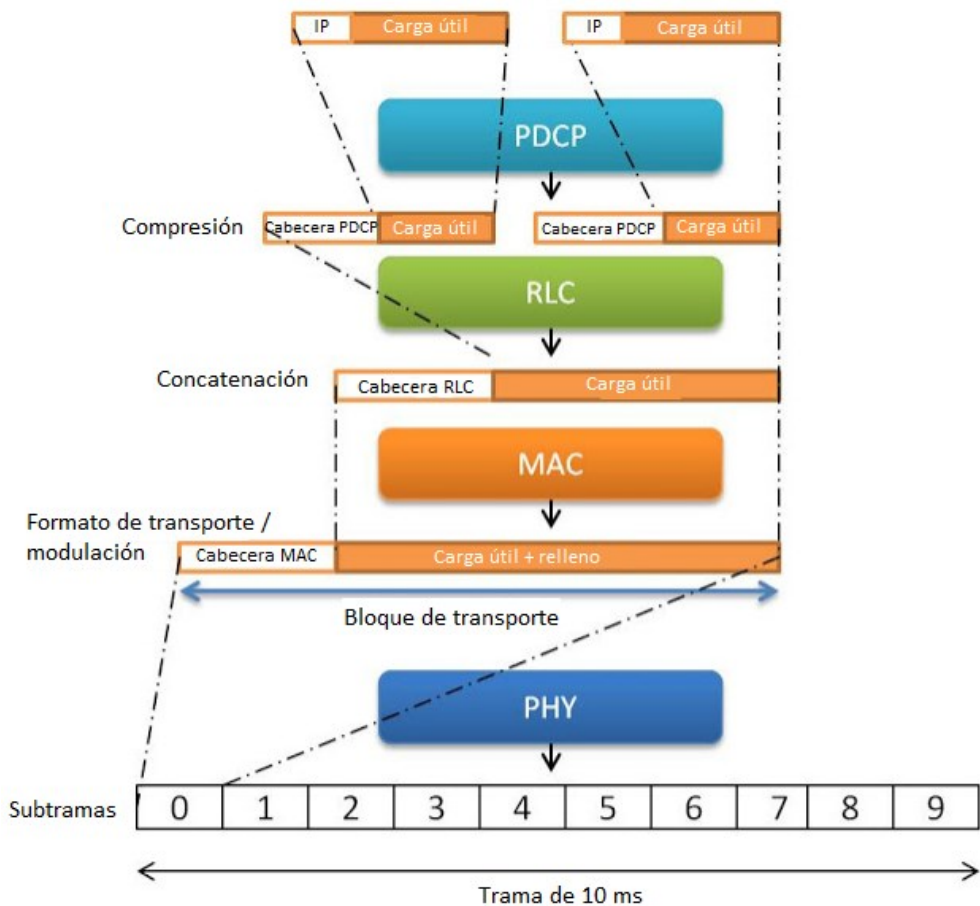


Figura 2.10 Tamaño del bloque de transporte
Modificada de: [33]

La Especificación Técnica (TS, *Technical Specification*) 36.213 del 3GPP, define un índice de TBS (I_{TBS}) a partir del índice MCS que permite calcular la cantidad de bits que se pueden transmitir en una subtrama. La tabla 2.3 muestra los 31 valores de MCS con su respectivo orden de modulación e índice de TBS.

MCS	Orden de modulación	I_{TBS}
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
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	Reservado
30	4	
31	6	

Tabla 2.3 Índice TBS

Tomada de: [32]

2.6.7. Throughput

El *throughput* o capacidad se define como la velocidad de transmisión de datos total, incluyendo datos de usuario e información de señalización y control que es entregada sin errores.

El cálculo de *throughput* se realiza a partir del índice MCS y del número de PRB de cada usuario, de acuerdo a la ecuación 2.3, esto es:



$$\textit{Throughput}_{\textit{usuario}} = \frac{TBS \ nPRB}{\textit{subtrama}} 1000 \frac{\textit{subtramas}}{\textit{segundo}} \quad (2.3)$$

Donde,

$\textit{Throughput}_{\textit{usuario}}$ Es la cantidad de información que puede transportar una subtrama. Se mide en bits

TBS Es el tamaño del bloque de transporte. Se mide en bits

$nPRB$ Es el número de bloques de recursos físicos asignado al usuario. Es adimensional

METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE

3.1. INTRODUCCIÓN

La metodología usada para el desarrollo del simulador estático básico a nivel de sistema para LTE³ es el modelo lineal secuencial o modelo en cascada [34], el cual sugiere un enfoque sistemático, secuencial en donde el desarrollo de software sigue unas etapas definidas que deben cumplirse de forma lineal para obtener el resultado final. Las fases que define el modelo se aprecian en la figura 3.1.

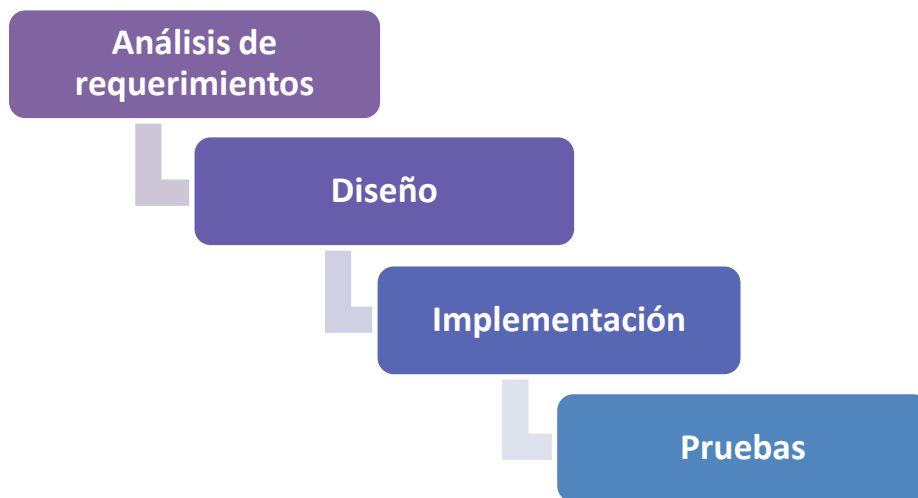


Figura 3.1 Modelo de desarrollo de software lineal secuencial

- 1. Análisis de requerimientos:** Comprende la recopilación de los requisitos y necesidades del proyecto, enfocado a las características que se espera que el software pueda tener. Esta fase se desarrolla a fin de enlistar detalladamente las acciones que el sistema realizará. [35].

³ Simulador a nivel de sistema para LTE: permite evaluar el desempeño en un sistema LTE compuesto por múltiples estaciones base y varios usuarios. A diferencia de simuladores a nivel de enlace que analizan el desempeño entre una estación base y un usuario, es decir, en un único enlace radio.



2. **Diseño:** Los resultados de la fase anterior se usan para crear un plan de diseño del software, es decir, un método de trabajo centrado en cómo se obtienen los resultados esperados en el análisis de requerimientos [35].
3. **Implementación:** Los resultados de la fase de diseño se traducen directamente en código [35].
4. **Prueba:** Los resultados de la fase de implementación se ejecutan a través de un plan de pruebas para verificar el funcionamiento y cumplimiento de los objetivos de la fase de análisis de requerimientos [35].

3.2. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

El análisis de requerimientos inicia con la definición del problema de estudio, posteriormente se explican los requerimientos funcionales y no funcionales del simulador básico a nivel de sistema para LTE.

3.2.1. Problema de Estudio

Con el propósito de satisfacer la creciente demanda de ancho de banda móvil y de los requerimientos de alta calidad de servicio, los operadores de sistemas de comunicación móvil celular implementan tecnologías emergentes como LTE, capaces de incrementar la capacidad y velocidad de transmisión de datos de la red respecto a soluciones previas.

Los operadores de telecomunicaciones estudian los diferentes fenómenos que afectan el desempeño de la red mediante el uso de herramientas software que predicen el comportamiento a través de cálculos que estiman la cobertura y capacidad a fin de disminuir costos y tiempo en su implementación.

A diferencia de lo que sucede en el ambiente comercial, en la academia las soluciones orientadas a la simulación de redes LTE son escasas. Por tal razón se plantea una primera versión de un simulador de red LTE a partir del simulador básico a nivel de sistema para LTE, que permita el estudio y análisis de esta tecnología considerando inicialmente características básicas.



3.2.2. Requerimientos

A continuación se presentan los requerimientos considerados para el diseño, desarrollo e implementación del simulador básico a nivel de sistema para LTE a fin de cumplir con los objetivos inicialmente planteados en este trabajo de grado.

- **Requerimientos funcionales**

Los requerimientos funcionales definen las acciones que el simulador será capaz de ejecutar y describen las operaciones que el sistema realiza sobre las entradas para conseguir las salidas [36]. Los requerimientos funcionales del simulador básico a nivel de sistema para LTE son:

Requerimiento 1: Permitir el despliegue de una red LTE estática⁴.

Requerimiento 2: Realizar cálculos de cobertura y capacidad de una red LTE.

Requerimiento 3: Permitir la selección del modelo de propagación.

Requerimiento 4: Permitir la selección del tipo de antena del eNodeB.

Requerimiento 5: Permitir la selección del azimut y tilt de antena del eNodeB.

Requerimiento 6: Realizar la sectorización estática de las celdas de la red.

Requerimiento 7: Permitir la selección del número de usuarios de la red.

Requerimiento 8: Implementar una estrategia de planificación de recursos.

Requerimiento 9: Implementar reuso de frecuencia.

Requerimiento 10: Permitir la selección de la frecuencia en el enlace descendente.

Requerimiento 11: Permitir la selección de la potencia de transmisión para los eNodeB.

Requerimiento 12: Considerar la presencia de edificaciones y multitrayectoria.

Requerimiento 13: Calcular las potencias interferentes de cada celda de la red.

Requerimiento 14: Calcular la SINR para cada usuario de la red.

⁴ Red estática: red modelada sin una evolución temporal, es decir, los parámetros de la red se definen para un instante de tiempo.



Requerimiento 15: Calcular el *throughput* por usuario, sector, celda y red.

Requerimiento 16: Mostrar resultados de cobertura de la red.

Requerimiento 17: Mostrar resultados del desempeño de la red en función de los indicadores de capacidad.

- **Requerimientos no funcionales**

Son requisitos que no describen ningún tipo de función, como por ejemplo, la disponibilidad, usabilidad, accesibilidad, costo, interfaz, entre otros. Los requerimientos no funcionales definidos para el simulador son:

Requerimiento 19: desplegar una interfaz de usuario.

Requerimiento 20: visualizarse y funcionar correctamente en equipos que tengan instalado el software Matlab® compatible con la versión 7.13.

Requerimiento 21: El tiempo de simulación del sistema dependerá de las características técnicas del computador sobre el que se ejecute.

Requerimiento 22: poder ser usado con fines académicos.

3.3. DISEÑO

En esta fase se definen las características y consideraciones que debe tener el simulador para su posterior implementación. Inicialmente se establece un modelo del sistema que permita representar una red móvil celular LTE y posteriormente se definen las consideraciones o parámetros de la red a simular.

3.3.1. Definición del Modelo del Sistema

El simulador representa un sistema LTE con características fijas de escenario y red, conformada por cuatro celdas, cada una con un eNodeB sectorizado y un número variable de equipos de usuarios (UE) distribuidos aleatoriamente.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de este sistema, el simulador implementa dos bloques, uno de cálculo de cobertura y otro de cálculo de capacidad. En el primero, se puede configurar los parámetros de : tipo de antena, modelo de propagación, tipos de desvanecimiento, potencia de transmisión del



eNB, frecuencia, azimut, *tilt* de antena y radio de la celda, a fin de medir la potencia de recepción en el enlace descendente en cada punto del escenario conformado por una grilla de receptores. En el segundo, además de algunos de los parámetros definidos en el cálculo de cobertura se incluye el efecto del número de usuarios y del ancho de banda del sistema.

3.3.2. Algoritmo del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE

Con el objetivo de estructurar la simulación se establece un conjunto de instrucciones o reglas definidas, ordenadas y finitas que permitan realizar la simulación mediante pasos sucesivos para obtener los resultados deseados [37], este procedimiento o algoritmo genera las salidas del sistema a partir de las entradas del mismo [38], a continuación se explica en detalle el proceso para obtener los resultados de los bloques en donde se calcula cobertura y capacidad respectivamente.

- **Algoritmo para cálculo de cobertura**

En el algoritmo para el cálculo de cobertura existen dos tipos de entradas de datos al sistema, las entradas mediante interfaz gráfica y las entradas definidas por el simulador. Las primeras son variables que el usuario puede configurar, estas son: el modelo de propagación, el tipo de desvanecimiento, el radio de la celda, el tipo de antena, el *tilt* de antena, el azimut, la frecuencia de operación y la potencia de transmisión del eNB. Las segundas entradas corresponden a parámetros de red constantes definidos en el código y son: el número de celdas, el factor de sectorización y la geometría de la celda.

A continuación se explica el proceso de cómo a partir de las entradas al sistema se obtienen los resultados de cobertura de la red:

1. Creación del escenario de simulación, se especifica el número y ubicación de los eNodeB de la red LTE.
2. Cálculo de la distancia de cada punto de la grilla de receptores del escenario a cada eNodeB.
3. Cálculo de las pérdidas de trayectoria para cada celda, de acuerdo al modelo de propagación seleccionado.
4. Cálculo del ángulo entre cada punto del escenario y los eNodeB.



5. Cálculo de la ganancia de acuerdo a la antena seleccionada para cada punto del escenario y los eNodeB.
6. Cálculo de la potencia de recepción en cada punto del escenario.
7. Cálculo de la potencia de recepción teniendo en cuenta el desvanecimiento lento y rápido de cada punto del escenario.
8. Despliegue de interfaces de resultados para cálculos de cobertura mediante mapas de colores para cada celda del sistema.

La figura 3.2 representa mediante un diagrama de flujo el algoritmo diseñado para el bloque de cálculo de cobertura en el simulador.



CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA

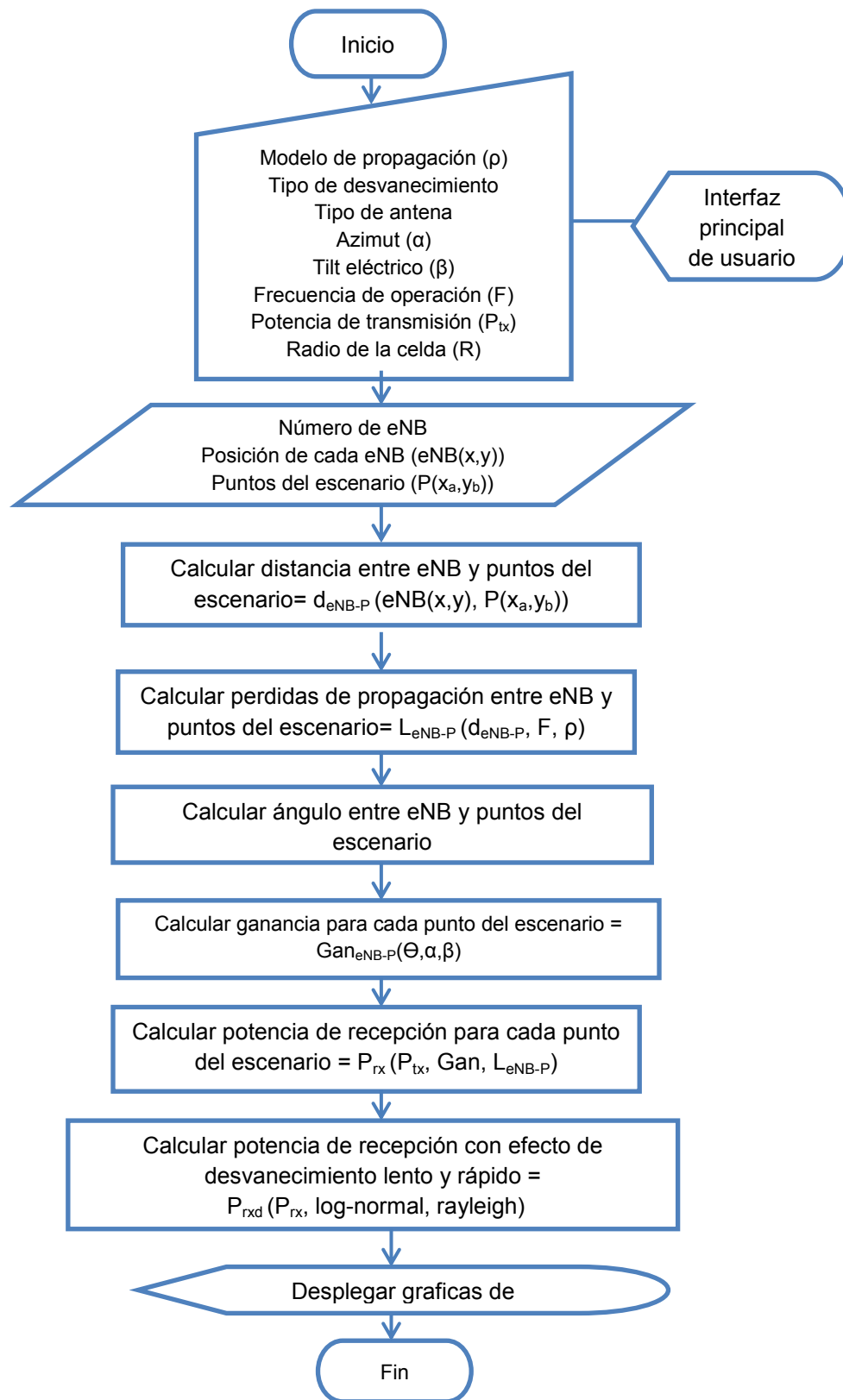







Figura 3.2 Diagrama de flujo para cálculo de cobertura



Donde,

	Iniciador o terminador
	Pantalla
	Entrada Manual
	Datos: entradas o salidas
	Operaciones o procesos

- **Algoritmo para cálculo de capacidad**

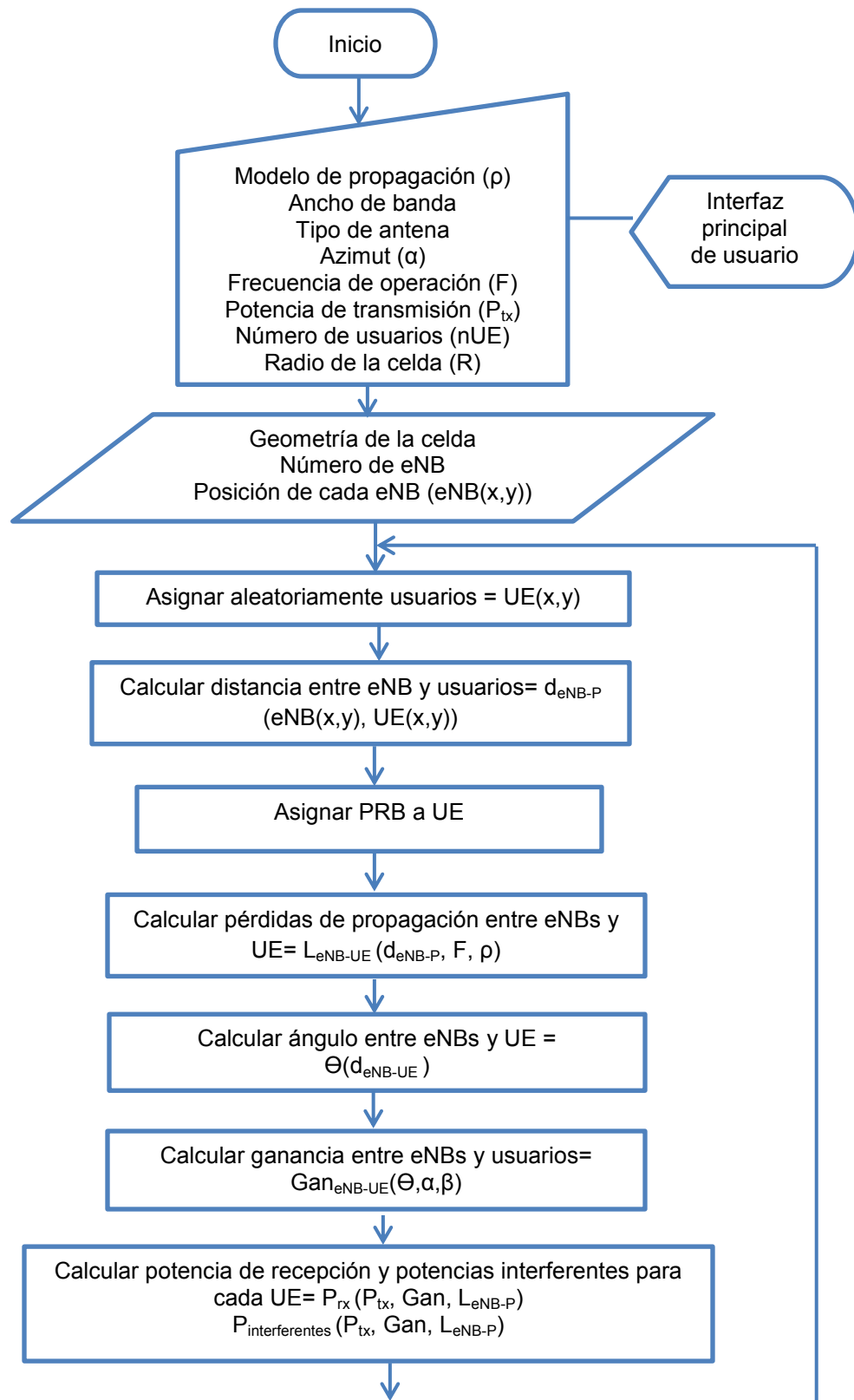
En el algoritmo para el cálculo de capacidad las entradas provenientes de la interfaz gráfica, seleccionadas por el usuario son: la frecuencia de operación, el radio de la celda, el tipo de antena, el modelo de propagación, el número de usuarios y el ancho de banda del sistema. Por otra parte, las variables de entrada definidas por el simulador son: la estrategia de planificación de paquetes, el reuso de frecuencia, el factor de sectorización, el número y geometría de las celdas. A continuación se explica el algoritmo para obtener los cálculos de capacidad.

1. Creación del escenario de simulación, se define la ubicación de los eNodeB (eNB) en cada celda.
2. Asignación aleatoria del número de usuarios en cada sector de las celdas.
3. Cálculo de la distancia de cada usuario de la red a todos los eNB.
4. Asignación de los bloques de recursos físicos disponibles en el eNB de acuerdo al número de usuarios de la celda y al ancho de banda del sistema.
5. Cálculo de pérdidas de trayectoria de acuerdo al modelo de propagación seleccionado para cada usuario de la red y todos los eNB.
6. Cálculo del ángulo entre cada usuario de la red y todos los eNB.
7. Cálculo de la ganancia de acuerdo a la antena seleccionada para cada usuario de la red y todos los eNB.
8. Cálculo de la potencia de recepción de cada usuario de la red.
9. Cálculo de la potencia de recepción teniendo en cuenta el desvanecimiento lento y rápido de cada usuario de la red.



10. Cálculo de las potencias interferentes de todos los eNB a un usuario.
11. Cálculo de ruido térmico.
12. Cálculo de la relación señal a interferencia más ruido para cada usuario.
13. Asignación de indicador de calidad del canal para cada equipo de usuario de acuerdo a la SINR.
14. Asignación de esquema de modulación y codificación para cada equipo de usuario de acuerdo al CQI.
15. Asignación del tamaño del bloque de transporte para cada usuario de acuerdo al CQI.
16. Cálculo del *throughput* por usuario, sector, celda y sistema a partir del TBS y de los PRB asignados a cada usuario.
17. Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos.
18. Despliegue de interfaces de resultados de capacidad de la red.

La figura 3.3 representa mediante un diagrama de flujo el algoritmo diseñado para el bloque de cálculo de capacidad en el simulador.



