

# **SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE CON PLANIFICADORES DE RECURSOS RADIO INTEGRADOS**



**Darío Giraldo Medina  
Diego Fernando Uribe Ante**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL  
Popayán, 2015**

# **SIMULADOR BÁSICO A NIVEL DE SISTEMA PARA LTE CON PLANIFICADORES DE RECURSOS RADIO INTEGRADOS**



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

**Darío Giraldo Medina  
Diego Fernando Uribe Ante**

**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, 2015**



## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	2
1.3. APORTES .....	3
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO .....	3
CAPÍTULO 2: GENERALIDADES .....	4
2.1. GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA LTE .....	4
2.2. ARQUITECTURA DE LTE .....	6
2.2.1. Equipo de Usuario .....	7
2.2.2. Red de Acceso E-UTRAN .....	8
2.2.3. Núcleo de Red EPC.....	9
2.2.4. Dominio de Servicios .....	9
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LTE .....	10
2.3.1. Bloque de Recursos Físicos .....	10
2.3.2. Reúso de Frecuencia.....	11
2.3.3. Ancho de Banda Variable .....	12
2.3.4. MIMO.....	13
2.4. INTERFERENCIA INTERCELDA.....	13
2.5. INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA LTE .....	15
2.5.1. Relación Señal a Interferencia más Ruido.....	15
2.5.2. Probabilidad de Degradación .....	16
2.5.3. Probabilidad de Interrupción .....	16
2.5.4. Indicador de Calidad del Canal.....	16
2.5.5. Esquema de Modulación y Codificación (MCS).....	18
2.5.6. Tamaño del Bloque de Transporte .....	18
2.5.7. <i>Throughput</i> .....	20
2.6. MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN ADAPTATIVA.....	21
2.7. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES.....	22
2.7.1. Estrategias de planificación LTE.....	24
2.7.1.1 <i>Round Robin</i> (RR) .....	25
2.7.1.2 Proporcional y Justa (PF, <i>Proportional Fair</i> ).....	25



2.7.1.3	Máxima Velocidad (MR, <i>Maximum Rate</i> ) .....	25
2.7.2.	Coeficientes de Priorización para Planificadores.....	26
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE DESARROLLO .....		27
3.1.	ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS .....	28
3.1.1.	Problema de Estudio .....	28
3.1.2.	Requerimientos.....	29
3.2.	DISEÑO .....	30
3.2.1.	Modelo del Sistema .....	30
3.2.2.	Algoritmos de los Planificadores de Recursos Radio .....	31
3.2.3.	Entradas y Salidas del Bloque de Planificadores de Recursos Radio .....	37
3.2.4.	Consideraciones para el Diseño del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE con Planificadores de Recursos Radio Integrados.....	37
3.3.	IMPLEMENTACIÓN .....	42
3.3.1.	Herramienta de Simulación .....	43
3.3.2.	Cálculo de Capacidad.....	43
3.3.3.	Resumen de Parámetros de Entrada al Simulador.....	46
3.4.	PRUEBAS .....	46
CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO .....		48
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	48
4.2.	ESCENARIO DE ESTUDIO.....	49
4.3.	CASO DE ESTUDIO 1 .....	51
4.3.1.	Resultados y análisis según el tipo de planificador.....	52
4.3.2.	Resultados y análisis para un UE .....	56
4.3.3.	Resultados y análisis para una celda .....	58
4.3.4.	Resultados y análisis del sistema .....	60
4.4.	CASO DE ESTUDIO 2.....	61
4.4.1.	Resultados y análisis según el tipo de planificador.....	62
4.4.2.	Resultados y análisis para una celda .....	65
4.4.3.	Resultados y análisis del sistema .....	66
4.5.	CASO DE ESTUDIO 3.....	68
4.5.1.	Resultados y análisis según el tipo de planificador.....	71
4.5.2.	Resultados y análisis para un UE .....	73
4.5.3.	Resultados y análisis para una celda .....	74
4.5.4.	Resultados y análisis del sistema .....	75



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	77
5.1.    INTRODUCCIÓN .....	77
5.2.    CONCLUSIONES.....	77
5.3.    TRABAJOS FUTUROS .....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolución de los sistemas móviles celulares.....	5
Figura 2.2 Velocidad pico de transmisión de datos de las diferentes tecnologías... 5	5
Figura 2.3 Arquitectura general del sistema LTE .....	7
Figura 2.4 Interfaces del eNB con otros nodos lógicos y sus principales funciones	8
Figura 2.5 Bloque de recursos físicos .....	11
Figura 2.6 Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC.....	12
Figura 2.7 Formas de uso de los sistemas MIMO. ....	14
Figura 2.8 Asignación de CQI .....	17
Figura 2.9 Tamaño del bloque de transporte.....	19
Figura 2.10 Arquitectura del planificador de recursos en DL para LTE. ....	24
Figura 3.1 Modelo de desarrollo de software lineal secuencial. ....	27
Figura 3.2 Diagrama de flujo desarrollado para el planificador Round Robin. ....	32
Figura 3.3 Diagrama de flujo desarrollado para el planificador Proportional Fair. .	34
Figura 3.4 Diagrama de flujo desarrollado para el planificador Maximun Rate. ....	36
Figura 3.5 Diagrama de entradas y salidas del bloque del planificador de recursos radio. ....	37
Figura 3.6 Geometría de las celdas celulares .....	38
Figura 4.1 Escenario de simulación para el caso de estudio 1.....	52
Figura 4.2 Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1.....	53
Figura 4.3 Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1. ....	55
Figura 4.4 Asignación de SRB por el planificador MR en celda 1. ....	56
Figura 4.5 SRB asignados y SINR del UE 11 en celda 1. ....	57
Figura 4.6 <i>Throughput</i> del UE 11 en celda 1.....	58
Figura 4.7 Función de distribución acumulativa del <i>throughput</i> total en celda 1. ..	59
Figura 4.8 <i>Throughput</i> total del sistema en cada subtrama. ....	60
Figura 4.9 Escenario de simulación para el caso de estudio 2.....	62
Figura 4.10 Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1.....	63
Figura 4.11 Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1. ....	64



Figura 4.12 Asignación de SRB por el planificador MR en celda 1. ....	65
Figura 4.13 <i>Throughput</i> total de celda 1 en cada subtrama. ....	66
Figura 4.14 Función de distribución acumulativa del <i>throughput</i> total en el sistema .....	67
Figura 4.15 Escenario de simulación para el caso de estudio 3.....	69
Figura 4.16 Mapa de cobertura del escenario de simulación con los efectos de desvanecimiento lento y rápido. ....	70
Figura 4.17 Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1.....	71
Figura 4.18 Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1. ....	72
Figura 4.19 Asignación de SRB por el planificador MR.....	73
Figura 4.20 SRB asignados y SINR del UE 1 en celda 1. ....	73
Figura 4.21 <i>Throughput</i> total de celda 1 en cada subtrama. ....	74
Figura 4.22 <i>Throughput</i> promedio del sistema en presencia de desvanecimiento lento y rápido.....	76



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Bloques de recursos vs ancho de banda.....	13
Tabla 2.2 Indicador CQI .....	18
Tabla 2.3 Índice MCS.....	20
Tabla 2.4 Esquema de modulación y codificación.....	22
Tabla 3.1 Bloques de recursos vs ancho de banda.....	38
Tabla 3.2 Características de las antenas Katherein. ....	39
Tabla 3.3 Altura de las antenas según el TR 25.996.....	40
Tabla 3.4 Modelo de propagación y ambiente relacionado. ....	41
Tabla 3.5 Índice TBS y CQI de acuerdo a SINR de referencia. ....	44
Tabla 3.6 Resumen parámetros de entrada al simulador.....	46
Tabla 4.1 Modelado del desvanecimiento. ....	49
Tabla 4.2 Parámetros del escenario de estudio. ....	50
Tabla 4.3 Casos de estudio.....	51
Tabla 4.4 Valor de <i>throughput</i> en Kbps según el índice TBS y SRB.....	54
Tabla 4.5 Medidas estadísticas del <i>throughput</i> total en el sistema. ....	60
Tabla 4.6 <i>Throughput</i> promedio en celda 1.....	66
Tabla 4.7 Medidas estadísticas del <i>throughput</i> total en el sistema. ....	67
Tabla 4.8 Medidas estadísticas del <i>throughput</i> en el sistema. ....	75





## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>1G</b>	Primera Generación, <i>First Generation</i>
<b>2G</b>	Segunda Generación, <i>Second Generation</i>
<b>3G</b>	Tercera Generación, <i>Third Generation</i>
<b>3GPP</b>	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación, <i>Third Generation Partnership Project</i>
<b>4G</b>	Cuarta Generación, <i>Fourth Generation</i>
<b>AMC</b>	Modulación y Codificación Adaptativa, <i>Adaptive Modulation and Coding</i>
<b>BER</b>	Tasa de Error de Bit, <i>Bit Error Rate</i>
<b>BLER</b>	Tasa de Error de Bloques de Transporte, <i>Transport Block Error Rate</i>
<b>BS</b>	Estación Base, <i>Base Station</i>
<b>BW</b>	Ancho de Banda, <i>Bandwidth</i>
<b>CQI</b>	Indicador de Calidad del Canal, <i>Channel Quality Indicator</i>
<b>CRC</b>	Código de Redundancia Cíclica, <i>Cyclic Redundancy Code</i>
<b>CS</b>	Conmutación de Circuitos, <i>Circuit Switching</i>
<b>DL</b>	Enlace Descendente, <i>Downlink</i>
<b>eNB</b>	Nodo B Evolucionado, <i>Evolved Node B</i>
<b>EPC</b>	Núcleo de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet Core</i>
<b>EPS</b>	Sistema de Paquetes Evolucionado, <i>Evolved Packet System</i>
<b>E-UTRAN</b>	Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada, <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
<b>FRF</b>	Factor de Reúso de Frecuencia, <i>Frequency Reuse Factor</i>
<b>HSDPA</b>	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Descendente, <i>High Speed Downlink Packet Access</i>
<b>HSPA</b>	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad, <i>High Speed Packet Access</i>
<b>HSPA+</b>	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad Evolucionado, <i>High Speed Packet Access Plus</i>
<b>HSS</b>	Servidor de Suscriptor Local, <i>Home Subscriber Server</i>
<b>HSUPA</b>	Acceso por Paquetes de Alta Velocidad en el Enlace Ascendente, <i>High Speed Uplink Packet Access</i>
<b>ICI</b>	Interferencia Inter Celda, <i>Inter Cell Interference</i>
<b>ICIC</b>	Coordinación Interferencia Inter Celda, <i>Inter Cell Interference Coordination</i>
<b>IMS</b>	Subsistema Multimedia IP, <i>IP Multimedia Sub-System</i>



<b>IMT-2000</b>	Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000, <i>International Mobile Telecommunications</i>
<b>IP</b>	Protocolo de Internet, <i>Internet Protocol</i>
<b>ITU</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones, <i>International Telecommunication Union</i>
<b>LTE</b>	Evolución de Largo Término, <i>Long Term Evolution</i>
<b>MAC</b>	Control de Acceso al Medio, <i>Medium Access Control</i>
<b>MCS</b>	Esquema de Modulación y Codificación, <i>Modulation and Coding Scheme</i>
<b>ME</b>	Equipo Móvil, <i>Mobile Equipment</i>
<b>MIMO</b>	Múltiples Entradas, Múltiples Salidas, <i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
<b>MME</b>	Entidad de Gestión de Movilidad, <i>Mobility Management Entity</i>
<b>MR</b>	Máxima Velocidad, <i>Maximum Rate</i>
<b>OFDM</b>	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OFDMA</b>	Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia, <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
<b>P-GW</b>	Puerta de Enlace de la Red de Paquetes de Datos, <i>Packet Data Network Gateway</i>
<b>PCRF</b>	Función de Control de Políticas y Normas de Cobro, <i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
<b>PDN</b>	Red de Paquetes de Datos, <i>Packet Data Network</i>
<b>PDU</b>	Unidad de Datos de Protocolo, <i>Protocol Data Unit</i>
<b>PF</b>	Proporcional y Justa, <i>Proportional Fair</i>
<b>PLMN</b>	Red Pública Móvil Terrestre, <i>Public Land Mobile Network</i>
<b>PR</b>	Reúso Parcial, <i>Partial Reuse</i>
<b>PRB</b>	Bloque de Recursos Físicos, <i>Physical Resource Block</i>
<b>PS</b>	Conmutación de Paquetes, <i>Packet Switching</i>
<b>PUSCH</b>	Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente, <i>Physical Uplink Shared Channel</i>
<b>QoS</b>	Calidad del Servicio, <i>Quality of Service</i>
<b>R5</b>	<i>Release 5</i>
<b>R6</b>	<i>Release 6</i>
<b>R8</b>	<i>Release 8</i>
<b>R99</b>	<i>Release 99</i>
<b>RF</b>	Radio Frecuencia, <i>Radio Frequency</i>
<b>RLC</b>	Control de Enlace Radio, <i>Radio Link Control</i>



<b>RR</b>	<i>Round Robin</i>
<b>RRM</b>	Gestión de Recursos Radio, <i>Radio Resource Management</i>
<b>RS</b>	Señales de Referencia, <i>Reference Signals</i>
<b>S-GW</b>	Puerta de Enlace de Servicio, <i>Serving Gateway</i>
<b>SAE</b>	Evolución de la Arquitectura del Sistema, <i>System Architecture Evolution</i>
<b>SC-FDMA</b>	Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única, <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
<b>SINR</b>	Relación Señal a Interferencia más Ruido, <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
<b>SISO</b>	Única Entrada, Única Salida, <i>Single-Input and Single-Output</i>
<b>SIP</b>	Protocolo de Inicio de Sesión, <i>Session Initiation Protocol</i>
<b>SR</b>	Reúso de frecuencia Suave, <i>Soft-frequency Reuse</i>
<b>SRB</b>	Bloque de Recursos de Planificación, <i>Scheduling Resource Block</i>
<b>TBS</b>	Tamaño del Bloque de Transporte, <i>Transport Block Size</i>
<b>TF</b>	Formato de transporte, <i>Transport Format</i>
<b>TS</b>	Especificación Técnica, <i>Technical Specification</i>
<b>UE</b>	Equipo de Usuario, <i>User Equipment</i>
<b>UICC</b>	Tarjeta Universal de Circuito Integrado, <i>Universal Integrated Circuit Card</i>
<b>UL</b>	Enlace Ascendente, <i>Uplink</i>
<b>UMTS</b>	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móvil, <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles se han ido desarrollando acorde a las nuevas necesidades de los usuarios, los cuales son cada vez más exigentes en cuanto a capacidad y calidad de servicio, buscando nuevas y mejores alternativas de comunicación. Actualmente la cuarta generación de comunicaciones (4G, *Fourth Generation*) tiene como objetivo mejorar las prestaciones de las anteriores generaciones aumentando considerablemente la velocidad y la eficiencia espectral con una latencia mínima, lo que permitirá que el usuario tenga un servicio estable en cualquier parte del mundo con el mismo terminal móvil, satisfaciendo la demanda y exigencias del mercado [1] [2].

La tecnología LTE (*Long Term Evolution*) de 4G es un estándar desarrollado por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), el cual ha garantizado la continuidad de la competitividad en la cadena de evolución de la telefonía móvil, con el objetivo de lograr la convergencia entre redes alámbricas e inalámbricas mediante el uso de toda clase de dispositivos electrónicos, además de optimizar el uso del espectro, reducir los costos, mejorar la calidad de servicio y brindar una mayor seguridad en la red [3].

Con los beneficios que trae LTE es indispensable tener herramientas de simulación que permitan realizar el análisis de estas nuevas redes en aspectos tan importantes como cobertura y capacidad. A nivel institucional se tomó la iniciativa de crear una herramienta de este tipo para uso en el ámbito académico, desarrollándose así una primera versión llamada “Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE”<sup>1</sup>, el cual permite hacer un análisis preliminar tanto en cobertura como en capacidad para sistemas LTE, pero aún presenta aspectos por mejorar y de igual manera carece de algunas características importantes que hacen especial a esta tecnología, teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo de grado se desarrolla una segunda versión de dicho simulador, en la cual se contemplan mejoras de la primera versión e integración de nuevas características, lo que permitirá realizar un análisis más completo y detallado del sistema.

---

<sup>1</sup>Simulador básico a nivel de sistema para LTE: trabajo de grado realizado en la Universidad del Cauca por Claudia Shirley Paz Arteaga y Eileen Johana Martínez Gómez, año 2014.



## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El alto costo de la licencia que tienen las herramientas software de simulación que permiten realizar un análisis eficiente de cobertura y capacidad en un sistema LTE hace que muchas instituciones de educación superior no puedan acceder a ellas y por lo tanto los procesos de investigación en esta tecnología de nueva generación no sean los deseados y/o adecuados.

Con el desarrollo del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE en la Universidad del Cauca se dio un primer paso en la consecución de una herramienta de simulación propia para este tipo de tecnología, sin embargo, en esta primera etapa del simulador no se incluyó una de las principales características de la tecnología LTE como lo es la asignación dinámica de los recursos radio disponibles, y por lo tanto con los resultados obtenidos solo es posible realizar un análisis parcial del desempeño en capacidad que se puede alcanzar en el sistema. Por tal motivo se hace necesario el desarrollo en una segunda etapa del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE en la cual se integre dicha característica y se realicen mejoras en la primera etapa del mismo.

Con el desarrollo por etapas del simulador se busca obtener una herramienta de simulación completa, siguiendo las especificaciones del *Release 8* (R8) de 3GPP para LTE, al servicio de los estudiantes y profesores de la universidad.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo General

Evaluar los planificadores *Round-Robin* y *Proportional Fair* utilizados en el enlace de bajada de LTE (*Long Term Evolution*) en el simulador básico a nivel de sistema para LTE.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Implementar los planificadores *Round Robin* y *Proportional Fair* e integrarlos al simulador básico a nivel de sistema para LTE.
- Analizar la cobertura y capacidad<sup>2</sup> de un sistema LTE para unas características de escenario y de red definidas.

---

<sup>2</sup>Capacidad: debe entenderse como la velocidad de transmisión de datos total (*throughput*) que puede ser obtenida por celda o la velocidad de transmisión de datos que puede ser lograda por un usuario dentro una celda en el sistema.



### 1.3. APORTES

Los aportes del trabajo de grado serán los siguientes:

- Herramienta software de simulación a nivel de sistema para LTE con la capacidad de realizar asignación dinámica de recursos radio empleando las estrategias básicas de planificación de recursos *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*, siendo la segunda versión del “Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE”.
- Herramienta software de código abierto y estructurada modularmente con lo cual se facilitará la integración de nuevas características en trabajos futuros.
- Análisis de capacidad y cobertura empleando diferentes estrategias de planificación de recursos radio para un sistema LTE con características de red y escenario definidas.

### 1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

Este trabajo de grado se compone de 5 capítulos. En el primer capítulo se realiza una introducción, se plantea el problema y se definen tanto los objetivos a alcanzar como los aportes. El segundo capítulo abarca las generalidades de la tecnología LTE, se describe su arquitectura, indicadores de desempeño y las estrategias de planificación de recursos radio propias de esta tecnología. El tercer capítulo contiene la metodología seguida para la integración de los planificadores *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* en Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE. En el cuarto capítulo se realiza el análisis del desempeño del sistema tanto en capacidad como en cobertura al emplear los planificadores de recursos radio en diferentes escenarios. Finalmente, en el quinto capítulo se muestran las conclusiones y los trabajos futuros.



## CAPÍTULO 2: GENERALIDADES

Las características generales de LTE resultan de gran interés para el desarrollo del simulador propuesto. En este capítulo se describen las estrategias de planificación y se muestra como administran los recursos disponibles en la red, además se definen los indicadores de desempeño a nivel de sistema utilizados para el análisis del desempeño en términos de capacidad y cobertura.

### 2.1. GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA LTE

El proceso de evolución de las tecnologías móviles está comprendido en cuatro generaciones bien definidas, el objetivo de cada generación (excepto la primera) siempre ha sido el de optimizar y/o maximizar las prestaciones de la generación predecesora aumentando su velocidad y eficiencia espectral, aspectos fundamentales que determinan el desempeño en el sistema.

La primera generación de telefonía móvil (1G, *1st Generation*) empleaba sistemas analógicos para su funcionamiento y solo ofreció el servicio de voz. La segunda generación (2G, *2nd Generation*) marcó un quiebre con 1G al pasar de tecnología analógica a digital, permitiendo transmitir voz y datos digitales de volúmenes bajos como mensajes de texto y multimedia cortos.

Las características de la tercera generación de telefonía móvil (3G, *3rd Generation*) fueron definidas por 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*). Las más importantes fueron alta velocidad de transmisión de datos, interoperabilidad hacia atrás con las generaciones anteriores de telefonía móvil y compatibilidad a nivel mundial.

La primera versión de las tecnologías de tercera generación fue conocida como Sistema Universal de Telecomunicaciones (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) definida en el Release de 1999 (R99). Posteriormente UMTS fue extendido con las tecnologías de 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*) definidos en el Release 5 (R5) y Release 6 (R6) respectivamente, conocidos colectivamente como Acceso por Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High Speed Packet Access*). La tecnología HSPA fue mejorada





en el Release 7 y se denominó HSPA evolucionado (HSPA+, *High Speed Packet Access Plus*) teniendo como principales características una modulación de orden superior y por primera vez en un sistema de comunicación celular, sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, *Multiple input - Multiple output*) [4].

La evolución de las tecnologías de telefonía móvil actualmente se encuentra en la cuarta generación (4G, *4th Generation*) teniendo como objetivo mejorar las características de la 3G y unificar los sistemas para que el usuario tenga un servicio óptimo y de altas prestaciones la mayor parte del tiempo.

En la figura 2.1 se resume el proceso de evolución de la telefonía móvil descrito anteriormente y en la figura 2.2 se presentan las velocidades pico de transmisión de datos de cada tecnología, empezando desde la 2G hasta la actual 4G.

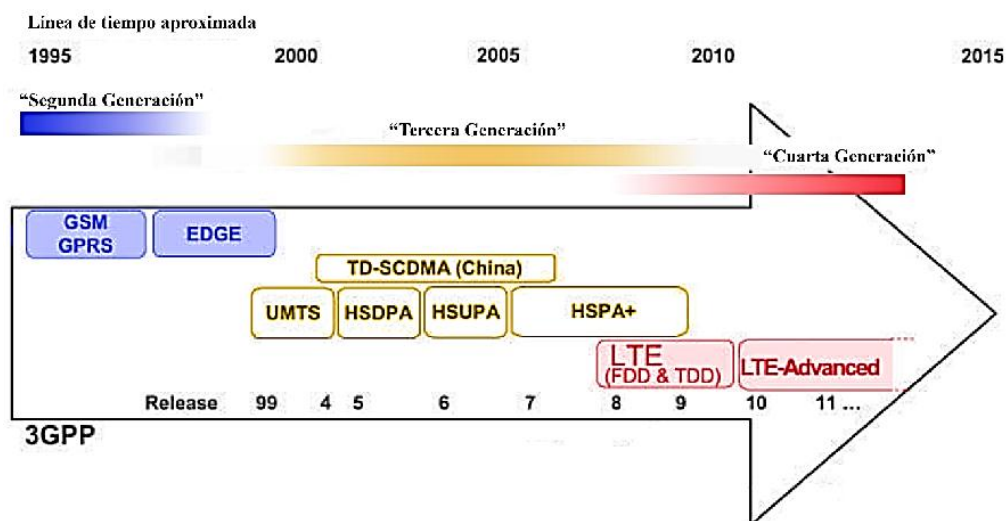


Figura 2.1 Evolución de los sistemas móviles celulares. Modificada de: [4]

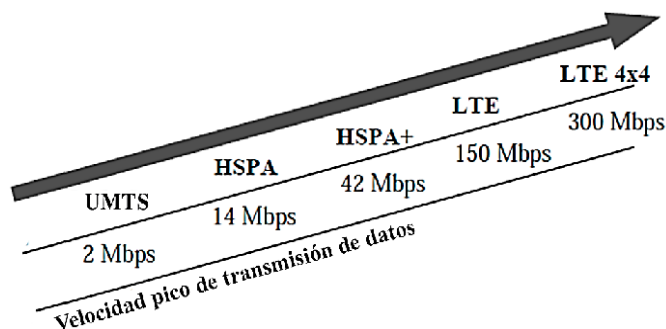


Figura 2.2 Velocidad pico de transmisión de datos de las diferentes tecnologías. Modificada de: [5]





La cuarta generación de telefonía móvil en su estándar LTE debe ser capaz de ofrecer un desempeño superior en comparación con las redes 3GPP existentes basados en HSPA. El *throughput* pico de usuario debe ser como mínimo 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente, es decir, diez veces mayor que en HSPA; la latencia debe ser reducida con el fin de mejorar el desempeño a los usuarios finales, y de igual manera, el consumo de energía del terminal debe ser minimizado para permitir un mayor uso de las aplicaciones multimedia sin necesidad de recargar la batería.

Los principales requerimientos de LTE se enumeran a continuación:

- Eficiencia espectral dos a cuatro veces más que con HSPA.
- Tasas pico superiores a los 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente.
- Tiempo de Round trip menor a 10 ms.
- Optimización de conmutación de paquetes.
- Alto nivel de movilidad y seguridad.
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP existentes [5].

## 2.2. ARQUITECTURA DE LTE

La arquitectura LTE ha sido diseñada para soportar solamente servicios por Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switching*), en contraste al modelo de Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*) de los sistemas celulares anteriores. Su objetivo es ofrecer una conectividad transparente del Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) entre el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) y la Red de Paquetes de Datos (PDN, *Packet Data Network*), sin interrumpir las aplicaciones de los usuarios finales durante la movilidad.