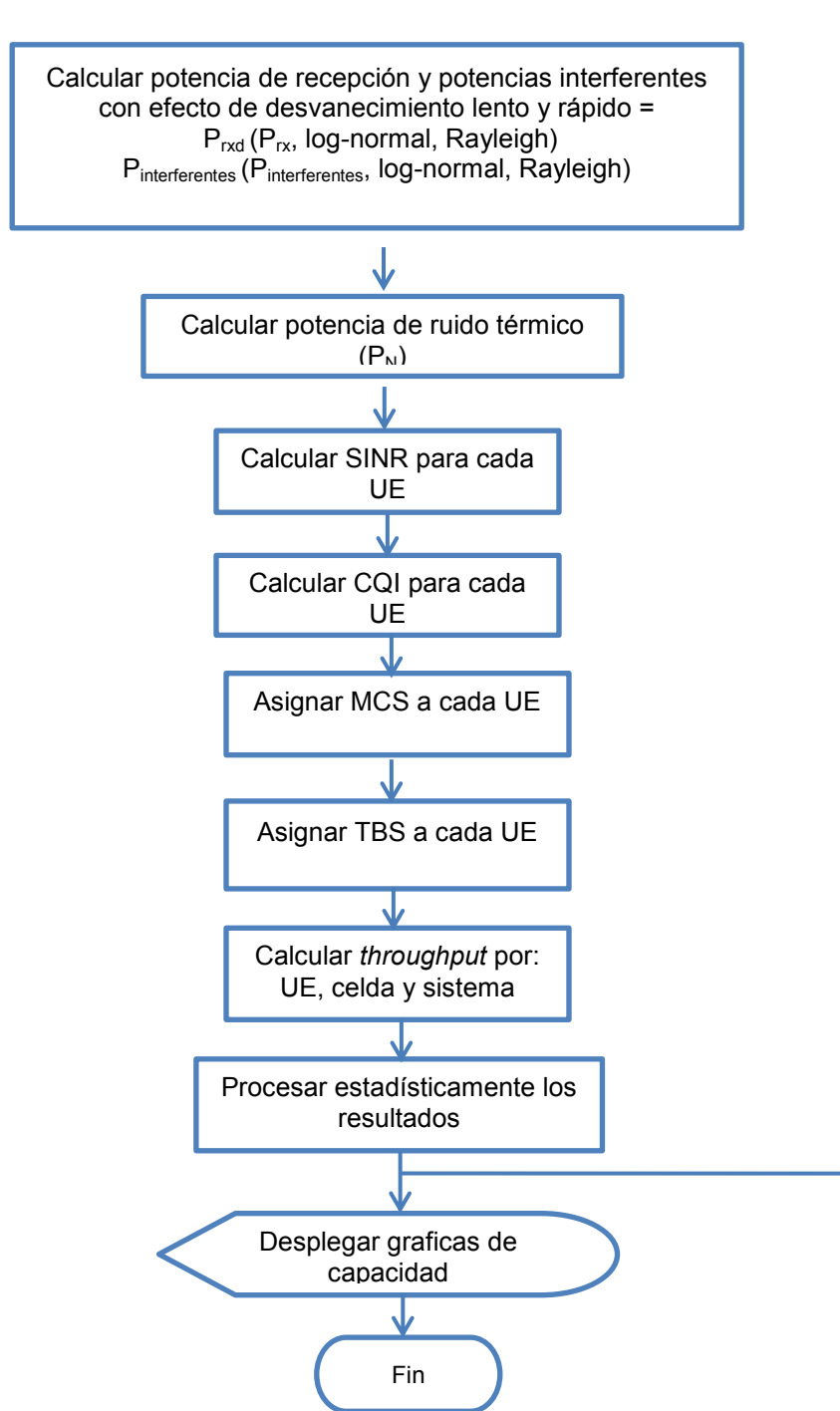


Figura 3.3 Diagrama de flujo del escenario para cálculo de capacidad



3.3.3. Consideraciones del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE

Esta sección explica los parámetros de la tecnología LTE considerados en el diseño del simulador básico a nivel de sistema.

- **Estrategia de planificación de paquetes**

La estrategia de planificación de paquetes usada en el simulador básico a nivel de sistema para LTE en el enlace descendente es *Round Robin*, asignándose equitativamente los bloques de recursos disponibles en el eNB entre todos los usuarios servidos por la celda. Esta estrategia es justa en el sentido de que todos los usuarios tienen el mismo número de PRB para transmitir, pero al no considerar el efecto del canal radio, los usuarios con un indicador bajo de calidad del canal se encuentran en desventaja por no tener los bloques de recursos necesarios para alcanzar tasas de datos comparables a las obtenidas por usuarios con mejores condiciones de canal [39].

La ecuación 3.1 muestra el número de PRB que le corresponde a cada usuario del sistema al implementar la estrategia de planificación de paquetes *Round Robin*.

$$PRB_{usuario} = \frac{PRB_C}{UE_C} \quad (3.1)$$

Donde,

$PRB_{usuario}$	Número de bloques de recursos físicos de un usuario del sistema
PRB_C	Número de bloques de recursos por celda
UE_C	Número de usuarios por celda

La figura 3.4 muestra la distribución de bloques de recursos en cada celda del sistema.

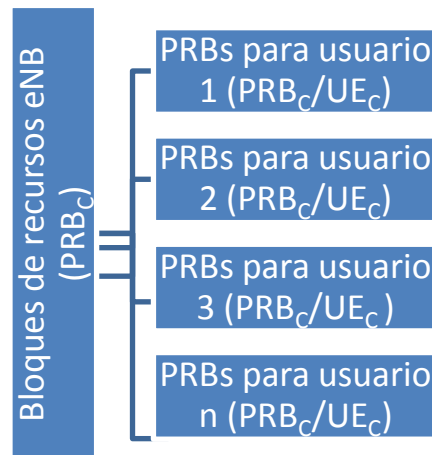


Figura 3.4 Distribución de PRB por celda

- **Reúso de frecuencia**

En el contexto del reúso de frecuencia de una red, el FRF 1 se convierte en la mejor opción al permitir usar el total de los recursos, sin embargo, es posible que la calidad del servicio para los usuarios cercanos al borde de la celda se degrade a causa de la interferencia inter celda [40]. El simulador básico a nivel de sistema para LTE usa el factor de reúso de frecuencia 1, especialmente porque su implementación en el código presenta menor complejidad, a pesar de las implicaciones en el servicio de los usuarios ubicados en el borde de la celda.

- **Probabilidad de degradación**

Sea D el evento “Degradación” y sea S una variable aleatoria binaria cuyos posibles valores son 0 y 1. La probabilidad de degradación $P_r\{D\}$, es la probabilidad de $S = 1$, luego, $S = 1$ si y solo si $SINR < \gamma$, donde $SINR$ es la variable aleatoria “relación señal a ruido e interferencia” y γ es el umbral de degradación. De esa manera, la probabilidad de degradación quedará definida como:

$$P_r\{D\} = P_r\{S = 1\} = P_r\{SINR < \gamma\},$$

La variable aleatoria S sigue una distribución Bernoulli con parámetro $p = P_r\{SINR < \gamma\}$.

De esa forma, la probabilidad de degradación dependerá de la distribución de probabilidad de la variable aleatoria $SINR$ y del valor del umbral γ .



Si $f_{SINR}(x)$ es la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria $SINR$, la probabilidad de degradación será:

$$P_r\{D\} = \int_{-\infty}^{\gamma} f_{SINR}(x)dx$$

- **Probabilidad de interrupción**

Sea I el evento “Interrupción” y sea S una variable aleatoria binaria cuyos posibles valores son 0 y 1. La probabilidad de interrupción $P_r\{I\}$, es la probabilidad de $S = 1$, luego, $S = 1$ si y solo si $SINR < \lambda$, donde $SINR$ es la variable aleatoria “relación señal a ruido e interferencia” y λ es el umbral de interrupción. De esa manera, la probabilidad de interrupción quedará definida como:

$$P_r\{I\} = P_r\{S = 1\} = P_r\{SINR < \lambda\},$$

La variable aleatoria S sigue una distribución Bernoulli con parámetro $p = P_r\{SINR < \lambda\}$.

De esa forma, la probabilidad de interrupción dependerá de la distribución de probabilidad de la variable aleatoria $SINR$ y del valor del umbral λ .

Si $f_{SINR}(x)$ es la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria $SINR$, la probabilidad de interrupción será:

$$P_r\{D\} = \int_{-\infty}^{\lambda} f_{SINR}(x)dx$$

- **Modelo de propagación**

El simulador básico a nivel de sistema para LTE considera los modelos de propagación explicados en el anexo A, estos son: espacio libre, COST Hata, COST Walfish Ikegamy y TR 36.942. La tabla 3.1 muestra los modelos de propagación con el ambiente en el que se aplican.



Modelo de propagación	Ambiente
COST-231 Walfish Ikegamy	Micro Urbano
COST-231 Hata	Macro Urbano – Macro Suburbano
TR 36.942	Urbano - Suburbano

Tabla 3.1 Modelo de propagación y ambiente relacionado

La tabla 3.2 muestra la relación entre el ambiente y los valores planteados por el proyecto 3GPP en el TR 25.996 para los parámetros de los modelos de propagación de COST Walfish Ikegamy y COST Hata.

Ambiente	Parámetro	Valor
Micro Urbano	Altura de la antena de la estación base	12.5 metros
	Altura de los edificios	12 metros
	Distancia entre edificios	50 metros
	Ancho de las calles	25 metros
	Altura de la antena de la estación móvil	1.5 metros
	Angulo de incidencia de la onda con respecto a la calle para todos los trayectos	30 grados
Macro Urbano y Suburbano.	Altura de la antena de la estación base	32 metros
	Altura de la antena de la estación móvil	1.5 metros

Tabla 3.2 Parámetros de simulación según TR 25.996

Tomada de [41]

- **Antenas**

Para la selección de los parámetros de entrada de antena al simulador, se tienen en cuenta aquellos que tengan una implicación directa en el cálculo de la potencia de recepción, es decir, los que afectan la ganancia de antena de transmisión percibida por un equipo de usuario.

Los parámetros de antena considerados como entradas variables al simulador son: el tipo de antena, el tilt y el azimut. Adicionalmente, se deben considerar



entradas constantes y definidas en el código del simulador que permitan realizar los cálculos, estas son: altura de antena y ganancia máxima de antena.

En el anexo B se describen los conceptos básicos de antenas necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

- **Tipo de antena**

Para la implementación de diferentes antenas en el simulador, se consideran aquellas que son típicamente usadas en una red real LTE, comercialmente existen múltiples tipos de antenas, pero se seleccionan dos referencias del fabricante Katherein, además se incluye la antena definida en el TR 36.942 para LTE. A continuación se especifican los tipos de antenas consideradas en el simulador.

- **Katherein 742215**

Es una antena multibanda direccional tipo panel con tilt eléctrico ajustable, usada en estaciones base de redes de comunicaciones móviles [42]. La tabla 3.3 muestra las características principales de la antena.

Parámetro	Valor
Rango de frecuencia	1710 MHz – 2200 MHz
Doble polarización	+45°, -45°
Ganancia	2 x 18 dBi
Impedancia	50 Ω
Tilt eléctrico	0° – 10°

Tabla 3.3 Parámetros de antena K742215

Tomada de [42]

La figura 3.5 muestra el patrón de radiación horizontal (azul) y vertical (rojo) normalizado en unidades logarítmicas y en coordenadas cartesianas para la antena Katherein 742215.

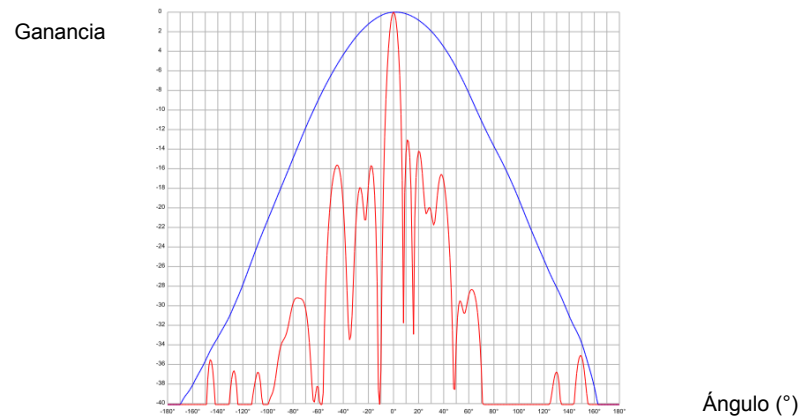


Figura 3.5 Patrón de radiación antenna K742215
Tomada de [43]

- **Katherein 80010681**

Es una antena multibanda direccional tipo panel con tilt eléctrico ajustable, usada en estaciones base de redes de comunicaciones móviles [44]. A continuación, la tabla 3.4 muestra las características principales de la antena.

Parámetro	Valor
Rango de frecuencia	1710 MHz – 2690 MHz
Doble polarización	+45°, -45°
Ganancia	2 x 15.5 dBi
Impedancia	50 Ω
Tilt eléctrico	0° – 12°

Tabla 3.4 Parámetros de antena K80010681
Tomada de [44]

La figura 3.6 muestra el patrón de radiación horizontal (azul) y vertical (rojo) normalizado en unidades logarítmicas y en coordenadas cartesianas para la antena Katherein 80010681.

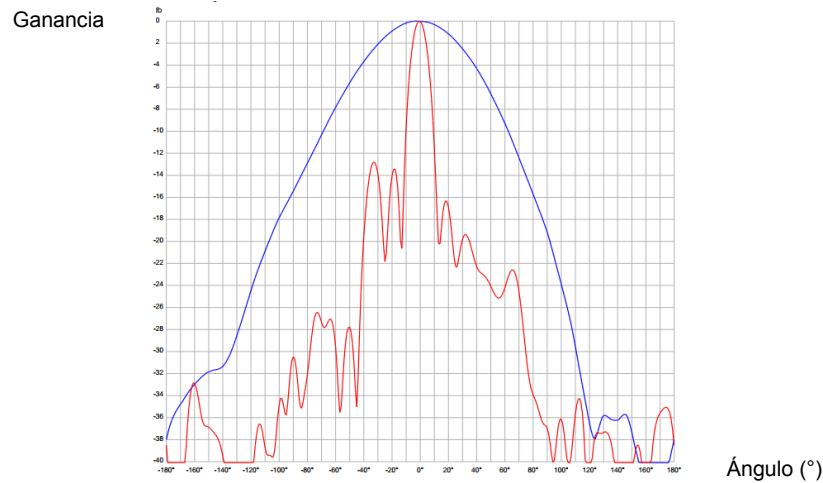


Figura 3.6 Patrón de radiación de antena K80010681
Tomada de: [45]

- **TR 36.942**

Es una antena recomendada por el 3GPP en el TR 36.942. La ecuación 3.4 [46] define la ganancia horizontal de antena, y debido a que no se cuenta con información sobre la ganancia vertical para esta antena, solo se implementan cálculos de ganancia respecto al patrón horizontal.

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{HP}} \right)^2, A_m \right] \quad (3.4)$$

Donde,

- θ Ángulo azimut, varía entre -180° y 180° . Se mide en grados
- θ_{HP} Ancho de haz a 3dB o de potencia mitad, 65° . Se mide en grados
- A_m Máxima atenuación, 20dB. Se mide en decibelios

La figura 3.7 muestra el patrón de radiación horizontal normalizado en unidades logarítmicas y en coordenadas cartesianas para la antena TR 36.942.

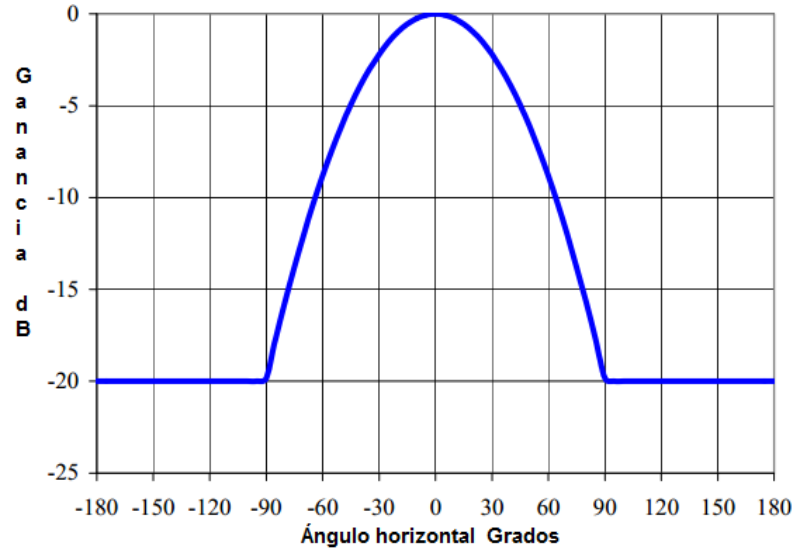


Figura 3.7 Ganancia normalizada de la antena TR 36.942
Tomada de: [46]

○ **Tilt de antena**

El simulador define las siguientes consideraciones respecto al *tilt* de antena:

- Las antenas se encuentran en el mismo plano que los usuarios del sistema (plano XY), por lo tanto se usa el patrón horizontal de antena para realizar los cálculos de ganancia de recepción en el enlace descendente.
- En antenas Katherein se puede variar el *tilt* eléctrico entre 0° y 10° con incrementos de 1° . Los cálculos se obtienen de los valores del patrón de radiación horizontal que proporciona el fabricante para cada valor de *tilt*. En antenas TR 36.942 se considera el *tilt* como una entrada constante con valor de 0° y se usa el patrón de radiación horizontal obtenido teóricamente de la ecuación 3.4.

○ **Azimut de antena**

El simulador define las siguientes consideraciones respecto al azimut:

- Para las antenas directivas, el azimut corresponde al ángulo entre el punto en donde se alcanza la máxima intensidad de campo o potencia y el eje x positivo.

- El azimut 0° o de referencia es el ángulo en donde la intensidad es máxima en el patrón de radiación teórico de la antena.
- La variación del azimut consiste en rotar horizontalmente el patrón de radiación teórico en el sentido de las manecillas del reloj un ángulo A , donde A es el valor de entrada de azimut que el usuario ingresa.

○ **Altura de antena**

En el simulador planteado se consideran alturas de antena típicas en LTE de acuerdo a los valores permitidos en el modelo de propagación seleccionado. Para los modelos de COST 231 los valores se asumen de la TR 25.996 del 3GPP indicadas en la tabla 3.2, mientras que para el modelo de propagación basado en la TR 36.942 se estableció un valor de 15 metros para la altura de la antena, teniendo en cuenta el promedio del valor entre la altura de la antena y la altura típica general de las edificaciones.

● **Ganancia de antena**

La ganancia de antena del eNB para un punto específico del escenario depende del patrón de radiación determinado por el tipo de antena; de la orientación de la antena (tilt y azimut); y de las coordenadas del punto específico de recepción respecto a la antena. Para el simulador propuesto se calculan las ganancias de acuerdo a la antena seleccionada por el usuario y se asigna el valor en función del ángulo entre el usuario y el eNB. La figura 3.8 muestra un escenario con un eNB y tres equipos de usuario, suponiendo que la antena se ubica en el azimut 0° , se puede calcular la ganancia que percibe cada usuario de acuerdo al ángulo.

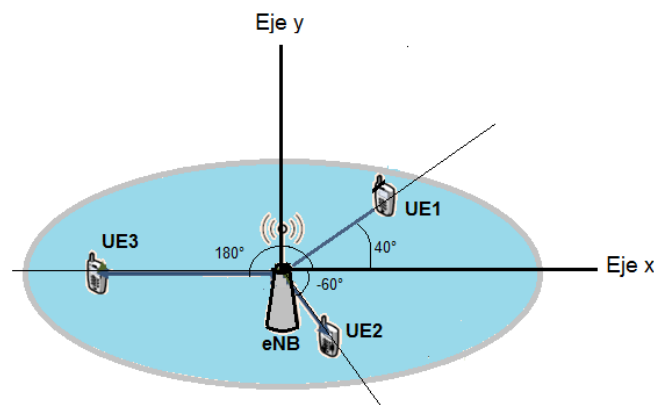


Figura 3.8 Ángulo formado entre un eNB y UE

Modificada de: [47]



- **Configuración de antena**

En el simulador básico a nivel de sistema para LTE propuesto en este trabajo de grado, se implementa un arreglo de antenas SISO para todas las celdas del sistema.

- **Ancho de banda**

El simulador define un ancho de banda de canal variable de 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz o 20 MHz. para cada eNB, que debe distribuirse de acuerdo al esquema de planificación de paquetes entre los usuarios de la celda.

- **Geometría de celda**

El simulador básico a nivel de sistema para LTE implementa celdas hexagonales, esta geometría es ampliamente utilizada en el diseño y simulación de redes móviles celulares por presentar ventajas respecto a otros modelos, al evitar solapamiento o espacios vacíos entre celdas y permitir la asignación eficiente de frecuencias.

3.3.4. Entradas y Salidas del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE

El simulador básico a nivel de sistema para LTE propuesto se implementó como se observa en la figura 3.9, internamente tiene dos bloques funcionales en los que se realiza el cálculo de cobertura y capacidad del sistema independientemente. Las entradas al simulador se observan a la izquierda y se dividen en entradas variables ingresadas por el usuario desde la interfaz gráfica y en entradas fijas definidas en el código implementado, ambas entradas son requeridas para realizar los cálculos de capacidad y cobertura. Las salidas se observan a la derecha e indican los resultados obtenidos del simulador. A continuación se especifican las entradas a cada uno de los bloques.

- **Entradas al bloque de cálculo de cobertura**

Las entradas variables al bloque de cálculo de cobertura desde la interfaz gráfica de usuario son: potencia de transmisión del eNB, modelo de propagación, frecuencia de operación, tipo de desvanecimiento, radio de la celda, tipo, *tilt* y azimut de antena. Las entradas fijas definidas en el código del simulador son: el número de eNBs del sistema y los parámetros requeridos para calcular la pérdida por trayectoria de acuerdo al modelo de propagación seleccionado por el usuario.

- **Entradas al bloque de cálculo de capacidad**

Las variables de entrada al bloque de cálculo de capacidad, configurables desde la interfaz gráfica de usuario son: el número de usuarios por sector, el ancho de banda del sistema, la potencia de transmisión del eNB, la frecuencia de operación, el modelo de propagación, el radio de la celda y el tipo de antena. Las entradas fijas definidas en el código son: la geometría de la celda, el reuso de frecuencia y la estrategia de planificación de paquetes.

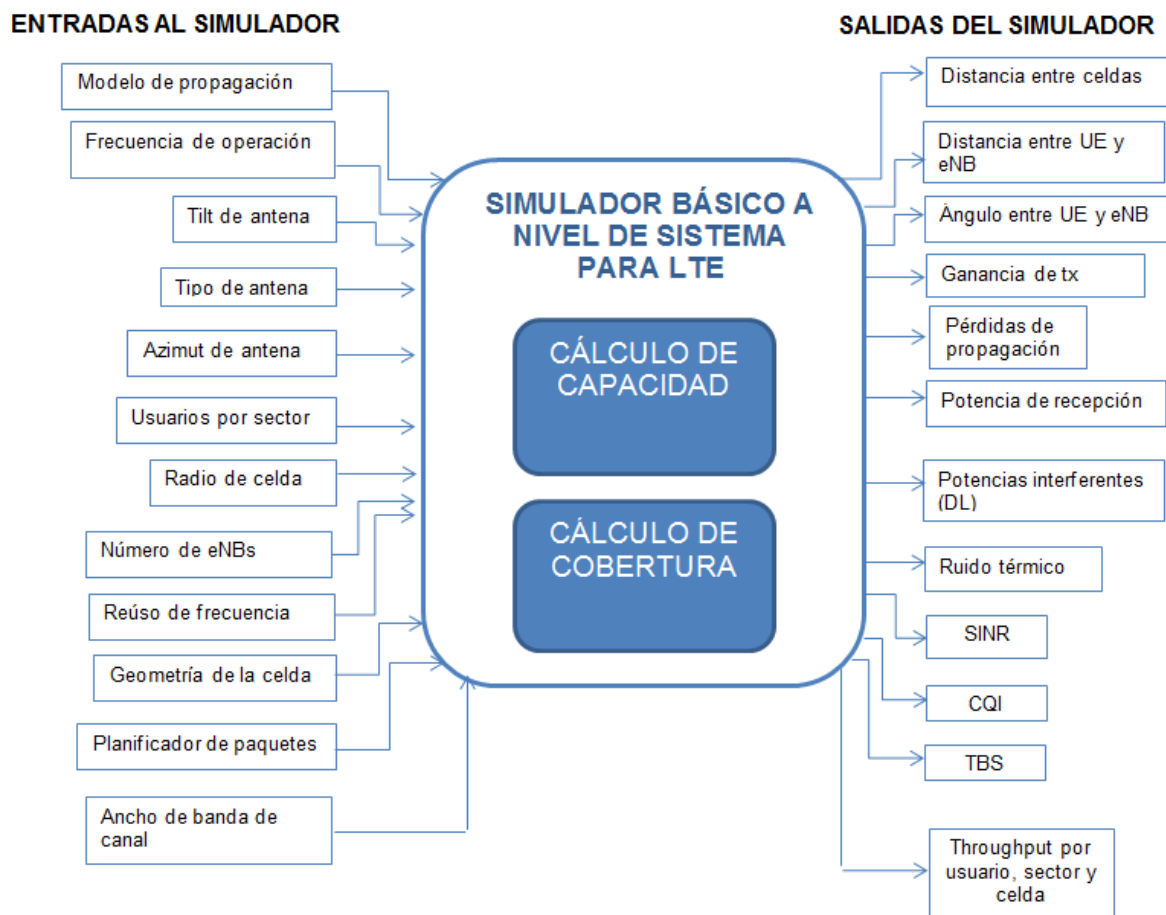


Figura 3.9 Diagrama de entradas y salidas del simulador básico a nivel de sistema para LTE



3.4. IMPLEMENTACIÓN

Esta fase explica los procesos implementados para el desarrollo del simulador básico a nivel de sistema para LTE. Primero, se selecciona la herramienta software sobre la que se programa el simulador, posteriormente se explican los procesos a implementar en los bloques de cálculo de cobertura y capacidad que permiten evaluar el desempeño a nivel de sistema de una red LTE.

3.4.1. Herramienta de Simulación

En la fase de implementación es indispensable una herramienta software que permita la interpretación del problema planteado a través de la traducción de los resultados de la fase de diseño en código. Según las necesidades del proyecto se consideran dos posibles herramientas de las que se tiene un conocimiento previo, estas son, el software matemático comercial Matlab® y el software libre y de código abierto Scilab.

Por las características de entorno y plataforma de trabajo agradable, lenguaje de programación simple y útil, potente capacidad de procesamiento de datos y gráficos que lo destacan como herramienta de análisis se selecciona a Matlab como el software adecuado para el desarrollo de este trabajo de grado. Este producto de *MathWorks* es uno de los entornos informáticos matemáticos más utilizados en computación técnica, es interactivo y ofrece rutinas de cómputo de alto rendimiento [48].

Matlab permite además, la creación de la interfaz gráfica de usuario, necesaria en el desarrollo del simulador para permitir la selección dinámica de los valores de los parámetros considerados en los bloques de cálculo de cobertura y capacidad. Ofrece operaciones con matrices, dibujo de funciones y datos, implementación de algoritmos, creación de interfaz de conexión con programas de otros lenguajes y una amplia gama de aplicaciones más [49] [50].

3.4.2. Cálculo de Cobertura

En esta sección se explican los procesos realizados en código para obtener los cálculos de cobertura del sistema.



- **Definición del escenario de simulación**

El escenario de simulación de cobertura consta de una grilla de receptores y está conformado por cuatro celdas, cada una con tres sectores distanciados 120° a partir de un ángulo barrido por el azimut de la antena desde el centro de la celda. Las dimensiones del escenario y la ubicación del eNB están en función del radio seleccionado por el usuario.

- **Cálculo de la distancia de cada punto del escenario a los eNB**

Para apreciar el efecto de cobertura se realiza el cálculo de la distancia para cada punto de recepción en el escenario considerando que tienen una separación de un decámetro. La distancia entre cada punto del escenario con posición x_i, y_i a cada eNB con posición x_{eNB}, y_{eNB} , está definida en la ecuación 3.5:

$$d = \sqrt{(x_{eNB} - x_i)^2 + (y_{eNB} - y_i)^2} \quad (3.5)$$

Donde,

x_{eNB} Es la ubicación del eNB en X . Se mide en decámetros

x_i Es la posición en el eje X del punto i . Se mide en decámetros

y_{eNB} Es la ubicación del eNB en Y . Se mide en decámetros

y_i Es la posición en el eje Y del punto i . Se mide en decámetros

- **Cálculo de las pérdidas de propagación**

Una vez obtenido el valor de la distancia entre los puntos del escenario y cada eNB se determinan las pérdidas de trayectoria de acuerdo al modelo de propagación seleccionado mediante la fórmula correspondiente de acuerdo al anexo A. Las entradas posibles de modelo de propagación son: espacio libre, COST 231 micro urbano modelado con COST Walfish Ikegamy, COST 231 macro urbano y COST 231 macro suburbano modelados con COST Hata, TR 36.942 urbano y TR 36.942 suburbano.



- **Cálculo de la distancia angular entre los puntos del escenario y cada eNB**

Dadas las ecuaciones 3.6 y 3.7, se procede a calcular el ángulo comprendido entre el eNB y los puntos del escenario (x_i, y_i) , de acuerdo a la ecuación 3.8.

$$\Delta x = (x_{eNB} - x_i) \quad (3.6)$$

$$\Delta y = (y_{eNB} - y_i) \quad (3.7)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (3.8)$$

Donde,

- θ Es el ángulo entre el eNB y el UE. Se mide en radianes
- Δx Diferencia de distancia entre la posición en el eje X del eNB y el punto i . Se mide en decámetros
- Δy Diferencia de distancia entre la posición en el eje Y del eNB y el punto i . Se mide en decámetros

El ángulo θ recibe un ajuste según el valor del azimut seleccionado por el usuario y el valor de Δx , de manera que se condiciona como muestra la relación 3.9:

$$\theta' = \begin{cases} \theta + 2\pi - \alpha, & \text{Sí } \alpha - \theta - \pi > 0 \\ \theta - 2\pi - \alpha, & \text{Sí } \theta - \alpha - \pi > 0 \\ \theta + \pi - \alpha, & \text{Sí } \Delta x < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Donde,

- θ' Angulo ajustado. Se mide en radianes
- α Angulo de azimut. Se mide en radianes

Para antenas Katherein, el ángulo calculado (θ') entre el punto x_i, y_i y el eNB se asocia con el patrón de ganancia proporcionado por el fabricante, para la antena TR 36.942 se reemplaza θ' en la ecuación 3.4 para determinar la ganancia de transmisión del eNB.

- **Cálculo de la potencia de recepción de cada punto del escenario**

Los datos obtenidos de pérdidas de trayectoria y ganancia para cada punto del escenario se agregan a la ecuación de potencia recibida del balance del enlace



que se detalla en el anexo D. Una vez calculada la potencia recibida, se adicionan el efecto del desvanecimiento lento y rápido descritos en el anexo E, el primero modelado por una función *Log-Normal* y el segundo por una distribución *Rayleigh* para obtener la potencia recibida en cada punto bajo las condiciones de propagación establecidas. En las distribuciones implementadas se considera media $\mu = 0dB$ y desviación estándar $\sigma = 4dB$. La ecuación 3.10 presenta la ecuación para el cálculo de la potencia de recepción.

$$P_{rx} = P_{eNB} + G_{eNB} - L + G_{RX} + F \quad (3.10)$$

Donde,

P_{rx}	Potencia de recepción en un punto específico del escenario. Se mide en dBm
P_{eNB}	Potencia de transmisión del eNB. Se mide en dBm
G_{eNB}	Ganancia de transmisión del eNB. Se mide en dBi
L	Pérdidas de propagación. Se mide en dB
G_{RX}	Ganancia de recepción. Se mide en dBi
F	Variable aleatoria que permite representar el desvanecimiento lento o el desvanecimiento rápido. Se mide en dB

- **Despliegue de gráficas de resultados de cobertura**

Una vez realizados los cálculos de cobertura para el escenario, el simulador muestra resultados gráficos en función de la distancia y de la potencia de recepción con y sin los efectos del desvanecimiento para cada sector de cada celda.

3.4.3. Cálculo de Capacidad

En esta sección se explican los procesos realizados en código para obtener los cálculos de capacidad del sistema.

- **Definición del escenario**

El escenario está conformado por 4 celdas en forma de hexágono cada una con 3 sectores, para obtener el hexágono regular se toman 7 muestras de una circunferencia de radio R, y para implementar la configuración de celdas que se muestra en la figura 3.10 cada hexágono se desplaza sobre el eje X y Y una magnitud determinada por el radio de la celda (R) y por el número de celda (1, 2, 3 o 4).

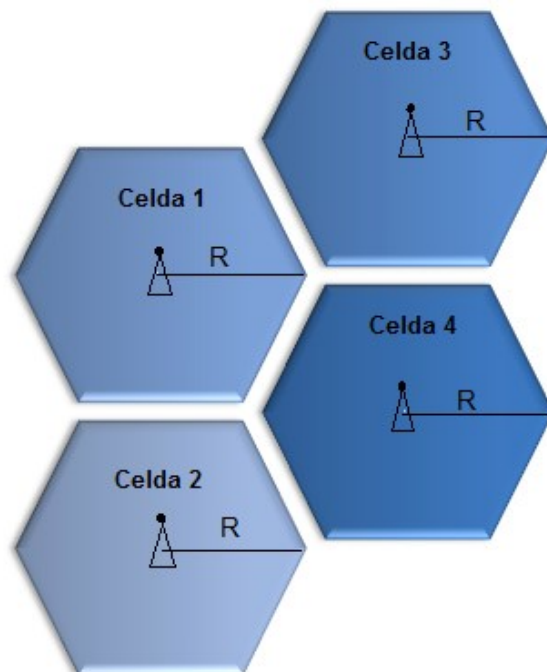


Figura 3.10 Configuración de celdas para bloque de cálculo de capacidad

La sectorización de la celda parte desde el centro del hexágono y corresponde al área barrida por 120° para cada uno de los tres sectores, como lo muestra la figura 3.11. A cada sector se le asigna una porción del ancho de banda disponible y cada PBR se relaciona con una frecuencia específica de acuerdo a la frecuencia de operación de la red, para realizar posteriores cálculos de interferencia.

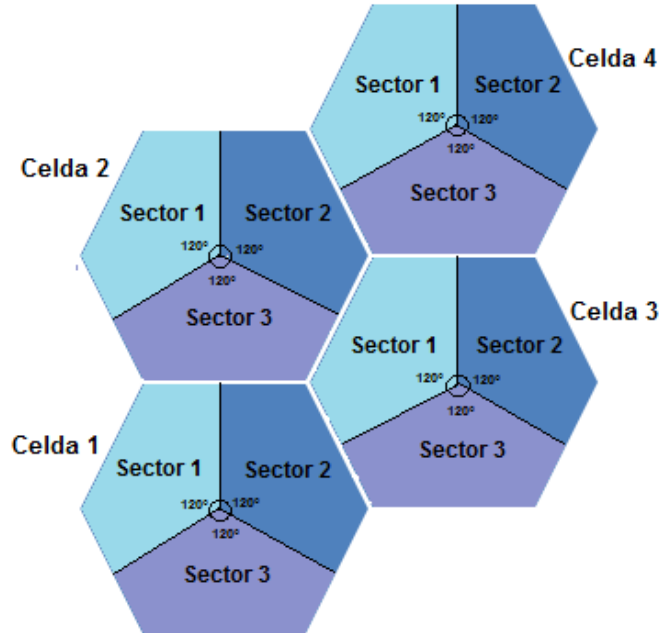


Figura 3.11 Sectorización del celdas para bloque de cálculo de capacidad

Por último, se procede a definir la posición de los eNB en función del radio, ubicando el eNB en el centro de cada hexágono.

- **Asignación de usuarios**

El número de usuarios por sector es una entrada al bloque de capacidad del simulador a través de la interfaz gráfica, los usuarios son asignados aleatoriamente con una distribución uniforme dentro del área de cada celda del sistema, el número total de usuarios en la celda está definido por la ecuación 3.11.

$$Usuarios_{celda} = S * usuarios_{sector} \quad (3.11)$$

Donde,

$Usuarios_{celda}$ Número de usuarios en la celda
 S Numero de sectores por celda
 $usuarios_{sector}$ Número de usuarios por sector

- **Asignación de bloques de recursos**

La asignación de recursos se realiza mediante el esquema de planificación *Round Robin*. En el simulador cada eNB cuenta con un número fijo de bloques de recursos de acuerdo al ancho de banda del sistema, que posteriormente, se



dividen equitativamente entre el número de sectores de acuerdo a la ecuación 3.12.

$$PRB_{sector} = \left\lfloor \frac{PRB_{celda}}{S} \right\rfloor \quad (3.12)$$

Donde,

PRB_{sector} Número de bloques de recursos por sector

PRB_{celda} Número de bloques de recursos por celda

S Número de sectores por celda

Por ejemplo, para un ancho de banda de 20MHz, reemplazando en la ecuación 3.12 el valor de PRB_{celda} por 100 y S por 3, se halla el número de PRB que cada sector tiene disponible para distribuir entre sus usuarios.

$$PRB_{sector} = \frac{100}{3} = 33.33 \quad (3.13)$$

Debido a que un PRB es la unidad mínima asignable a un usuario se toma el entero menor más cercano al resultado, es decir que para un ancho de banda de 20 MHz el número de PRB asignables es 33 y representa el número máximo de usuarios por sector permitidos en el simulador.

- **Cálculo de la distancia entre usuarios y eNB**

Para calcular la distancia entre los usuarios y la posición del eNB, se usa el teorema de Pitágoras. Se consideran las coordenadas del usuario y las coordenadas del eNB mediante la ecuación 3.14.

$$d = \sqrt{(x_{eNB} - x_{ue})^2 + (y_{eNB} - y_{ue})^2} \quad (3.14)$$

Donde,

d Distancia entre un usuario y un eNB. Se mide en decámetros

x_{eNB} Posición en el eje x del eNB. Se mide en decámetros

y_{eNB} Posición en el eje y del eNB. Se mide en decámetros

x_{ue} Posición en el eje x del usuario. Se mide en decámetros

y_{ue} Posición en el eje y del usuario. Se mide en decámetros



El cálculo anterior se realiza para todos los usuarios del sistema respecto a los eNB, obteniendo una matriz de NxM donde N es el número de usuarios totales del sistema y M es el número de eNB.

- **Cálculo de la ganancia de antena para cada usuario**

Para calcular la ganancia que percibe un usuario de la celda por parte de la antena del eNB es necesario calcular el ángulo que se forma entre el usuario y el eNB de acuerdo a la ecuación 3.15.

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y_{ue-eNB}}{\Delta x_{ue-eNB}}\right) \quad (3.15)$$

Donde,

θ	Ángulo entre el eNB y el usuario. Se mide en radianes
Δy_{ue-eNB}	Diferencia de posiciones en el eje Y entre el eNB y el usuario. Se mide en decámetros
Δx_{ue-eNB}	Diferencia de posiciones en el eje X entre el eNB y el usuario. Se mide en decámetros

Una vez realizado el cálculo del ángulo θ para todos los usuarios del sistema y su respectivo eNB, se encuentra la ganancia de antena a partir del patrón de radiación proporcionado por el fabricante para antenas Katherein o el obtenido teóricamente para la antena TR 36.942.

- **Cálculo de pérdidas de propagación**

Las pérdidas de trayectoria dependen del modelo de propagación seleccionado desde la interfaz de usuario, esta entrada se relaciona con la fórmula correspondiente de acuerdo al anexo A. Las entradas posibles de modelo de propagación son: espacio libre, COST 231 micro urbano modelado con COST Walfish Ikegamy, COST 231 macro urbano y COST 231 macro suburbano modelados con COST Hata, TR 36.942 urbano y TR 36.942 suburbano.

- **Cálculo de potencia de recepción**

La potencia de recepción se calcula mediante el balance del enlace y permite cuantificar el efecto de la variación de los parámetros de antena, potencia de transmisión del eNB, modelo de pérdidas de propagación y radio de la celda.



Adicionalmente, el simulador considera el efecto del desvanecimiento por sombra causado por edificios u obstáculos presentes en la trayectoria de la señal, modelado por una función *Log-Normal* y el desvanecimiento rápido causado por multitrayectoria de la señal modelado por una función *Rayleigh*. La ecuación 3.16 permite el cálculo de la potencia de recepción percibida en un equipo de usuario.

$$P_{rxUEo} = \frac{P_{eNB} G_{eNB} G_{UEo} F}{L} \quad (3.16)$$

P_{rxUEo}	Potencia de recepción de un equipo de usuario objetivo. Se mide en watts
P_{eNB}	Potencia de transmisión del eNB. Se mide en watts
G_{eNB}	Ganancia de transmisión del eNB. Es adimensional
L	Pérdidas de propagación entre el eNB y el equipo de usuario objetivo. Es Adimensional
G_{UEo}	Ganancia de recepción de un equipo de usuario objetivo. Es adimensional
F	Variable aleatoria que permite representar el desvanecimiento lento o el desvanecimiento rápido. Es adimensional

- **Cálculo de potencias interferentes**

El simulador para LTE implementa un reuso fraccional de frecuencia con factor 1, por lo que existe interferencia inter celda cuando un usuario de una celda recibe una señal modulada con una frecuencia portadora específica de otros eNB del sistema. Es necesario calcular la interferencia de un usuario del sistema para calcular la SINR y determinar el estado del canal en el enlace descendente.

En el sistema propuesto cada usuario se ve afectado por tres potencias interferentes, correspondientes a señales que emiten los eNB vecinos a usuarios de su celda pero que llegan como potencias interferentes a usuarios de otras celdas que estén usando la misma portadora.

En el simulador, las potencias interferentes son calculadas mediante el balance del enlace descendente para una frecuencia específica entre el usuario de una celda objetivo y los eNB vecinos a la celda.

Después de encontrar las tres potencias interferentes a un usuario, se suman para calcular la interferencia co-canal total para ese usuario como se muestra en la ecuación 3.17



$$P_{I_{UE}} = \sum_{i=1}^3 P_{eNB_{iUE}} \quad (3.17)$$

Donde,

$P_{I_{UE}}$ Potencia interferente co-canal total percibida por un equipo de usuario. Se mide en watts

$P_{eNB_{iUE}}$ Potencia interferente de los eNB vecinos al equipo de usuario. Se mide en watts

- **Modelado de ruido térmico**

Con el objetivo de calcular la SINR se incluye el efecto del ruido térmico en el canal, modelado mediante la ecuación 3.18 que define la potencia de ruido térmico.

$$P_N = K T B \quad (3.18)$$

Donde,

P_N Potencia de ruido térmico. Se mide en watts

K Constante de Boltzman: $1.3806504 \times 10^{23} J/^\circ K$

T Temperatura ambiente: $293^\circ K$

B Ancho de banda por usuario. Se mide en Hz

- **Cálculo de SINR**

El simulador calcula la SINR para cada usuario del sistema usando los valores previamente hallados de potencia de recepción, interferencia co-canal total y potencia de ruido térmico a partir de la ecuación 2.2.

- **Cálculo de *throughput***

Para el cálculo del *throughput* se mapean los valores de SINR obtenidos para cada usuario con valores de SINR de referencia para una BLER menor o igual al 10%, como se muestra en la tabla 2.2. Posteriormente se obtiene el CQI que determina el MCS, con este valor se mapea al índice de TBS de acuerdo a la especificación técnica 36.213 para LTE. Por último, con el valor del índice TBS y el número de PRB asignados a cada usuario del sistema se obtiene el tamaño del bloque de transporte en bits que determina el *throughput* o capacidad por usuario. Este proceso se repite para cada usuario y al realizar la sumatoria del valor de



throughput de los usuarios del sector, celda o sistema se obtienen los resultados en capacidad del simulador.

- **Tratamiento estadístico de datos**

Después de obtener los indicadores de desempeño para una red LTE a partir simulador, se procesan los resultados para lograr una tendencia estadísticamente representativa usando el método de Montecarlo, basado en la repetición exhaustiva de experimentos aleatorios.

Para el simulador básico a nivel de sistema para LTE se considera que 500 repeticiones son suficientes para obtener una tendencia estadística definida, teniendo en cuenta el tiempo de simulación y las pruebas realizadas con diferentes números de iteraciones.

Una vez obtenidos los datos mediante el método de Montecarlo, se usan las funciones estadísticas: Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) y Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*); y las medidas estadísticas: varianza, mediana y media para realizar el análisis de los datos obtenidos.

3.4.4. Resumen de Parámetros de Entrada al Simulador

La tabla 3.5 muestra los parámetros del simulador que se pueden variar desde la interfaz gráfica de usuario para analizar el desempeño de una red LTE.

Parámetros variables	Valores
Potencia de transmisión [W]	20, 40
Frecuencia de transmisión [MHz]	1720, 1900, 2500
Tipo de antena	Katherein 742215 Katherein 80010681 TR 36.942
Modelo de propagación	Espacio libre COST 231 Urban macro COST 231 Urban micro COST 231 Suburban macro TR 36.942 Urbano TR 36.942 Suburbano



Tipo de desvanecimiento	Rápido, Lento
Tilt de antena (°)	0-10
Azimuth de antena (°)	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270
Radio de la celda (m)	Definido por el usuario
Ancho de banda de la celda (MHz)	3, 5, 10, 15, 10
Número de usuarios por sector	Límite máximo de acuerdo a ancho de banda seleccionado

Tabla 3.5 Resumen parámetros de entrada al simulador

3.5. PRUEBAS

En cada una de las etapas del algoritmo de cálculo de cobertura y capacidad se obtienen resultados cuantitativos lo que permite hacer un seguimiento mediante cálculos teóricos de los resultados y verificar el correcto funcionamiento de cada bloque del simulador.

Además, se comparan los resultados de *throughput* por usuario obtenidos del simulador con tasas pico teóricas para LTE con el fin de verificar los resultados en capacidad del simulador. La tabla 3.6 muestra los valores pico de *throughput* en el enlace descendente para diferentes anchos de banda de canal en LTE.

Modulación y codificación	Uso MIMO	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK ½	SISO	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16 QAM ½	SISO	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16 QAM ¾	SISO	2.3	6.6	11.1	22.3	33.4	44.8
64 QAM ¾	SISO	3.5	9.9	16.6	33.5	50.4	67.2
64 QAM	SISO	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7

Tabla 3.6 Velocidades de transmisión de datos pico en el DL (Mbps)

El apéndice B presenta la verificación detallada del funcionamiento de los bloques del simulador básico a nivel de sistema para LTE desarrollado.



CASOS DE ESTUDIO

4.1. INTRODUCCION

Este capítulo presenta los casos de estudio, resultados y análisis del desempeño en cobertura y capacidad de una red LTE usando el simulador básico estático a nivel de sistema desarrollado.

Los resultados de cobertura se presentan mediante mapas de colores que indican los niveles de potencia recibida en una grilla de receptores ubicada en el área del escenario de simulación.

Los resultados de capacidad se presentan mediante curvas de funciones estadísticas de SINR y *throughput*, calculadas mediante el método de Montecarlo, en donde los procesos que componen la simulación se ejecutan 500 veces para obtener una tendencia estadísticamente representativa.

A continuación se describen las medidas estadísticas requeridas para el análisis de los datos:

- CDF: indica la probabilidad de que una variable aleatoria tenga un valor menor a uno específico.
- PDF: indica la probabilidad relativa de que una variable aleatoria pueda tomar un valor específico.
- Mediana: Es el valor de la variable aleatoria debajo del cual se encuentra el 50% de la probabilidad total.
- Promedio o media (μ): “Centro de masa” de la distribución de probabilidad. Se calcula mediante el promedio o media aritmética de un conjunto de mediciones.
- Varianza: es la medida de dispersión de los valores alrededor de la media y se define como el promedio de las distancias cuadráticas entre los diferentes valores de la variable aleatoria y la media.
- Desviación estándar (σ): es la raíz cuadrada de la varianza y mide la dispersión de las observaciones respecto a la media.