LTE abarca la evolución del acceso radio de la red móvil definida formalmente por el 3GPP como Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) acompañada de una evolución de aspectos no-radio denominada Evolución de Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*) la cual incluye el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) de la red. La integración de la red de acceso E-UTRAN

y la red troncal EPC constituyen la red del sistema LTE llamada Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [4].

La figura 2.3 muestra la configuración general de la arquitectura LTE, la cual está dividida en cuatro dominios principales: Equipo de Usuario, red de acceso E-UTRAN, red troncal EPC y el dominio de Servicios.

Los dominios de esta arquitectura son funcionalmente equivalentes a los de los sistemas 3GPP existentes. El nuevo desarrollo arquitectónico se limita a los dominios E-UTRAN y el EPC. Los dominios UE y Servicios permanecen intactos arquitectónicamente, pero la evolución funcional también ha continuado en esas áreas [5].

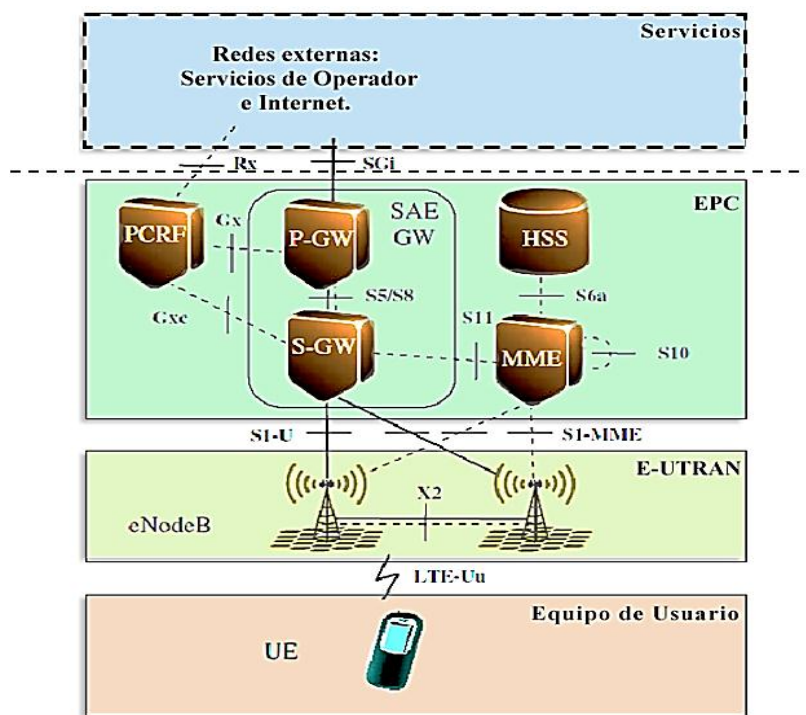


Figura 2.3 Arquitectura general del sistema LTE. Modificado de: [5]

### 2.2.1. Equipo de Usuario

Permite a los usuarios acceder a los servicios del sistema LTE a través de la interfaz radio (interfaz entre el UE y la red de comunicaciones móviles). La arquitectura funcional de un equipo de usuario en el sistema LTE es la misma que en su momento se definió para los sistemas GSM y que se adaptó posteriormente para UMTS.

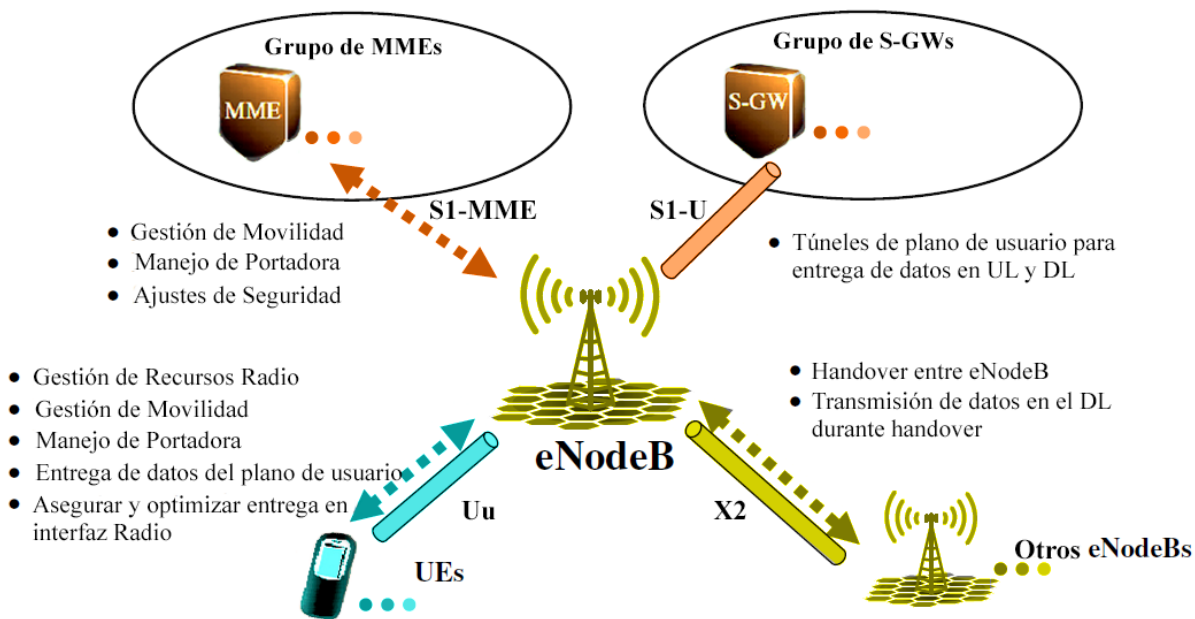
El equipo de usuario (UE, *User Equipment*) contiene dos elementos básicos: la Tarjeta Universal de Circuito Integrado (UICC, *Universal Integrated Circuit Card*) y el Equipo Móvil propiamente dicho (ME, *Mobile Equipment*) [6].

### 2.2.2. Red de Acceso E-UTRAN

El único nodo en la red de acceso E-UTRAN es el Nodo B evolucionado (eNB, *Evolved Node B*). Los eNB son la estación base de E-UTRAN y se distribuyen normalmente en el área de cobertura del sistema.

Funcionalmente el eNB actúa como un puente de capa 2 entre el UE y el EPC, realiza el cifrado/descifrado de los datos y también compresión/descompresión de cabeceras IP, lo que se traduce en una disminución de la latencia del sistema; de igual manera el eNB es responsable de la gestión de recursos de radio (RRM, *Radio Resource Management*), lo que incluye, por ejemplo, la asignación de recursos en función de las condiciones de canal, solicitudes, prioridad o tráfico del UE de acuerdo a la calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) requerida [6].

El eNB establece conexiones con otros eNB a través de la interfaz X2; para conectarse con el núcleo de paquetes evolucionado emplea la interfaz S1 y para realizar intercambio de información con los UE hace uso de la interfaz Uu. La figura 2.4 muestra las interfaces que el eNB tiene con los nodos lógicos circundantes y resume sus funciones.



**Figura 2.4** Interfaces del eNB con otros nodos lógicos y sus principales funciones. Modificado de: [5]



Es importante mencionar que el eNB puede estar sirviendo a múltiples UE en su área de cobertura, pero cada UE está conectado a un solo eNB a la vez.

### 2.2.3. Núcleo de Red EPC

El diseño de la red troncal EPC fue concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. Otro factor clave considerado en el diseño de la arquitectura de la red troncal EPC es la posibilidad de acceder a sus servicios a través de otras redes de acceso 3GPP como UTRAN o GERAN y redes de acceso fuera del ámbito del 3GPP como CDMA-2000, WiMAX o WLAN [6].

Como se observa en la figura 2.3, el núcleo del sistema EPC está formado por tres entidades de red: la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management 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*). Estas tres entidades, junto con el Servidor de Suscriptor Local (HSS, *Home Subscriber Server*), base de datos principal del sistema 3GPP, y la Función de Control de Políticas y Reglas de Tarificación (PCRF, *Policy Control and Charging Rules Function*) constituyen los elementos básicos para la provisión del servicio de conectividad IP entre los equipos de usuario conectados a través de E-UTRAN y redes externas a las que se conecta la red troncal EPC [6].

La descripción completa de la red troncal EPC se recoge en los documentos 3GPP TS 23.401 [7] y 3GPP TS 23.402 [8]. En particular, en la especificación TS 23.401 se describe la arquitectura de la red troncal EPC cuando la red de acceso es E-UTRAN, así como la utilización de redes de acceso 3GPP alternativas o complementarias como UTRAN y GERAN. Por otro lado, la especificación TS 23.402 extiende la arquitectura de la red troncal EPC para soportar el acceso a través de otras redes no 3GPP [6].

### 2.2.4. Dominio de Servicios

El dominio de servicios puede incluir varios subsistemas, que a su vez pueden contener varios nodos lógicos y prestar una amplia gama de servicios. El subsistema más importante en el dominio de servicios se conoce como Subsistema Multimedia IP (IMS, *IP Multimedia Sub-System*) que proporciona los mecanismos de control necesarios para la prestación de servicios de comunicación multimedia que están basados en la utilización del protocolo IP a los usuarios del sistema LTE.



La siguiente es una clasificación de los tipos de servicios que están disponibles [5]:

- Servicios de operador basados en IMS: El operador puede utilizar el IMS para proporcionar servicios que utilizan el protocolo de inicio de sesión (SIP, *Session Initiation Protocol*).
- Servicios de operador no basado en IMS: El operador puede simplemente poner un servidor en su red, y los UE se conectan a él a través de algún protocolo que sea soportado por una aplicación en el UE. Un servicio de streaming de vídeo proporcionado desde un servidor de streaming es un ejemplo de ello.
- Otros servicios no proporcionados por el operador de red móvil, por ejemplo, servicios prestados a través de Internet. La configuración típica sería que el UE se conecta a un servidor en Internet, por ejemplo, a un servidor web para los servicios de navegación web, o en un servidor SIP para el servicio de telefonía por Internet (es decir, VoIP) [5].

### 2.3. CARACTERÍSTICAS DE LTE

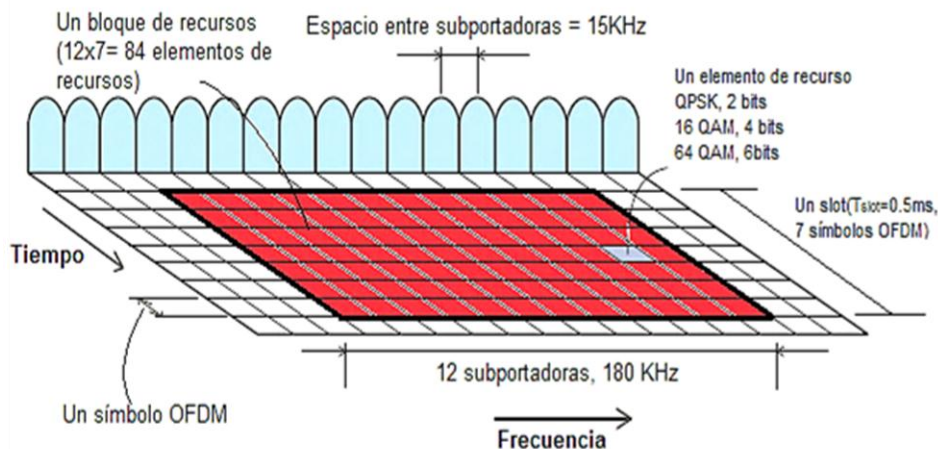
Con LTE se introduce una gran variedad de características respecto a los anteriores estándares, pero la principal innovación es que todos los servicios, incluida la voz, están soportados por el protocolo IP. Las velocidades que se pueden conseguir en la interfaz radio con LTE también aumentan respecto a la última generación, llegando a un rango de 100 Mbps y 1 Gbps [6].

A continuación, se presentan las características de LTE que permiten brindar alta eficiencia espectral, reducción de latencia, mayor velocidad de transmisión de datos, mayor capacidad y cobertura del sistema.

#### 2.3.1. Bloque de Recursos Físicos

Se define como Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*) a la mínima unidad de recursos que un eNB puede asignar a un terminal móvil. En la figura 2.5 se muestran las características de un PRB en tiempo y frecuencia.

Un PRB ocupa en frecuencia 180 KHz divididos en 12 subportadoras equiespaciadas de 15 KHz cada una y en tiempo un slot equivale a 0.5 ms repartidos en 7 símbolos OFDMA, a su vez, un PRB está conformado por 84 elementos de recurso y cada elemento puede transportar 2, 4 o 6 bits dependiendo de si la modulación asignada al usuario es QPSK, 16 QAM o 64 QAM [6].



**Figura 2.5.** Bloque de recursos físicos. Modificada de [9]

### 2.3.2. Reúso de Frecuencia

LTE fue diseñado para utilizar un factor de reúso de frecuencias igual a uno, lo cual significa que cada eNB hace uso de todo el Ancho de Banda (BW, *Bandwidth*) disponible para transmisión, y en un principio esta tecnología no realiza planeación de frecuencias entre celdas, teniendo como consecuencia la adición de Interferencia Inter Celda (ICI, *Inter Cell Interference*) que degrada la capacidad del sistema [10].

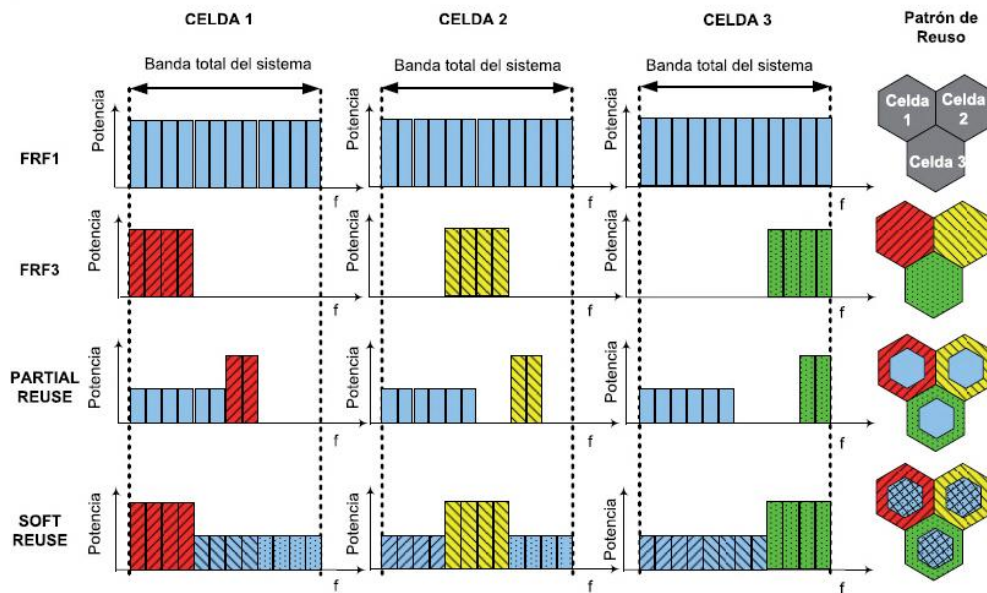
La planeación de frecuencias aparece como una estrategia de mitigación de dicha interferencia, haciendo posible la implementación de la Coordinación de Interferencia Inter Celda (ICIC, *Inter Cell Interference Coordination*) que a través de esquemas de mitigación de interferencia gestiona la ICI, asignando o restringiendo los recursos y niveles de potencia de usuarios de distintas celdas con el mismo PRB asignado en la misma subtrama [11]. Esta planeación presenta tres esquemas fundamentales, diferentes al de reúso uno: reúso duro de frecuencia, reúso suave de frecuencia y reúso fraccional de frecuencia [10].

A través de indicadores de interferencia en el enlace de bajada es posible establecer una estrategia de ICIC que seleccione de forma dinámica distintos Factores de Reúso de Frecuencia (FRF, *Frequency Reuse Factor*), según las condiciones de interferencia intercelular detectadas en el sistema [6].

La figura 2.6 muestra los esquemas de reúso de frecuencia, cada FRF tiene asociado un conjunto de recursos y un perfil de potencia de transmisión en particular [12]. Además ilustra el reúso 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 del eNB 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 [6].



**Figura 2.6.** Esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC. Tomada de: [6]

### 2.3.3. Ancho de Banda Variable

La interfaz radio de LTE basada en OFDMA ofrece una gran flexibilidad al desplegar el sistema dentro de una determinada banda, donde idealmente cualquier ancho de banda puede ser usado (en pasos de 180 kHz correspondientes al ancho de banda de un PRB). No obstante, para facilitar la operación, LTE define un subconjunto de anchos de banda posibles. En concreto, se permiten bloques de espectro con 6, 15, 25, 50, 75 y 100 PRB que se corresponden con anchos de banda nominales de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz respectivamente, como muestra la Tabla 2.1 [13].



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: [14]

#### 2.3.4. MIMO

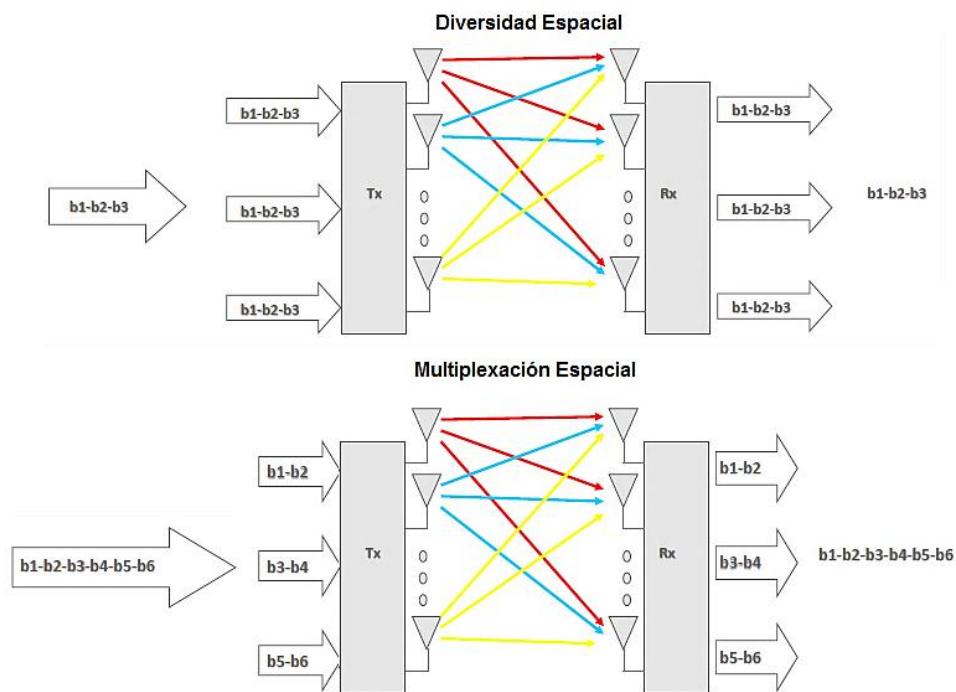
Ante la actual necesidad de satisfacer la demanda de velocidad y calidad de la señal, las nuevas tecnologías y en especial LTE ha optado por el uso de sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), que consiste en el uso de varias antenas transmisoras y receptoras que se pueden usar de dos formas según el requerimiento de la red: diversidad espacial y multiplexación espacial [5].

La figura 2.7 detalla la diferencia entre la diversidad y la multiplexación espacial, el primero tiene como objetivo mejorar la calidad de la señal y por lo tanto la disminución de la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) usando las diferentes antenas para transmitir la misma información. En el segundo caso se envían diferentes datos por las distintas antenas obteniendo como resultado un aumento de la eficiencia espectral y la capacidad del sistema [5].

#### 2.4. INTERFERENCIA INTERCELDA

En los escenarios de comunicación móviles actuales, la interferencia de las celdas vecinas, también conocida como la interferencia intercelda, es a menudo la principal fuente de deterioro del radioenlace, incluso más que el ruido. Sobre el enlace de bajada se debe tener especial cuidado, ya que la interferencia sobre el receptor, que en este caso es el equipo de usuario, no tiene la capacidad de mitigarla de la misma manera como lo puede hacer el eNB [15].





**Figura 2.7.** Formas de uso de los sistemas MIMO.

La ecuación 2.1 describe los componentes de la interferencia intercelda en el enlace descendente sobre un equipo de usuario en particular, como la sumatoria de las potencias interferentes, afectadas por la ganancia de antena y las pérdidas por trayecto.

$$P_i = \sum_{eNB_i=1}^K \frac{P_{TXi} G_i}{L_i} \tag{2.1}$$

Donde,

- $P_i$       Potencia de interferencia co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNB vecinos [Watts].
- $P_{TXi}$     Potencia de transmisión del eNB vecino que afecta al usuario objetivo [Watts].
- $G_i$       Ganancia de antena del eNB vecino percibida por el usuario objetivo [dBi].
- $L_i$       Pérdidas de trayectoria desde el eNB vecino hasta el usuario objetivo [dB].



## 2.5. INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA LTE

El análisis del desempeño de las redes toma gran importancia ya que permite conocer, entre otros aspectos, el estado de sus enlaces. Como herramientas de este análisis se encuentran los indicadores de desempeño, los cuales se describirán a continuación.

### 2.5.1. Relación Señal a Interferencia más Ruido

En teoría de la información y la ingeniería de telecomunicaciones, la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) es un indicador utilizado para dar límites superiores teóricos sobre la capacidad del canal (o la tasa de transferencia de información) en los sistemas de comunicación inalámbrica. La SINR se define como la potencia de una cierta señal de interés, dividido por la suma de la potencia de interferencia y la potencia de ruido presente en el enlace [16]. La ecuación 2.2 describe la SINR percibida por un equipo de usuario en el sistema 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 [dB].
$P_{rx}$	Potencia de la señal recibida por un usuario objetivo de un eNB objetivo [Watts].
$P_i$	Potencia interferente co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNB vecinos [Watts].
$P_N$	Potencia de ruido térmico [Watts].

En LTE se definen valores de SINR requeridos que debe percibir un equipo de usuario para alcanzar una BER objetivo. La SINR requerida depende del Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) y del modelo de propagación, además existen dos métodos por los cuales puede ser calculada. 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 [17].

### **2.5.2. Probabilidad de Degradación**

Como parámetro básico para determinar el límite de capacidad del sistema está la probabilidad de que, en un momento dado, no puedan ser atendidos todos los usuarios con la calidad de servicio objetivo. Esta probabilidad de degradación global se define como la probabilidad de que la SINR percibida por los usuarios del sistema sea inferior a una SINR objetivo y sustituye el concepto de grado de servicio o probabilidad de bloqueo de los sistemas clásicos; el sistema alcanza su límite de capacidad cuando la probabilidad de degradación se hace igual a un valor máximo permitido [18].

### **2.5.3. Probabilidad de Interrupción**

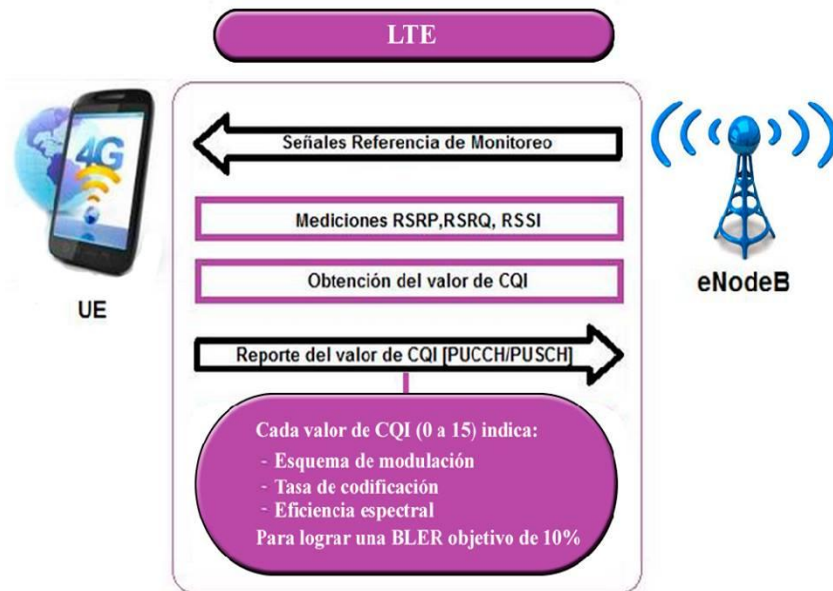
La probabilidad de interrupción en un sistema de comunicación móvil celular se describe como una degradación muy intensa de la señal que supone un corte del servicio y se define como la probabilidad de que la SINR percibida por los usuarios sea menor a un valor de SINR mínimo e indica que a estos usuarios no se les presta servicio. Se considera como una interrupción al intervalo de tiempo en el que se produce un corte parcial o total de la señal, aparece un ruido o una BER excesiva, surge una fuerte discontinuidad en la señal o una distorsión intensa [19].

### **2.5.4. Indicador de Calidad del Canal**

El Indicador de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), indica el estado del canal de comunicación en el enlace descendente y representa el esquema de modulación y de codificación más alto que, si se utiliza, significaría transmisiones por el Canal Físico Compartido de Enlace Descendente (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*) con una Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) máxima del 10%. El CQI depende principalmente de la SINR, una tasa alta de datos sólo puede ser recibida exitosamente con un valor alto de SINR. La razón para usar una cantidad de CQI como retroalimentación en lugar de, por ejemplo, la relación señal a ruido, es porque basándose en los informes de retroalimentación sobre CQI se simplifica la comprobación de terminales [15].