A continuación se presentan las consideraciones requeridas para el análisis de los resultados obtenidos de los casos de estudio:

- Se considera como macroceldas a celdas con radio igual o mayor a 1 Km.
- La potencia de transmisión del eNB es de 20 W, valor típico en macroceldas.
- La potencia mínima de recepción para un equipo de usuario en LTE se encuentra en el rango entre -90 dBm y -104.7 dBm [25].
- La cobertura del sistema se determina como la distancia máxima en la que se perciben potencias con valores de -90 dBm, es decir, el punto límite o frontera para que un usuario pueda establecer comunicación con el eNB.
- El desvanecimiento lento se modela mediante una función *log-normal* con media 0 y desviación estándar 4.
- El desvanecimiento rápido se modela mediante una función *Rayleigh* con media 0 y desviación estándar 4.
- El valor de SINR objetivo se establece en 4.4 dB, degradándose la comunicación entre el eNB y el UE si la SINR percibida por el usuario es menor a este valor.
- El valor de SINR mínima se establece en -6.7 dB, interrumpiéndose la comunicación entre el eNB y el UE si la SINR percibida por el usuario es menor a este valor.
- Los ejes X y Y en las gráficas de mapas de colores representan la dimensión del escenario de simulación en decámetros (dam).
- Para facilitar la visualización y análisis, los resultados gráficos de cobertura se limitan al sector 1 de la celda 1, debido a que son suficientes para detallar el cambio progresivo entre escenarios. Además éstos representan el comportamiento general de los otros sectores y celdas. Así mismo, en capacidad, se presentan algunos resultados que resumen el comportamiento del sistema. La totalidad de gráficas y resultados que brinda el simulador tanto en cobertura como capacidad se presentan en el Apéndice C.



4.2. CASO DE ESTUDIO 1

El objetivo es evaluar el desempeño en cobertura y capacidad de una red LTE cuando se varía el tipo de antena en el eNB y se mantienen constantes los demás parámetros de entrada al simulador, como se presenta en la tabla 4.1.

Parámetros	Valor
Potencia de transmisión eNB [W]	20
Frecuencia de transmisión [MHz]	1930
Ancho de banda de canal [MHz]	20
Tipo de antena	TR 36.942, Katherein 742215, Katherein 80010681
Azimut (°)	90
Tilt (°)	0
Ganancia de antena (dB)	18
Modelo de propagación	TR 36.942
Tipo de desvanecimiento	Lento, Rápido
Radio de la celda (Km)	2
Número de usuarios por sector	5

Tabla 4.1 Parámetros de entrada al simulador para el caso de estudio 1

4.2.1. Resultados y Análisis de Cobertura

A continuación se presentan los resultados de cobertura en función de la potencia de recepción con y sin desvanecimiento rápido para los escenarios de simulación con antenas: TR 36.942, Katherein 742215 y Katherein 80010681.

- **Cobertura sin efecto del desvanecimiento**

Las figuras 4.1 (a), 4.2 (a) y 4.3 (a) presentan el patrón de radiación de ganancia horizontal teórico normalizado, obtenido a partir del simulador para las antenas TR 36.942, Katherein 742215 y Katherein 80010681 en coordenadas polares y unidades logarítmicas. Dichas figuras presentan en un mapa de colores los valores de potencia recibida sin considerar el efecto del desvanecimiento en el escenario de simulación para el sector 1 de la celda 1 cuando el eNB radia con una antena TR 36.942, Katherein 742215 y Katherein 80010681 y considerando en todos los casos un azimut de 90°.

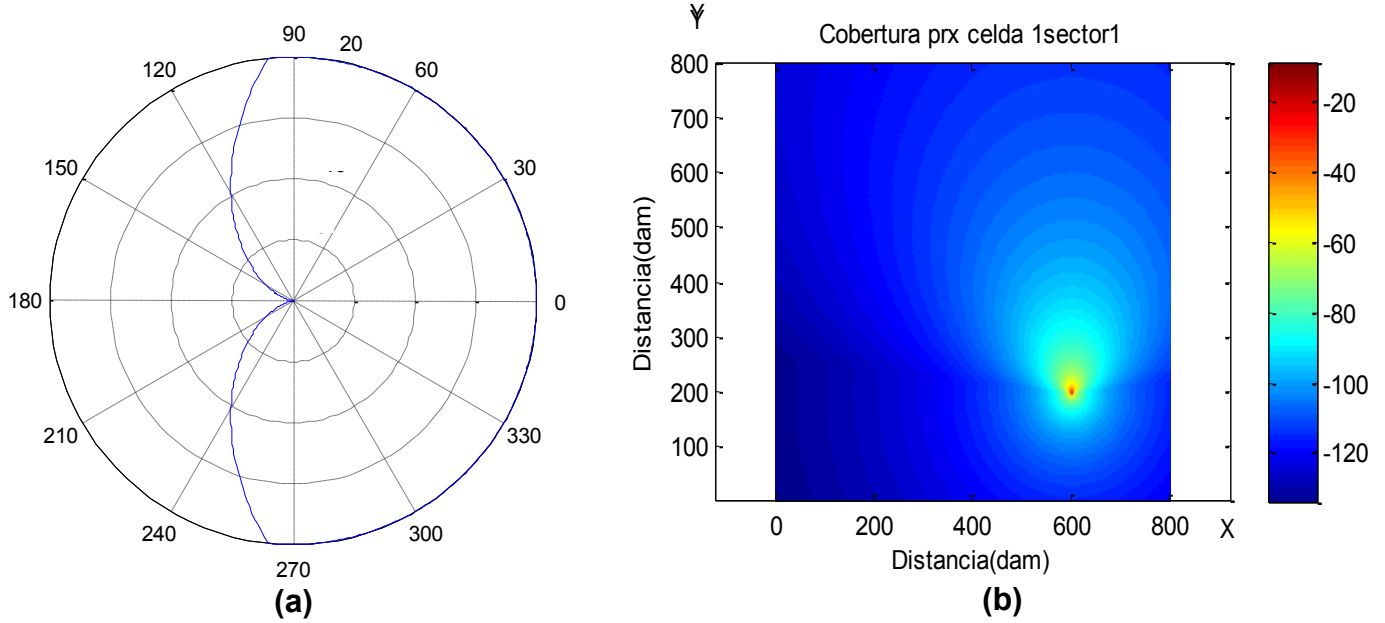


Figura 4.1 Patrón de ganancia teórico y cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para la antena TR 36.942

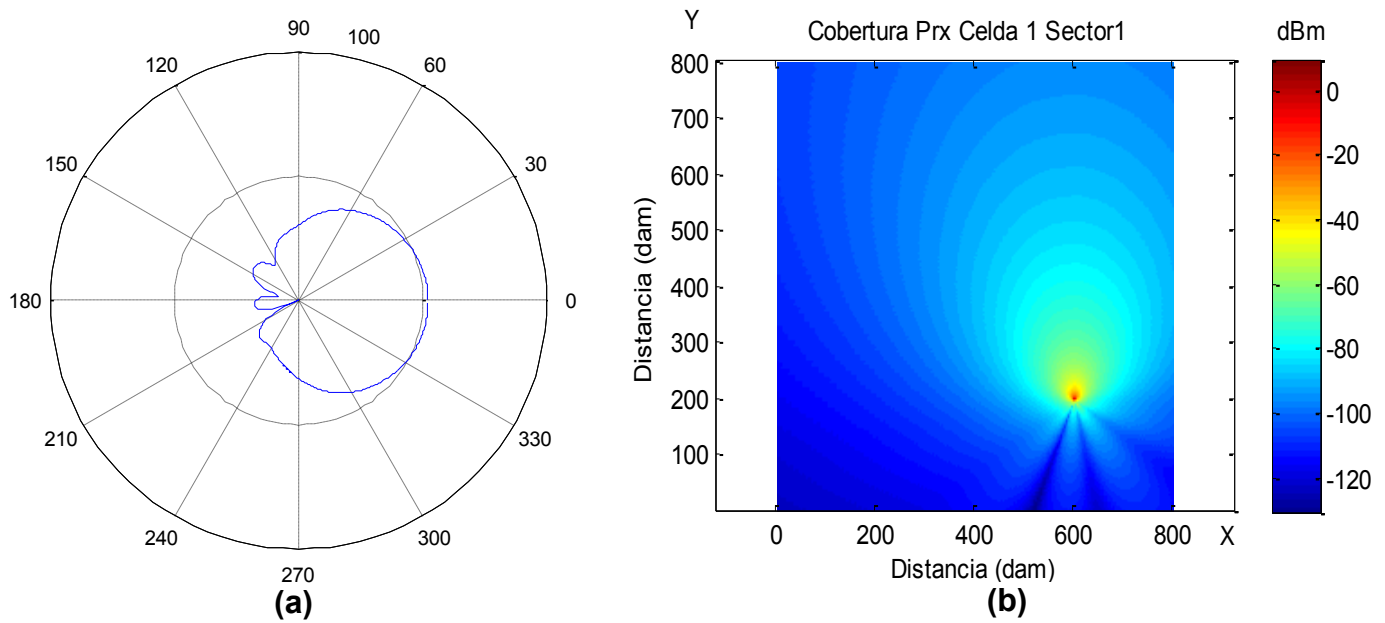


Figura 4.2 Patrón de ganancia teórico y cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para la antena Katherein 742215

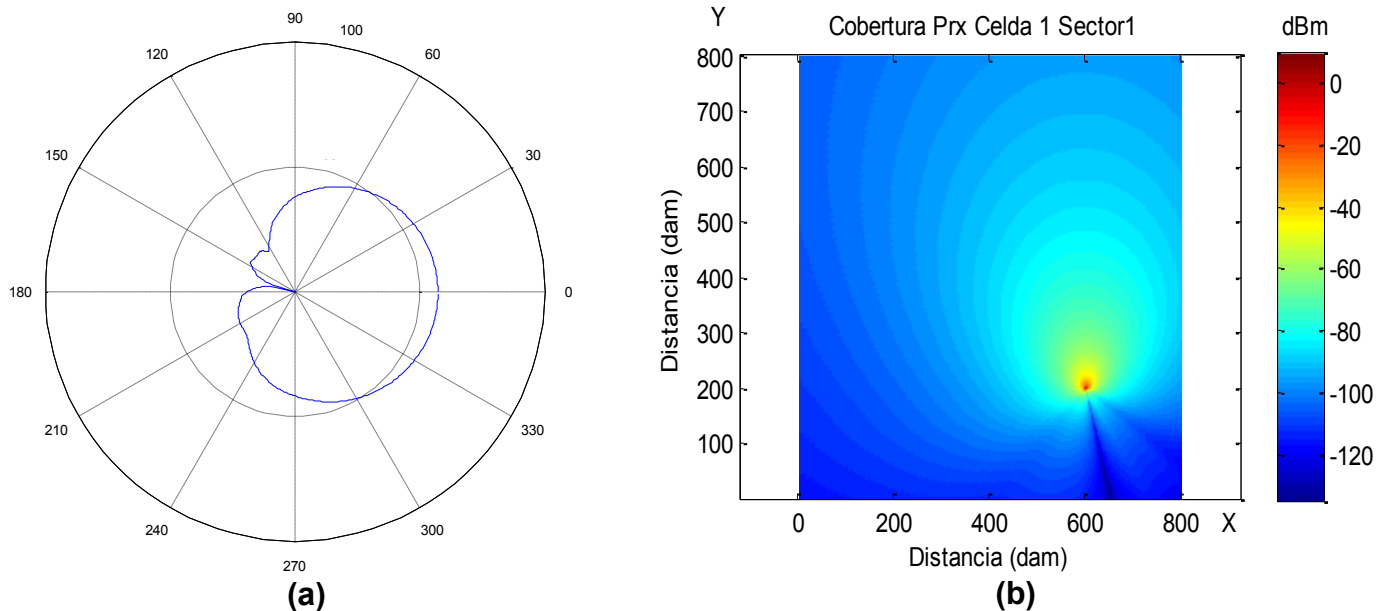


Figura 4.3 Patrón de ganancia teórico y cobertura en función de la potencia De recepción sin desvanecimiento para la antena Katherein 80010681

Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 permiten comparar los patrones de radiación teóricos de las antenas TR 36.942, Katherein 742215 y Katherein 80010681 con los resultados de cobertura para cada escenario evaluado. Se observa que para todos los tipos de antena, la potencia de recepción sigue la forma del patrón de radiación teórico con una rotación de 90° causada por el valor de azimut de entrada seleccionado, además, en cada escenario se distinguen el lóbulo principal del patrón de radiación con una orientación de 90° respecto al eje X positivo y los lóbulos secundarios que radian hacia atrás del lóbulo principal.

La tabla 4.2 muestra la relación entre el tipo de antena y la distancia máxima en la que se alcanza el valor mínimo de potencia de recepción que un equipo de usuario puede percibir en LTE (-90 dBm). Los valores de potencia se miden en la dirección de máxima radiación de cada antena.

Tipo de antena	Distancia máxima alcanzada	
	(dam)	(m)
TR 36.942	147	1470
Katherein 742215	443	4430
Katherein 80010681	443	4430

Tabla 4.2 Cobertura máxima caso de estudio 1- Sin desvanecimiento



De la tabla 4.2 se observa que las antenas Katherein 742215 y Katherein 80010681 presentan un comportamiento similar al alcanzar las mismas distancias en cobertura, así mismo, la antena TR 36.942 muestra un comportamiento inferior reflejado en una menor distancia.

La tabla 4.3 muestra la relación entre el tipo de antena y la potencia promedio percibida en el área de cada escenario sin incluir el efecto del desvanecimiento. Se evidencia que la antena TR 36.942 es la que presenta el peor desempeño debido a que en el área de estudio se percibe una potencia de recepción promedio menor respecto a las otras. Adicionalmente, las antenas Katherein presentan un comportamiento similar al tener una potencia de recepción promedio equiparable.

Tipo de antena	Potencia promedio (dBm)
TR 36.942	-119.6387
Katherein 742215	-108.3286
Katherein 80010681	-105.1856

Tabla 4.3 Potencia promedio caso de estudio 1- Sin desvanecimiento

- **Cobertura con el efecto del desvanecimiento rápido**

Las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 presentan los mapas de colores con la potencia recibida para el sistema, cuando se varía el tipo de antena del eNB al incluir el efecto del desvanecimiento rápido, causado por la multitrayectoria de la señal para el sector 1 de la celda 1.

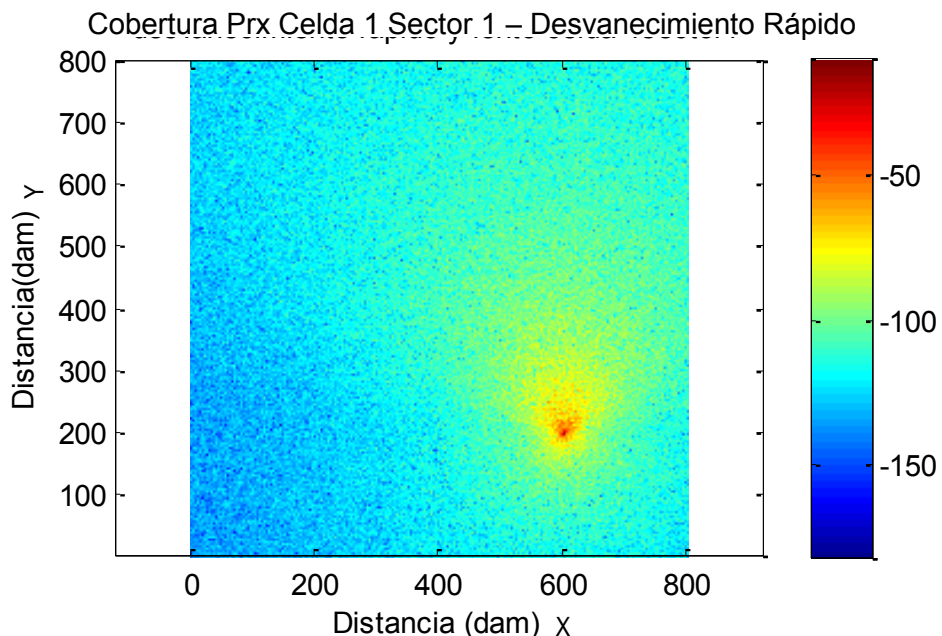


Figura 4.4 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para la antena TR 36.942

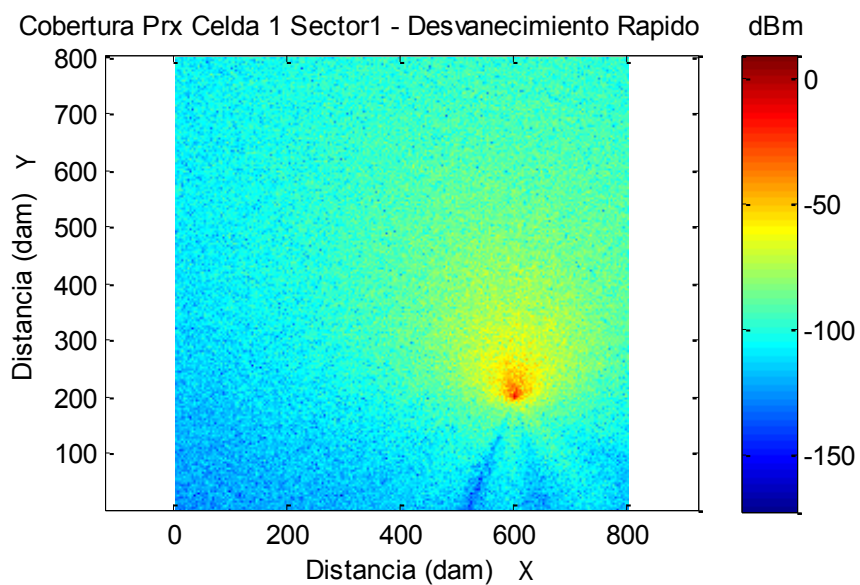


Figura 4.5 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para la antena Katherein 742215

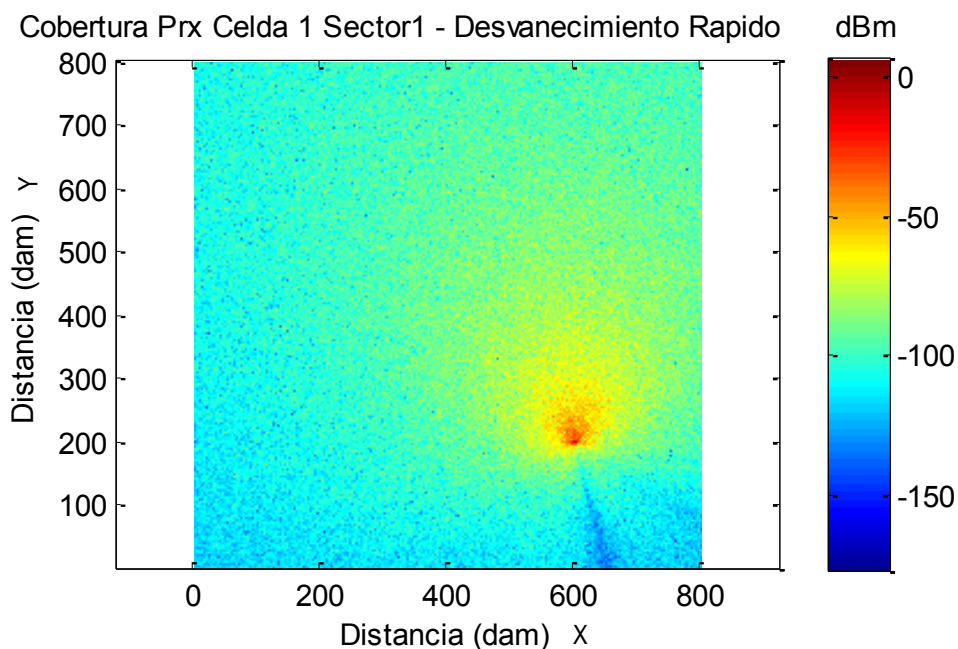


Figura 4.6 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para la antena Katherein 80010681

En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se observa un pixelado en los mapas de cobertura y un crecimiento del área con tonalidades amarillas que indican mayores valores de potencia de recepción respecto a los escenarios que no incluyen el desvanecimiento. El primer efecto indica que en algunas zonas cercanas al eBN se presentan potencias bajas y en otras zonas lejanas potencias altas, mientras que el segundo representa un incremento en la cobertura. Lo anterior se debe a que en los escenarios con desvanecimiento rápido la señal recibida es la sumatoria destructiva o constructiva de todas las trayectorias generadas por las reflexiones de la señal con objetos ubicados en la dirección de radiación de la antena.

La tabla 4.4 muestra la relación entre el tipo de antena y la distancia máxima en la que se alcanza el valor mínimo de potencia de recepción que un equipo de usuario puede percibir en LTE (-90 dBm). Los valores de potencia se miden en la dirección de máxima radiación de cada antena.



Tipo de antena	Distancia máxima alcanzada	
	(dam)	(m)
TR 36.942	288	2880
Katherein 742215	600	6000
Katherein 80010681	600	6000

Tabla 4.4 Cobertura máxima caso de estudio 1- Desvanecimiento rápido

De la tabla 4.4 se observa que las antenas Katherein 742215 y Katherein 80010681 presentan un comportamiento similar al alcanzar las mismas distancias en cobertura, no obstante, la antena TR 36.942 muestra un comportamiento inferior reflejado en una menor distancia. Por otra parte, se evidencia un incremento en la distancia máxima alcanzada y una mayor variabilidad en los valores de potencias percibidos en puntos adyacentes respecto a los obtenidos en los escenarios sin desvanecimiento.

La tabla 4.5 presenta la relación entre el tipo de antena y la potencia promedio percibida en el área evaluada para cada escenario al incluir el efecto del desvanecimiento rápido, donde se observa una disminución de aproximadamente 1 dB respecto a los valores promedio calculados sin desvanecimiento, lo que refleja un deterioro en los valores de potencia percibida en el escenario.

Tipo de antena	Potencia promedio (dBm)
TR 36.942	-121.0942
Katherein 742215	-109.7833
Katherein 80010681	-106.6549

Tabla 4.5 Potencia promedio caso de estudio 1- Desvanecimiento rápido

De la tabla 4.5 se observa que en el escenario evaluado con la antena TR 36.942 es donde se perciben menores valores de potencia, mientras que en los escenarios con las antenas Katherein el comportamiento es similar al presentar valores de potencia de recepción promedio de -109.78 dBm y -106.65 dBm para las referencias 742215 y 80010681 respectivamente.

4.2.2. Resultados y Análisis de Capacidad

Las figuras 4.7 (a) y (b) presentan la función de distribución acumulativa de la relación señal a interferencia más ruido al variar el tipo de antena del eNB cuando se considera el efecto del desvanecimiento lento y rápido.

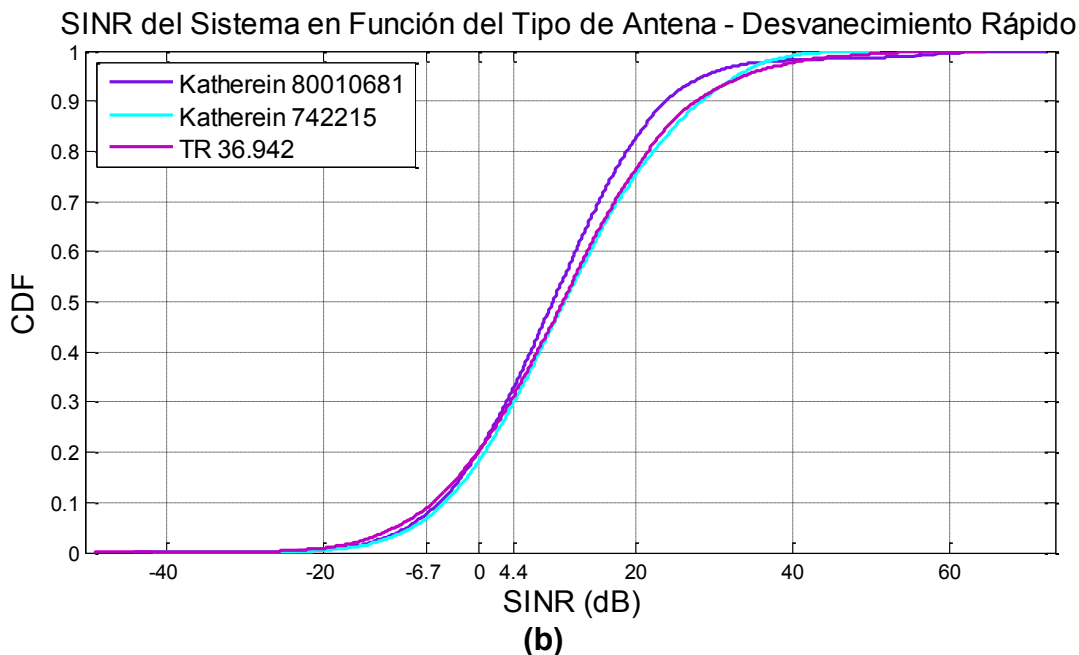
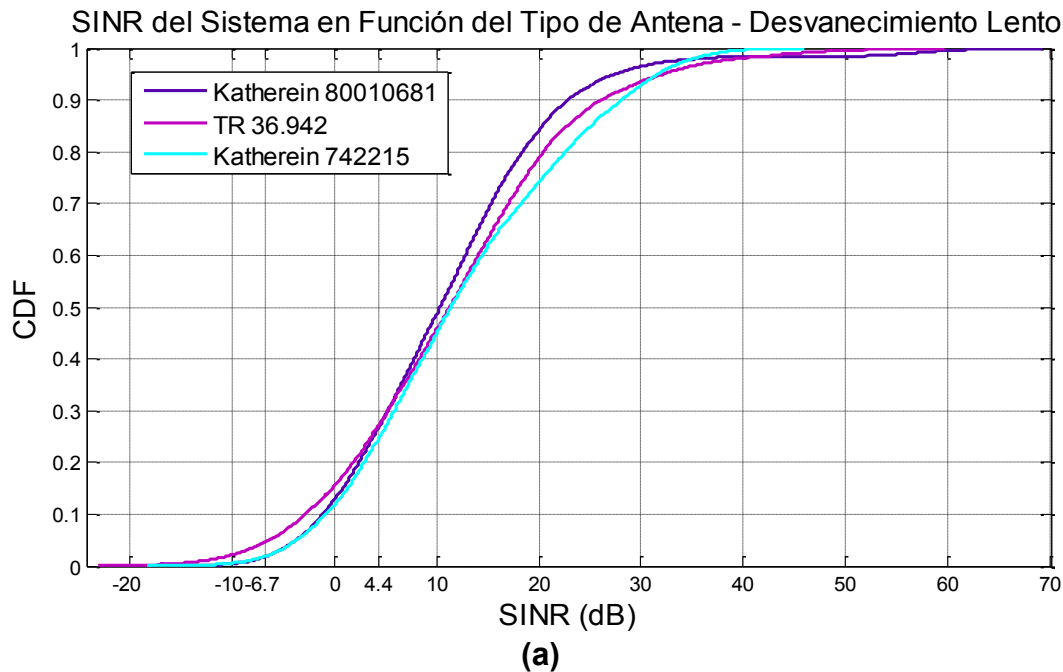


Figura 4.7 Función de distribución acumulativa de la SINR del sistema para el caso de estudio 1

De la figura 4.7 (a) se observa que la antena TR 36.942 presenta el peor desempeño por debajo de una SINR de 6 dB al tener menor probabilidad de alcanzar valores superiores respecto a las otras antenas, mientras que las CDF de las antenas Katherein se superponen presentando igual desempeño. Sin embargo, para valores de SINR mayores a 6 dB este comportamiento se invierte en las



antenas TR 36.942 y Katherein 80010681, siendo esta última la que presenta un menor desempeño respecto a las otras dos que tienen un comportamiento similar.

De la figura 4.7 (b) se observa que las antenas TR 36.942, Katherein 742215 y Katherein 80010681 presentan un desempeño en capacidad similar al traslaparse para valores por debajo de una SINR de 4.4 dB. Sin embargo, para valores de SINR mayores a 4.4 dB este comportamiento cambia al separarse la curva de la antena Katherein 80010681 de las otras, presentando mayor probabilidad de alcanzar valores de SINR inferiores respecto a las demás.

La tabla 4.6 presenta la probabilidad de que la SINR percibida en el sistema por los equipos de usuario sea menor o igual a -6.7 dB (probabilidad de interrupción) y 4.4 dB (probabilidad de degradación) teniendo en cuenta, tanto el desvanecimiento lento, como el desvanecimiento rápido para cada tipo de antena.

Tipo de Antena	Probabilidad de degradación (%)		Probabilidad de interrupción (%)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
TR 36.942	27.34	31.32	4.68	8.84
Katherein 742215	24.73	30.1	1.85	6.74
Kathrein 80010681	26.96	33.02	1.87	7.74

Tabla 4.6 Probabilidad de degradación e interrupción caso de estudio 1

De la tabla 4.6 se observa que la antena TR 36.942 presenta una mayor probabilidad de degradación e interrupción en los escenarios con desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido. En otras palabras, el uso de la antena TR 36.942 en el despliegue de una red LTE limitaría las condiciones de servicio y conexión ofrecidas a los usuarios en comparación a sistemas que implementen antenas Katherein 80010681 y 742215.

La tabla 4.7 muestra la mediana, media y desviación estándar de la SINR del sistema calculada para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido.



Tipo de antena	Mediana SINR (dB)		Media SINR (dB)		Desviación estándar SINR (dB)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
TR 36.942	11.40	10.56	11.66	10.86	11.71	13.49
Katherein 80010681	10.35	9.355	11.11	9.73	10.77	12.49
Katherein 742215	11.42	10.47	12.58	11.33	10.84	12.52

Tabla 4.7 Medidas estadísticas caso de estudio 1

De la tabla 4.7 se aprecia que la antena Katherein 742215 presenta mayores valores en la media de la SINR que los otros tipos de antena, indicando un mejor desempeño en capacidad respecto al *throughput*. Para los tres tipos de antena cuando se aplica desvanecimiento lento la media es mayor a la obtenida con desvanecimiento rápido debido a las atenuaciones profundas y fluctuaciones en el nivel de la señal que caracteriza a este último. Respecto a la desviación estándar se observa que para todos los tipos de antena evaluados, es mayor en el desvanecimiento rápido variando entre 12.49 dB y 13.48 dB respecto al desvanecimiento lento, en donde los valores cambian entre 10.71 dB y 10.84 dB, lo que representa una mayor variabilidad de los valores de SINR obtenidos con desvanecimiento rápido.

Las figuras 4.8 (a) y (b) presentan la función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema cuando se considera el efecto del desvanecimiento lento y rápido para las tres antenas evaluadas.

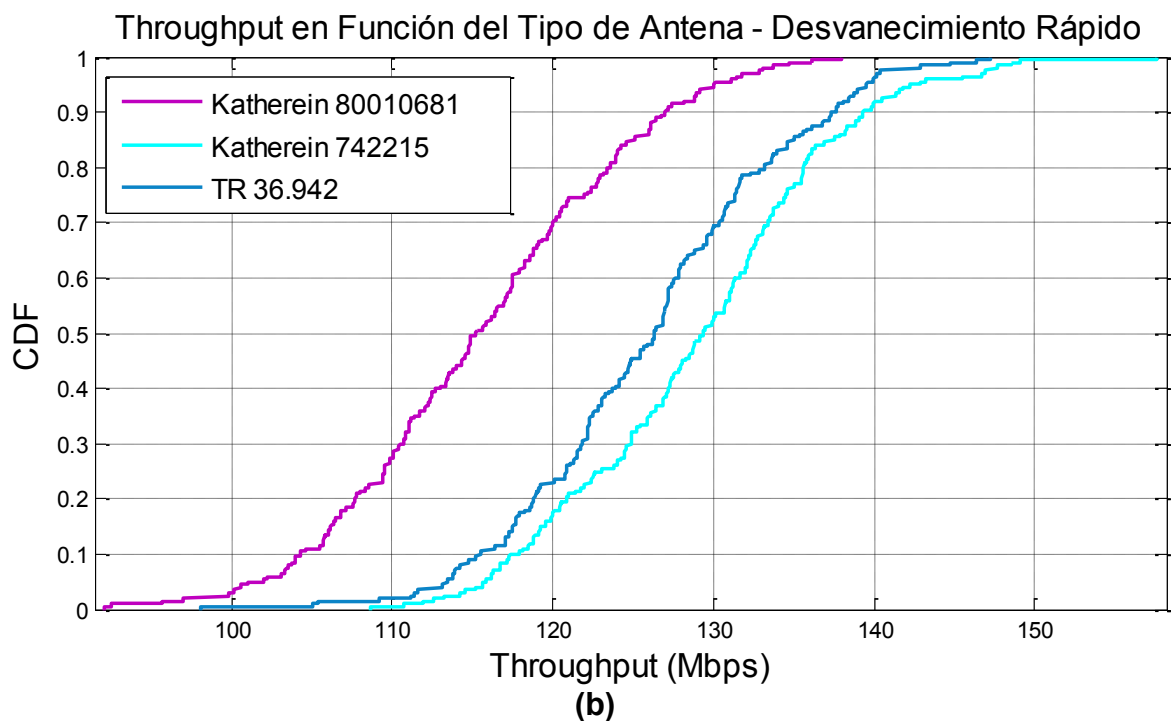
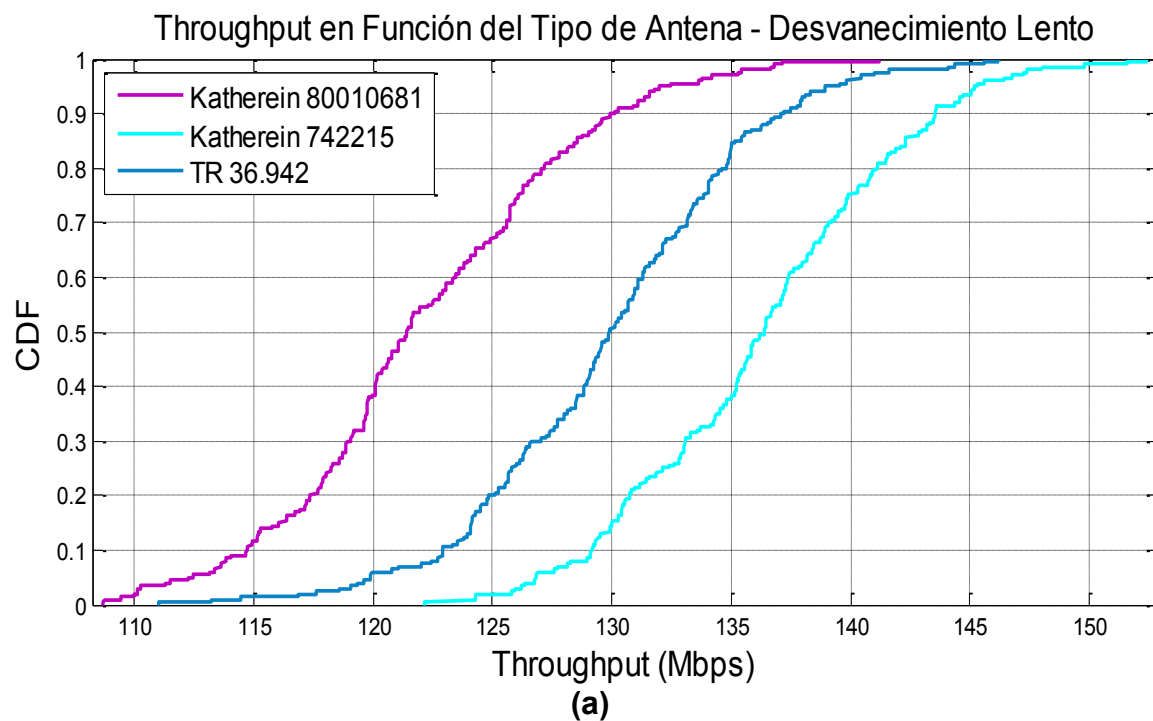


Figura 4.8 Función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema para el caso de estudio 1



De las figuras 4.8 (a) y (b) se observa que el mejor desempeño en capacidad para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido se presenta para el sistema que implementa la antena Katherein 742215, debido a que para todo punto alcanza valores más altos de *throughput* respecto a los otros tipos de antena, mientras que la antena Katherein 80010681 tiene el peor desempeño en capacidad, al alcanzar valores de *throughput* inferiores respecto a las otras.

Específicamente, en el escenario con desvanecimiento lento, la probabilidad de que el *throughput* de sistema sea menor a 130 Mbps es del 90% para la antena Katherein 80010681, del 51% para la antena TR 36.942 y del 12.5% para la antena Katherein 742215. En el escenario con desvanecimiento rápido se presenta un aumento en la probabilidad de que los usuarios perciban un *throughput* de sistema por debajo de un valor determinado, por ejemplo la probabilidad de que el *throughput* de sistema sea menor a 130 Mbps es del 95% para la antena Katherein 80010681, del 69% para la antena TR 36.942 y del 52% para la antena Katherein 742215.

La tabla 4.8 muestra el rango de valores de *throughput* del sistema obtenidos de la simulación para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido en función del tipo de antena.

Tipo de Antena	Rango de <i>throughput</i> de sistema (Mbps)	
	D. lento	D. rápido
TR 36.942	111 – 146	98 – 147
Katherein 742215	122 – 152	108 – 157
Katherein 80010681	108 – 141	92 – 138

Tabla 4.8 Rango de *throughput* de sistema caso de estudio 1

De la tabla 4.8 se evidencia que la antena con el mejor desempeño es la Katherein 742215 por brindar los mayores valores de *throughput* del sistema para escenarios con desvanecimiento lento y rápido, por otra parte, la antena Katherein 80010681 presenta un rango de valores de *throughput* inferior al de las otras antenas, por lo que tiene un menor desempeño en la tasa de transmisión que los usuarios del sistema pueden alcanzar y finalmente la antena TR 36.942 ofrece un desempeño en capacidad intermedio respecto a las demás.



La tabla 4.9 presenta la mediana, media y desviación estándar del *throughput* de sistema para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido.

Tipo de antena	Mediana <i>throughput</i> (Mbps)		Media <i>throughput</i> (Mbps)		Desviación estándar <i>throughput</i> (Mbps)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
TR 36.942	129.9	126.3	129.29	126.05	5.85	8.25
Katherein 80010681	121.4	115.2	122.16	115.53	6.07	8.78
Katherein 742215	136.4	129.3	136.29	129.07	5.66	8.42

Tabla 4.9 Medidas estadísticas caso de estudio 1

De la tabla 4.9 se aprecia que la antena Katherein 742215 presenta mayores valores en la media de *throughput* que los otros tipos de antena, indicando un mejor desempeño en capacidad. Para los tres tipos de antena, cuando se aplica desvanecimiento lento, la media es mayor a la obtenida respecto a los escenarios evaluados con desvanecimiento rápido. Adicionalmente, la desviación estándar es mayor para los escenarios evaluados con desvanecimiento rápido variando entre 8.78 Mbps y 8.25 Mbps respecto a los escenarios con desvanecimiento lento donde se encuentra entre 5.85 Mbps y 6.07 Mbps, presentándose mayor variabilidad del *throughput* del sistema para el desvanecimiento rápido.

4.3. CASO DE ESTUDIO 2

El objetivo es evaluar el desempeño en cobertura y capacidad de una red LTE compuesta por cuatro celdas, cuando se varía el radio de la celda y se mantienen constantes los demás parámetros de entrada al simulador, como se presenta en la tabla 4.10.

Parámetros	Valor
Potencia de transmisión eNB [W]	20
Frecuencia de transmisión [MHz]	1930
Ancho de banda de canal [MHz]	20
Tipo de antena	TR 36.942
Azimut (°)	90
Tilt (°)	0
Ganancia (dB)	18



Modelo de propagación	TR 36.942
Tipo de desvanecimiento	Lento, Rápido
Radio de la celda (Km)	0.5, 2, 6, 10
Número de usuarios por sector	5

Tabla 4.10 Parámetros de entrada al simulador para el caso de estudio 2

4.3.1. Resultados y Análisis de Cobertura

A continuación se presentan los resultados de cobertura para los escenarios de simulación con radio de celda de 10 Km, 6 Km, 2 Km y 500 m.

- **Cobertura sin efecto del desvanecimiento**

En los escenarios de simulación planteados para este caso de estudio, el eNB de interés (eNB1) se ubica en la esquina inferior derecha y sus coordenadas dependen del radio seleccionado como se muestra en la tabla 4.11. Los resultados presentados en esta sección consideran que la señal no es afectada por el desvanecimiento.

Radio de celda (m)	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
10000	30000	10000
6000	6000	18000
2000	2000	6000
500	500	1500

Tabla 4.11 Posición del eNB 1 caso de estudio 2

Las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 presentan los resultados de cobertura en función de la potencia de recepción en el sector 1 de la celda 1 para radios de celda de 10 Km, 6 Km, 2 Km y 500 m respectivamente.

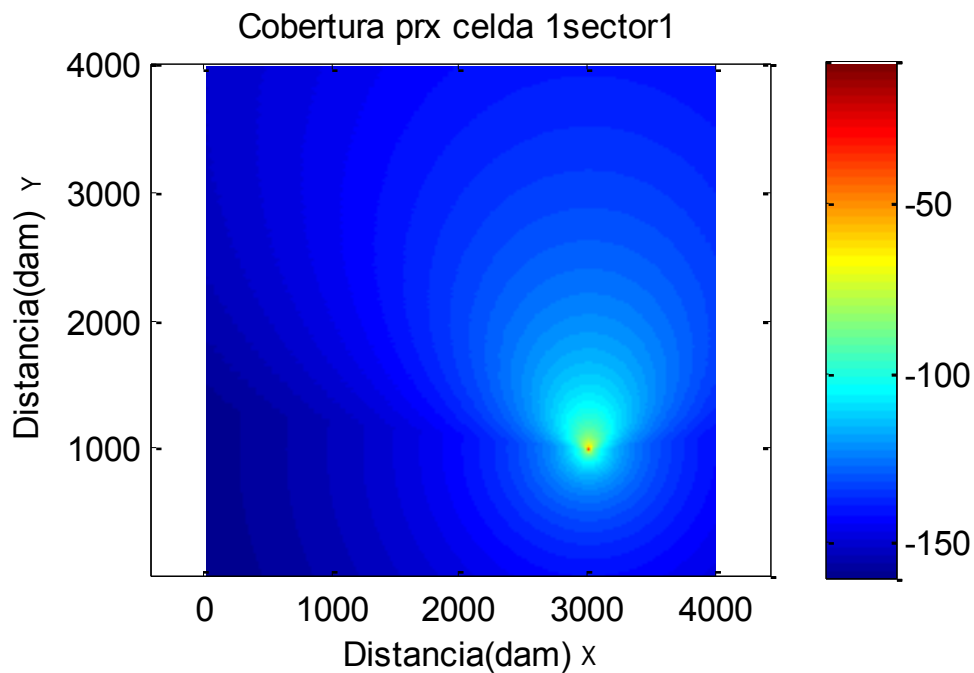


Figura 4.9 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 10 Km

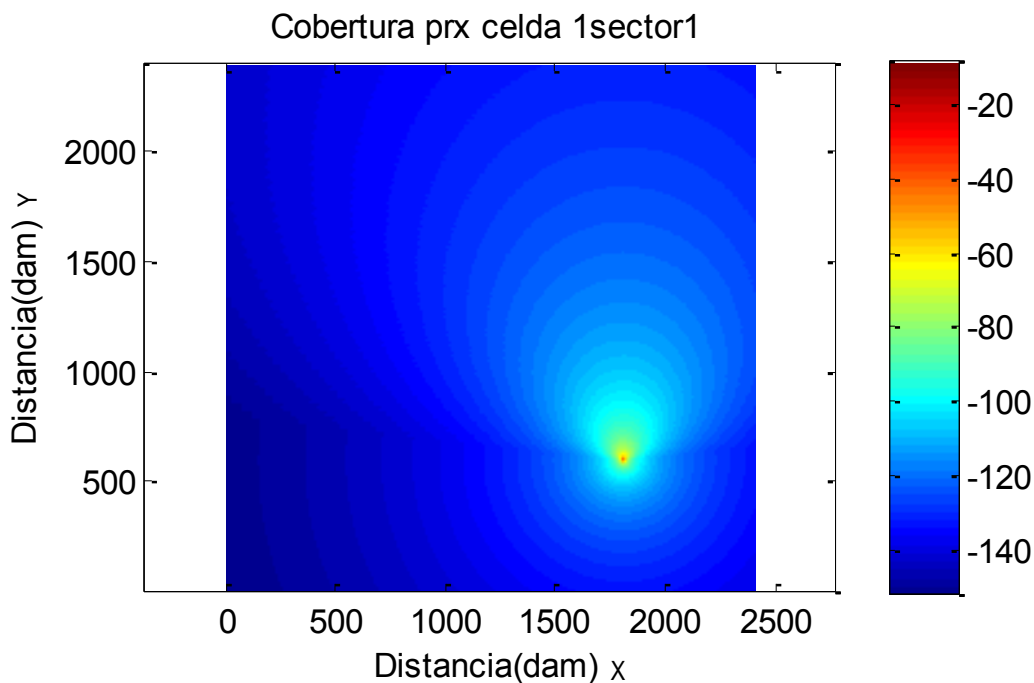


Figura 4.10 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 6 Km

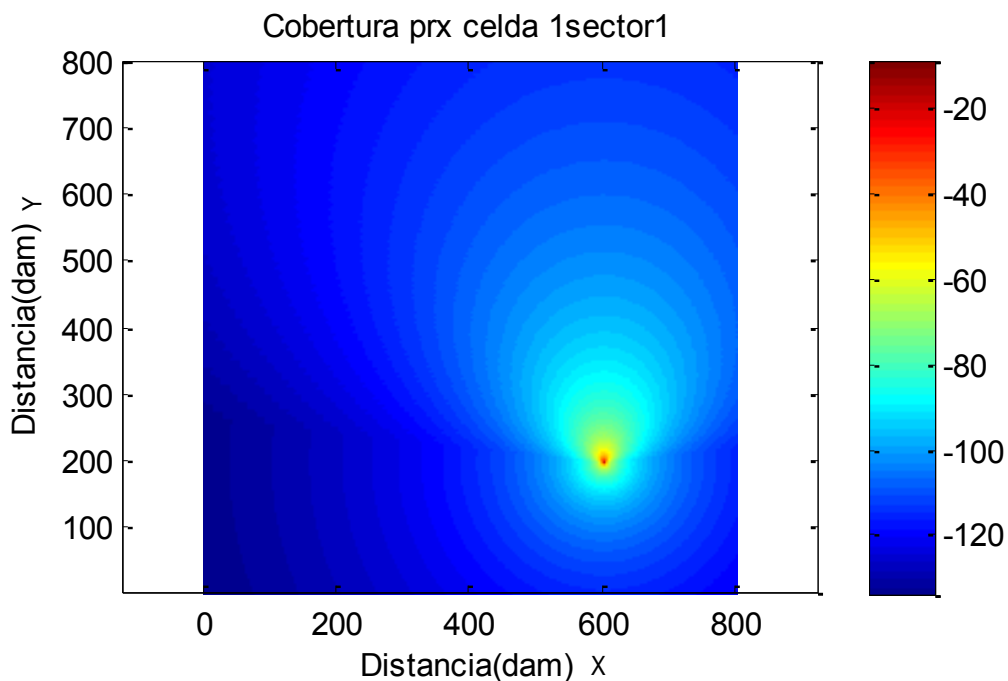


Figura 4.11 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 2 Km

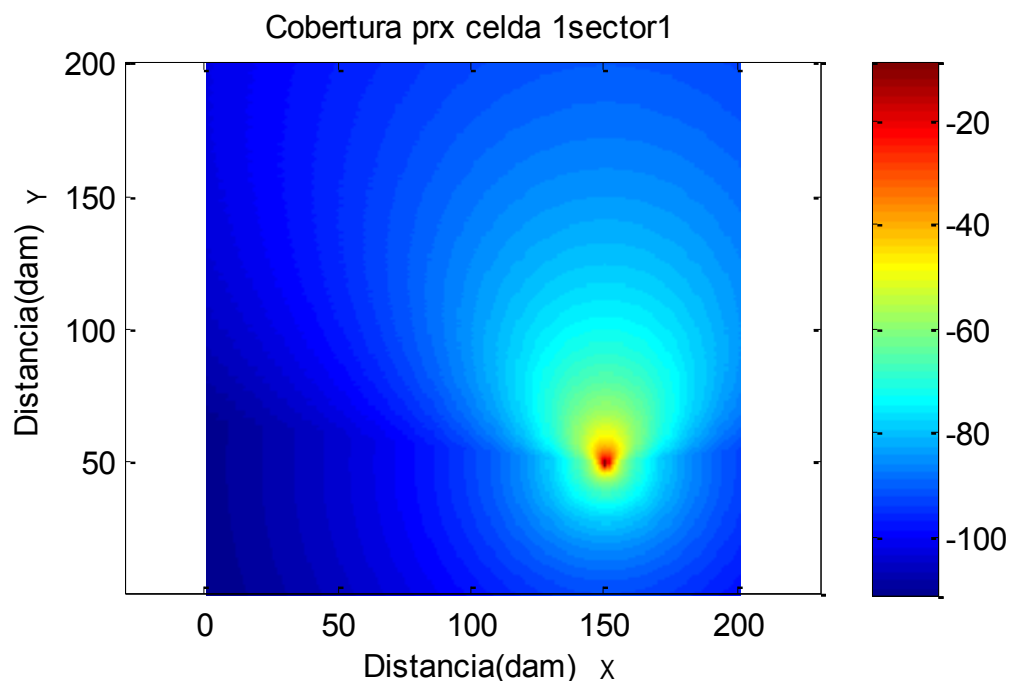


Figura 4.12 Cobertura en función de la potencia de recepción sin desvanecimiento para un radio de celda de 500m



De las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 se observa que la potencia recibida en los diferentes escenarios sigue la forma del patrón de radiación de la antena TR 36.942. Las figuras muestran un aumento progresivo de las zonas con mayores valores de potencia recibida a medida que el radio de la celda disminuye. Por ejemplo para un radio de 10 Km predominan zonas en tono azul oscuro en el rango entre -100 dBm y -150 dBm mientras que para un radio de 500 m se observan zonas en tonos amarillo y azul claro que representan potencias de recepción en el rango de -20 dBm a -70 dBm.