La forma como se reporta el CQI se observa en la figura 2.8, 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 indicador 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 2.8** Asignación de CQI. Modificada de: [20]

La tabla 2.2 presenta la relación entre el indicador 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** Indicador CQI. Tomada de: [21]

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

El Esquema de Modulación y Codificación es determinado por el eNB de acuerdo al CQI proporcionado por el terminal móvil. Con el índice MCS se le informa al UE la tasa de codificación y el orden de modulación con la que debe realizar su transmisión. El eNB puede asignar cualquier MCS cuyo índice sea inferior o igual al indicado en el CQI, con lo cual se garantiza una BLER inferior al 10% [6].

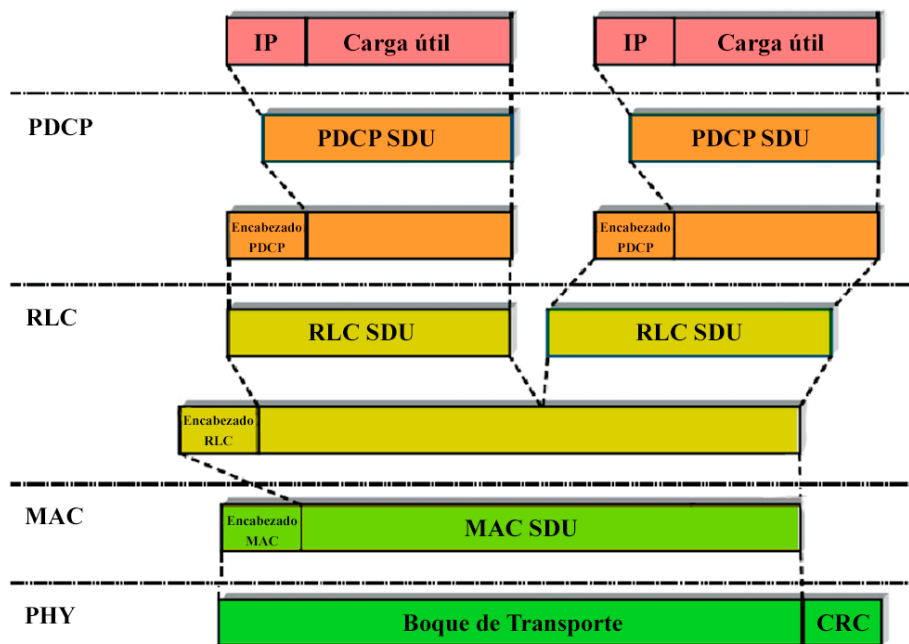
### 2.5.6. Tamaño del Bloque de Transporte

El Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) corresponde al número de bits que pueden transmitirse en una subtrama de 1 ms y depende del MCS y del número de bloques de recursos asignados por el eNB a cada UE.

Como se observa en la figura 2.9 el flujo de datos del enlace descendente debe pasar a través de varias capas antes de conformar el bloque de transporte. Inicialmente el flujo de datos llega a la capa de Protocolo de Convergencia de Paquete de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*) en la cual se realiza la compresión de encabezado IP, seguido de un cifrado. La salida del PDCP se envía a la capa de Control de Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*).

En la capa RLC se realiza la concatenación y/o segmentación de la Unidad de Datos de Servicio<sup>3</sup> (SDU, *Service Data Unit*) PDCP en una Unidad de Datos de Protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) RLC con el tamaño de bloque adecuado y se transmite a la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) que multiplexa varias PDU RLC, añade un encabezado, selecciona el esquema de modulación y codificación y configura la capa física para formar un bloque de transporte.

<sup>3</sup> En general, la entidad de datos desde/hacia una capa de protocolo más alta se conoce como unidad de datos de servicio (SDU) y la entidad correspondiente hacia/desde una entidad de capa de protocolo inferior se llama unidad de datos de protocolo (PDU).



**Figura 2.9.** Tamaño del bloque de transporte. Modificado de: [15]

Finalmente, la capa física adjunta un Código de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Code*) al bloque de transporte para propósito de detección de errores, de igual manera lleva a cabo procesos de codificación, modulación y posteriormente la transmisión de la señal en una subtrama de 1 ms [15]. En la tabla 2.3 extraída de la Especificación Técnica (TS, *Technical Specification*) 36.213 del 3GPP, se muestran los valores de MCS con su respectivo orden de modulación e índice de TBS.

MCS	Orden de modulación	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 MCS. Tomado de [21]

### 2.5.7. Throughput

El *throughput* o capacidad del sistema se define como la velocidad de transmisión de datos total, incluidos los 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:

$$Throughput_{usuario} = \frac{TBS * nPRB}{subtrama} * 1000 \frac{subtramas}{segundo} \quad (2.3)$$



Donde,

- $Throughput_{usuario}$  Cantidad de información que puede transportar una subtrama [bit].
- $TBS$  Tamaño del bloque de transporte [bit].
- $nPRB$  Número de bloques de recursos físicos asignado al usuario.

## 2.6. MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN ADAPTATIVA

LTE define un proceso para optimizar la capacidad y cobertura de la red llamado Modulación y Codificación Adaptativa (*AMC, Adaptive Modulation and Coding*), el cual para una potencia de transmisión dada, indica al eNB que debe adaptar la tasa de transmisión de cada usuario a las variaciones de la calidad de la señal recibida [22].

A través del Esquema de Modulación y Codificación el eNB asigna a cada elemento de recurso una modulación y codificación basándose en estimaciones de calidad que le retorna el terminal móvil, mediante el Indicador de Calidad del Canal [6].

La tabla 2.4 muestra la forma como se asigna la modulación a un usuario dependiendo del indicador CQI y el valor de MCS. La codificación se escoge entre 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6 dependiendo de si el requerimiento del enlace es de calidad de la señal o de velocidad de transmisión de datos [23].

MCS	CQI	Modulación
0	2	QPSK
1	2	
2	3	
3	3	
4	4	
5	4	
6	5	
7	5	
8	6	
9	6	
10	6	16QAM
11	7	
12	7	
13	8	
14	8	





15	9	64QAM
16	9	
17	9	
18	10	
19	10	
20	11	
21	11	
22	12	
23	12	
24	13	
25	13	
26	14	
27	14	
28	15	
29	15	
30	15	
31	15	
		QPSK
		16QAM
		64QAM

**Tabla 2.4.** Esquema de modulación y codificación.  
Tomada de: [21]

## 2.7. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES

La planificación de paquetes en LTE consiste en asignar de forma dinámica recursos radio a los usuarios para que éstos puedan realizar sus transmisiones ordenadamente a través de la interfaz radio LTE. El planificador de paquetes debe considerar varios indicadores como el volumen de tráfico, la calidad del canal, el estado del buffer y los requisitos de calidad de servicio (QoS) para cada terminal móvil, identificados a través de las mediciones realizadas en el eNB y/o reportados por el UE para realizar una óptima asignación de recursos entre todos los usuarios del sistema [24].

La asignación de recursos radio LTE en el dominio del tiempo explota la diversidad multiusuario, donde, debido a la existencia de varios usuarios, es más probable que alguno de ellos experimente una buena calidad del canal en una determinada subtrama. Así, si el planificador tiene en cuenta el CQI de cada usuario, podría asignar el canal al usuario con mejor calidad y de este modo se aprovecharían mejor los recursos radio. Esta mejora por diversidad multiusuario es tanto mayor cuanto mayor es el número de usuarios.



De igual manera LTE permite extender este concepto al dominio de la frecuencia, donde ahora se tienen en cuenta las variaciones del canal debido a los desvanecimientos selectivos en frecuencia que son apreciables en los sistemas celulares donde el ancho de banda de coherencia<sup>4</sup> es típicamente menor que el ancho de banda del sistema. En ese sentido el planificador podría asignar el canal a los usuarios con un ancho de banda de coherencia mayor y de ese modo aprovechar mejor los recursos radio [6].

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, en sistemas LTE el canal es percibido de manera diferente tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo, de forma que si se asignan adecuadamente los bloques de recurso entre los usuarios el sistema trabajará más eficientemente, es decir, más próximo a su máxima capacidad.

En LTE el planificador reside en el eNB, tanto para el DL como para el UL, este mecanismo centralizado asegura ortogonalidad en las transmisiones, aunque requiere de señalización entre los usuarios y el eNB para reportar, entre otras cosas, el estado del canal y del buffer ya que no tendría sentido asignar recursos en una subtrama a un terminal con un excelente canal pero que no tiene información a transmitir. Es importante destacar que, aunque la función de planificación se ejecuta en cada eNB, el planificador podría considerar determinadas restricciones o preferencias provenientes de otros eNB a la hora de asignar algunos de los recursos de la interfaz radio, con el objetivo de coordinar sus decisiones y mitigar la interferencia intercelda.

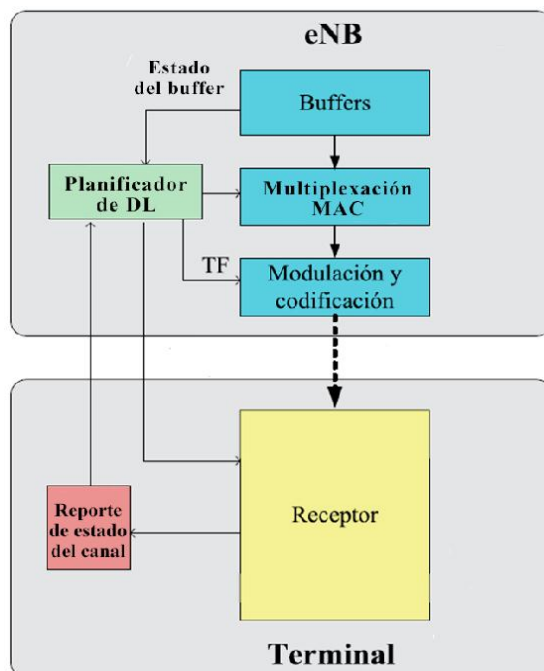
La figura 2.10 muestra la arquitectura del planificador de recursos en DL para LTE, el cual se encarga de decidir qué usuarios transmiten, cómo se multiplexan sus canales lógicos (multiplexación MAC), el formato de transporte (TF, *Transport Format*) y la técnica modulación y codificación a emplear.

Debido a las variaciones en frecuencia del canal, el planificador podría asignar recursos a varios terminales en una misma subtrama, para ello, el planificador necesita que los terminales reporten el estado del canal mediante Reportes del Estado del Canal (CSR, *Channel Status Reports*), posteriormente el eNB toma la decisión de planificación y se encarga de enviar un mensaje a los terminales del sistema donde se detalla, para cada PRB, la identidad del terminal al que se le ha asignado el PRB y toda la información necesaria para que pueda decodificar el

---

<sup>4</sup> El ancho de banda de coherencia determina la anchura espectral donde la respuesta en frecuencia del canal se puede considerar plana, y por lo tanto la señal no sufriría distorsión en frecuencia.

bloque de transporte. Este mensaje recibe el nombre de Asignación de Planificación de Enlace Descendente (*Downlink Scheduling Assignment*) [6].



**Figura 2.10.** Arquitectura del planificador de recursos en DL para LTE.  
Tomado de: [6]

### 2.7.1. Estrategias de planificación LTE

Existe un gran número de planificadores de recursos para las redes inalámbricas, la mayoría de los cuales se derivan de los algoritmos diseñados para redes cableadas. En la tecnología LTE los planificadores de recursos, entre otros aspectos, deben ser capaces de manejar un modelo del canal adaptativo con múltiples estados posibles debido a la hostilidad y naturaleza cambiante de éste, deben gestionar diferentes tipos de tráfico, garantizando sus requisitos de QoS, de igual manera deben garantizar una repartición justa, adecuada y eficiente de los recursos entre los terminales móviles y finalmente deben programar las transmisiones de manera que se incremente la capacidad del sistema asegurando que el número de transmisiones simultáneas previstas no provoque un exceso de interferencia [24].

Entre las diferentes estrategias de planificación de recursos radio existentes, las denominadas *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* son las que satisfacen de mejor manera las características anteriores y por tal motivo son empleadas generalmente por LTE. A continuación se hace una descripción detallada de dichas estrategias de planificación.



### 2.7.1.1 **Round Robin (RR)**

El nombre de esta estrategia de planificación de recursos radio viene del principio de *Round Robin* conocido de otros campos, donde cada persona toma una parte de un algo en cantidades parejas. En los sistemas LTE, donde varios usuarios comparten los recursos de red en la celda, el planificador RR distribuye los bloques de recursos radio de manera equitativa y en un orden racional, normalmente comenzando por el primer elemento de la lista hasta llegar al último sin tener en cuenta las condiciones del canal radio, por lo tanto, es una estrategia justa en el sentido de que cada usuario tiene asignado el canal durante el mismo tiempo, sin embargo, al no considerar las condiciones del canal, aquellos usuarios con las peores condiciones serán incapaces de utilizar los bloques de recursos asignados lo cual se traducirá en bajo *throughput* de la celda y por lo tanto del sistema.

### 2.7.1.2 **Proporcional y Justa (PF, *Proportional Fair*)**

Proportional Fair es una estrategia de planificación basada en el mantenimiento de un equilibrio entre dos intereses contrapuestos: Tratar de maximizar el desempeño total de la red y, al mismo tiempo permitir a todos los usuarios al menos un nivel mínimo de servicio. Esto se hace mediante la asignación de una velocidad a cada flujo de datos o de una prioridad de planificación (dependiendo de la aplicación) que es inversamente proporcional al consumo de recursos previsto.

Esta estrategia utiliza información de la capa física para la toma de decisiones de planificación, se trata por tanto de un sistema intercapa ya que tiene en cuenta el estado del canal radio para realizar la asignación de recursos radio, priorizando a los usuarios con las mejores condiciones, además asegura el cumplimiento del criterio de justicia proporcional dado que al seleccionar un usuario incrementa su *throughput* y reduce su prioridad de asignación para seguir asignando recursos a otros usuarios en los cuales la prioridad asignación pasará a ser más alta, de esa manera garantiza que a todos los usuarios se les asignará al menos un bloque de recursos radio en cada subtrama [24].

### 2.7.1.3 **Máxima Velocidad (MR, *Maximum Rate*)**

Esta estrategia planificación selecciona al usuario que experimenta las mejores condiciones del canal radio en cada subtrama para asignarle los PRB disponibles. MR permite maximizar la capacidad del sistema gracias a la diversidad multiusuario, ya que si el número de usuarios es suficientemente grande, es posible encontrar a uno de ellos que pueda transmitir en tasas cercanas a la máxima capacidad, sin embargo, MR no es justo en algunos escenarios, donde un usuario que experimente



una calidad del canal muy superior al resto (por estar muy cerca de al eNB) obtendrá casi siempre el canal, impidiendo las transmisiones del resto de usuarios, lo que es inaceptable desde el punto de vista de la calidad del servicio [6].

### 2.7.2. Coeficientes de Priorización para Planificadores

En cada UE del sistema se monitorean dos parámetros: la tasa máxima a la que puede transmitirse en el siguiente intervalo de planificación según la SINR medida ( $T$ ), y la tasa promedio a la que se ha estado transmitiendo en la celda ( $R$ ).

Para el cálculo de la prioridad de asignación de recursos se usa la ecuación 2.4:

$$P = \frac{T^\alpha}{R^\beta} \quad (2.4)$$

Donde,

$P$	Prioridad de asignación.
$T$	Tasa máxima a la que cada UE puede transmitir en el siguiente intervalo de planificación según la SINR medida.
$R$	Tasa promedio a la que se ha estado transmitiendo en la celda.
$\alpha$ y $\beta$	Coeficientes de priorización.

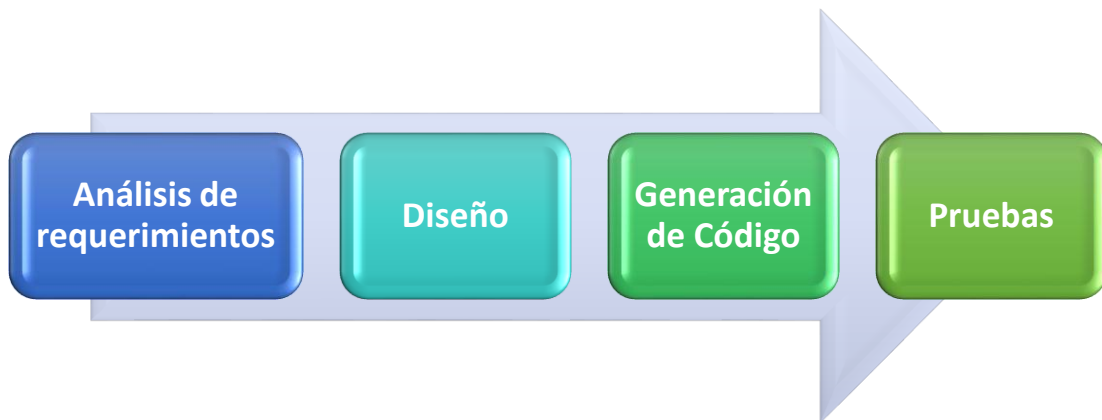
Mediante el ajuste de los coeficientes de priorización  $\alpha$  y  $\beta$ , se puede modificar el balance entre servir a los mejores UE (los que tienen mejores condiciones de canal) y servir los UE que tienen un nivel aceptable de desempeño [25], de la siguiente manera:

- Si  $\alpha = 0$  y  $\beta = 1$ , el planificador actuará con la estrategia *Round Robin*, sirviendo a todos los UE por igual, sin tener en cuenta el estado del canal radio o el consumo de recursos.
- Si  $\alpha = \beta = 1$ , se tendrá la estrategia de planificación *Proportional Fair*, y los UE del sistema serán servidos de acuerdo a sus condiciones de canal radio y la QoS.
- Si  $\alpha = 1$  y  $\beta = 0$ , entonces el planificador solo servirá los UE con las mejores condiciones de canal radio empleando la estrategia de planificación *Maximun Rate*.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Este capítulo presenta el conjunto de procedimientos utilizados para integrar los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* en el simulador básico a nivel de sistema para LTE.

La metodología a utilizar en el desarrollo del trabajo se basará en el modelo lineal secuencial que en líneas generales se define como participativa, activa, flexible, didáctica y de diálogo. Este modelo sugiere un enfoque sistemático en donde el desarrollo de software sigue unas etapas bien definidas que deben cumplirse de forma lineal y ordenada para alcanzar los objetivos propuestos [26].



**Figura 3.1** Modelo de desarrollo de software lineal secuencial.

- 1. Análisis de requerimientos:** Etapa dirigida al análisis detallado de los requerimientos y definición concreta de los objetivos del trabajo a desarrollar, teniendo como punto de partida el estudio del simulador estático básico a nivel de sistema para LTE que se desarrolló previamente en la institución.
- 2. Diseño:** Detalla el proceso que se va a seguir para la integración de los planificadores de recursos radio en el simulador estático básico a nivel de sistema para LTE y el plan de pruebas.
- 3. Implementación:** Comprende la generación de código para los planificadores *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* a integrar en el simulador estático básico a nivel de sistema para LTE.



- 4. Pruebas:** Durante esta etapa se comprueba que no se hayan cometido errores en alguna de las fases anteriores, especialmente en la generación de código.

### 3.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

El análisis de requerimientos comprende la descripción del problema al cual se le quiere dar solución, también define los requerimientos que se deben tener en cuenta para el cumplimiento del objetivo del trabajo.

#### 3.1.1. Problema de Estudio

Una de las principales características de la cuarta generación de telefonía móvil, específicamente en su estándar LTE, es la prestación de altas tasas de transmisión de datos a los usuarios, teniendo como objetivo 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente; para cumplir tal objetivo las estrategias de planificación de recursos radio LTE (descritas en la sección 2.8.1) juegan un papel determinante, ya que con una óptima asignación de recursos radio se puede llegar a límites cercanos a la máxima capacidad del sistema, sin embargo, si la asignación de recursos radio no es adecuada, este se estará subutilizando y por lo tanto su desempeño será pobre.

El desempeño de un sistema LTE está estrechamente relacionado con la estrategia de planificación de recursos radio empleada ya sea *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* debido a que en cada caso se manejan diferentes parámetros y condiciones para la asignación de recursos radio en la red.

De igual manera la cobertura determina la cantidad de recursos a los cuales puede acceder un UE según la estrategia de planificación usada, de modo que entre mayor sea el área cubierta por la red, mayor número de UE se tienen que atender con la misma cantidad de recursos radio.

El simulador básico a nivel de sistema para LTE permite realizar un análisis del desempeño y cobertura del sistema, describiendo el *throughput* que este puede alcanzar para unas características de escenario y de red definidas empleando la estrategia de planificación de recursos radio *Round Robin*, sin embargo, esto no sería suficiente para realizar un análisis completo en la red, pues el *throughput* que se puede alcanzar con las estrategias de planificación de recursos radio *Proportional Fair* o *Maximun Rate* es teóricamente más alto y por tanto se podría obtener un desempeño mucho mayor en el sistema.





Dados los anteriores argumentos, es clara la necesidad de modelar e implementar en el simulador básico a nivel de sistema para LTE algoritmos que permitan simular las estrategias de planificación de recursos radio *Proportional Fair* y *Maximun Rate* en el sistema con lo cual será posible realizar un análisis mucho más completo de su desempeño tanto en capacidad como en cobertura.

### 3.1.2. Requerimientos

A continuación se presentan los requerimientos para integrar los planificadores de recursos radio en el simulador básico a nivel de sistema para LTE.

- **Requerimientos funcionales**

Los requerimientos funcionales definen las acciones que el simulador será capaz de ejecutar con las características que se añadirán y describen las operaciones que el sistema realiza sobre las entradas para conseguir las salidas [27]. Los requerimientos funcionales del simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados son:

**Requerimiento 1:** Obtener el CQI y TBS según la SINR de cada usuario.

**Requerimiento 2:** Obtener la tasa máxima a la cual un usuario puede transmitir en el siguiente intervalo de tiempo y la tasa promedio con la que se ha estado transmitiendo en la celda.

**Requerimiento 3:** Calcular la prioridad de asignación de recursos radio para cada usuario de la red.

**Requerimiento 4:** Asignar los recursos radio disponibles a partir de la prioridad calculada para cada usuario y del planificador de recursos radio seleccionado.

**Requerimiento 5:** Calcular el *throughput* por usuario, sector, celda y red con los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*.

**Requerimiento 6:** Realizar cálculos de capacidad de un sistema LTE con los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*.

**Requerimiento 7:** Realizar cálculos de cobertura de un sistema LTE con los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*.

**Requerimiento 8:** Desplegar los resultados de la cobertura y desempeño de la red para cada uno de los planificadores de recursos radio integrados.





- **Requerimientos no funcionales**

Especifica criterios que pueden usarse para juzgar la operación de un sistema en lugar de sus comportamientos específicos, es decir, se refiere a todos los requisitos que no describen información a guardar, ni funciones a realizar [28]. Estos son:

**Requerimiento 9:** Desplegar una interfaz de usuario intuitiva.

**Requerimiento 10:** Ser compatible con la versión R2013a de Matlab®.

**Requerimiento 11:** Minimizar el impacto en los tiempos de simulación, generado por la adición de nuevas características al simulador.

**Requerimiento 12:** Ser un software de código abierto.

**Requerimiento 13:** Tener fines académicos.

### 3.2. DISEÑO

En esta fase se define el proceso que selecciona y organiza los elementos necesarios para modelar los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* que se integrarán en el simulador básico a nivel de sistema para LTE.

#### 3.2.1. Modelo del Sistema

En este trabajo de grado se empleó el modelo del sistema definido en el simulador básico a nivel de sistema para 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.

El objetivo de estudio se enfoca en los bloques de capacidad y cobertura, y se le permite al usuario del simulador configurar los siguientes parámetros: tipo de antena, azimut, *tilt* de antena, modelo de propagación, tipos de desvanecimiento, potencia de transmisión del eNB, frecuencia de transmisión, número de usuarios por sector, el tipo de planificador de recursos radio, el ancho de banda del sistema y el radio de la celda, a fin de medir el *throughput* asignado a cada UE, calcular la capacidad y la cobertura de las celdas y el sistema.



### 3.2.2. Algoritmos de los Planificadores de Recursos Radio

En el proceso de modelado de los planificadores de recursos radio a integrar, es muy importante definir un conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permita estructurar el algoritmo correspondiente de cada uno de ellos [26]. A continuación se describen los algoritmos empleados.

- **Algoritmo para el planificador de recursos radio *Round Robin***

El planificador *Round Robin* asigna los PRB de manera equitativa entre los usuarios del sistema sin tener en cuenta sus condiciones del canal radio.