La tabla 4.12 muestra la relación entre el radio de la celda y la potencia promedio percibida en el área de cada escenario.

Radio (m)	Potencia promedio (dBm)
10000	-145.91
6000	-137.57
2000	-119.64
500	-97.04

Tabla 4.12 Potencia promedio caso de estudio 2- Sin desvanecimiento

De la tabla 4.12 se evidencia la relación inversamente proporcional entre el radio de la celda y la potencia de recepción promedio, por ejemplo para un radio de 500 m se tiene una potencia promedio de -97.04 dBm mientras que para un radio de 10 Km es de -145.91 dBm.

- **Cobertura con efecto del desvanecimiento rápido**

Las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 presentan los mapas de cobertura para el sector 1 de la celda 1, se observa la potencia de recepción en los escenarios simulados al considerar el efecto del desvanecimiento rápido causado por la multitrayectoria de la señal para radios de celda de: 10 Km, 6 Km, 2 Km y 500 m.

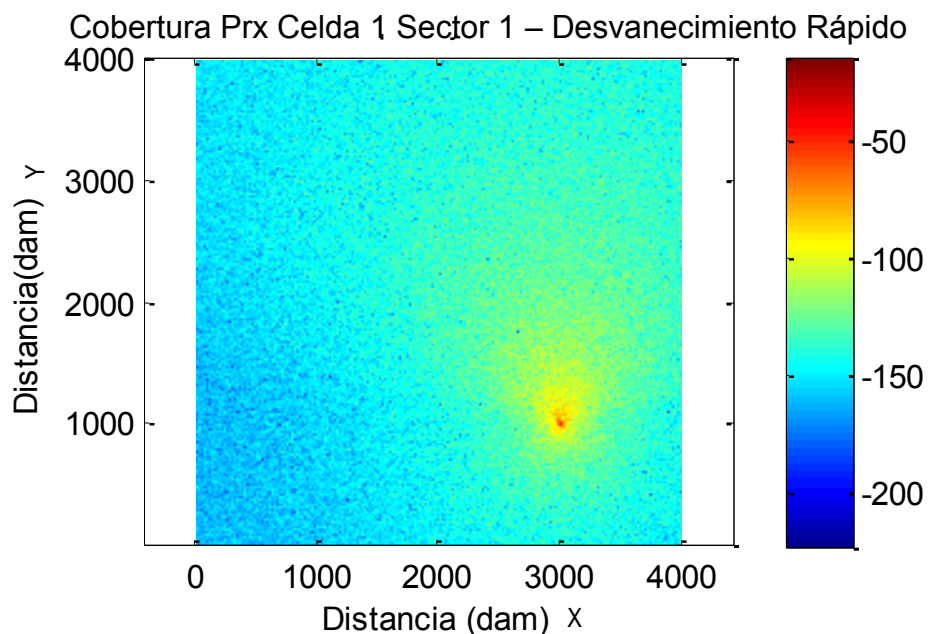


Figura 4.13 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 10 Km

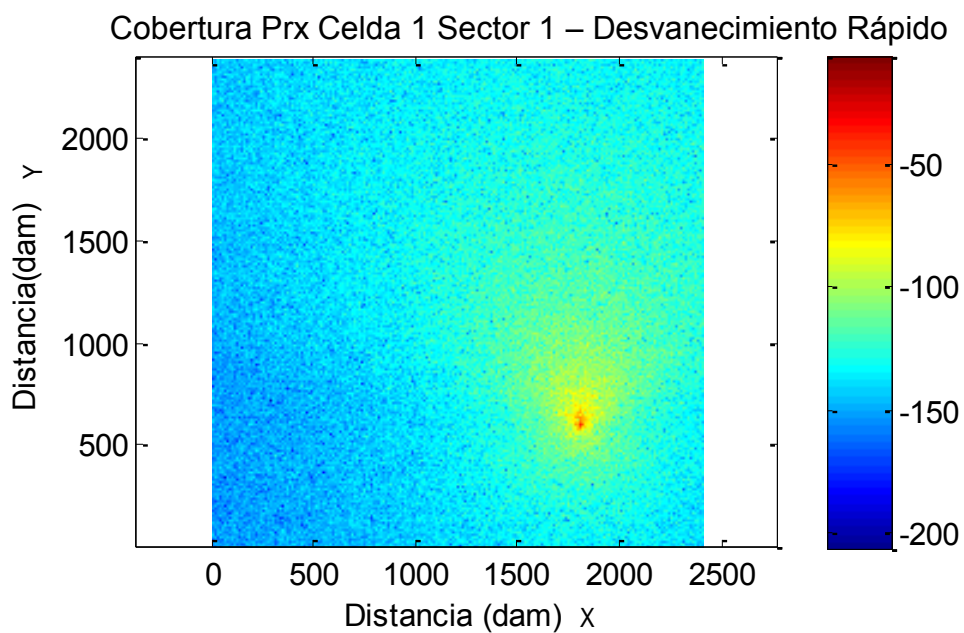


Figura 4.14 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 6 Km

Cobertura Prx Celda 1 Sector 1 – Desvanecimiento Rápido

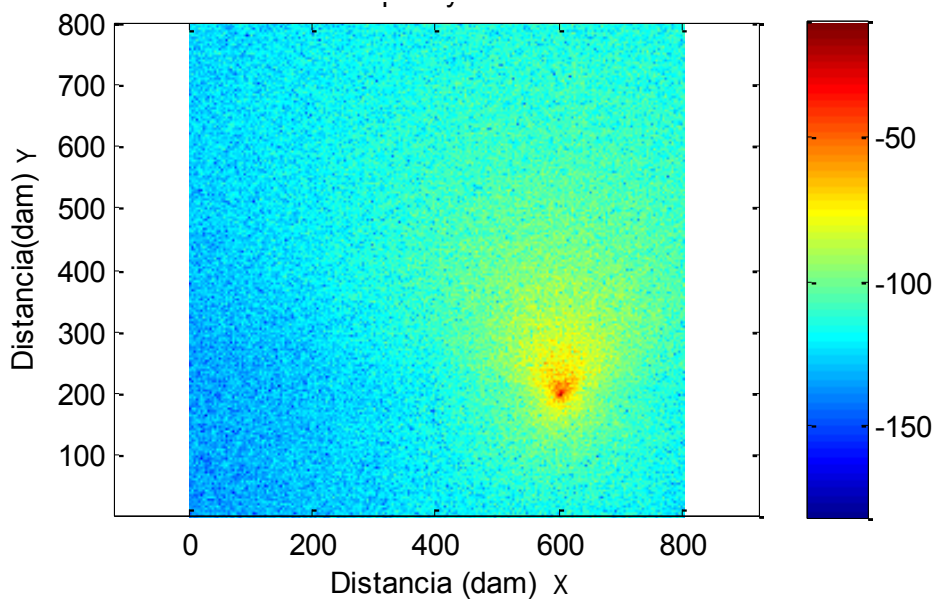


Figura 4.15 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 2 Km

Cobertura Prx Celda 1 Sector 1 – Desvanecimiento Rápido

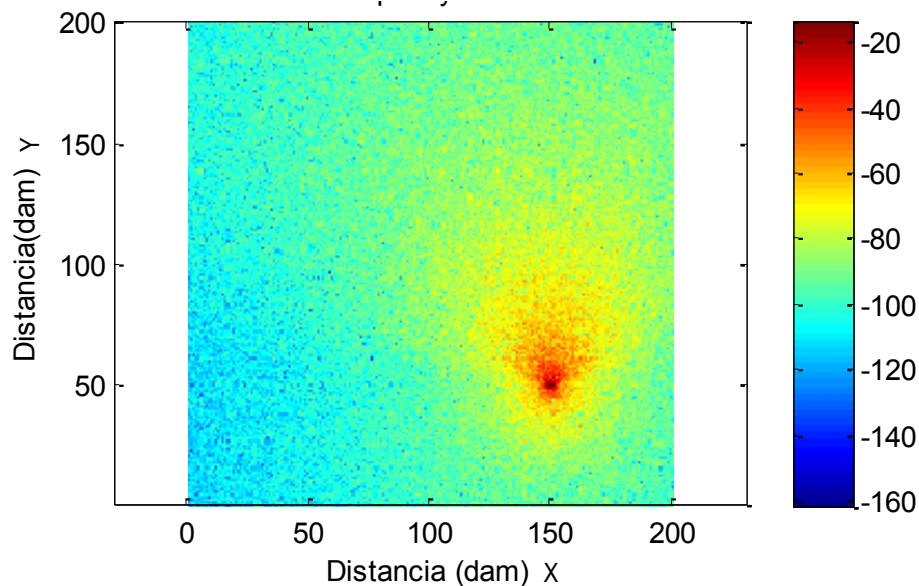


Figura 4.16 Cobertura en función de la potencia de recepción con desvanecimiento rápido para un radio de celda de 500 m



De las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se observa un aumento progresivo de las zonas con mayores valores de potencia recibida a medida que el radio de la celda disminuye, manteniéndose el comportamiento respecto a los resultados obtenidos para los escenarios simulados sin desvanecimiento. Sin embargo, se observan zonas cercanas a la antena que reciben menores potencias respecto a los resultados de la simulación sin desvanecimiento y zonas lejanas que presentan mayores potencias. Lo anterior hace que se presente un efecto de pixelado en las imágenes de cobertura, distorsionando el patrón de radiación de la antena a causa de la multitrayectoria.

La tabla 4.13 presenta la relación entre el radio de la celda y la potencia promedio percibida en el área de cada escenario con el efecto del desvanecimiento rápido, donde se evidencia la relación inversamente proporcional entre el radio de la celda y la potencia de recepción promedio.

Radio (m)	Potencia promedio (dBm)
10000	-147.3689
6000	-139.0256
2000	-121.0942
500	-98.4656

Tabla 4.13 Potencia promedio caso de estudio 2- Con desvanecimiento rápido

De la tabla 4.12 y la tabla 4.13 se observa como la potencia de recepción promedio disminuye en aproximadamente 2 dB para los escenarios que consideran el efecto de desvanecimiento rápido respecto a los escenarios sin desvanecimiento, comportamiento causado por las atenuaciones profundas y fluctuaciones que sufre la señal con multitrayectoria.

4.3.2. Resultados y Análisis de Capacidad

Las figuras 4.17 (a) y (b) presentan la función de distribución acumulativa de la relación señal a interferencia más ruido cuando se considera el efecto del desvanecimiento lento y rápido para radios de celda de 10 Km, 6 Km, 2 Km y 500 m respectivamente.

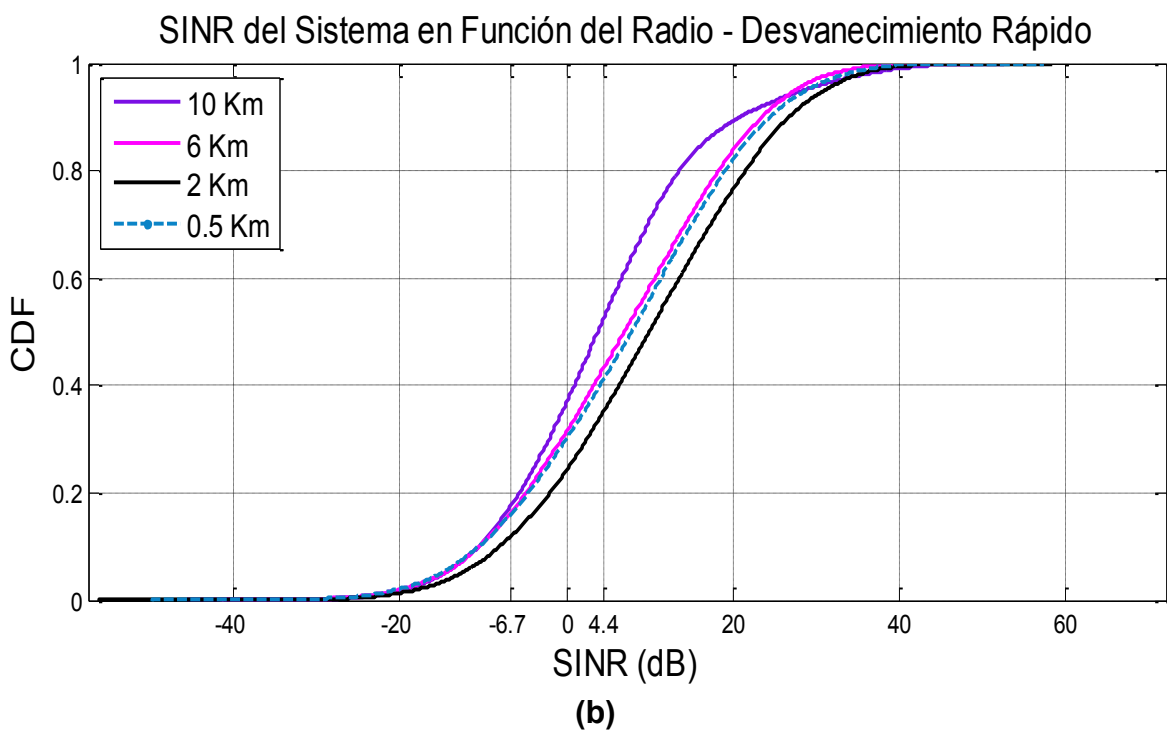
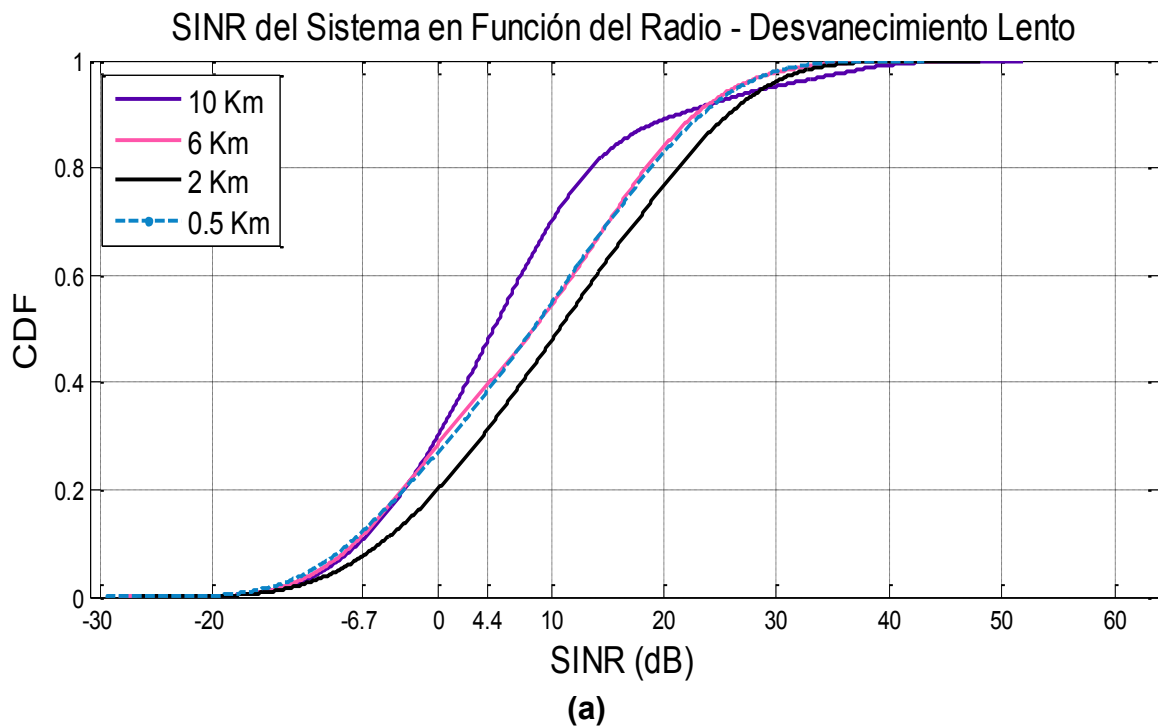


Figura 4.17 Función de distribución acumulativa de la SINR del sistema para el caso de estudio 3



De las figuras 4.17 (a) y (b) se observa que la probabilidad de que los usuarios del sistema perciban una SINR menor a un valor específico aumenta a medida que el radio de la celda lo hace. Sin embargo, para un radio de celda de 500 m, este comportamiento no se mantiene debido a que la distancia entre los eNB es menor y la potencia emitida por cada uno afecta las comunicaciones de los otros, resultando en un incremento en la interferencia y por tanto en un valor bajo de SINR.

La tabla 4.14 presenta la probabilidad de que la SINR percibida en el sistema por los equipos de usuario sea menor o igual a -6.7 dB (probabilidad de interrupción) y 4.4 dB (probabilidad de degradación) teniendo en cuenta tanto el desvanecimiento lento como el desvanecimiento rápido.

Radio (Km)	Probabilidad de degradación (%)		Probabilidad de interrupción (%)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
10	47.90	52.33	10.87	17.51
6	38.5	43.03	10.91	16.11
2	31.20	35.01	7.90	11.81
0.5	38.49	41.02	12.11	15.90

Tabla 4.14 Probabilidad de degradación e interrupción caso de estudio 2

De la tabla 4.14, se observa que para los escenarios simulados con desvanecimiento lento, la probabilidad de que se presente una SINR menor a la objetivo (4.4 dB) es mayor a medida que se incrementa el radio de la celda. Por ejemplo, para un radio de 2 Km la probabilidad de degradación es del 31.2% mientras que para el radio de 10 Km es del 47.9%. Por otra parte, la probabilidad de que los usuarios del sistema perciban una SINR menor al valor mínimo (-6.7 dB) es del 7.9% para un radio de 2 Km, mientras que para el radio de celda de 10 Km es del 10.87%

Adicionalmente, en todos los escenarios simulados con desvanecimiento rápido se presenta un incremento en la probabilidad de degradación y desconexión respecto a la obtenida con desvanecimiento lento. Específicamente, para un radio de 2 Km la probabilidad de degradación es del 35.01% y la probabilidad de interrupción es del 11.81% mientras que para un radio de celda de 10 Km son de 52.33% y 17.51% respectivamente.



La tabla 4.15 muestra la mediana y desviación estándar de la SINR del sistema obtenidas para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido cuando se varía el radio de la celda.

Radio (Km)	Mediana SINR (dB)		Media SINR (dB)		Desviación estándar SINR (dB)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
10	4.92	3.75	6.15	4.56	11.38	12.72
6	8.48	6.98	8.01	6.71	11.58	13.08
2	10.7	9.93	10.57	9.66	11.63	13.40
0.5	8.5	7.82	8.09	7.34	11.73	13.49

Tabla 4.15 Medidas estadísticas caso de estudio 2

De la tabla 4.15 se aprecia que conforme el radio de la celda disminuye de 10 Km a 2 Km, la media de la SINR del sistema aumenta en los escenarios con desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido presentándose una excepción con el radio de 500 m debido a que la potencia de transmisión del eNB (20 W) hace que para este radio la capacidad del sistema se degrade por la cercanía entre eNBs, reflejada en un valor alto de interferencia co-canal.

Respecto a la desviación estándar, se observa que los valores son mayores para los escenarios con desvanecimiento rápido variando entre 12.72 dB y 13.49 dB respecto al desvanecimiento lento que varía entre 11.38 dB y 11.73 dB, presentándose mayor variabilidad en el primero.

La figura 4.18 presenta la SINR promedio en función del radio de la celda percibida por los usuarios del sistema para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido.