Como se mencionó en la sección 2.7.2 los coeficientes de priorización  $\alpha$  y  $\beta$  para este caso son 0 y 1 respectivamente, y por lo tanto la prioridad de asignación de recursos radio a partir de la ecuación 2.4 será:

$$P = \frac{1}{R} \quad (3.1)$$

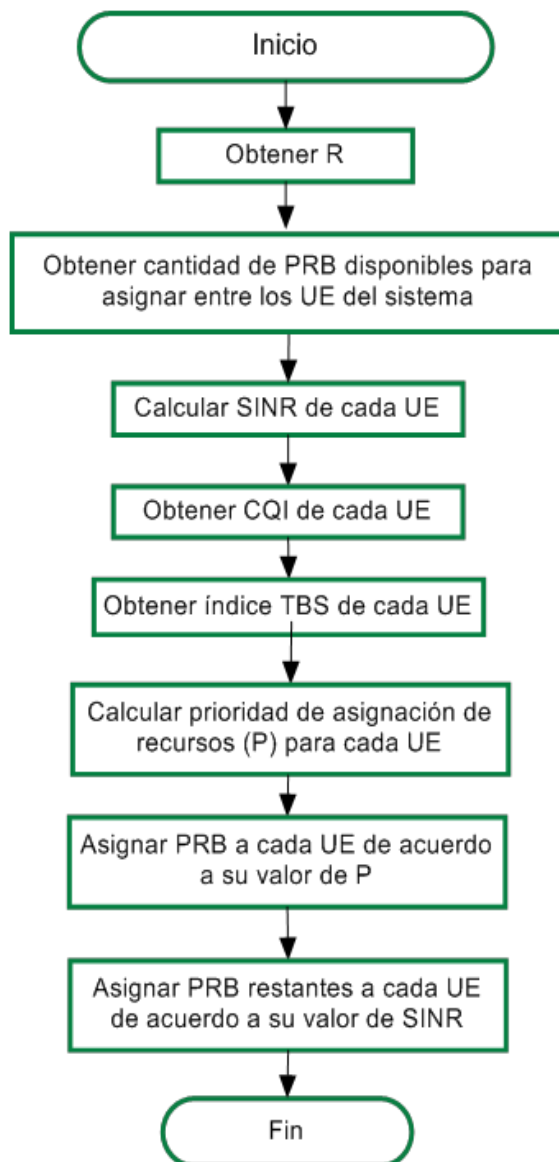
Donde  $R$  es la tasa promedio a la que se ha estado transmitiendo en la celda y es igual para todos los UE, de manera que la prioridad de asignación ( $P$ ) es independiente de las condiciones de canal del usuario y por consiguiente será igual para todos.

A continuación se explica el algoritmo para el planificador *Round Robin*:

1. Obtener la tasa promedio a la cual ha estado transmitiendo el eNB ( $R$ ).
2. Determinar el número máximo de bloques de recursos disponibles para asignar a partir del ancho de banda del sistema.
3. Calcular la SINR para cada usuario.
4. Obtener el CQI para cada UE de acuerdo a la SINR.
5. Obtener el índice TBS para cada UE de acuerdo al CQI.
6. Calcular la prioridad de asignación de recursos radio para cada usuario usando la ecuación 3.1.
7. Con el valor de  $P$  obtenido, asignar los PRB correspondientes a cada usuario y finalizar proceso.



En La figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo desarrollado para modelar el algoritmo del planificador de recursos radio *Round Robin*.



**Figura 3.2** Diagrama de flujo desarrollado para el planificador *Round Robin*.

- **Algoritmo para el planificador de recursos radio *Proportional Fair***

Este planificador trata de maximizar el desempeño total del sistema y al mismo tiempo permitir a todos los usuarios al menos un nivel mínimo de servicio teniendo en cuenta las condiciones del canal del usuario.



Como se mencionó en la sección 2.7.2 los coeficientes de priorización  $\alpha$  y  $\beta$  para este caso son 1 y 1 respectivamente, y por lo tanto la prioridad de asignación de recursos radio a partir de la ecuación 2.4 será:

$$P = \frac{T}{R} \quad (3.2)$$

Donde  $R$  es la tasa promedio a la que se ha estado transmitiendo en la celda (es igual para todos los usuarios) y  $T$  la tasa máxima a la que puede transmitir el usuario en el próximo intervalo de tiempo. Las condiciones del canal determinan el valor de  $T$ , que a su vez afecta el valor de  $P$  en forma directamente proporcional.

A continuación se explica el algoritmo para el planificador *Proportional Fair*:

1. Obtener la tasa promedio a la cual ha estado transmitiendo el eNB ( $R$ ).
2. Determinar el número máximo de bloques de recursos disponibles para asignar a partir del ancho de banda del sistema.
3. Calcular la SINR para cada usuario.
4. Obtener el CQI para cada UE de acuerdo a la SINR.
5. Obtener el índice TBS para cada UE de acuerdo al CQI.
6. Obtener la tasa máxima a la cual puede transmitir el usuario en el próximo intervalo de tiempo ( $T$ ) a partir del índice TBS.
7. Calcular la prioridad de asignación de recursos radio para cada usuario usando la ecuación 3.2.
8. Asignar 1 PRB a cada usuario para garantizar un mínimo nivel de servicio.
9. Asignar los PRB restantes para cada usuario dependiendo de su valor de  $P$ .
10. Verificar si aún hay PRB sin asignar, de ser así, asignarlos entre los UE de acuerdo a su valor de SINR y finalizar el proceso.

En La figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo desarrollado para modelar el algoritmo del planificador de recursos radio *Proportional Fair*.

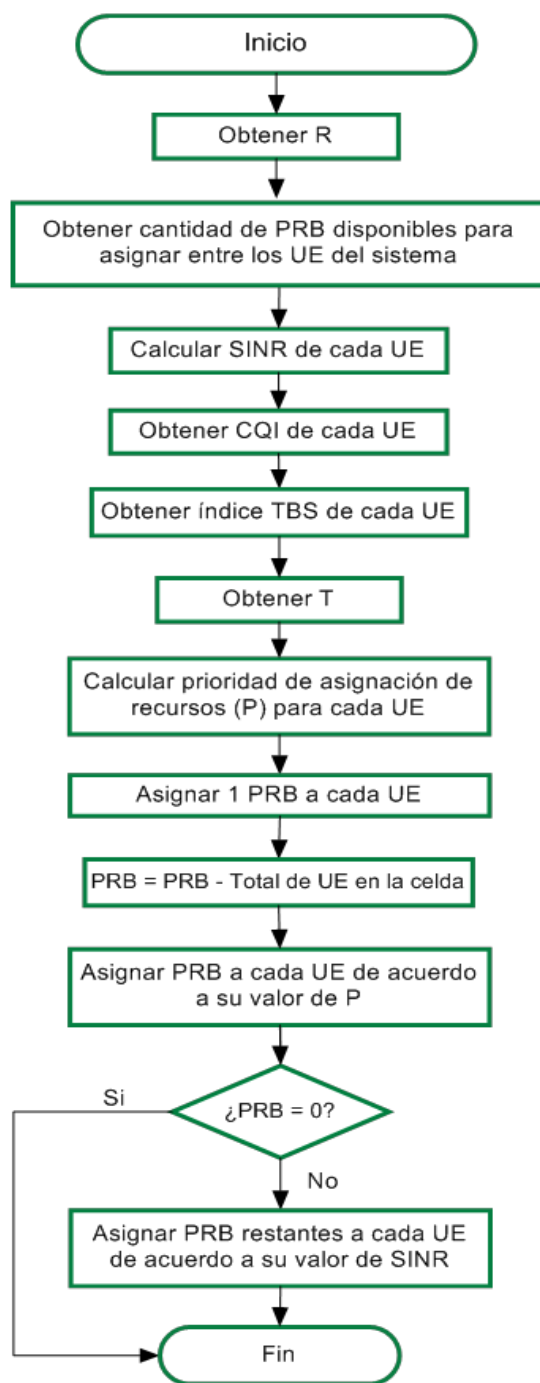


Figura 3.3 Diagrama de flujo desarrollado para el planificador *Proportional Fair*.

- Algoritmo para el planificador de recursos radio *Maximun Rate*

El planificador *Maximun Rate* asigna los bloques de recursos a los usuarios cuya SINR sea mayor o igual a la SINR objetivo del sistema, en caso de que ningún UE



cumpla dicho requisito, los PRB serán asignados al usuario con las mejores condiciones de canal radio.

Como se mencionó en la sección 2.7.2 los coeficientes de priorización  $\alpha$  y  $\beta$  para este caso son 1 y 0 respectivamente, y por lo tanto la prioridad de asignación de recursos radio a partir de la ecuación 2.4 será:

$$P = T \quad (3.3)$$

Donde  $T$  la tasa máxima a la que puede transmitir el usuario en el próximo intervalo de tiempo, de manera que la prioridad de asignación ( $P$ ) depende únicamente de este factor.

A continuación se explica el algoritmo para el planificador *Maximun Rate*:

1. Obtener el valor de SINR objetivo del sistema.
2. Determinar el número máximo de bloques de recursos disponibles para asignar a partir del ancho de banda del sistema.
3. Calcular la SINR para cada usuario.
4. Obtener el CQI para cada UE de acuerdo a su SINR.
5. Obtener el índice TBS para cada UE de acuerdo a su CQI.
6. Verificar si la SINR de todos los usuarios es menor a la SINR objetivo, de ser así pasar al punto 7, en caso contrario pasar al punto 8.
7. Asignar todos los PRB al UE con el mayor índice TBS y finalizar el proceso.
8. Asignar una prioridad de asignación igual a cero a los UE con SINR menor a la SINR objetivo.
9. Para los UE restantes obtener la tasa máxima a la cual pueden transmitir en el próximo intervalo de tiempo ( $T$ ) a partir del índice TBS.
10. Calcular la prioridad de asignación de recursos radio para los usuarios a los cuales se les ha calculado  $T$  usando la ecuación 3.3.
11. Con el valor de  $P$  obtenido, asignar los PRB correspondientes a cada UE.
12. Verificar si aún hay PRB sin asignar, de ser así, asignarlos entre los UE de acuerdo a su valor de SINR y finalizar el proceso.



La figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo desarrollado para modelar el algoritmo del planificador de recursos radio *Maximun Rate*.

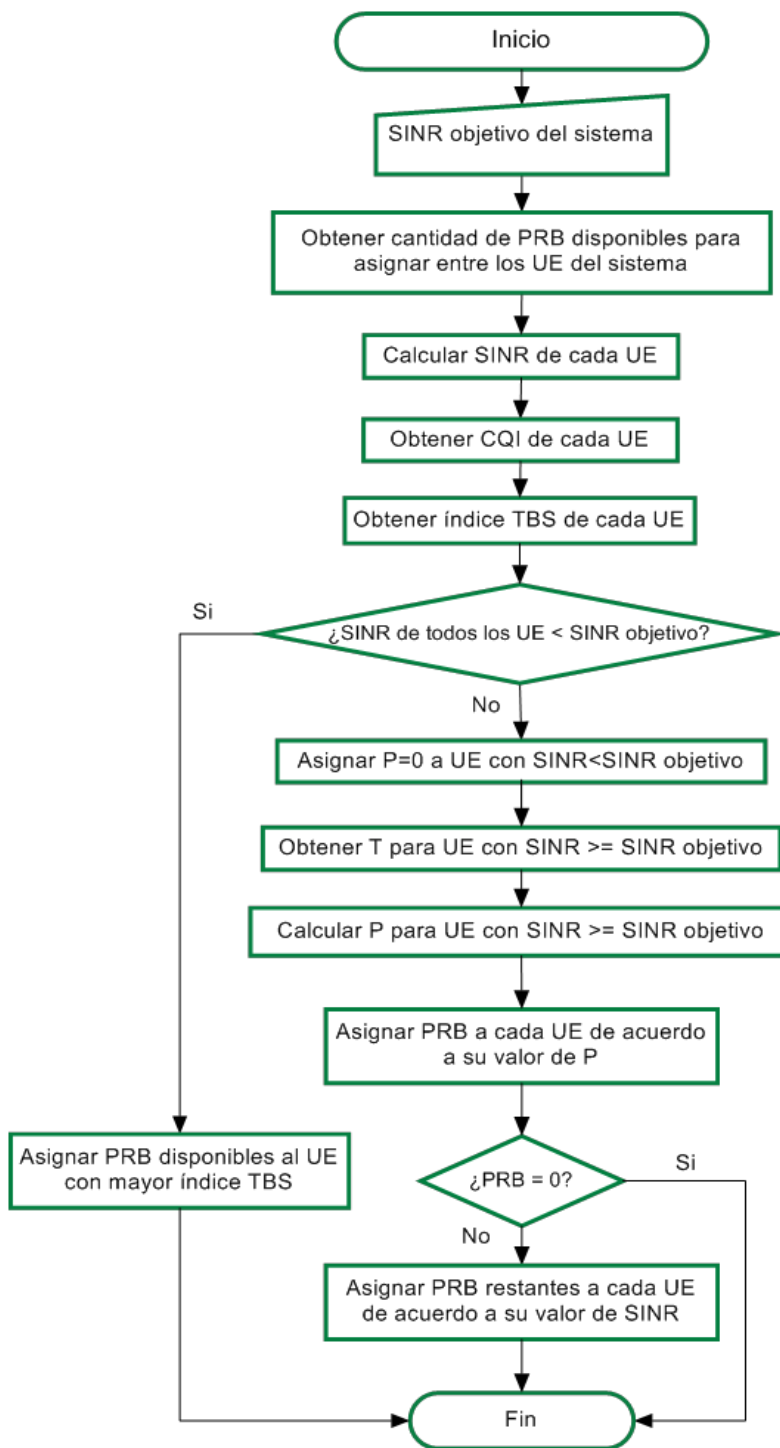
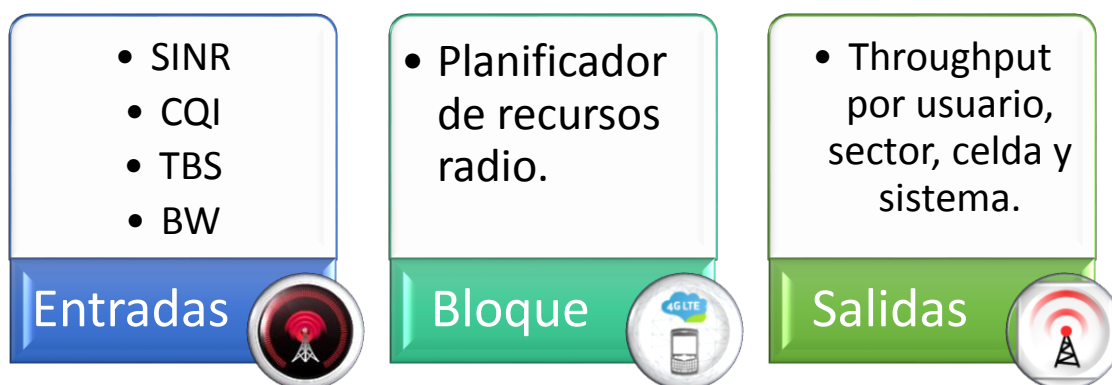


Figura 3.4 Diagrama de flujo desarrollado para el planificador *Maximun Rate*.

### 3.2.3. Entradas y Salidas del Bloque de Planificadores de Recursos Radio

El diagrama de entradas y salidas muestra los datos que son procesados por el bloque de planificadores de recursos radio y los resultados que se obtienen a partir de este, la figura 3.5 ilustra el procedimiento mencionado.



**Figura 3.5** Diagrama de entradas y salidas del bloque del planificador de recursos radio.

En el bloque de planificadores de recursos radio están contenidos los tres planificadores de recursos radio modelados en la sección 3.2.2, estos usan el ancho de banda del sistema junto con la SINR, el CQI y el TBS de cada UE para obtener el *throughput* por usuario, por celda y del sistema.

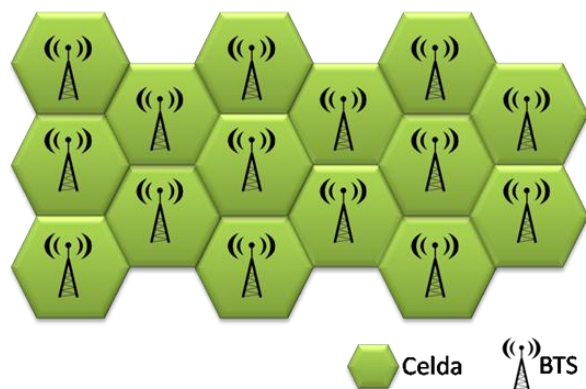
### 3.2.4. Consideraciones para el Diseño del Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE con Planificadores de Recursos Radio Integrados

En las secciones siguientes se presentan las características del sistema escogidas para su posterior implementación en el simulador.

- **Geometría de las celdas**

En una red celular la extensión total a cubrir se divide en celdas hexagonales, esto debido a que es la única que permite cubrir un área sin dejar espacios vacíos y sin que exista superposición entre ellas, como se muestra en la figura 3.6. Esto es un modelo teórico que permite hacer la planificación y estimaciones iniciales. En la práctica el área de cobertura de una celda es totalmente irregular pero siempre alrededor del punto de ubicación del eNB [29].





**Figura 3.6** Geometría de las celdas celulares

- **Ancho de banda**

El simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados permite al usuario escoger el ancho de banda del sistema y por lo tanto los PRB que se distribuirán entre los UE como se muestra en la tabla 3.1.

Ancho de banda del canal (MHz)	Número de PRB
3	15
5	25
10	50
15	75
0	100

**Tabla 3.1** Bloques de recursos vs ancho de banda.

- **Reúso de frecuencia**

El simulador utiliza un factor de reúso de frecuencia igual a 1 debido principalmente a la simplicidad en la implementación del código.

- **Antenas**

Las antenas consideradas para el diseño del simulador son la Katherein 742215, la Katherein 80010681 y la TR 36.942. Las principales características de las antenas Katherein se encuentran en la tabla 3.2.



Tipo de antena	Rango de frecuencia	Doble polarización	Ganancia (dBi)	Impedancia	Tilt eléctrico
Katherein 742215	1710 MHz – 2200 MHz	+45°, -45°	2 x 18	50 Ω	0° – 10°
Katherein 80010681	1710 MHz – 2690 MHz	+45°, -45°	2 x 15.5	50 Ω	0° – 12°

**Tabla 3.2** Características de las antenas Katherein. Tomada de [30].

La TR 36.942 es una antena recomendada por el 3GPP en el TR 36.942. La ecuación 3.4 define la ganancia horizontal de antena [31].

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

Donde,

- $\theta$             Ángulo azimut, varía entre -180° y 180° [°].
- $\theta_{HP}$        Ancho de haz a 3dB o de potencia mitad, 65° [°].
- $A_m$          Máxima atenuación, 20dB [dB].

- **Configuración de antena**

Las antenas se configuran según el modelo de una entrada-una salida (SISO, *Single Input Single Output*), es decir, se usa una sola antena tanto en el transmisor como en el receptor, lo que implica una menor complejidad en el desarrollo del código del simulador [32]. Además se considera que en caso de usar antenas directivas se tendrán 3 en cada celda, cada una orientada hacia un sector.

- **Tilt de antena**

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

- Las antenas y los usuarios se encuentran sobre un sistema de coordenadas XYZ debido a que poseen una altura (eje Z) que varía según el modelo de propagación que se esté usando, pero se usa el patrón horizontal de antena para realizar los cálculos de ganancia de recepción en el enlace descendente



debido a que no se tiene información de los patrones de a ganancia en tres dimensiones.

- **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.

- **Altura de antena**

Las alturas de antena típicas en LTE se consideran en el simulador 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 3.3, 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 del eNB, teniendo en cuenta el promedio del valor entre la altura de la antena y la altura típica general de las edificaciones.

Ambiente	Parámetro	Valor
Micro Urbano	Altura de la antena de la estación base (eNB)	12.5 metros
	Altura de la antena de la estación móvil (UE)	1.5 metros
Macro Urbano y Suburbano	Altura de la antena de la estación base (eNB)	32 metros
	Altura de la antena de la estación móvil (UE)	1.5 metros

**Tabla 3.3** Altura de las antenas según el TR 25.996. Tomada de [33].

- **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 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.

- **Modelo de propagación**

La tabla 3.4 muestra los modelos de propagación considerados en el simulador, con su respectivo ambiente de aplicación.

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

**Tabla 3.4** Modelo de propagación y ambiente relacionado.

- **Bloque de Recursos de Planificación**

Los flujos de información de los UE del sistema son ubicados por cada planificador de recursos radio en una estructura de frecuencia-tiempo definida como bloque de recursos de planificación (SRB, *Scheduling Resource Block*), formada por dos PRB, es decir, tienen 180 KHz de ancho y un intervalo de tiempo de duración igual a una subtrama (1mseg) de largo. Dicha duración corresponde con la mínima granularidad temporal en la asignación de recursos radio [34].

- **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  $\gamma$  es el umbral de degradación. De esa manera, la probabilidad de degradación quedará definida según la ecuación 3.5.

$$P_r\{D\} = P_r\{S = 1\} = P_r\{SINR < \gamma\}, \tag{3.5}$$

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  $\gamma$ .



Si  $f_{SINR}(x)$  es la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria  $SINR$ , la probabilidad de degradación se define en la ecuación 3.6.

$$P_r\{D\} = \int_{-\infty}^{\gamma} f_{SINR}(x)dx \quad (3.6)$$

- **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  $\lambda$  es el umbral de interrupción. De esa manera, la probabilidad de interrupción está definida en la ecuación 3.7.

$$P_r\{I\} = P_r\{S = 1\} = P_r\{SINR < \lambda\}, \quad (3.7)$$

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  $\lambda$ .

Si  $f_{SINR}(x)$  es la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria  $SINR$ , la probabilidad de interrupción se define según la ecuación 3.8.

$$P_r\{D\} = \int_{-\infty}^{\lambda} f_{SINR}(x)dx \quad (3.8)$$

- **Consideraciones de cobertura**

La integración del bloque de planificadores de recursos radio no influye directamente en el diseño para el bloque de cobertura, desarrollado previamente en el simulador básico a nivel de sistema para LTE. La relación que existe entre los planificadores de recursos radio y la cobertura se analizará en la sección 4.5.

### 3.3. IMPLEMENTACIÓN

La implementación es la fase donde se crea el código correspondiente al diseño hecho en la sección 3.2. La herramienta software a emplear y la usada en el



simulador básico a nivel de sistema para LTE deben ser compatibles, además el método de programación se fija de modo que se complemente con las anteriores versiones del simulador y sea comprensible para los futuros trabajos que se realicen sobre esta versión.

### 3.3.1. Herramienta de Simulación

El simulador básico a nivel de sistema para LTE fue desarrollado en la herramienta software Matlab®, gracias a su amplio soporte matemático, alta precisión, vasto soporte de funciones ya desarrolladas y todo esto sobre un entorno de desarrollo agradable y fácil de usar [35]. La segunda versión de este simulador empleará esta herramienta, permitiendo compatibilidad y fácil integración de los planificadores de recursos radio.

La interacción en Matlab® se realiza mediante instrucciones (comandos), y también mediante funciones y programas (scripts). Los objetos básicos con los cuales opera Matlab® son matrices. La especificación y asignación de cada variable la realiza Matlab® en forma dinámica y eficiente, por lo que no son necesarias las declaraciones de variables de algunos lenguajes de computación convencionales [36].

### 3.3.2. Cálculo de Capacidad

Los cálculos necesarios para determinar la capacidad tanto de la red como de cada usuario se describen en esta sección.

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

El cálculo de la distancia entre los eNB y cada UE se hace en tres dimensiones, considerando en la coordenada z las alturas de las antenas. La distancia entre cada UE en el escenario con posición  $x_{UEi}, y_{UEi}, z_{UEi}$  a cada eNB con posición  $x_{eNB}, y_{eNB}, z_{eNB}$  está definida en la ecuación 3.9:

$$d_{UEi} = \sqrt{(x_{eNB} - x_{UEi})^2 + (y_{eNB} - y_{UEi})^2 + (z_{eNB} - z_{UEi})^2} \quad (3.9)$$

Donde,

$x_{eNB}$  Es la ubicación del eNB en X [m].

$y_{eNB}$  Es la ubicación del eNB en Y [m].



$z_{eNB}$  Es la altura de la antena del eNB en Z [m].

$x_{UEi}$  Es la posición del UE en X [m].

$y_{UEi}$  Es la posición del UE en Y [m].

$z_{UEi}$  Es la altura de la antena del UE en Z [m].

- **Cálculo de SINR**

La SINR depende de la potencia de recepción de cada UE, de las potencias interferentes para dicho UE y de la potencia de ruido térmico del sistema, esta última tiene una relación directamente proporcional con el ancho de banda del sistema, es decir, a mayor ancho de banda, mayor será la potencia de ruido térmico y viceversa. Estas variables se relacionan mediante la ecuación 2.2 obteniendo el valor de SINR.

- **Obtención del TBS y CQI**

La tabla 3.5 muestra el valor del CQI y TBS para un determinado valor de referencia de SINR.

SINR de referencia	Indicador CQI	Índice TBS
Fuera de rango	0	0
-6,7	1	0
-4,7	2	0
-2,3	3	2
0,2	4	5
2,4	5	7
4,3	6	9
5,9	7	11
8,1	8	13
10,3	9	15
11,7	10	18
14,1	11	21
16,3	12	23
18,7	13	25
21	14	26
22,7	15	26

**Tabla 3.5** Índice TBS y CQI de acuerdo a SINR de referencia. Tomado de [21].



- **Cálculo de la prioridad de asignación**

Este parámetro se obtiene a partir de la ecuación 2.4 y depende del planificador de recursos radio escogido, como se indica en la sección 2.7.2.

- **Asignación de recursos**

El primer paso para la asignación de recursos es obtener el número de PRB disponibles según el ancho de banda escogido por el usuario, esto se describe en la tabla 2.1, después, se calcula el porcentaje de prioridad de asignación para cada usuario mediante la ecuación 3.9.

$$P\% = \frac{P_{\#UE}}{(\sum_1^i P_i)} * 100\% \quad (3.9)$$

Donde,

$P\%$	Porcentaje de prioridad de asignación.
$P$	Prioridad de asignación de cada usuario.
$P_{\#UE}$	Prioridad de asignación de determinado UE.

Una vez realizado este cálculo se encuentra el número de SRB correspondientes a cada UE de acuerdo a la ecuación 3.10.

$$\#SRB_{UE_i} = [SRB_{Total} * P\%_i] \quad (3.10)$$

Donde,

$\#SRB_{UE_i}$	Número de SRB para el $UE_i$
$P\%_i$	Porcentaje de prioridad de asignación del $UE_i$ .
$SRB_{Total}$	Número de SRB disponibles.

Si llegasen a sobrar SRB después del cálculo anterior, estos se asignan de acuerdo a la SINR de cada UE.

- **Cálculo de *throughput***

El número de SRB asignados, el índice TBS de cada UE y la recomendación TS-136.213 ([21]) permiten obtener el tamaño del bloque de transporte en bits, el cual determina el *throughput* o capacidad por usuario. Este proceso se repite para cada





usuario, de manera que el valor de *throughput* por sector, celda y sistema resulta de la sumatoria del *throughput* de los usuarios según corresponda.

### 3.3.3. Resumen de Parámetros de Entrada al Simulador

La tabla 3.6 muestra los parámetros del simulador que se pueden variar desde la interfaz gráfica de usuario para analizar la capacidad y cobertura del sistema.

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
Tipo de planificador	<i>Round Robin, Proportional Fair, Maximun Rate</i>
SINR objetivo (para planificador MR)	-4.7, 0.2, 4.3, 8.1, 11.7, 16.3, 21

**Tabla 3.6** Resumen parámetros de entrada al simulador

### 3.4. PRUEBAS

Durante las etapas anteriores de análisis de requisitos, diseño y generación de código, se construyó el simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados partiendo de un concepto teórico y llegando a una implementación tangible. La etapa siguiente son las pruebas, en la



cual se crean una serie de casos de prueba, con el fin de detectar errores, comprobar los diferentes módulos y verificar su correcta integración en el sistema desarrollado, asegurando que las entradas definidas producen resultados reales de acuerdo con los resultados requeridos [26].

Para la verificación del correcto funcionamiento de esta segunda versión del simulador se establecen casos de estudio que se presentan en el capítulo 4, con el fin de probar que los resultados obtenidos son fieles con los rangos de *throughput* estipulados por recomendaciones técnicas propias de la tecnología LTE [21], igualmente se emplean artículos en los que se exponen resultados del desempeño en capacidad de sistemas LTE empleando planificadores de recursos radio [24] [25], con los cuales es posible comprobar que los datos teóricos se adaptan a los resultados obtenidos con la herramienta software desarrollada.



## CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis del desempeño tanto en capacidad como en cobertura para un sistema LTE, empleando los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*.

Los resultados de la planificación de recursos radio se muestran a través de gráficas en las que se detalla la cantidad de recursos asignados a cada UE por parte de los diferentes tipos de planificadores.

Los resultados de capacidad se muestran a través de gráficas de *throughput* obtenidas según tipo de planificador de recursos radio, para cada UE, para cada celda y para el sistema.

Los resultados de cobertura se presentan mediante mapas de colores que indican los niveles de potencia percibida por los UE en el área del escenario de simulación.

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

- Función de distribución acumulativa (FDA): describe la probabilidad de que una variable aleatoria real  $X$  sujeta a cierta ley de distribución de probabilidad se sitúe en la zona de valores menores o iguales a  $x$  [37].
- Mediana: es el valor central de un grupo de valores de una variable aleatoria  $X$  ordenados por tamaño. Si la cantidad de términos es par, la mediana es el promedio de los dos valores centrales.
- Promedio o media ( $\mu$ ): es el promedio aritmético de las observaciones, es decir, el cociente entre la suma de todos los datos y el número total de datos.
- Varianza: es una medida de dispersión que permite identificar la diferencia promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su punto central (media) y se calcula como el promedio de las distancias cuadráticas entre los diferentes valores de la variable aleatoria y la media.



- Desviación estándar ( $\sigma$ ): permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media y se calcula como la raíz cuadrada de la varianza [38].

## 4.2. ESCENARIO DE ESTUDIO

El escenario de estudio es un espacio definido que simula un entorno real, permitiendo analizar detalladamente el funcionamiento de los planificadores de recursos radio en el sistema LTE en un determinado contexto. Para la selección de los parámetros del escenario de estudio se hacen las consideraciones mostradas a continuación:

- Las macroceldas son celdas de radio entre 1 y 20 Km y tienen una potencia de transmisión típica del eNB de 20W.
- El valor de SINR objetivo se establece en 4.3 dB, considerando que la comunicación entre el eNB y el UE se degrada si la SINR recibida es menor a este valor. Por otro lado el valor de la SINR mínima se establece en -6.7 dB, indicando que la comunicación entre el eNB y el UE se interrumpe si la SINR recibida está por debajo de este valor.
- Debido a que el comportamiento del sistema es similar en cada una de sus divisiones (celda, sector), el análisis de resultados se limita a la celda 1.
- Las gráficas de capacidad y las medidas estadísticas están basadas en el estudio de 500 subtramas simuladas, pero solo se muestran las primeras 10 subtramas para hacer un análisis más detallado de los resultados.
- El tipo de desvanecimiento se modela según la tabla 4.1.

Tipo de desvanecimiento	Modelado con la función	Media	Desviación estándar
Rápido	<i>Rayleigh</i>	0	4
Lento	<i>Log-normal</i>	0	4

Tabla 4.1 Modelado del desvanecimiento.



La tabla 4.2 presenta los parámetros del simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados escogidos para el escenario de estudio.

Parámetros	Valor
Disposición de las celdas	4 Celdas hexagonales
Patrón de antena	Antena directiva
Número de antenas transmisoras	1
Número de antenas receptoras	1
Reúso de frecuencia	1
Potencia de transmisión eNB [W]	20
Frecuencia de transmisión [MHz]	1900
Tipo de antena	Katherein 742215
Modelo de propagación	COST 231 macro urbano
Radio de la celda (Km)	1
Espacio entre subportadoras	15 KHz
Ancho de banda de un PRB	180 KHz
Ruido térmico ( $N_0$ )	-174dBm/Hz
Duración subtrama	1 mseg
Duración de la trama	10 mseg
Número de usuarios por sector (distribuidos aleatoriamente)	5

Tabla 4.2 Parámetros del escenario de estudio.



En la tabla 4.2 se establece en 5 el número de usuarios por sector, esto permite apreciar y entender mejor las gráficas que se presentan en los casos de estudio.

La tabla 4.3 presenta los casos de estudios considerados que permiten analizar el desempeño en capacidad y cobertura de los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* en un sistema LTE.

Caso de estudio	Descripción
<b>Caso de estudio 1</b>	Evalúa el desempeño de los planificadores de recursos radio en términos de la capacidad del sistema.
<b>Caso de estudio 2</b>	Evalúa el desempeño en capacidad de los planificadores de recursos radio variando el ancho de banda del sistema.
<b>Caso de estudio 3</b>	Evalúa el impacto del desvanecimiento lento y rápido en el desempeño de los planificadores de recursos radio tanto en capacidad como en cobertura para un sistema LTE.

**Tabla 4.3** Casos de estudio

#### 4.3. CASO DE ESTUDIO 1

El objetivo se centra en evaluar el desempeño de los planificadores de recursos radio en términos de la capacidad del sistema, se establece el ancho de banda del sistema en 20 MHz y se analiza bajo desvanecimiento lento.

El simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados despliega el modelo de las celdas y distribución de los UE, como se muestra en la figura 4.1. Esta permite hacer una predicción de los resultados, debido a la relación inversamente proporcional que existe entre la distancia de separación del eNB con un UE y la cantidad de recursos que puede obtener este último, es decir, a mayor distancia entre eNB y UE, menor es la potencia de recepción del UE y la cantidad de recursos obtenidos en este caso es baja, caso contrario sucede cuando

el UE se encuentra cerca al eNB, pues la potencia de recepción del UE es mayor y por tanto también lo es la cantidad recursos obtenidos.

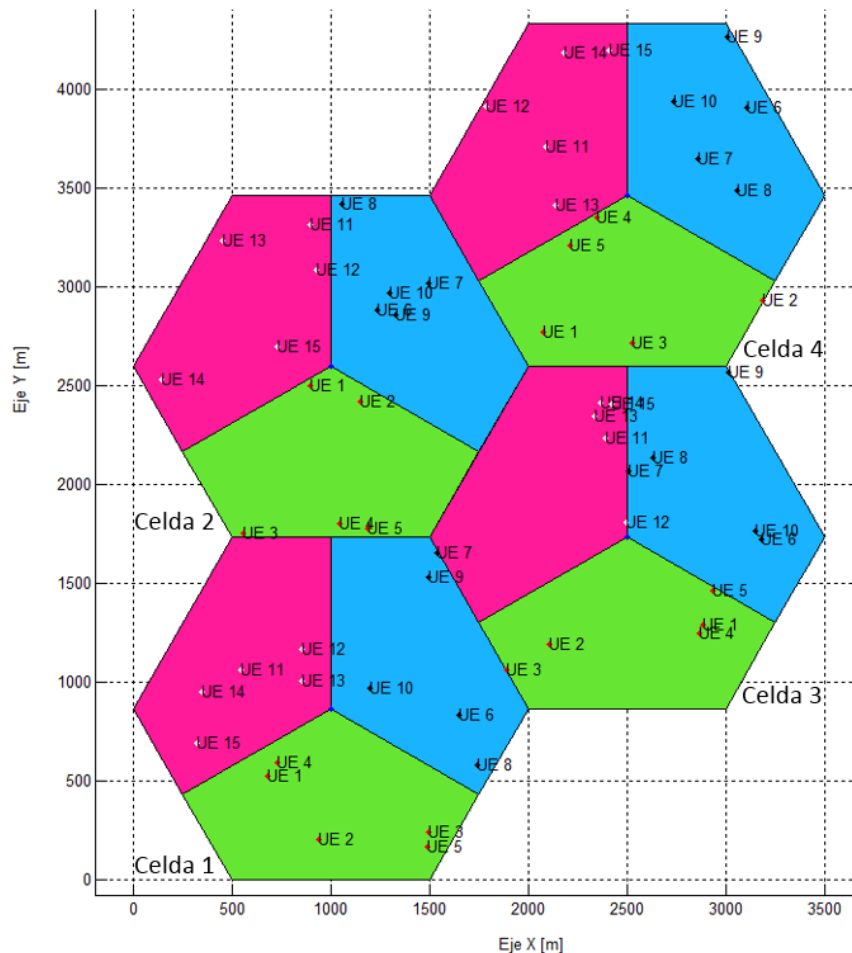


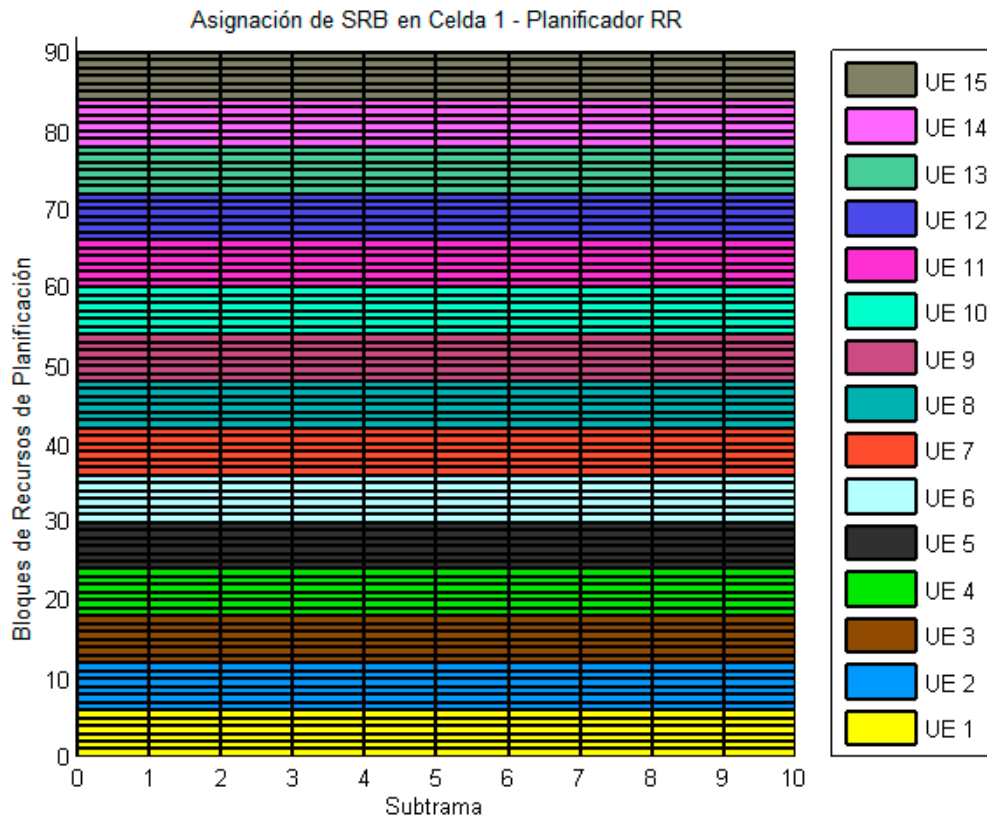
Figura 4.1 Escenario de simulación para el caso de estudio 1.

#### 4.3.1. Resultados y análisis según el tipo de planificador

En seguida se hace la descripción detallada de la asignación de SRB entre los UE de la celda 1, llevada a cabo por los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*.

- **Planificador *Round Robin***

En la figura 4.2 se muestra la distribución de los SRB en las 10 primeras subtramas simuladas, empleando el planificador de recursos radio RR. Se observa que la asignación de recursos radio entre los usuarios es equitativa, brindando a cada uno 6 SRB por subtrama.



**Figura 4.2** Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1.

Para este caso, los usuarios que tuvieron valores de SINR inferiores a la SINR objetivo (4.3 dB), obtuvieron un índice TBS menor o igual a 9, lo que limitó el *throughput* a un máximo de 0.936 Mbps como se muestra en la tabla 4.4. En cambio, los usuarios que tuvieron una SINR superior a la SINR objetivo, les correspondió un índice TBS mayor a 9, lo que delimitó el valor de *throughput* máximo en 2.984 Mbps [21]. Lo anterior permite deducir que con una misma cantidad de SRB asignados, se encontraron UE más eficientes en el aprovechamiento de los recursos, es decir, obtuvieron valores de *throughput* tres veces mayor a la de otros UE.



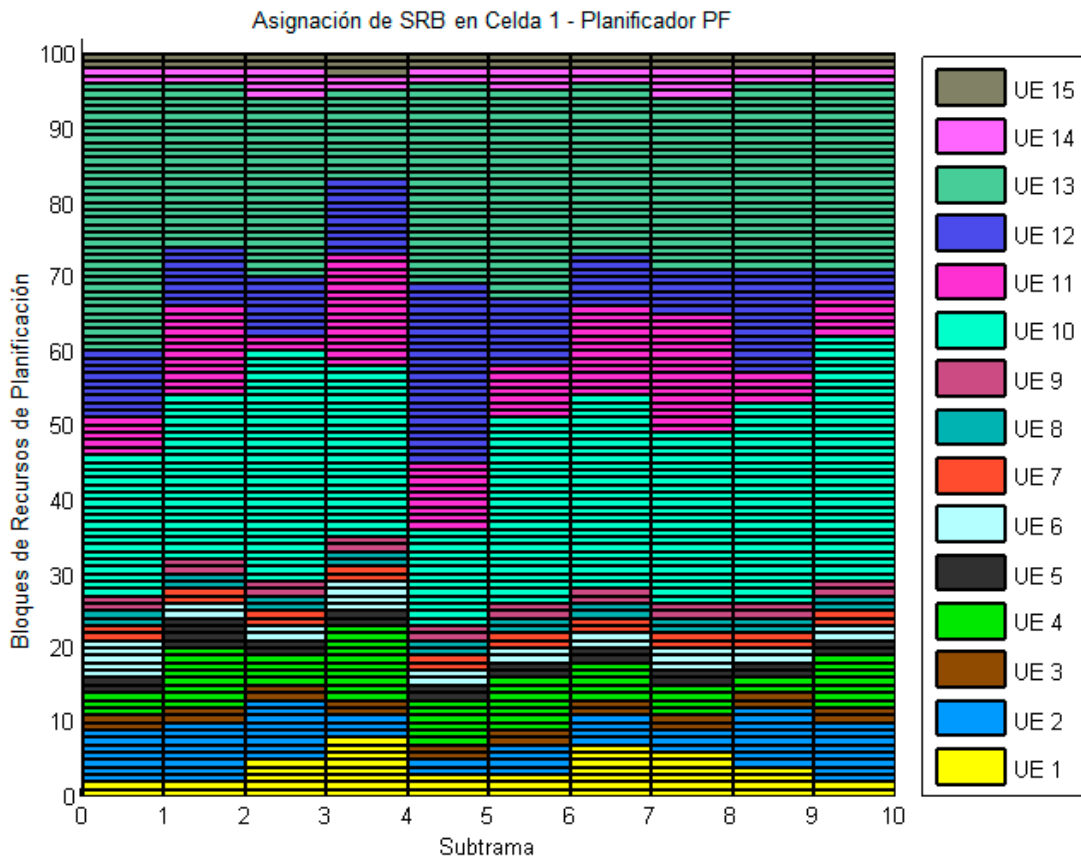


Índice TBS	Número de SRB					
	1	2	3	4	5	6
0	16	32	56	88	120	152
1	24	56	88	144	176	208
2	32	72	144	176	208	256
3	40	104	176	208	256	328
4	56	120	208	256	328	408
5	72	144	224	328	424	504
6	328	176	256	392	504	600
7	104	224	328	472	584	712
8	120	256	392	536	680	808
9	136	296	456	616	776	936
10	144	328	504	680	872	1032
11	176	376	584	776	1000	1192
12	208	440	680	904	1128	1352
13	224	488	744	1000	1256	1544
14	256	552	840	1128	1416	1736
15	280	600	904	1224	1544	1800
16	328	632	968	1288	1608	1928
17	336	696	1064	1416	1800	2152
18	376	776	1160	1544	1992	2344
19	408	840	1288	1736	2152	2600
20	440	904	1384	1864	2344	2792
21	488	1000	1480	1992	2472	2984

Tabla 4.4 Valor de *throughput* en Kbps según el índice TBS y SRB. Tomada de [21].

- **Planificador *Proportional Fair***

La figura 4.3 ilustra la distribución de los SRB del sistema a partir del planificador de recursos radio PF. Todos los UE obtuvieron por lo menos un SRB por subtrama lo que les garantizó un mínimo nivel de servicio, además, al UE 10 y al UE 13 les correspondió la mayor cantidad de SRB en cada subtrama, por su cercanía al eNB y su ubicación en la región de mayor ganancia de la antena, de acuerdo a la figura 4.1, obteniendo los mejores niveles de SINR. En contraste, a los UE que tuvieron los valores más bajos de SINR, solo les concedió 2 o 3 SRB por subtrama.

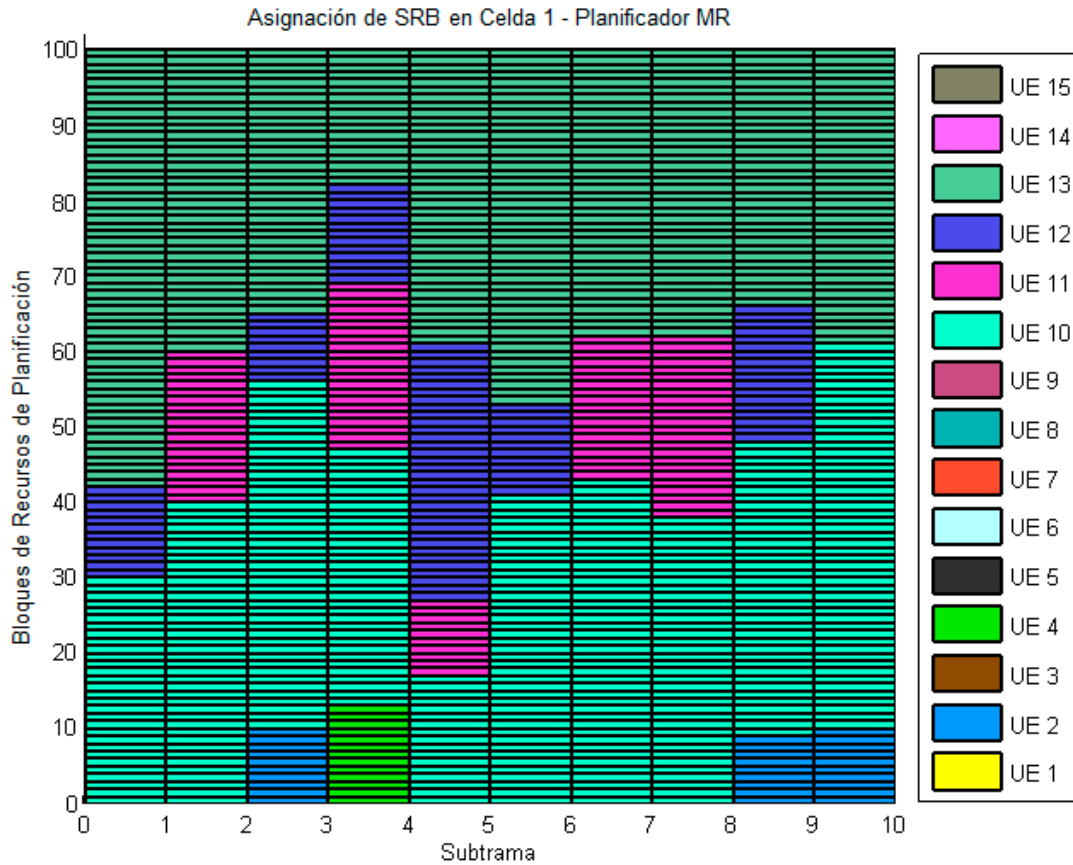


**Figura 4.3** Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1.

- **Planificador *Maximun Rate***

En la figura 4.4 se tiene la distribución de SRB realizada por el planificador MR. Este solo asignó recursos a los UE que lograron obtener una SINR mayor a la SINR objetivo del sistema (4.3 dB), al resto no le prestó el servicio.

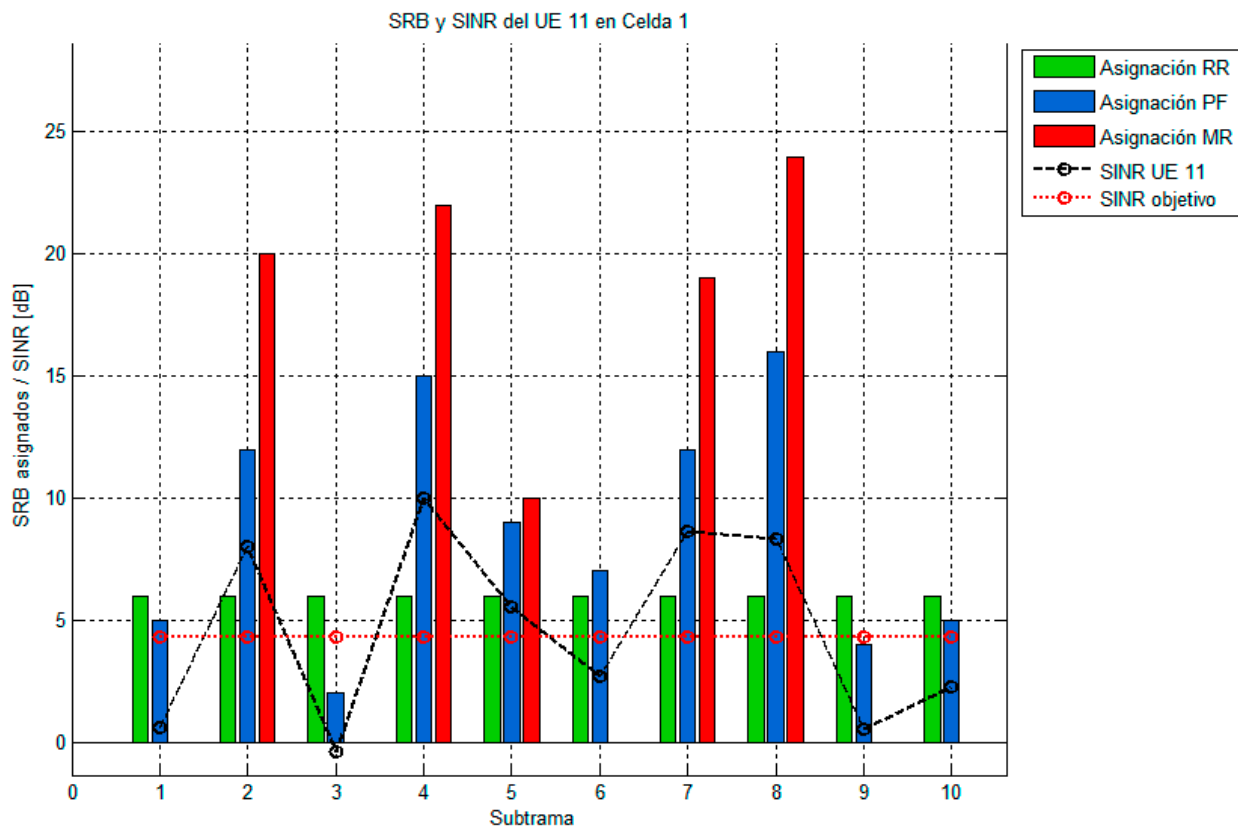
El planificador MR repartió en cada subtrama la mayoría de SRB disponibles entre el UE 10 y el UE 13, de modo que la máxima cantidad de SRB recibida en las 10 subtramas simuladas fue de 42 y 57 respectivamente. Por su parte, a los UE 2, UE 4, UE 11 y UE 12 se les asignó recursos de forma intermitente, y a los UE restantes no se les asignó SRB en ninguna subtrama.