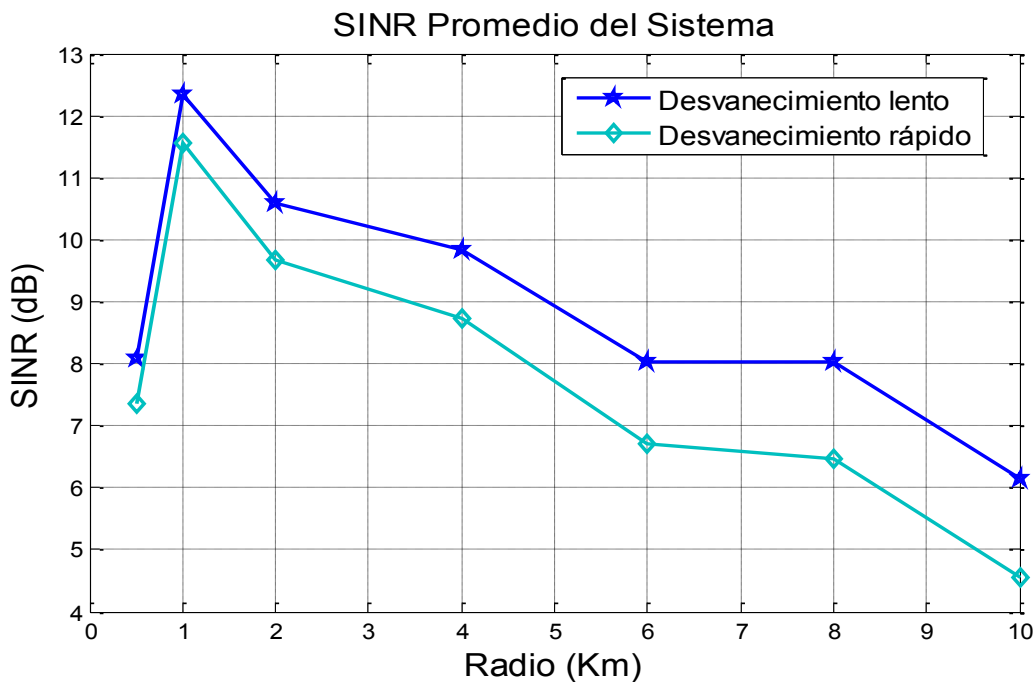
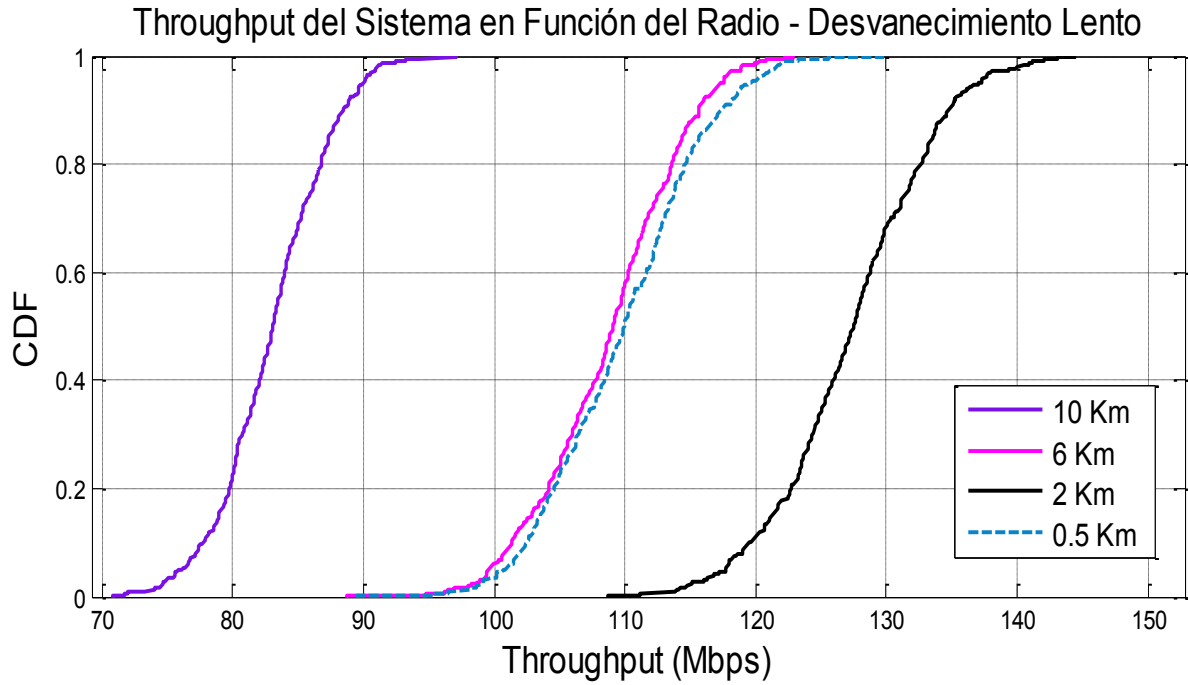


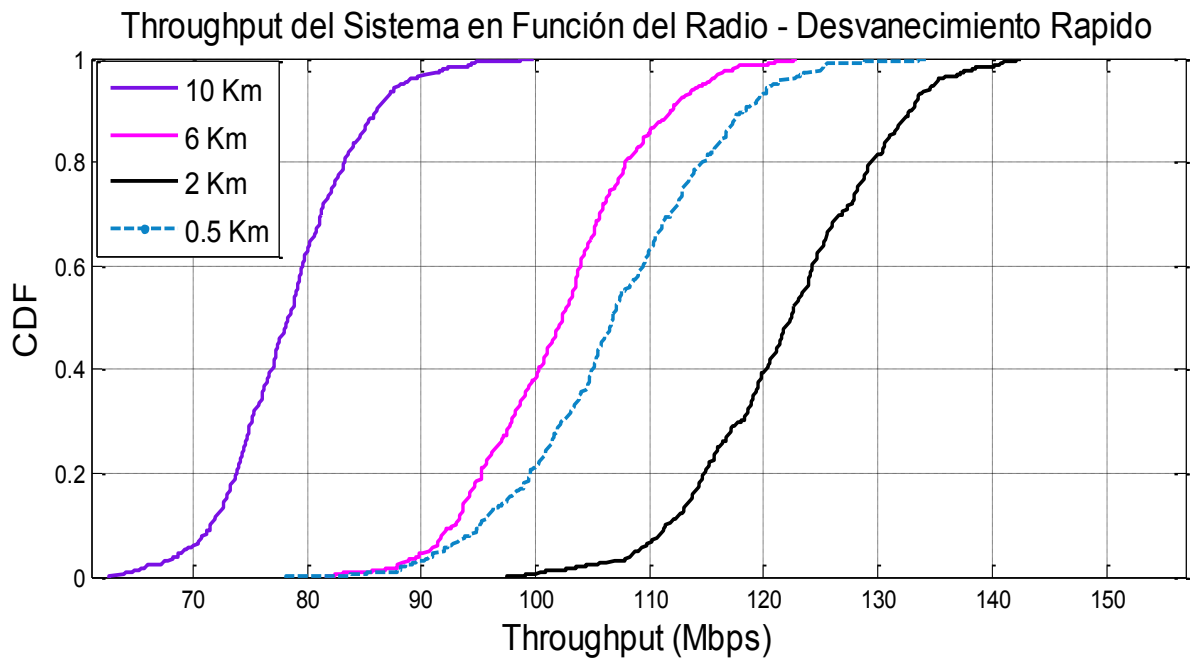
Figura 4.18 SINR promedio del sistema para el caso de estudio 2

En la figura 4.18 se observan dos tipos de comportamiento tanto para desvanecimiento lento como para desvanecimiento rápido. Dicho comportamiento es ascendente cuando el radio de la celda y la SINR son directamente proporcionales y descendente cuando son inversamente proporcionales. El primero se presenta para un radio de celda de 500 m a 1 Km debido al incremento en la interferencia co-canal causado por la cercanía entre celdas. En el segundo, se evidencia cómo a medida que el radio de la celda aumenta la SINR disminuye de un valor de 12.45 dB con un radio de celda de 1 Km hasta 6.18 dB con un radio de 10 Km para el escenario con desvanecimiento lento y de 11.66 dB hasta 4.63 dB para el escenario con desvanecimiento rápido.

Las figuras 4.19 (a) y (b) presentan la función de distribución acumulativa del *throughput* de sistema cuando se considera el efecto del desvanecimiento lento y rápido para los radios de celda considerados.



(a)



(b)

Figura 4.19 Función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema para el caso de estudio 2



De las figuras 4.19 (a) y (b) se observa un corrimiento a la derecha en las curvas de CDF del *throughput* cuando el radio de la celda decrece, es decir, el *throughput* de sistema y el radio de la celda presentan una relación inversamente proporcional. Este comportamiento se mantiene para los escenarios evaluados con desvanecimiento lento y rápido. Por ejemplo, para un radio de celda de 2 Km y considerando desvanecimiento lento se presenta la probabilidad de que en el 70% de las veces se alcance un *throughput* menor a 130 Mbps mientras que al considerar el efecto del desvanecimiento rápido esta probabilidad aumenta a un 80%. Para un radio de 10 Km y considerando desvanecimiento lento se presenta la probabilidad de que en el 70% de las veces se alcance un *throughput* menor a 85.26 Mbps mientras que al considerar el efecto del desvanecimiento rápido esta probabilidad aumenta a un 90.4%.

La tabla 4.16 muestra el rango de valores de *throughput* del sistema obtenidos con desvanecimiento lento y rápido en función del radio.

Radio (Km)	Rango de <i>throughput</i> de sistema (Mbps)	
	D. lento	D. rápido
10	70 – 99	62 – 96
6	88 – 123	81 – 122
2	108 – 144	97 – 143
0.5	89 – 134	78 – 133

Tabla 4.16 Rango de *throughput* de sistema caso de estudio 2

De la tabla 4.16 se observa un aumento progresivo de los valores de *throughput* del sistema en función del radio de la celda para escenarios con desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido, siendo menores los alcanzados con este último.

La tabla 4.17 presenta la mediana, media y desviación estándar del *throughput* de sistema para los escenarios evaluados en este caso de estudio tanto para desvanecimiento lento como para desvanecimiento rápido.



Radio (Km)	Mediana <i>throughput</i> (Mbps)		Media <i>throughput</i> (Mbps)		Desviación estándar <i>throughput</i> (Mbps)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
10	83.07	78.35	83.05	78.53	5.8	8.9
6	109	102.3	108.78	102.06	5.89	8.24
2	127.5	122.4	127.39	122.19	5.39	7.46
0.5	109.9	106.7	109.87	106.98	4.17	5.92

Tabla 4.17 Medidas estadísticas caso de estudio 2

De la tabla 4.17 se aprecia que la mediana y media de *throughput* del sistema para todos los escenarios evaluados disminuye a medida que el radio de la celda aumenta. Respecto a la desviación estándar, se presentan valores mayores para el desvanecimiento rápido respecto al lento, evidenciándose mayor variabilidad del *throughput* del sistema para el primero, por otra parte, a medida que el radio de celda aumenta la dispersión en los valores de *throughput* es mayor.

La figura 4.20 muestra el *throughput* promedio del sistema para radios de celda en un rango de 500 m a 10 Km.

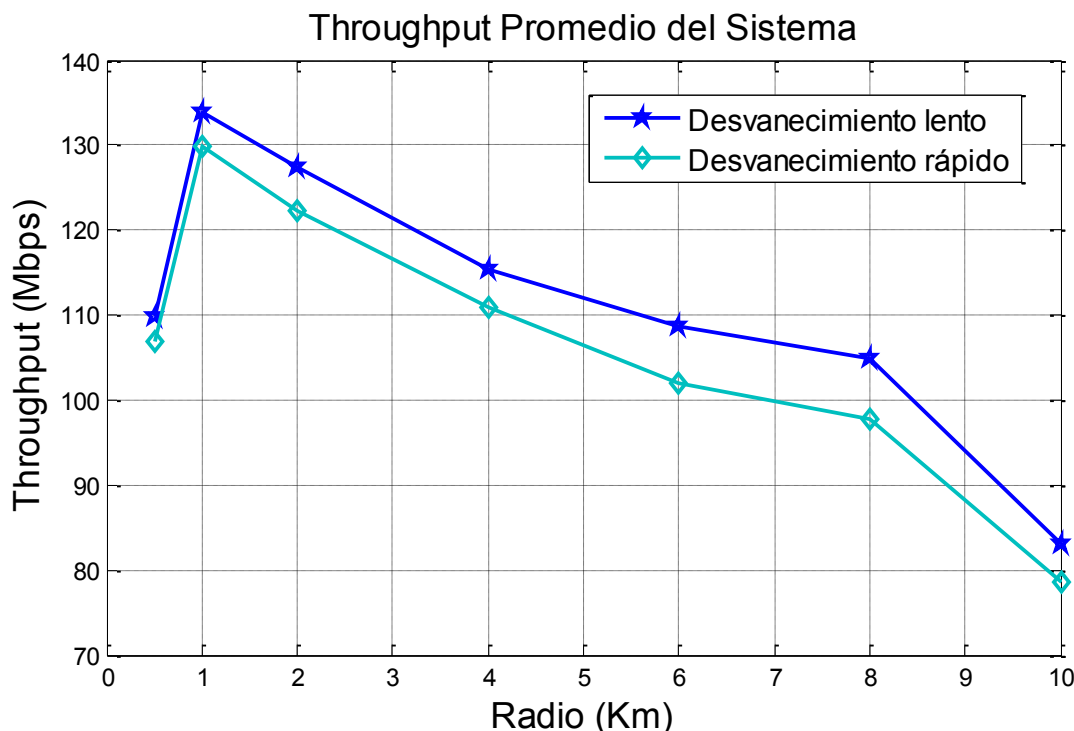


Figura 4.20 *Throughput* promedio del sistema para el caso de estudio 2



De la figura 4.20 se observa un comportamiento creciente para radios de celda de 500 m a 1 Km, efecto ocasionado por la cercanía de los eNB y el incremento en la potencia interferente para radios pequeños. Para radios de 1 Km en adelante el comportamiento de la gráfica es decreciente, indicando una relación inversamente proporcional entre el radio de celda y el *throughput* del sistema que disminuye de un valor de 133.8 Mbps para un radio de celda de 2 Km hasta 83.06 Mbps para un radio de 10 Km con desvanecimiento lento y de 129.8 Mbps hasta 78.54 Mbps con desvanecimiento rápido.

4.4. CASO DE ESTUDIO 3

El objetivo es evaluar el desempeño en cobertura y capacidad de una red LTE cuando se varía el número de usuarios por sector y se mantienen constantes los demás parámetros, como se muestra en la tabla 4.18.

Parámetros	Valor
Potencia de transmisión eNB [W]	20
Frecuencia de transmisión [MHz]	1930
Ancho de banda de canal [MHz]	20
Tipo de antena	TR 36.942
Azimut (°)	90
Tilt (°)	0
Ganancia (dB)	18 dB
Modelo de propagación	TR 36.942
Tipo de desvanecimiento	Lento, Rápido
Radio de la celda (Km)	2
Número de usuarios por sector	3, 5, 10, 20

Tabla 4.18 Parámetros de entrada al simulador para el caso de estudio 3

4.4.1. Resultados y Análisis de Cobertura

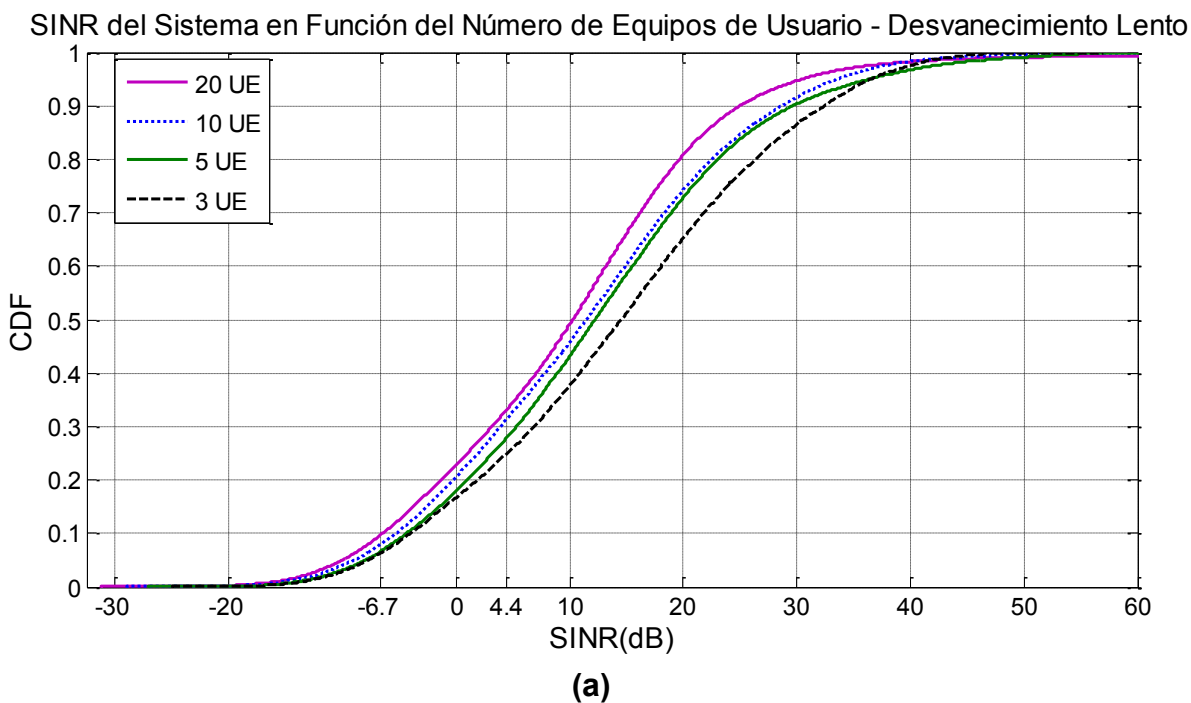
En el simulador básico a nivel de sistema para LTE, la cobertura está definida por las potencias de recepción que se perciben en una grilla de receptores dispuesta en todo el escenario y que representa las posibles ubicaciones en las que se encontraría un equipo de usuario. Debido a que el propósito del bloque de cálculo de cobertura es determinar el alcance de la señal en función de la potencia de recepción, variar el número de usuarios no condiciona los resultados en cobertura.



Para este caso de estudio, las gráficas de cobertura brindadas por el simulador coinciden con las obtenidas en el caso de estudio 2 con un radio de celda de 2 Km, mostradas en la figura 4.11 para el escenario que no considera el desvanecimiento y la figura 4.15 para el escenario que incluye el efecto del desvanecimiento rápido.

4.4.2. Resultados y Análisis de Capacidad

Las figuras 4.21 (a) y (b) presentan la función de distribución acumulativa de la relación señal a interferencia más ruido al considerar el efecto del desvanecimiento lento y rápido cuando el número de equipos de usuarios por sector es: 3, 5, 10 y 20.





SINR del Sistema en Función del Número de Equipos de Usuario - Desvanecimiento Rápido

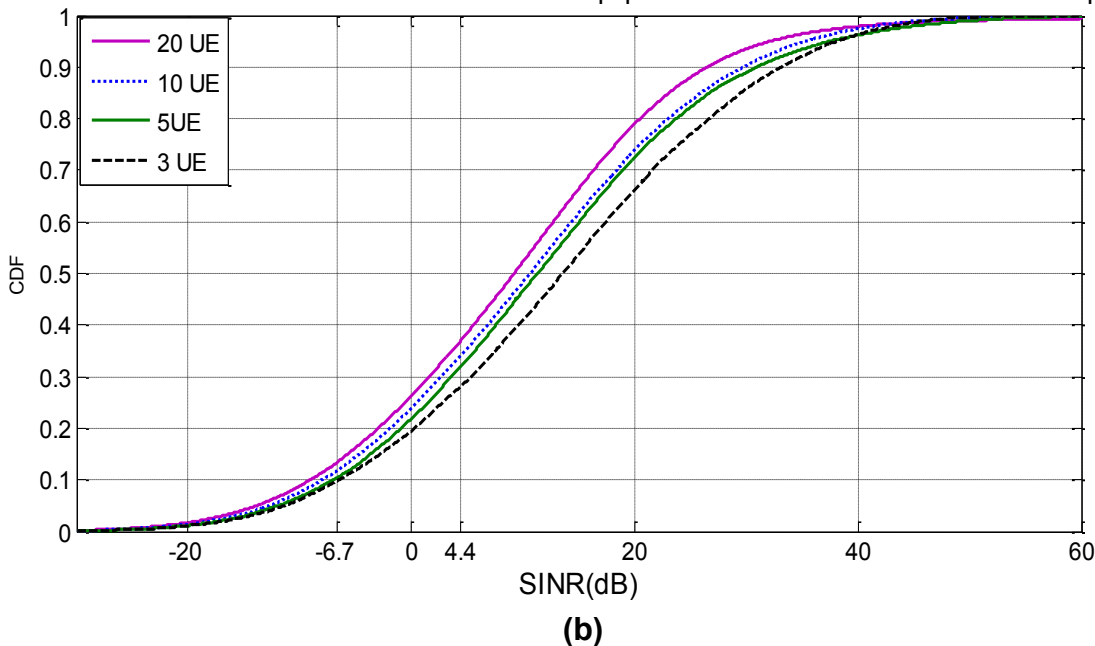


Figura 4.21 Función de distribución acumulativa de la SINR del sistema para el caso de estudio 3

De las figuras 4.21 (a) y (b) se observa que la probabilidad de que los usuarios del sistema perciban una SINR por debajo de un valor específico aumenta conforme lo hace el número de equipos de usuario por sector.

La tabla 4.19 muestra los resultados más representativos de la figura 4.21, donde la probabilidad de que la SINR percibida en el sistema por los equipos de usuario sea menor o igual a -6.7 dB (probabilidad de interrupción) y 4.4 dB (probabilidad de degradación) teniendo en cuenta tanto el desvanecimiento lento y como el rápido.

Número de Equipos de Usuario	Probabilidad de degradación (%)		Probabilidad de interrupción (%)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
20	33.02	36.84	9.54	13.24
10	31.22	33.93	7.8	11.62
5	27.61	31.76	6.41	10.33
3	24.70	27.92	6.21	9.7

Tabla 4.19 Probabilidad de degradación e interrupción caso de estudio 3



De la tabla 4.19 se observa que al incrementar el número de equipos de usuarios por sector, tanto la probabilidad de degradación como la de interrupción también lo hacen, es decir, existe una relación directamente proporcional entre el número de equipos de usuario y un desempeño bajo en capacidad. Por ejemplo, para los escenarios evaluados con desvanecimiento lento, la probabilidad de degradación para 3 UE por sector es de 24.7% mientras que para 20 UE es del 33.02%. Por otra parte la probabilidad de interrupción para 3 UE es de 6.21% y para 20 UE del 9.54%.

Adicionalmente, en los escenarios simulados con desvanecimiento rápido se incrementa la probabilidad de degradación y de interrupción en todas las variaciones del número de UE respecto a la obtenida con desvanecimiento lento. Por ejemplo, para 5 UE por sector la probabilidad de degradación con desvanecimiento lento y rápido es de 27.61% y 31.76% respectivamente.

La tabla 4.20 muestra la mediana, media y desviación estándar de la SINR del sistema obtenidas para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido cuando se varía el número de equipos de usuario por sector.

Número de Equipos de Usuario	Mediana throughput (Mbps)		Media throughput (Mbps)		Desviación estándar throughput (Mbps)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
20	10.31	9.23	10.13	9.27	13.16	14.74
10	11.45	10.5	11.60	10.77	13.04	14.65
5	12.26	11.4	12.70	11.76	13.34	14.96
3	14.54	13.62	14.38	13.44	13.47	15.06

Tabla 4.20 Medidas estadísticas caso de estudio 3

De la tabla 4.20 se observa que a mayor número de equipos de usuario por sector la media de la SINR del sistema disminuye tanto para los escenarios con desvanecimiento lento como para los que se evalúan con desvanecimiento rápido.

Respecto a la desviación estándar, se observa que los valores cambian entre 13.04 dB y 13.47 dB para el escenario con desvanecimiento lento y entre 14.65 dB y 15.06 dB para el escenario con desvanecimiento rápido, presentándose mayor variabilidad en este último.



La figura 4.22 presenta la relación entre la SINR promedio y el número de equipos de usuario por sector para los escenarios evaluados.