**Figura 4.4** Asignación de SRB por el planificador MR en celda 1.

### 4.3.2. Resultados y análisis para un UE

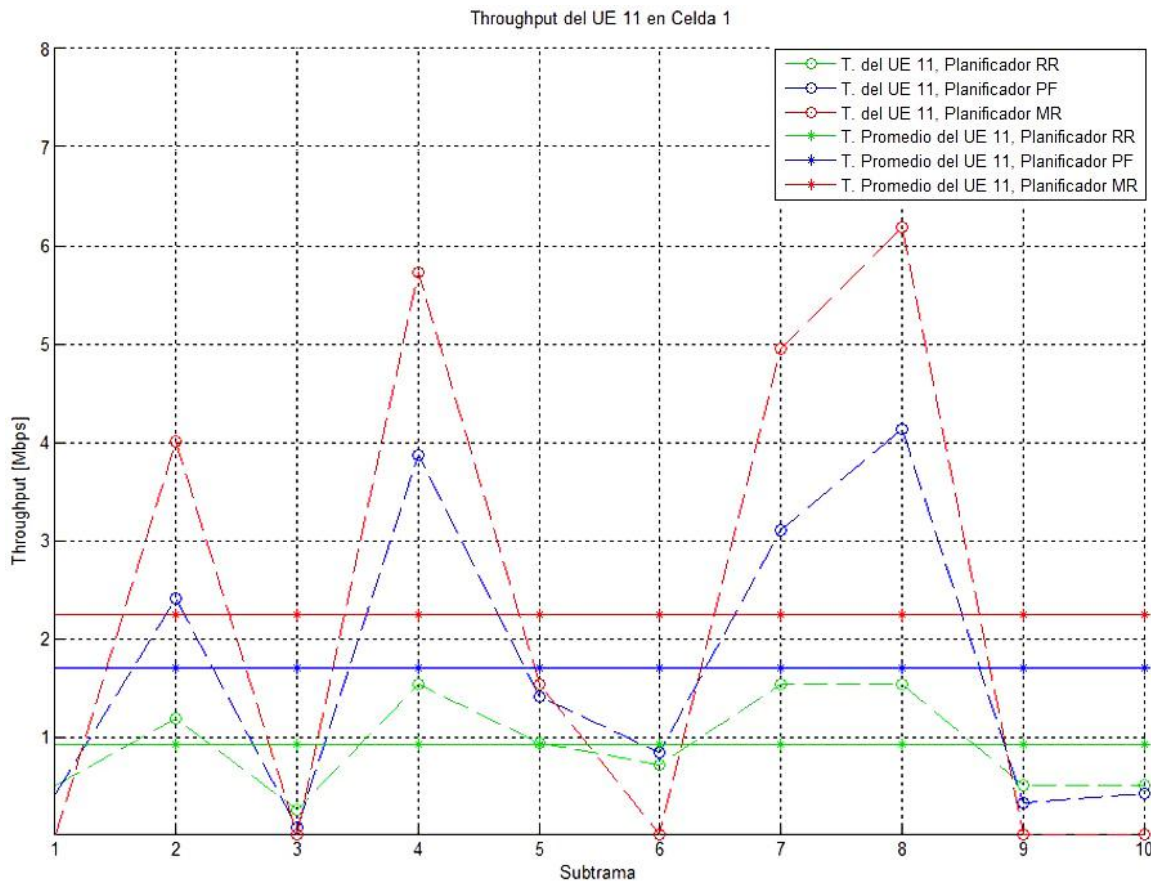
La figura 4.5 muestra la SINR y la cantidad de SRB repartidos al UE 11. La SINR tuvo un comportamiento dinámico debido al desvanecimiento lento del sistema, específicamente en las subtramas 1, 3, 6, 9 y 10 presentó valores inferiores a la SINR objetivo del sistema. De igual forma, se puede examinar la relación de la SINR con los SRB que le fueron asignados: el planificador RR le asignó la misma cantidad de SRB sin tener en cuenta su SINR, el planificador PF hizo una asignación de SRB más eficiente pues en cada subtrama intenta señirse al nivel de SINR y finalmente el planificador MR le asignó SRB cuando sus niveles de SINR superaron la SINR objetivo.



**Figura 4.5** SRB asignados y SINR del UE 11 en celda 1.

La distribución de los SRB para el UE 11 se describe a continuación: el planificador RR le asignó 6 SRB en cada subtrama, el planificador PF le entregó entre 2 y 16 SRB según su SINR, y el planificador MR le repartió entre 10 y 24 SRB pero solo en la mitad de las subtramas simuladas.

En la figura 4.6 se presenta el *throughput* del UE 11 analizado en la figura 4.5. Los valores más altos de *throughput* se tuvieron con el planificador MR y los más bajos con RR, mientras que PF presentó un valor intermedio respecto a los otros planificadores.



**Figura 4.6** *Throughput* del UE 11 en celda 1.

El *throughput* promedio del UE 11 con los planificadores MR, PF y RR correspondió a valores de 2.3 Mbps, 1.7 Mbps y 0.9 Mbps, lo cual significa que el planificador MR empleó los 100 SRB disponibles con mayor eficiencia, a pesar de que algunos valores de *throughput* fueron iguales a 0 Mbps. El planificador PF le aseguró el servicio en todas las subtramas y su *throughput* promedio fue 1.8 veces mayor al de RR, siendo este último el menos eficiente.

### 4.3.3. Resultados y análisis para una celda

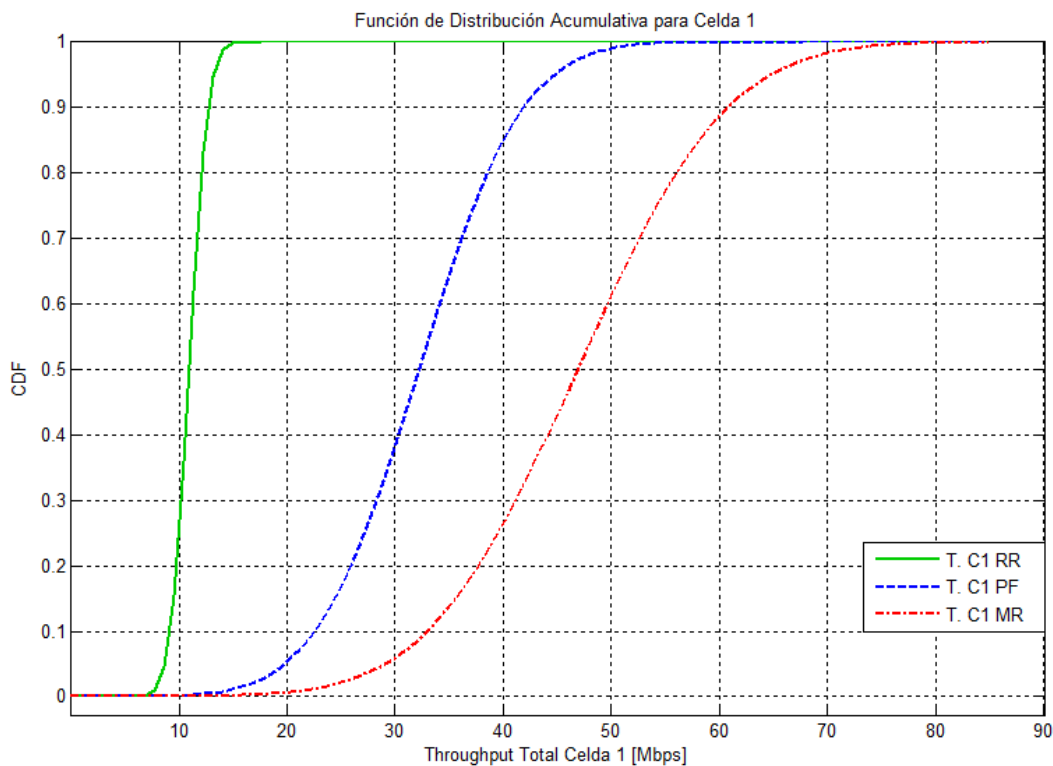
En la figura 4.7 se presenta la Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) para el *throughput* de la celda 1.

Con el planificador RR la probabilidad de obtener valores de *throughput* mayores a 20 Mbps fue la más baja de todos, debido a que los UE que tuvieron una SINR por debajo de la SINR objetivo, subutilizaron los SRB asignados por el eNB.



Con el planificador MR, se alcanzó la probabilidad más alta de obtener un *throughput* por encima de 40 Mbps, pues los SRB se asignaron eficientemente a los UE con una SINR superior a la objetivo, permitiéndoles alcanzar *throughput* altos en cada subtrama, sin embargo, varios usuarios del sistema no fueron servidos, lo cual es inaceptable en todo sistema celular.

El planificador PF tuvo un balance entre los planificadores de recursos radio RR y MR, pues este le asignó una cantidad de SRB a cada UE proporcional a sus condiciones de canal.



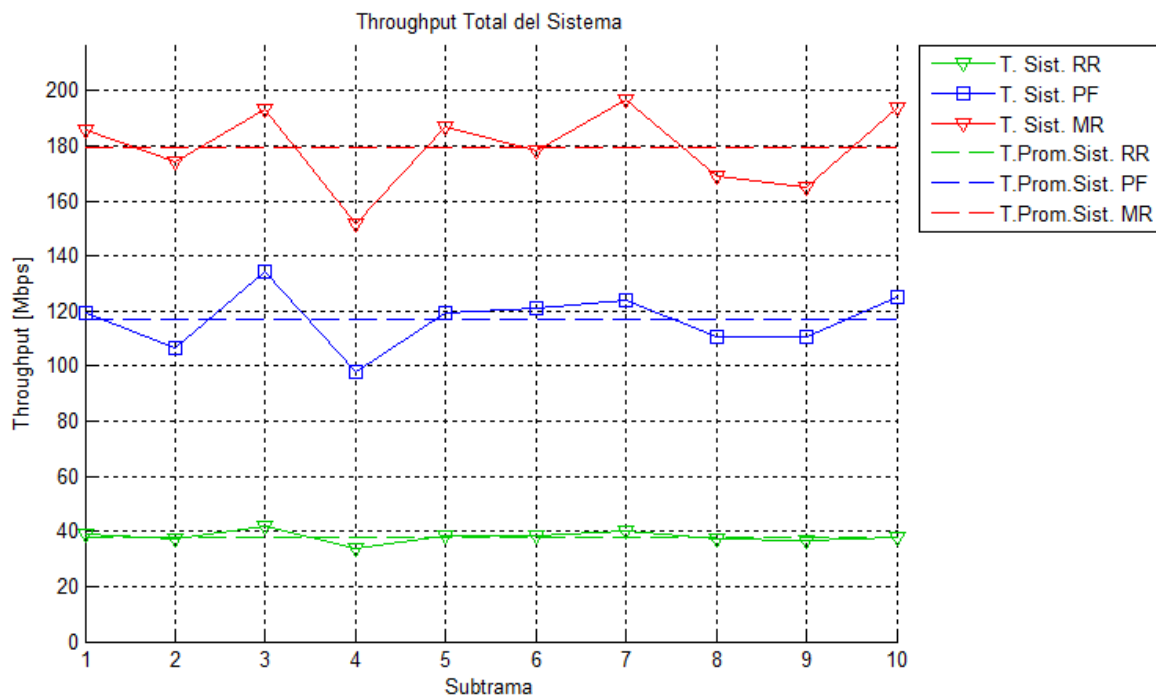
**Figura 4.7** Función de distribución acumulativa del *throughput* total en celda 1.

Además, la figura 4.7 muestra la probabilidad de que con un determinado planificador se puedan alcanzar ciertos valores de *throughput* en la celda 1, por ejemplo, existe una probabilidad del 90% de que con los planificadores RR, PF y MR se alcance un *throughput* menor o igual a 13 Mbps, 42 Mbps y 61 Mbps respectivamente.



#### 4.3.4. Resultados y análisis del sistema

El *throughput* promedio del sistema con el planificador MR fue de 180 Mbps, con el planificador PF fue de 119 Mbps y con el planificador RR fue de 39 Mbps como se muestra en la figura 4.8.



**Figura 4.8** *Throughput* total del sistema en cada subtrama.

En la tabla 4.5 se presentan los valores de la media, mediana y desviación estándar para el *throughput* total del sistema.

Tipo de planificador	Media <i>Throughput</i> (Mbps)	Mediana <i>Throughput</i> (Mbps)	Desv. Estándar <i>Throughput</i> (Mbps)
<b>Round Robin</b>	39.433	39.467	0.912
<b>Proportional Fair</b>	119.254	119.887	6.939
<b>Maximun Rate</b>	180.278	183.845	12.503

**Tabla 4.5** Medidas estadísticas del *throughput* total en el sistema.



Los valores más altos tanto de la media como mediana están alrededor de 181.5 Mbps y corresponden al planificador MR, siendo 4.5 veces mayor al valor de 39.4 Mbps del planificador RR, mientras que el planificador PF alcanza valores de 119.5 Mbps triplicando la media y mediana del planificador RR.

La desviación estándar muestra que tan alejados están los valores de *throughput* de la media, lo que significa que los valores de *throughput* con el planificador MR varían en promedio 12.5 Mbps por encima o por debajo de 180.2 Mbps, es decir, tiene una fluctuación mayor respecto a los otros planificadores, ya que con el planificador PF varía en promedio 6.9 Mbps alrededor de 119.2 Mbps, y con el planificador RR se presenta la menor variación siendo de 0.9 Mbps alrededor de 39.4 Mbps.

Teniendo en cuenta el análisis y los resultados obtenidos en este caso de estudio, se puede concluir que en un sistema LTE los mayores valores de *throughput* son obtenidos con el planificador MR, seguido por el planificador PF y en último lugar el planificador RR.

#### 4.4. CASO DE ESTUDIO 2

El objetivo es evaluar el desempeño en capacidad de un sistema LTE cuando se varía el ancho de banda, empleando los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*. Se establecieron los parámetros definidos en la tabla 4.2, los anchos de banda son 5 MHz y 15 MHz<sup>5</sup>.

Para este caso de estudio el escenario generado por la herramienta desarrollada se muestra en la figura 4.9.

---

<sup>5</sup>Las figuras de este caso de estudio se dividen en parte **(a)** y **(b)**, en las cuales se consignan los resultados obtenidos para el ancho banda de 5 MHz y 15 MHz respectivamente.



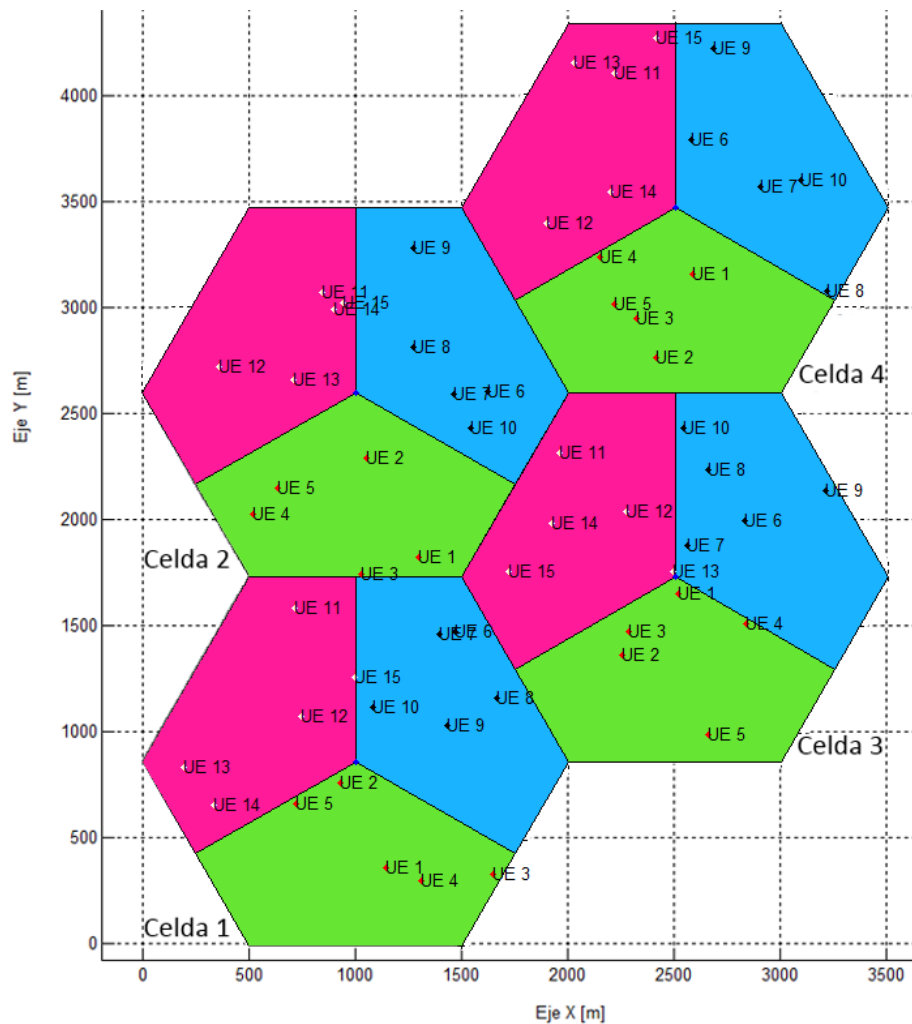


Figura 4.9 Escenario de simulación para el caso de estudio 2.

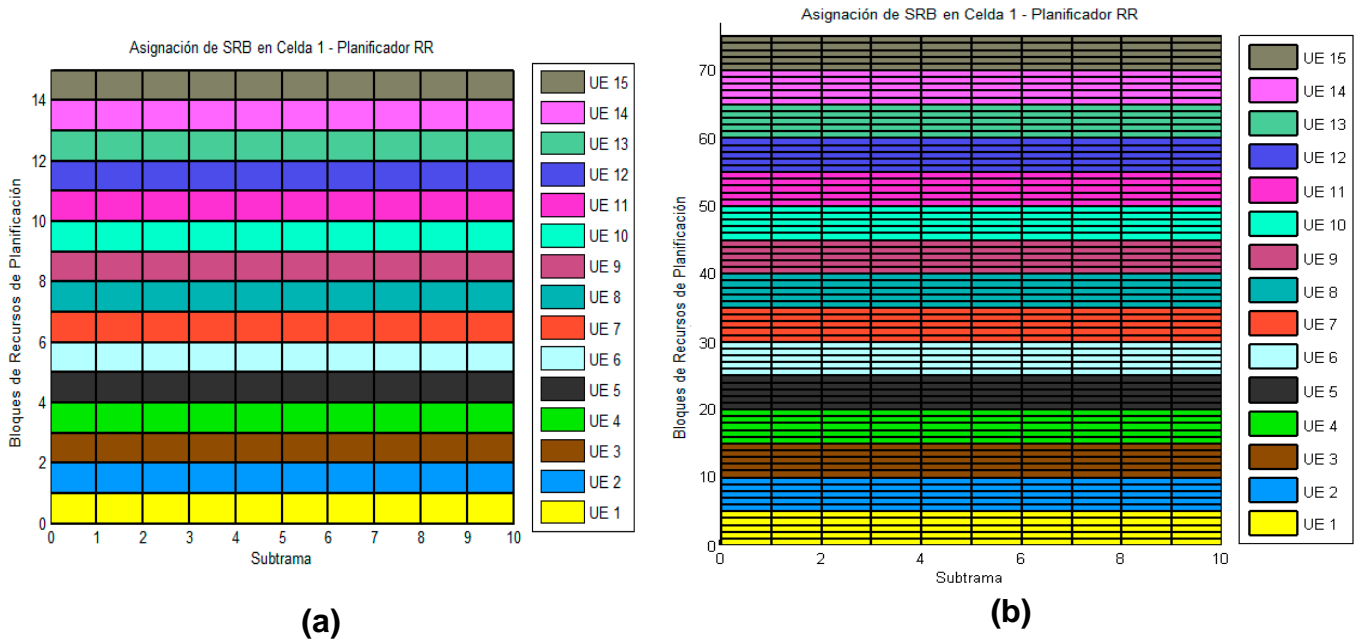
#### 4.4.1. Resultados y análisis según el tipo de planificador

A continuación se hace una descripción detallada de la asignación de SRB llevada a cabo por los planificadores de recursos radio LTE para los 15 UE de la celda 1, empleando los anchos de banda de 5 MHz y 15 MHz.

- **Planificador *Round Robin***

En este caso se le asignó a todos los UE del sistema la misma cantidad de SRB, sin tener en cuenta sus condiciones de canal radio como se muestra en la figura 4.10. Se observa que el planificador RR no hizo una asignación eficiente cuando el ancho de banda fue de 5 MHz, pues solo asignó 15 de los 25 SRB disponibles, debido a que dividió la cantidad de SRB entre el número total de UE obteniendo 1.66 SRB/UE

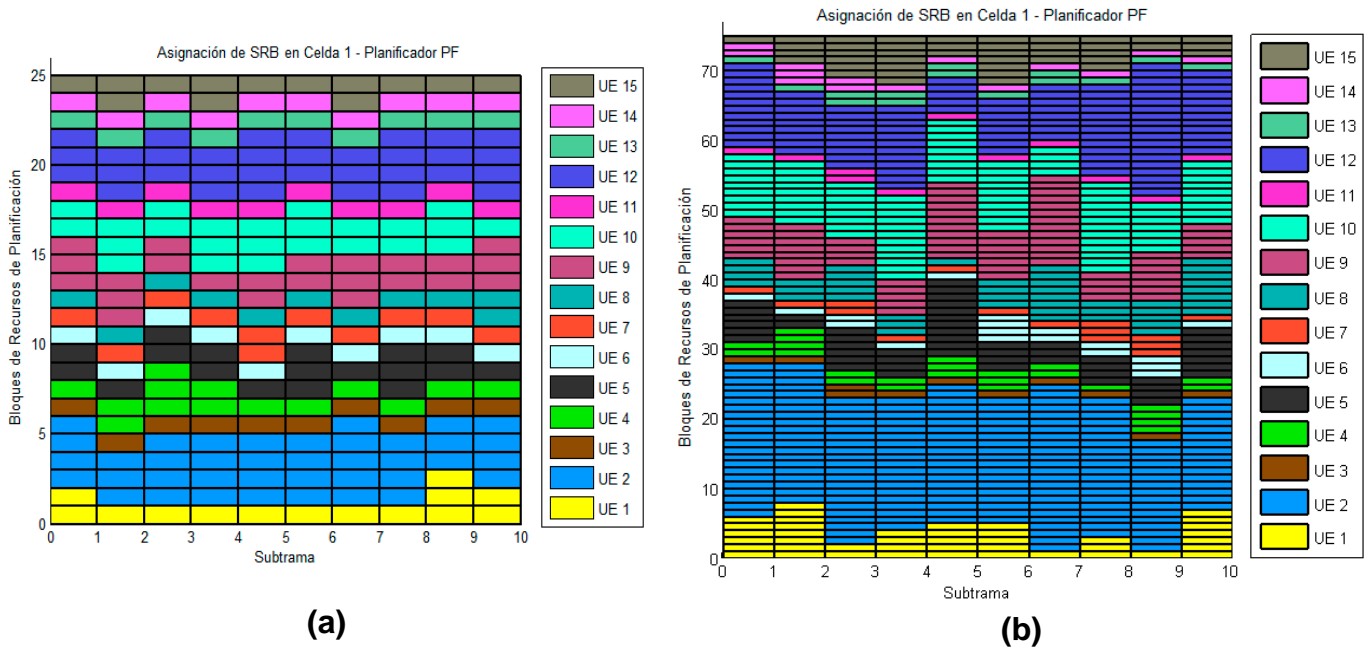
y por lo tanto asignó la parte entera inferior, correspondiente a 1 SRB/UE, con lo cual el sistema fue subutilizado, por otra parte, con el ancho de banda de 15 MHz no ocurrió el mismo problema, pues el número de UE y SRB disponibles son múltiplos, lo cual asegura que todos los SRB sean asignados.



**Figura 4.10** Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1.

### Planificador *Proportional Fair*

En la figura 4.11 se muestra la asignación de recursos radio llevada a cabo por este planificador. Al variar el ancho de banda en el sistema se tiene una cantidad diferente de SRB para asignar, cuando se emplea un ancho de banda de 5 MHz se tienen 25 SRB disponibles, el planificador PF asigna 1 SRB a cada UE y seguidamente asigna los 10 SRB restantes, teniendo como criterio dar una mayor prioridad de asignación a los UE que presentan los valores de SINR más altos, por otra parte, cuando se emplea un ancho de banda de 15 MHz se tienen 75 SRB disponibles, después de asignar 1 SRB a cada UE se tienen 60 SRB restantes, los cuales son asignados siguiendo el criterio anterior.