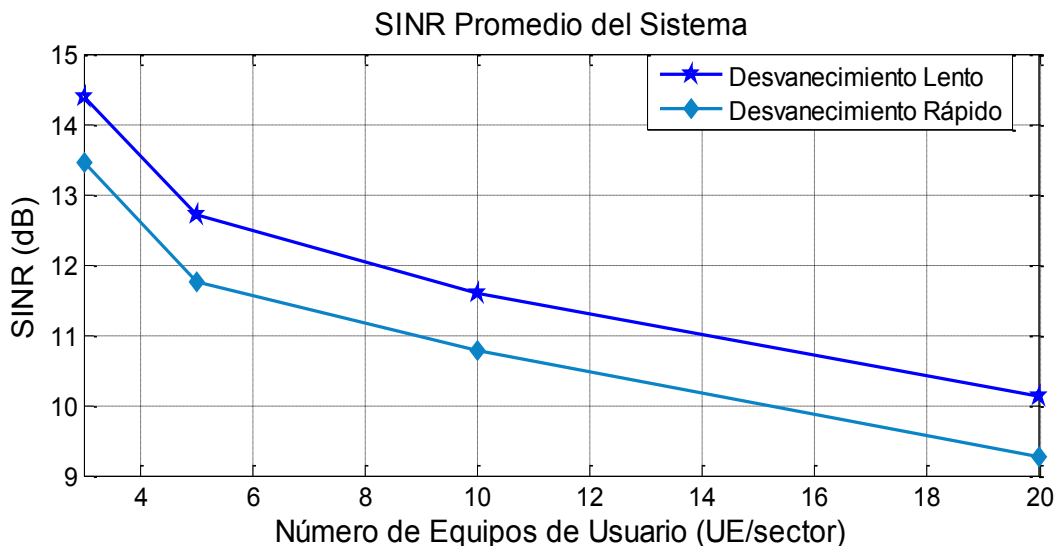
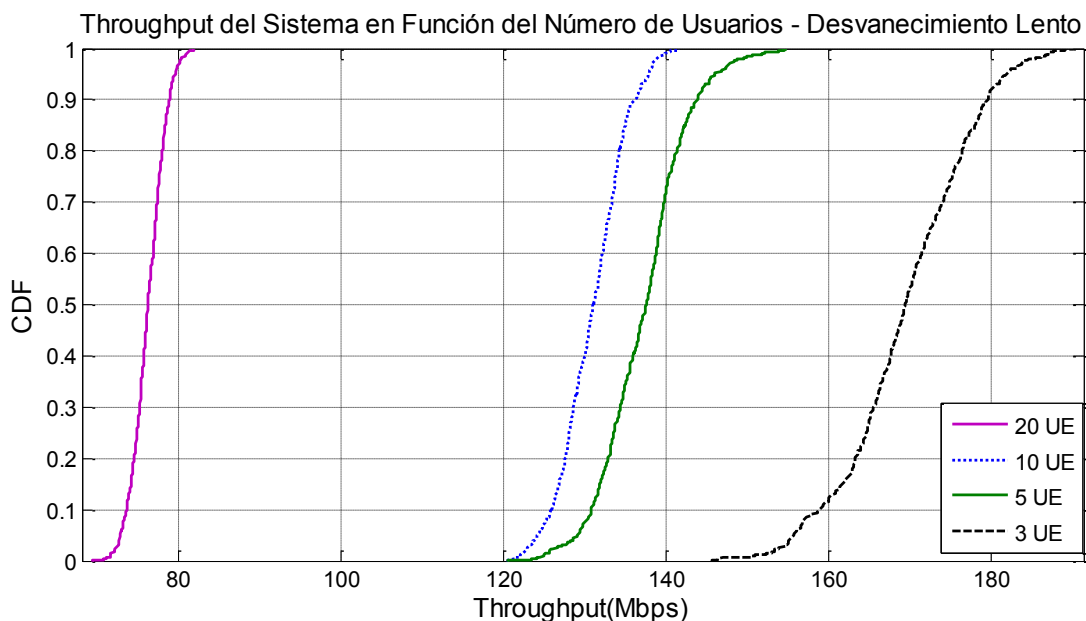


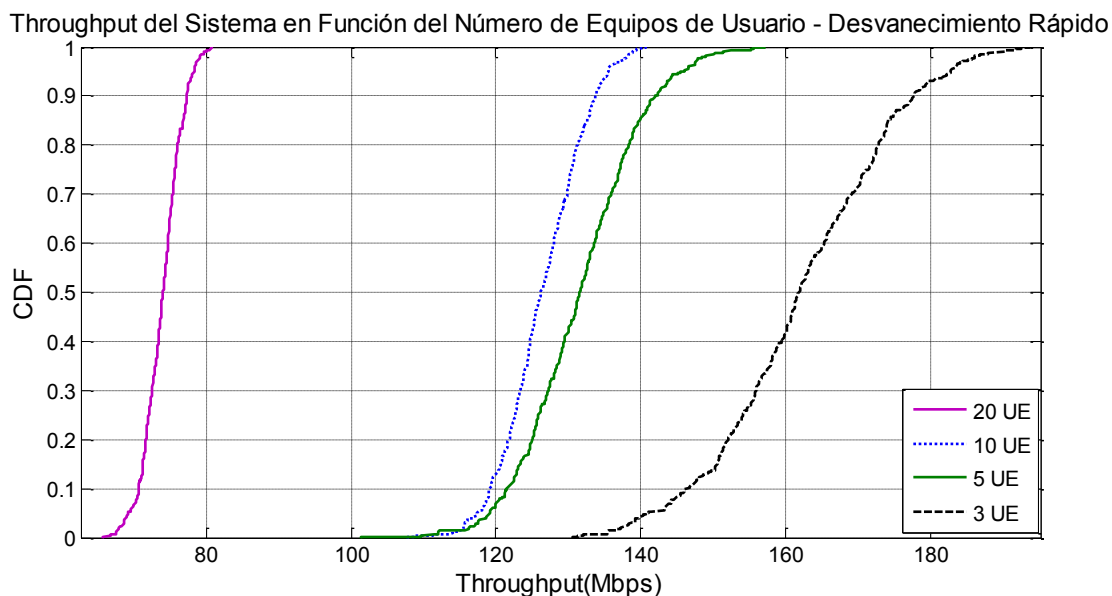
Figura 4.22 SINR promedio del sistema para el caso de estudio 3

La figura 4.22 muestra como la SINR promedio del sistema disminuye de un valor de 14.37 dB hasta 10.13 dB para los escenarios con desvanecimiento lento y de 13.44 hasta 9.27 con desvanecimiento rápido, es decir, conforme aumenta el número de UE la SINR disminuye para todos los puntos evaluados en la curva.

Las figuras 4.23 (a) y (b) presentan la función de distribución acumulativa del *throughput* de sistema cuando se considera el efecto del desvanecimiento lento y rápido para los diferentes números de equipos de usuario por sector considerados.



(a)



(b)

Figura 4.23 Función de distribución acumulativa del *throughput* del sistema para el caso de estudio 3

Las figuras 4.23 (a) y (b) presentan un corrimiento a la derecha en las CDF cuando el número de UE por sector disminuye, evidenciando la relación inversamente proporcional entre el *throughput* de sistema y el número de equipos de usuario por sector. Este comportamiento se mantiene para los escenarios



evaluados con desvanecimiento lento y rápido. Por ejemplo, 3 UE con desvanecimiento lento presentan una probabilidad del 50% de alcanzar valores menores a 169 Mbps mientras que para 20 UE se alcanzan valores de 76.28 Mbps para la misma probabilidad. Al considerar el efecto del desvanecimiento rápido se observa un corrimiento a la izquierda en las CDF respecto al desvanecimiento lento evidenciando un menor desempeño en capacidad, por ejemplo para 3 UE se presenta una probabilidad del 50% de alcanzar valores menores a 162 Mbps y para 20 UE se pueden alcanzar hasta 74 Mbps.

La tabla 4.21 muestra el rango de valores de *throughput* del sistema obtenidos a partir de la figura 4.23 para los escenarios evaluados en función del número de equipos de usuarios por sector.

Número de Equipos de Usuario	Rango de <i>Throughput</i> de sistema (Mbps)	
	D. lento	D. rápido
20	69-82	65-80
10	120-141	107-140
5	120-155	101-157
3	145-190	130-194

Tabla 4.21 Rango de *throughput* de sistema caso de estudio 3

De la tabla 4.21 se observa una disminución progresiva en los valores de *throughput* en función del número de equipos de usuarios por sector para los escenarios con desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido, siendo menores los alcanzados con este último.

La tabla 4.22 presenta la mediana, media y desviación estándar del *throughput* de sistema para los escenarios evaluados en este caso de estudio tanto para desvanecimiento lento como para desvanecimiento rápido.

Número de Equipos de Usuario	Mediana <i>throughput</i> (Mbps)		Media <i>throughput</i> (Mbps)		Desviación estándar <i>throughput</i> (Mbps)	
	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido	D. lento	D. rápido
20	76.28	74.02	76.33	73.90	2.03	2.64
10	131	126.3	131.06	126.46	3.98	5.59
5	137.7	132	137.36	131.73	5.30	8.11
3	169.4	161.9	169.56	162.31	7.87	12.04

Tabla 4.22 Medidas estadísticas caso de estudio 3



De la tabla 4.22 se aprecia que la mediana y media para todos los escenarios evaluados aumenta a medida que el número de usuarios por sector disminuye evidenciando una relación inversamente proporcional entre estos. Respecto a la desviación estándar se observa que la dispersión aumenta a medida que el radio de celda lo hace.

La figura 4.24 muestra el *throughput* promedio del sistema en función del número de equipos de usuario por sector.

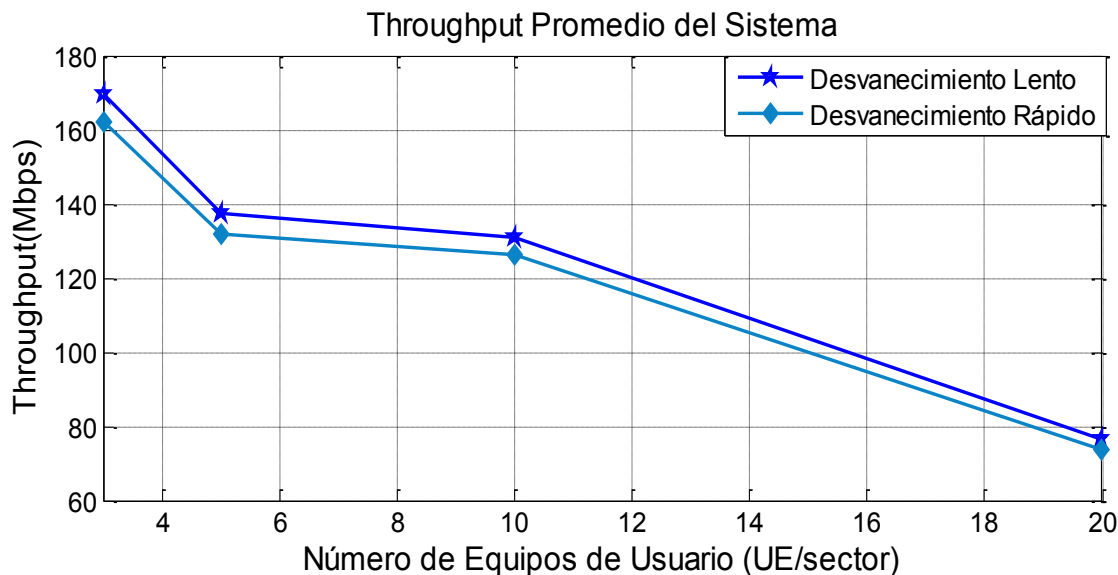


Figura 4.24 *Throughput* promedio del sistema para el caso de estudio 3

La figura 4.24 muestra un comportamiento decreciente de la curva, indicando que el *throughput* promedio disminuye a medida que el número de equipos de usuario aumenta, por ejemplo, para 3 UE se obtiene una tasa de trasmisión de 169.56 Mbps y 162.31 Mbps para los escenarios con desvanecimiento lento y rápido respectivamente mientras que para 20 UE estos valores son 76.33 Mbps y 73.90 Mbps.



CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. INTRODUCCION

En este trabajo de grado se presenta el diseño e implementación de un simulador básico estático a nivel de sistema para LTE capaz de realizar cálculos de cobertura y capacidad de un sistema con características definidas, adicionalmente se plantean tres escenarios con el objetivo de determinar el efecto de la variación del radio de la celda, del número de equipos de usuario y del tipo de antena. En este capítulo se presentan las conclusiones y propuestas de trabajos futuros en torno al simulador desarrollado.

5.2. CONCLUSIONES

- A partir del diseño y desarrollo del simulador básico a nivel de sistema para LTE se obtuvieron las siguientes conclusiones:
 - El simulador básico a nivel de sistema desarrollado se convierte en una herramienta de aprendizaje y acercamiento didáctico a la tecnología LTE presentando la ventaja de facilitar su uso mediante una interfaz gráfica amigable y la documentación necesaria para hacerlo entendible al usuario, en contraposición a los simuladores ya desarrollados que pese a su complejidad y alcance de las características de la tecnología LTE carecen de estrategias para que usuarios con conceptos básicos de la tecnología lo usen.
 - Durante el proceso de diseño e implementación del simulador básico a nivel de sistema para LTE se presentaron múltiples dificultades destacándose entre ellas: la visualización de mapas de cobertura del sistema, resolución en las gráficas de cobertura, optimización del tiempo de simulación, distribución aleatoria de usuarios y almacenamiento de datos para implementar el método de Montecarlo, su solución exigió de conocimientos sobre: teoría de propagación, teoría de radiocomunicaciones móviles, conceptos de LTE y probabilidad y procesos estocásticos, estos últimos con el fin de realizar un tratamiento estadístico adecuado e interpretar los resultados obtenidos. Adicionalmente, se requirió de capacitación en la herramienta software Matlab® y manejo avanzado en matrices de datos.



Los resultados obtenidos a partir de las pruebas del simulador en cobertura y capacidad. son consistentes con los rangos esperados para LTE y los presentados en otros artículos, con lo que se verifica el correcto funcionamiento del simulador.

- Este trabajo de grado también evaluó el desempeño en el enlace descendente para los casos de estudio planteados, obteniendo las siguientes conclusiones:
 - Del caso de estudio 1 en el que se varió el tipo de antena con el que transmite el eNB, los resultados indican que la antena Katherein 742215 es la de mayor desempeño en capacidad y cobertura, en capacidad por tener las mejores condiciones para el servicio y conexión de los usuarios, además de alcanzar los valores más altos de *throughput* de sistema y en cobertura por presentar la potencia promedio de recepción más alta para el escenario de simulación. Por otra parte, la antena TR 36.942 es la de menor desempeño en cobertura frente a las demás referencias por los valores de potencia promedio percibida en el escenario simulado, mientras que la antena Katherein 80010681 presentó el menor comportamiento en capacidad al alcanzar la tasa de *throughput* promedio inferior y tener un comportamiento medio frente a la probabilidad de conexión e interrupción que se ofrece a los usuarios. De lo anterior se rescata la implicación directa que tiene la elección del tipo de antena en el desempeño y cobertura de una red, debido a que la potencia de recepción varía de acuerdo a los parámetros específicos e intrínsecos de cada una.
 - Del caso de estudio 2 donde se varió el radio de la celda, respecto al desempeño en capacidad se evidenció una relación inversamente proporcional entre el radio de la celda y los indicadores de desempeño (SINR y *throughput*) para los sistemas implementados con macroceldas (radio > 1 Km), sin embargo, dado el caso de que el radio de celda corresponda a rangos de microcelda (radio < 1 Km), el desempeño del sistema se afecta debido al incremento en la interferencia causado por la corta distancia entre los eNB y los niveles de potencia con que radia. Respecto al análisis en cobertura, se observó un incremento en la potencia de recepción promedio a medida que el radio de la celda disminuía evidenciando la relación inversamente proporcional entre el radio de celda y la potencia percibida en el escenario.



- Del caso de estudio 3 en el que se varió el número de equipos de usuario por sector y se mantuvieron constante los demás parámetros incluyendo el ancho de banda del sistema, se evidenció que el aumento en el número de equipos de usuario bajo las condiciones planteadas afecta negativamente los resultados obtenidos en capacidad. Al usar la estrategia de planificación de paquetes de *Round Robin* la cantidad de bloques de recursos que le corresponde a cada usuario disminuye cuando el número de equipos de usuario por sector aumenta, de manera que son menos los bloques de recursos por usuario que se enfrentan a la interferencia inter celda causada por los eNBs vecinos y al efecto de las condiciones de propagación, alcanzando menores valores de SINR que directamente representan para el usuario un índice de calidad de canal, esquema de modulación y codificación y tamaño de bloque de transporte inferiores, resultando en un menor *throughput* promedio de sistema.
- El desvanecimiento rápido causado por la multitrayectoria de la señal hace que se presente un menor desempeño en capacidad respecto a los escenarios evaluados con desvanecimiento lento para todos los casos analizados, esto debido a que en el desvanecimiento rápido la señal recibida es la suma de las múltiples trayectorias de la señal reflejadas con objetos lo que implica fluctuaciones y atenuaciones de la señal que deterioran el estado del canal. Respecto al desempeño en cobertura, se observó que cuando se incluye el efecto del desvanecimiento rápido, la cobertura se incrementa al alcanzar una mayor distancia con determinado valor de potencia de recepción respecto a los escenarios evaluados con desvanecimiento lento, sin embargo, se observó un efecto de pixelado en los mapas de colores indicando que la potencia recibida presentaba variaciones significativas en amplitud en puntos adyacentes del escenario, percibiéndose una potencia de recepción promedio menor en comparación con los escenarios que consideraron el efecto del desvanecimiento lento.



5.3. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos del diseño e implementación del simulador básico a nivel de sistema para LTE se presentan como referencia para trabajos futuros que busquen desarrollar funcionalidades adicionales a las presentadas y permitan analizar el comportamiento de sistemas enfocados en la línea de investigación de la tecnología de comunicación radio inalámbrica LTE. Para ello se propone:

- Implementar dentro de las funcionalidades del simulador básico a nivel de sistema para LTE otro tipo de estrategias de planificación de paquetes.
- Implementar dentro de las funcionalidades del simulador básico a nivel de sistema para LTE estrategias de mitigación de interferencia inter celda.
- Implementar dentro de las funcionalidades del simulador básico a nivel de sistema para LTE técnicas de control de potencia.
- Implementar dentro de las funcionalidades del simulador básico a nivel de sistema para LTE la tecnología de múltiples antenas (MIMO)
- Implementar dentro de las funcionalidades del simulador básico a nivel de sistema para LTE la movilidad de usuarios.
- Analizar desempeño en cobertura y capacidad de una red LTE con características de escenario y red variables de acuerdo a las funciones permitidas por el simulador.
- Implementar cálculos para el enlace ascendente dentro de las funcionalidades del simulador básico a nivel de sistema para LTE.
- Desarrollar un simulador dinámico⁵ a nivel de sistema para LTE
- Implementar en el simulador básico a nivel de sistema para LTE características de LTE Advanced.

⁵ Simulador dinámico: permite estudiar la evolución temporal del funcionamiento de un sistema, lo que resulta interesante para evaluar aspectos relacionados con la gestión de recursos y calidad de servicio experimentada por los usuarios.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] S. Ferran, M. Lema, and M. García, “QoS - Control de Admisión Uplink en Long Term Evolution,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [2] R. Agusti, F. Álvarez, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, and O. Sallent, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. España: Fundación Vodafone, 2010, pp. 1–431.
- [3] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, 1 st. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2009, pp. 1–450.
- [4] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G LTE/ LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 1 st. Oxford, United King: Elsevier, 2011, pp. 1–447.
- [5] Z. Cataldi, R. García, and R. Pessacq, “Metodología de Diseño, Desarrollo y Evaluación de Software Educativo,” Universidad Nacional de La Plata, 2000.
- [6] J. C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, “System Level Simulation of LTE Networks,” *2010 IEEE 71st Veh. Technol. Conf.*, no. i, pp. 1–5, 2010.
- [7] G. Piro, S. Member, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, “Simulating LTE Cellular Systems : an Open Source Framework,” no. c, pp. 1–16, 2010.
- [8] A. Kumar, Y. Liu, J. Sengupta, and Divya, “Evolution of Mobile Wireless Communication Networks : 1G to 4G,” *Int. J. Electron. Commun. Technol.*, vol. 1, pp. 68–72, 2010.
- [9] 3GPP, “The Mobile Broadband Standard,” 2011. [Online]. Available: www.3gpp.org. [Accessed: 15-Aug-2013].
- [10] “HSPA - High Speed Packet Access, Mobile Broadband, HSDPA, HSUPA.” .
- [11] UMTS Forum, “HSPA : High Speed Wireless Broadband.” .
- [12] “First HSPA 3G Mobile Broadband Launched in Japan.” .
- [13] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE: The UMTS Long Term Evolution*. Chichester, United Kingdom: Wiley and Sons, 2011, pp. 1–794.
- [14] 4G Americas, “SAE/EPC: System Architecture Evolution/Evolved Packet Core.” [Online]. Available:



<http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=251>.
[Accessed: 22-Jul-2013].

- [15] 3GPP, “TR 21.905 V10.2.0 - 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Service and System Aspects; Vocabulary for 3GPP Specifications (Release 10),” Sophia Antipolis, Francia, 2010.
- [16] 3GPP, “TS 36.300 V8.9.9 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Unicersal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2 (Release 8),” Sophia Antipolis, Francia, 2009.
- [17] J. Karlsson and M. Riback, “Initial field performance measurements of LTE,” *Ericsson Rev.*, pp. 22–28, 2008.
- [18] R. Agusti, F. Bernardo, and F. Casadevall, “LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles,” *Fund. Vodafone ...*, pp. 1–431, 2010.
- [19] Maximizing Border, “Long Term Evolution (LTE),” 2012. [Online]. Available: <http://shishireahmed.blogspot.com/>. [Accessed: 07-Mar-2014].
- [20] Y. Barayan and I. Kostanic, “Performance Evaluation of Proportional Fairness Scheduling in LTE,” in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2013, vol. II, pp. 23–25.
- [21] K. T. K. O and S. K. Oh, “A Universal Frequency Reuse System in a Mobile Cellular Environment,” *Veh. Technol. Conf. 2007. VTC2007-Spring.*, vol. 65th, pp. 2855 – 2859, 2007.
- [22] A. Hamza, S. Khalifa, H. Hamza, and K. Elsayed, “A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks,” *Commun. Surv. Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 4, pp. 1642–1670, 2013.
- [23] L. Wang and C. Yeh, “3-cell network MIMO architectures with sectorization and fractional frequency reuse,” ... *Areas Commun. IEEE J.*, vol. 29, no. 6, pp. 1185–1199, 2011.
- [24] D. Bilios and C. Bouras, “Optimization of fractional frequency reuse in long term evolution networks,” *Wirel. Commun. Netw. Conf.*, no. Cci, pp. 1875–1879, 2012.
- [25] 3GPP, “TS 36.101; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception,” Sophia Antipolis, Francia, 2011.



- [26] Agilent Technologies, "Transforming MIMO Test with Fast, Accurate Signal Creation, Signal Analysis, and Protocol Development and Conformance," 2009. [Online]. Available: <http://www.agilent.com/about/newsroom/tmnews/background/N5106A/>. [Accessed: 18-Feb-2014].
- [27] M. Castaneda and M. Ivrlac, "On downlink intercell interference in a cellular system," ... *Symp.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2007.
- [28] P. Sainju, "LTE Performance Analysis on 800 and 1800 MHz Bands," Tampere University of Technology, 2012.
- [29] A. Syed, "Dimensioning of LTE Network Description of Models and Tool , Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface," Helsinki University of Technology, 2009.
- [30] M. Simon and M. Alouini, "MULTIUSER COMMUNICATION SYSTEMS," in *Digital communication over fading channels*, 2nd ed., 2005, pp. 638–681.
- [31] C. Cox, *An Introduction to LTE and 4G Mobile Communications*, 1st ed. Chichester, United Kingdom: Wiley and Sons, 2012.
- [32] 3GPP, "TR 36.213 - V8.8.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures," Sophia Antipolis, Francia, 2009.
- [33] A. Basir, "Transport Block Size and Code Rate," 2012. [Online]. Available: <http://4g-lte-world.blogspot.com/2012/12/transport-block-size-code-rate-protocol.html>. [Accessed: 11-Feb-2014].
- [34] R. Pressman, *Ingeniería del Software: Un Enfoque Práctico*, 5th ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 2002, pp. 1–980.
- [35] Kasetsart University, "Software Development Life Cycle," in *Ood with Java C++ and UML*, pp. 51–64.
- [36] S. Engineering and S. Committee, *IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications*, vol. 1998. 1998.
- [37] Real Academia Española, "Algoritmo," 2001. [Online]. Available: <http://lema.rae.es/drae/?val=algoritmo>. [Accessed: 03-Feb-2014].
- [38] T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, and C. Stein, *Introduction to algorithms*, 3rd ed., vol. 23, no. 2. Massachusetts: The MIT Press, 2009, pp. 1–1313.



- [39] C. Wengerter, J. Ohlhorst, A. Golitschek, E. Von Elbwart, and P. Mcom, "Fairness and Throughput Analysis for Generalized Proportional Fair Frequency Scheduling in OFDMA," vol. 2, no. 2, pp. 0–4, 2005.
- [40] Y. Choi, C. Kim, and S. Bahk, "Flexible design of frequency reuse factor in OFDMA cellular networks," *Commun. 2006. ICC'06. ...*, vol. 4, no. c, pp. 1784–1788, 2006.
- [41] 3GPP, "TR 25 996 - V8.0.0 - Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Spacial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (3GPP TR 25.996 version 8.0.0 Release 8)," 2009.
- [42] Katherein Antennen Electronic, "Multi-band Panel Antenna K742215." Rosenheim, Alemania, pp. 3–4.
- [43] Katherein Antennen Electronic, "Horizontal and Vertical Radiation Pattern 742215." Rosenheim, Alemania, pp. 10–13, 2008.
- [44] Katherein Antennen Electronic, "Multi-band Panel Antenna 80010681." Rosenheim, Alemania, p. 2.
- [45] Katherein Antennen Electronic, "Horizontal and Vertical Radiation Pattern 80010681." Rosenheim, Alemania, pp. 42–45, 2010.
- [46] 3GPP, "TR 36.942 - V8.2.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios," Sophia Antipolis, Francia, 2009.
- [47] Technische Universitat Dresden, "Cool Relay – Multiuser MIMO Detectors for." [Online]. Available: <https://mns.ifn.et.tu-dresden.de/Research/Projects/Pages/Cool-Relay.aspx>. [Accessed: 18-Feb-2014].
- [48] R. Choy and a. Edelman, "Parallel MATLAB: Doing it Right," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 2, pp. 331–341, Feb. 2005.
- [49] L. Hong and J. Cai, "The application guide of mixed programming between MATLAB and other programming languages," *2010 2nd Int. Conf. Comput. Autom. Eng.*, pp. 185–189, Feb. 2010.
- [50] M. Mathworks, "Online: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>," *Acessado em* . .
- [51] R. Nielsen and M. Nielsen, "Physical Layer measurements in 3GPP LTE," Aalborg University, 2012.