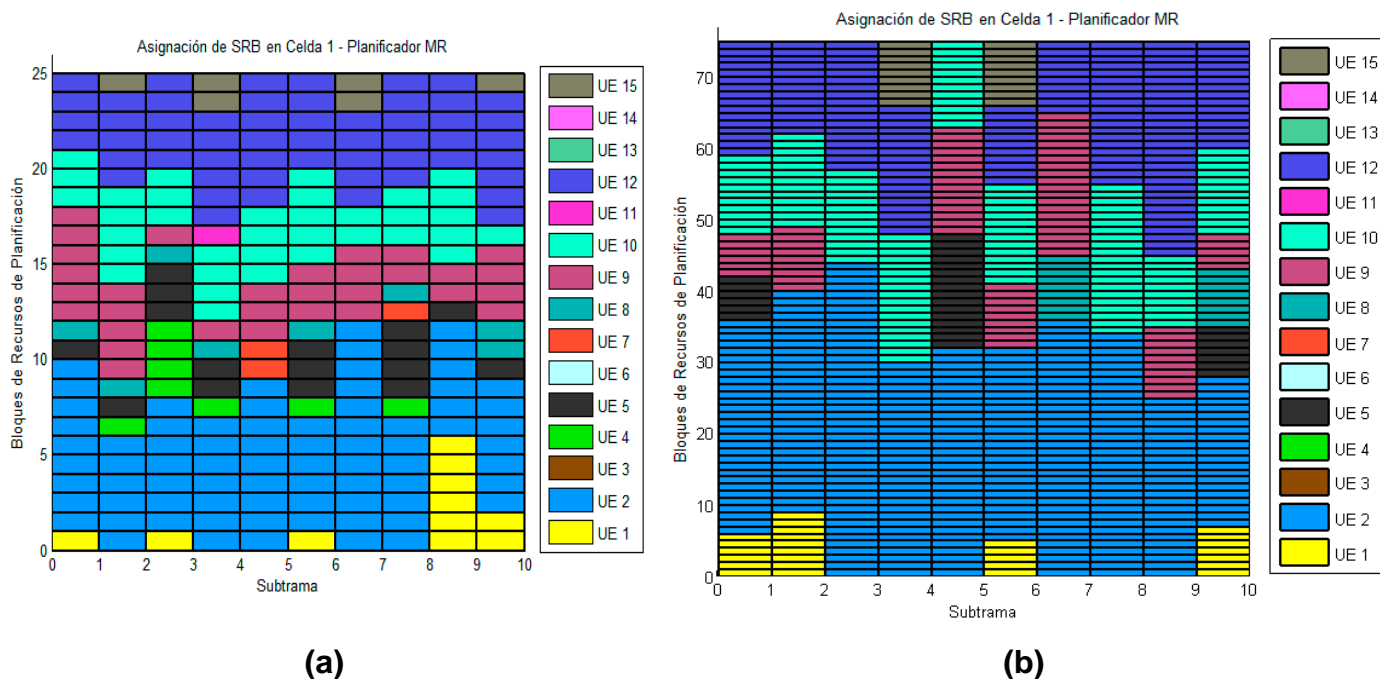
**Figura 4.11** Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1.

La asignación de recursos radio por parte del planificador PF es más eficiente cuanto mayor sea el ancho de banda del sistema, ya que se tienen más SRB disponibles y se le puede asignar una mayor cantidad a los UE que presenten los niveles de SINR más elevados, con lo cual el desempeño en capacidad del sistema aumenta notablemente.

- **Planificador *Maximun Rate***

En este caso, los SRB disponibles de cada ancho de banda solo son asignados a los usuarios cuya SINR sea superior a la SINR objetivo. Los UE 2, UE 10 y UE 12 tienen los niveles más altos de SINR en la celda 1 y por lo tanto se les asignó la mayor cantidad de SRB en cada subtrama como se puede observar en la figura 4.12.

Teniendo en cuenta que el planificador MR descarta en el proceso de asignación a los UE que no superan la SINR objetivo, este tiene una mayor cantidad de SRB para asignar entre los UE que superan dicho nivel, con lo cual el sistema trabaja en límites cercanos a su máxima capacidad, dado que los UE pueden alcanzar altas tasas de transmisión de datos.

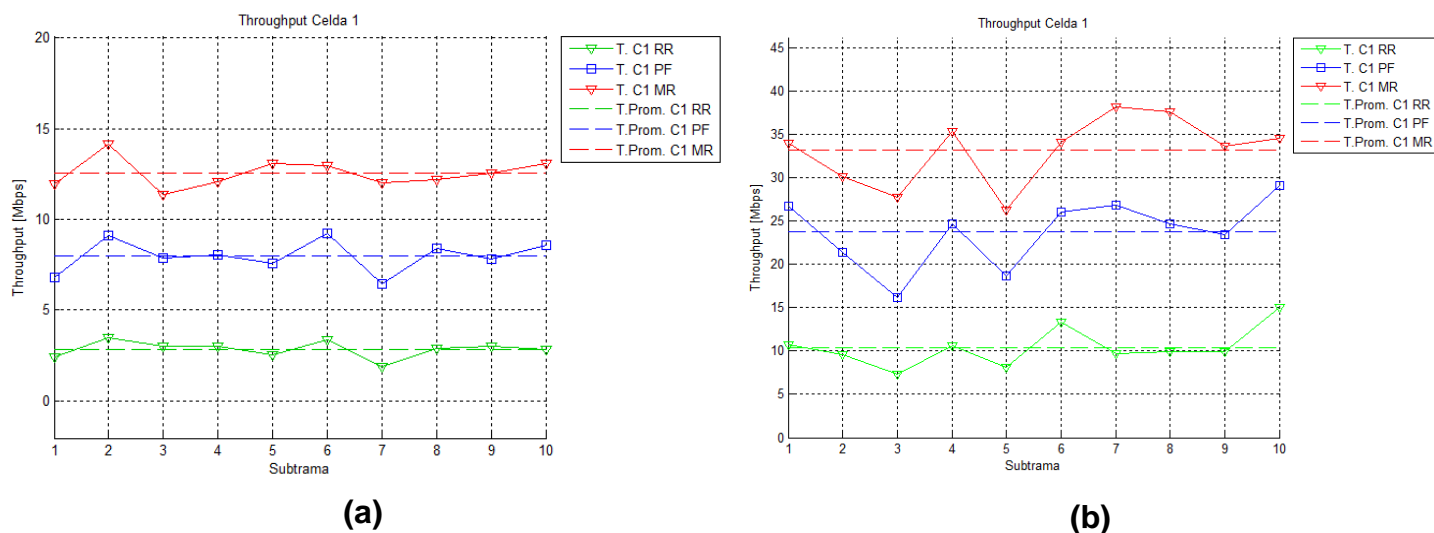


**Figura 4.12** Asignación de SRB por el planificador MR en celda 1.

Al igual que con el planificador PF, el planificador MR es más eficiente cuanto mayor sea el ancho de banda del sistema, ya que se tienen más SRB disponibles para asignar a los UE cuya SINR supere el nivel de la SINR objetivo.

#### 4.4.2. Resultados y análisis para una celda

En la celda 1, cuando se empleó un ancho de banda de 5 MHz y se tuvieron 25 SRB disponibles, el planificador MR permitió alcanzar un *throughput* promedio de 12.7 Mbps, mientras que con los planificadores PF y RR se alcanzó un *throughput* promedio de 7.9 Mbps y 3 Mbps respectivamente, por otra parte, cuando se empleó un ancho de banda de 15 MHz y los SRB disponibles fueron 75, el planificador MR permitió alcanzar un *throughput* promedio de 34 Mbps, y los planificadores PF y RR permitieron alcanzar un *throughput* promedio de 24.6 Mbps y 10.2 Mbps respectivamente como se muestra en la figura 4.13.



**Figura 4.13** Throughput total de celda 1 en cada subtrama.

En la tabla 4.6 se presenta el resumen del *throughput* promedio que se alcanzó con cada tipo de planificador en la celda 1.

Tipo de Planificador	Throughput Promedio (Mbps)	
	BW = 5 MHz	BW = 15 MHz
<b>Round Robin</b>	3.023	10.235
<b>Proportional Fair</b>	7.945	24.621
<b>Maximun Rate</b>	12.768	34.085

**Tabla 4.6** Throughput promedio en celda 1.

Se observa que al variar el ancho de banda del sistema se determina el *throughput* que este puede alcanzar, por ejemplo, al emplear un ancho de banda de 5 MHz el cual posee pocos SRB, el máximo *throughput* promedio que se puede alcanzar es de 12.7 Mbps, sin embargo, si se emplea el ancho de banda de 15 MHz, el *throughput* promedio máximo que se puede alcanzar es de 34 Mbps.

#### 4.4.3. Resultados y análisis del sistema

La tabla 4.7 presenta los valores de media, mediana y desviación estándar del *throughput* en el sistema según el tipo de planificador, para los anchos de banda de 5 MHz y 15 MHz.

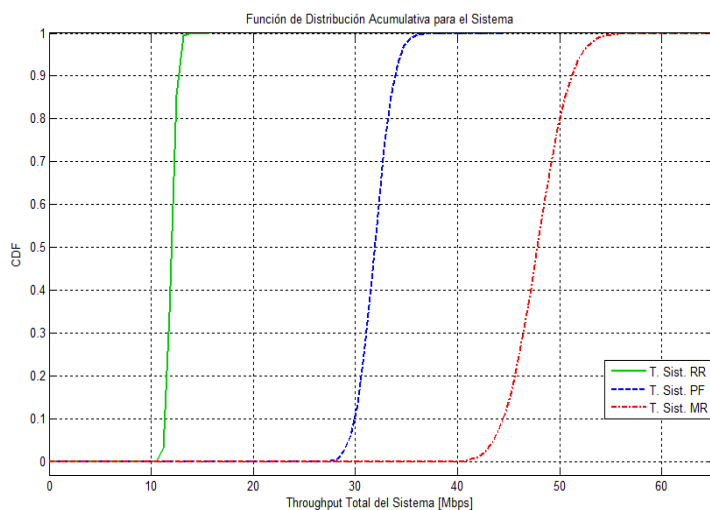


Tipo de Planificador	Media <i>Throughput</i> (Mbps)		Mediana <i>Throughput</i> (Mbps)		Desv. Estándar <i>Throughput</i> (Mbps)	
	BW 5MHz	BW 15MHz	BW 5MHz	BW 15MHz	BW 5MHz	BW 15MHz
<b>RR</b>	11.875	47.132	11.975	46.563	0.437	1.679
<b>PF</b>	31.263	98.115	31.452	97.458	1.322	6.354
<b>MR</b>	48.576	130.236	48.634	128.64	2.058	7.854

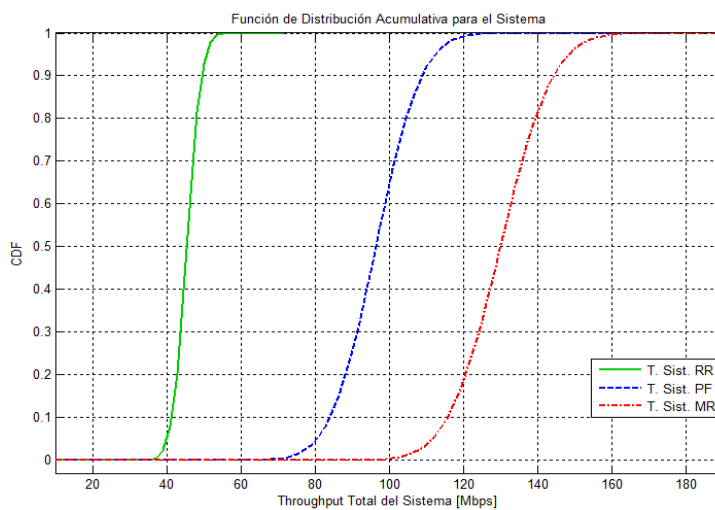
Tabla 4.7 Medidas estadísticas del throughput total en el sistema.

En la tabla 4.7 se observa que al emplearse un ancho de banda de 5 MHz los planificadores MR, PF y RR permitieron alcanzar un *throughput* promedio de 48.5 Mbps, 31.2 Mbps y 11.8 Mbps respectivamente, por otra parte, cuando se empleó un ancho de banda de 15 MHz, el planificador MR permitió alcanzar un *throughput* promedio de 130.2 Mbps, y los planificadores PF y RR permitieron alcanzar un *throughput* promedio de 98.1 Mbps y 47.1 Mbps respectivamente.

La figura 4.14 presenta la función de distribución acumulativa del *throughput* en el sistema cuando se emplea los anchos de banda de 5MHz y 15MHz.



(a)



(b)

Figura 4.14 Función de distribución acumulativa del *throughput* total en el sistema.



Se observa que para los anchos de banda de 5 MHz y 15 MHz, el planificador MR tuvo las probabilidades más altas de alcanzar un determinado valor de *throughput* en comparación a los planificadores PF y RR, describiendo un comportamiento similar al de la celda 1.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y análisis realizado en las secciones 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3, se comprobó que al seleccionar el mismo tipo de planificador de recursos radio, ya sea RR, PF o MR, el desempeño en capacidad (medido en *throughput*) que se puede alcanzar en el sistema es mayor, cuanto mayor sea el ancho de banda empleado.

#### 4.5. CASO DE ESTUDIO 3

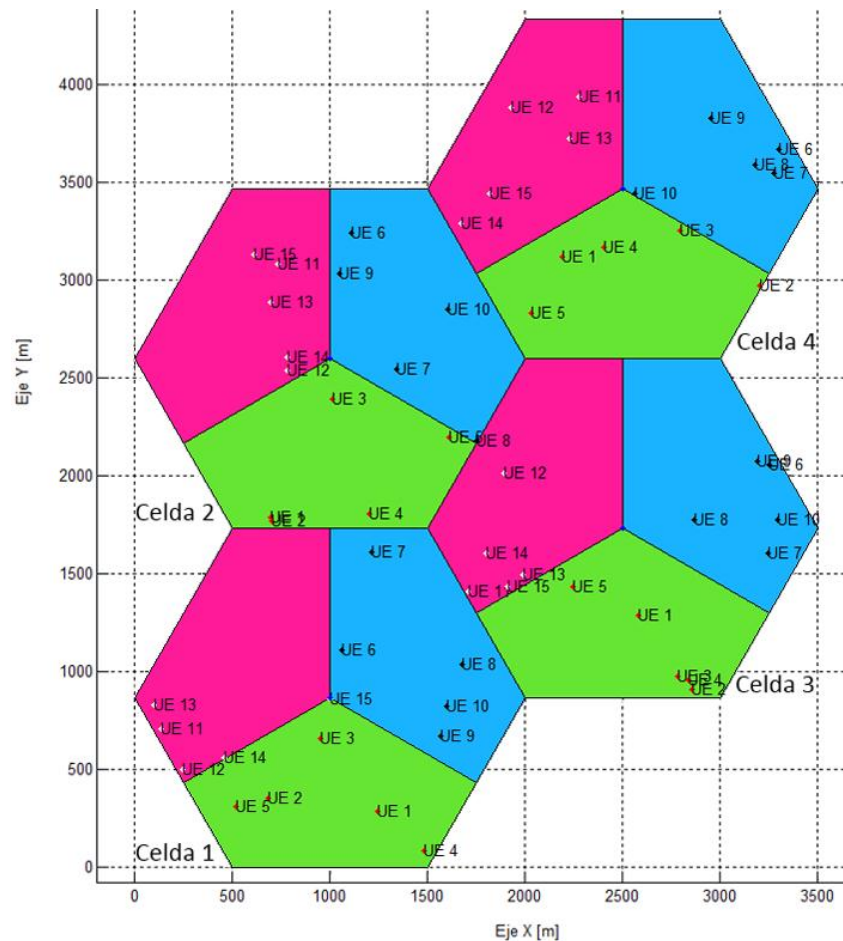
El objetivo es evaluar el impacto del desvanecimiento lento y rápido en el desempeño tanto en capacidad como en cobertura para un sistema LTE, empleando los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*. Se establecieron los parámetros definidos en la tabla 4.2, y se fijó el ancho de banda en 10MHz (50 SRB).

Con el fin de realizar un análisis coherente y apreciar claramente las incidencias del desvanecimiento lento y rápido en el desempeño en cobertura y en capacidad del sistema se simularon ambos efectos en el mismo escenario<sup>6</sup>.

El escenario de simulación generado por la herramienta desarrollada se muestra en la figura 4.15.

---

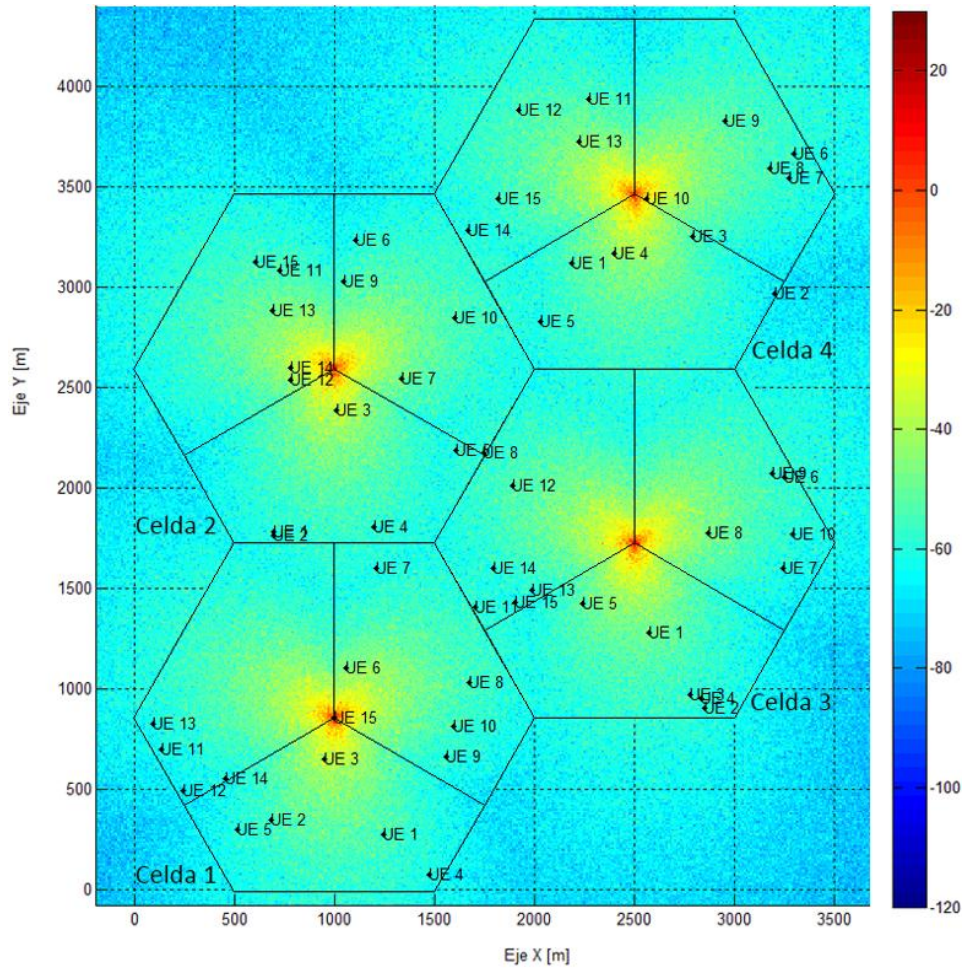
<sup>6</sup> Para este caso de estudio, las figuras se dividen en parte **(a)** y **(b)** en las cuales se consignan los resultados obtenidos bajo los efectos del desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido, respectivamente.



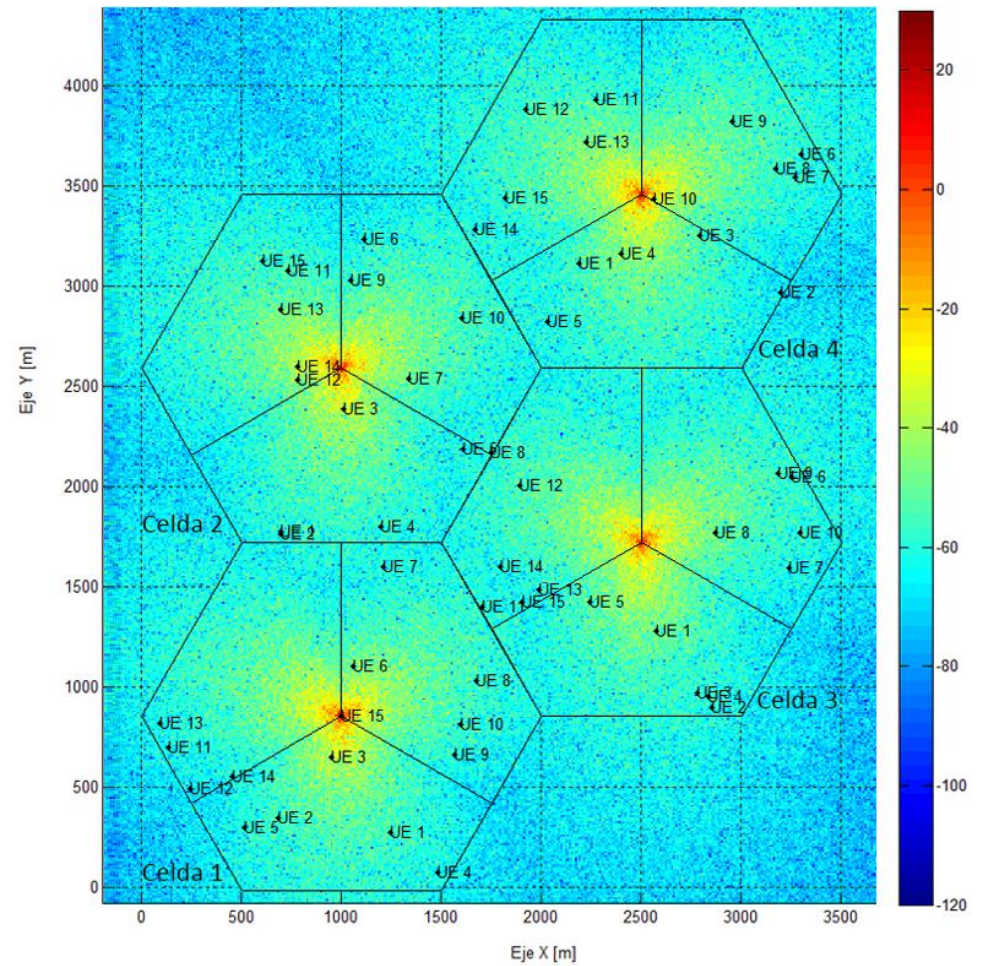
**Figura 4.15** Escenario de simulación para el caso de estudio 3.

En la figura 4.16 se presentan los mapas de cobertura para el escenario de simulación, se observa una relación inversamente proporcional entre el radio de la celda y la potencia promedio percibida por los UE, tanto para el desvanecimiento lento como para el desvanecimiento rápido.





(a)



(b)

Figura 4.16 Mapa de cobertura del escenario de simulación con los efectos de desvanecimiento lento y rápido.



En la figura 4.16 (a) se muestra el sistema bajo los efectos del desvanecimiento lento, se observa que predominan las zonas en tono verde claro y azul claro correspondientes a un rango de potencias percibidas entre -35 dBm y -70 dBm, y en zonas muy cercanas al eNB predominan los tonos amarillo y rojo claro, representando rangos de potencia percibida entre -30 dBm y 10 dBm.

En la figura 4.16 (b) se presenta el sistema con desvanecimiento rápido, en este caso se observa un comportamiento similar al descrito para el desvanecimiento lento, sin embargo, aparecieron pequeñas zonas en tono azul oscuro que corresponden a rangos de potencia percibida entre -90 dBm y -110 dBm, esto debido a las atenuaciones profundas y fluctuaciones que sufre la señal por la multitrayectoria, lo que causó un efecto de pixelado en toda la zona de cobertura.

#### 4.5.1. Resultados y análisis según el tipo de planificador

En esta sección se hace una descripción detallada de la asignación de SRB por parte de los planificadores de recursos radio LTE en la celda 1, bajo los efectos del desvanecimiento lento y rápido.

- **Planificador *Round Robin***

En este caso, al no tener en cuenta las condiciones de canal radio de los UE, los efectos causados en el sistema por el desvanecimiento lento o rápido no afectaron la asignación de recursos radio llevada a cabo por este planificador, asignándoles la misma cantidad de SRB, como se muestra en la figura 4.17.

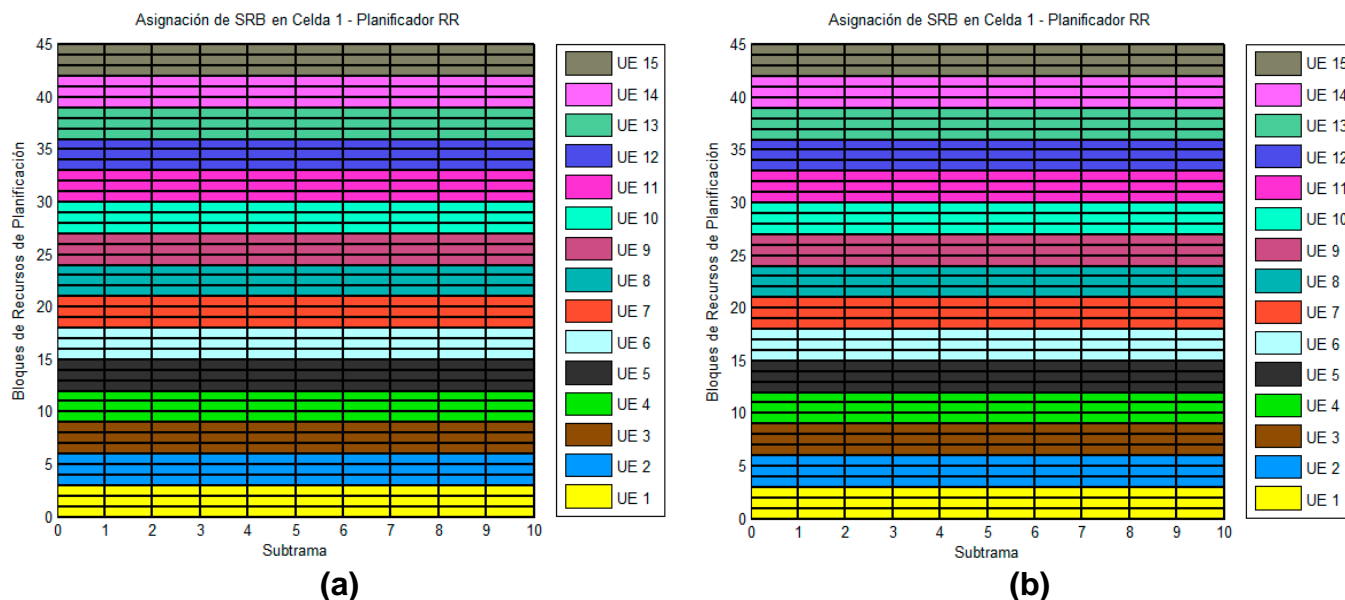
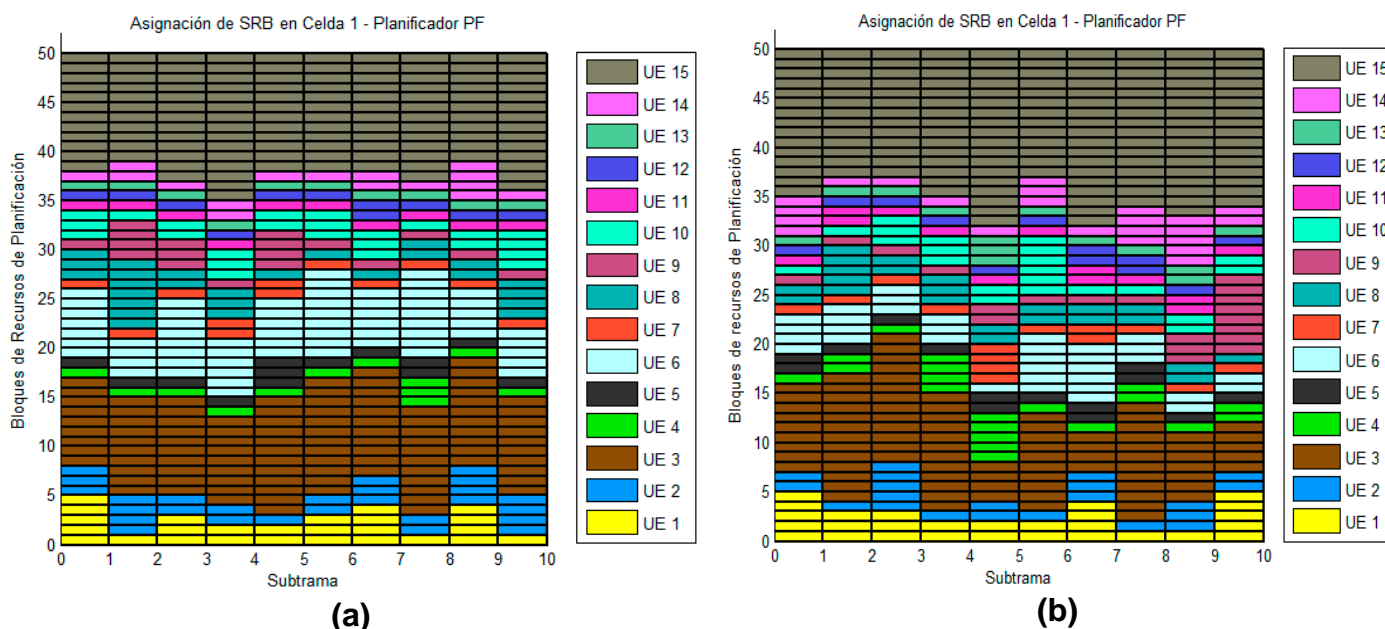


Figura 4.17 Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1.

- **Planificador *Proportional Fair***

En la figura 4.18 se muestra la asignación de recursos radio realizada por este planificador, se observa que bajo los efectos del desvanecimiento rápido, aquellos UE que tuvieron más atenuación y fluctuaciones en los niveles de señal recibieron menos SRB comparado con la asignación que hizo el planificador PF bajo desvanecimiento lento. Como consecuencia, los UE que no se vieron muy afectados por el desvanecimiento rápido, obtuvieron algunos SRB adicionales a los conseguidos cuando el sistema presentó desvanecimiento lento.



**Figura 4.18** Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1.

- **Planificador *Maximun Rate***

En la figura 4.19 se muestra la asignación de recursos radio llevada a cabo por el planificador MR. Cuando el sistema presentó desvanecimiento lento le asignó la mayor cantidad de SRB a los UE 3, UE 6 y UE 15 en cada subtrama, gracias a que las fluctuaciones en sus niveles de SINR no fueron significativos, sin embargo, cuando el sistema estuvo bajo los efectos del desvanecimiento rápido, solo le asignó SRB en todas las subtramas al UE 15.



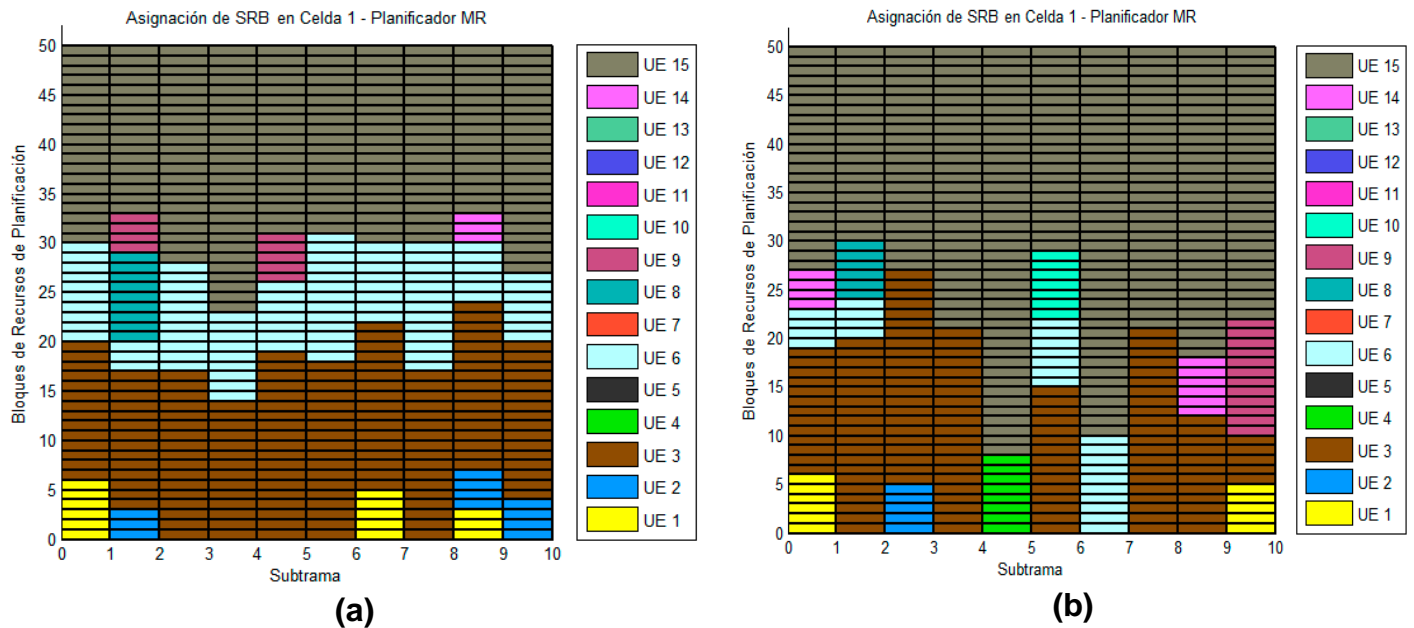


Figura 4.19 Asignación de SRB por el planificador MR.

#### 4.5.2. Resultados y análisis para un UE

En la figura 4.20 se muestra la asignación de SRB realizada por los planificadores RR, PF y MR para el UE 1, considerando los efectos del desvanecimiento lento y rápido.

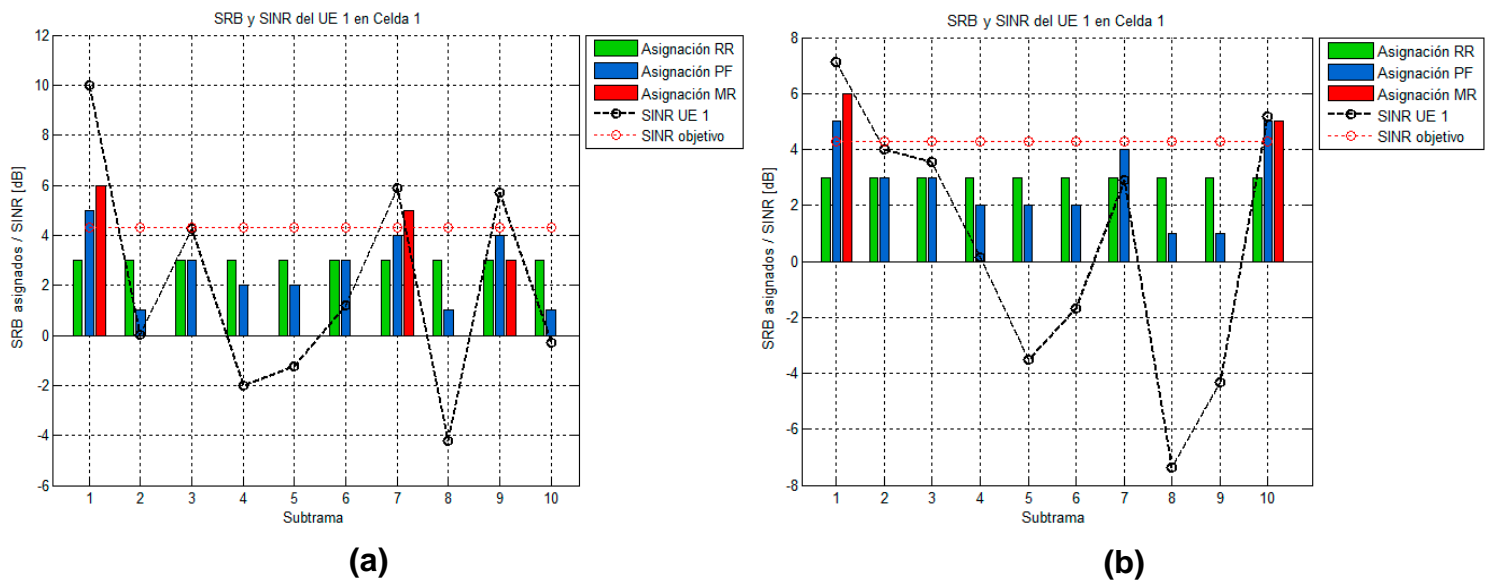


Figura 4.20 SRB asignados y SINR del UE 1 en celda 1.



Se observa que bajo el efecto del desvanecimiento rápido, los niveles de SINR disminuyeron considerablemente respecto a los niveles alcanzados cuando el sistema presentó desvanecimiento lento, en otras palabras, los niveles máximo y mínimo de SINR bajo el efecto del desvanecimiento lento fueron de 10 dB y -4.1, mientras que con el desvanecimiento rápido estos niveles fueron de 7.3 dB y -7.5 dB respectivamente.

Como consecuencia, los valores de *throughput* que se pueden alcanzar con el planificador RR disminuyen bajo desvanecimiento rápido, pues al tener menores niveles de SINR e igual número de SRB, el *throughput* es menor, como se puede observar en la tabla 4.3.

Cuando el sistema presentó desvanecimiento lento, el planificador MR solo le asignó recursos al UE 1 en las subtramas 1, 7 y 9, debido a que en las demás subtramas los efectos causados por este fenómeno no le permitieron obtener la SINR requerida, de igual manera, bajo el efecto del desvanecimiento rápido, solo le asignó recursos en las subtramas 1 y 10, pues fueron las únicas en las cuales los niveles de SINR estuvieron por encima de la SINR objetivo.

#### 4.5.3. Resultados y análisis para una celda

En la figura 4.21 se muestra el *throughput* alcanzado en la celda 1 con los diferentes planificadores de recursos radio bajo los efectos del desvanecimiento lento y rápido.

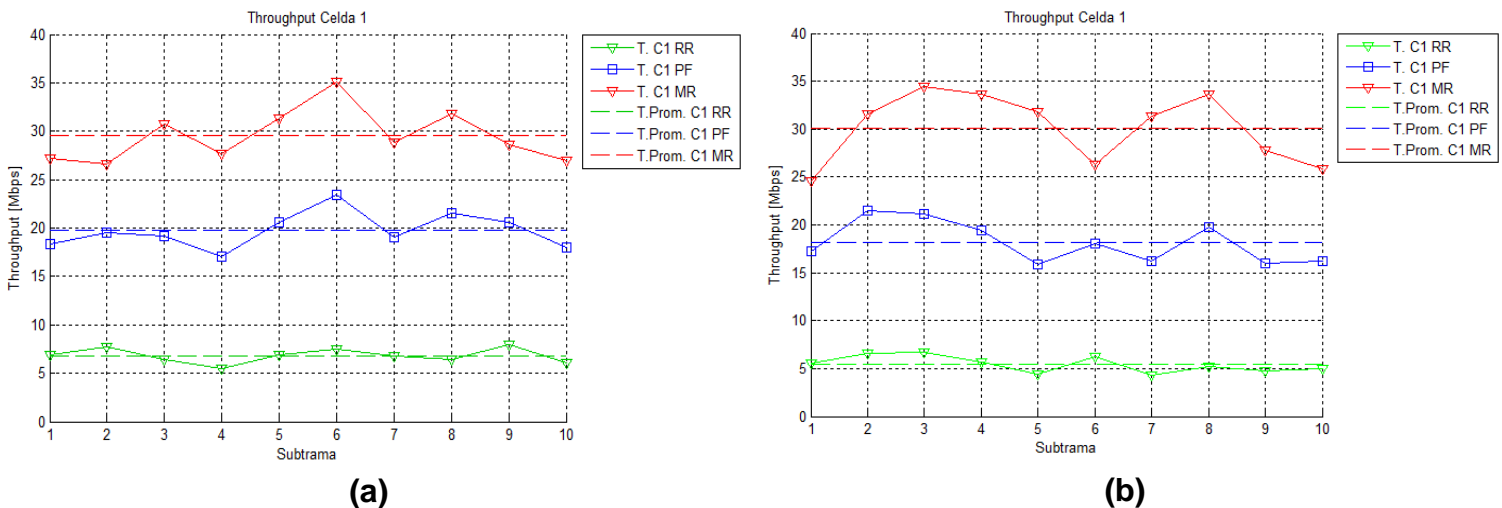


Figura 4.21 *Throughput* total de celda 1 en cada subtrama.

Cuando en el sistema se presentó desvanecimiento lento, los planificadores MR, PF y RR alcanzaron valores de *throughput* promedio iguales a 29.5 Mbps, 19.7 Mbps y



7.8 Mbps, mientras que con desvanecimiento rápido estos valores fueron de 30 Mbps, 17.7 Mbps y 5.1 Mbps respectivamente.

Debido a los anteriores resultados, se observa que el planificador MR fue el que hizo la asignación de recursos radio más eficiente bajo los efectos del desvanecimiento rápido, pues logró compensar las variaciones y fluctuaciones en los niveles de la señal causados por dicho fenómeno, obteniendo así un valor medio de *throughput* similar al que se alcanzó bajo desvanecimiento lento.

#### 4.5.4. Resultados y análisis del sistema

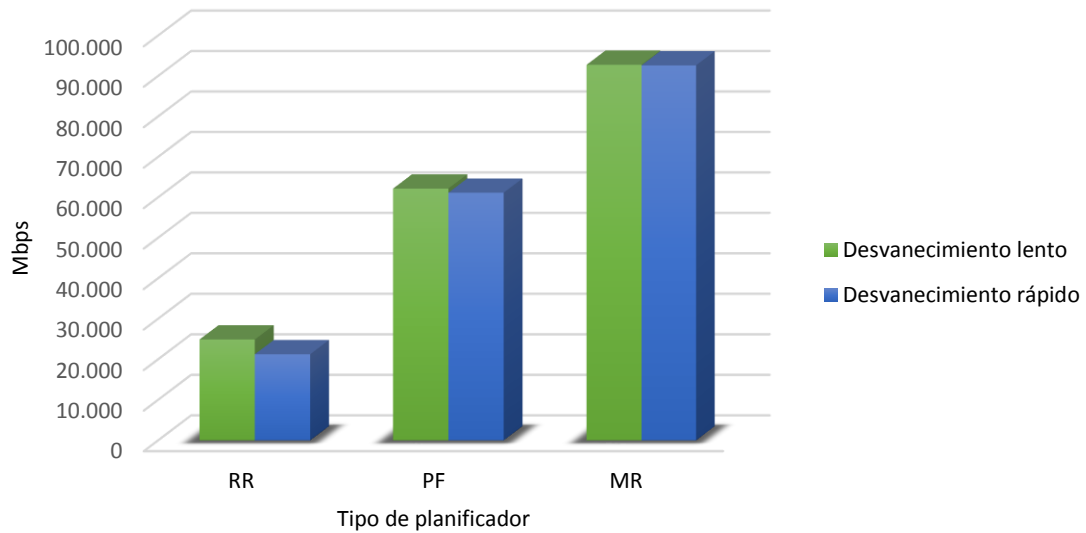
La tabla 4.8 presenta la media, mediana y desviación estándar del *throughput* en el sistema considerando los efectos del desvanecimiento lento y rápido.

Tipo de Planificador	Media <i>Throughput</i> (Mbps)		Mediana <i>Throughput</i> (Mbps)		Desv. Estándar <i>Throughput</i> (Mbps)	
	Desv. lento	Desv. rápido	Desv. lento	Desv. rápido	Desv. lento	Desv. rápido
<b>RR</b>	24.886	21.244	25.004	22.052	1.232	2.796
<b>PF</b>	62.170	61.143	61.924	62.784	2.551	5.303
<b>MR</b>	92.783	92.622	92.236	96.250	5.365	9.547

**Tabla 4.8** Medidas estadísticas del *throughput* en el sistema.

Como se ilustra en la figura 4.22 al considerarse desvanecimiento lento en el sistema, el planificador MR permitió alcanzar un *throughput* promedio de 92.7 Mbps, mientras que con los planificadores PF y RR se alcanzó un *throughput* promedio de 62.1 Mbps y 24.8 Mbps respectivamente, por otra parte, bajo los efectos del desvanecimiento rápido, el planificador MR permitió alcanzar un *throughput* promedio de 92.6 Mbps, el planificador PF 61.1 Mbps y el planificador RR 23.2 Mbps.

Se observa que en presencia de desvanecimiento rápido los planificadores MR y PF realizaron un asignación eficiente de recursos radio en el sistema, pues se obtuvieron valores de *throughput* promedio similares a los obtenidos bajo desvanecimiento lento.



**Figura 4.22** *Throughput* promedio del sistema en presencia de desvanecimiento lento y rápido.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las diferentes secciones de este caso de estudio, se puede concluir que al realizarse una asignación dinámica de recursos radio en cada subtrama, se logran compensar los efectos desfavorables producidos por el desvanecimiento rápido, con lo cual la capacidad del sistema no se ve afectada en gran medida por dicho fenómeno, constituyéndose esta en una de las principales ventajas que trae consigo la implementación de este tipo de planificadores en sistemas LTE.



## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo de grado se presentó el modelado e integración de los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* en el Simulador Básico a Nivel de Sistema para LTE desarrollado previamente en la institución, con los cuales fue posible realizar cálculos más detallados de capacidad y cobertura para diferentes escenarios.

En este capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos futuros que se podrán realizar a partir de la herramienta software desarrollada.

### 5.2. CONCLUSIONES

- El simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados, es una herramienta que permite profundizar en el estudio e investigación de la tecnología LTE, conservando la interfaz gráfica amigable y presentando gráficas de capacidad y cobertura mejoradas que permiten visualizar el escenario de estudio en tres dimensiones, el mapa de colores de cobertura del sistema, la asignación de recursos radio llevada a cabo por cada tipo de planificador y el comportamiento del *throughput* de cada UE, de cada celda y del sistema, proporcionando detalles que posibilitan análisis más completos de sistemas LTE.
- Se comprobó la versatilidad y eficiencia de Matlab, empleada para el desarrollo de este trabajo de grado, ya que al tener la posibilidad de almacenar datos numéricos en matrices, fue posible realizar una gran cantidad de cálculos simultáneamente conservando independencia entre ellos, lo cual fue muy útil para obtener los resultados necesarios y/o requeridos para cada usuario en el sistema. Por otra parte, al emplear la división por módulos para el desarrollo de la segunda versión del simulador se facilitó la organización y comprensión del mismo, pues al dividir el problema complejo inicial en varios subproblemas más simples la detección





de errores se tornó sencilla y al mismo tiempo se tuvo un ahorro notorio en los tiempos de desarrollo.

- Los planificadores de recursos radio permiten el control de la velocidad de transmisión asignada a un usuario en función de la calidad del canal, lo que representa el núcleo de la adaptación dinámica del enlace en la tecnología LTE. Además la división y asignación de los recursos disponibles en el enlace descendente a diferentes usuarios con anchos de banda variables, permite al eNB ser más flexible en comparación con las estaciones base de otras tecnologías. El problema de los planificadores de recursos radio se encuentra en la imposibilidad de conseguir justicia, eficiencia y baja complejidad en uno solo.
- Los resultados obtenidos en el caso 1 demuestran que el planificador de recursos radio *Maximun Rate* logra aprovechar con mayor eficiencia los recursos disponibles, lo que se traduce en mayores valores de *throughput* tanto de celda como de sistema comparado con los planificadores *Round Robin* y *Proportional Fair*. Pero se debe tener en cuenta que las prestaciones del servicio no son las mismas con los tres planificadores de recursos radio, es decir, el planificador *Maximun Rate* deja de prestar el servicio a algunos UE para alcanzar los niveles más cercanos a la máxima capacidad del sistema, mientras que los otros dos planificadores aseguran un nivel mínimo de servicio para todos los UE que lo soliciten.
- A partir del análisis y los resultados obtenidos en el caso de estudio dos, se puede concluir que el ancho de banda en un sistema LTE es una característica que lo hace muy versátil y adaptable a diferentes entornos, ya que con la variación de este parámetro se determina la cantidad de usuarios que soportará el sistema, en ese sentido, si se va a prestar el servicio en un entorno rural es adecuado emplear un ancho de banda de 5MHz o 10MHz ya que el número de usuarios en estas zonas es bajo, por otra parte, si se desea prestar el servicio en zonas urbanas en las cuales la cantidad de usuarios es mucho mayor se recomienda emplear un ancho de banda de 20MHz.
- En sistemas LTE, una buena combinación entre ancho de banda y planificador de recursos radio asegura un buen desempeño, pues si se realiza una adecuada asignación de los bloques de recursos radio disponibles, el



sistema trabajará en límites cercanos a su máxima capacidad y los usuarios podrán alcanzar altos *throughput*. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones y especialmente en el caso de estudio 2, se recomienda combinar con todo ancho de banda el planificador de recursos radio *Proportional Fair*, con lo cual siempre será posible obtener un buen *throughput* y al mismo tiempo garantizar a todos los usuarios el servicio, a pesar de que sus condiciones de canal radio no sean las mejores.

- Con el desarrollo de este trabajo de grado, en especial con los resultados obtenidos en el tercer caso de estudio, se comprobó la ventaja adicional que trae consigo el uso de los planificadores de recursos radio en sistemas LTE, específicamente los planificadores *Proportional Fair* y *Maximun Rate*, pues al realizarse una asignación dinámica de recursos en cada subtrama se compensaron los efectos desfavorables causados por el por el desvanecimiento rápido, asegurando que el desempeño en capacidad no se vea alterado en gran medida y se obtengan valores de *throughput* en el sistema similares a los alcanzados bajo desvanecimiento lento.

### 5.3. TRABAJOS FUTUROS

El simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados está abierto a cualquier tipo de adiciones que permitan la creación de un simulador de alto nivel, permitiendo el desarrollo de nuevas y más profundas investigaciones en la tecnología de comunicación radio inalámbrica LTE. Para ello se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Modelar e implementar en el simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados, otros planificadores que se basen en parámetros como requerimientos de retardo o estado del buffer de cada UE.
- Evaluar en la segunda versión del simulador, los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* a través de indicadores de justicia que empleen métricas como *throughput*, cantidad de recursos asignados a cada UE y cantidad de UE a los que se les asignó recursos.



De igual manera se propone el modelado e integración de las siguientes funcionalidades en el simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados, con el fin de evaluar el desempeño tanto en capacidad como en cobertura de los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* y posteriormente realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en ausencia y en presencia de dichas funcionalidades.

- Tecnología de múltiples antenas (MIMO).
- Técnicas de control de potencia.
- Procedimientos de nivel físico de LTE tales como HARQ, *paging*, indicación del estado del canal y acceso aleatorio.
- Cálculos para el enlace ascendente.
- Tecnología de antenas inteligentes o *Beamforming*.
- Movilidad de usuarios.
- Implementación de obstáculos que simulen la presencia de edificios, casas, árboles y automóviles (con sus respectivas atenuaciones) en cada una de las celdas del sistema.
- Análisis indoor, para lo cual se debe proporcionar el plano del lugar en el que se quiere realizar el estudio.
- Características de LTE Advanced (Release 10).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. A. López Muñoz, "Efecto de las redes de cuarta generación (LTE) en los servicios móviles en Chile", tesis de pregrado Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2011.
- [2] J. A. Navarro Giovanetti, "Evolución de 3G y su convergencia a 4G en comunicaciones móviles", tesis de pregrado Ingeniería Electrónica, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2008.
- [3] A. P. Guevara Toledo y V. G. Vásquez Alarcón, "Estado actual de las redes LTE en latinoamérica", tesis de grado Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2013.
- [4] S. Sesia et al, "LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory To Practice", United Kingdom: Wiley, 2011.
- [5] H. Holma y T. Antti, "LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", United Kingdom: Wiley, 2009.
- [6] R. Agusti et al, "LTE: Nuevas Tendencias En Comunicaciones Móviles", España: Fundación Vodafone, 2010.
- [7] 3GPP, "TS 23.401 V8.0.0; - Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 8), Sophia Antipolis - Francia, 2007.
- [8] 3GPP, "TS 23.402 V8.0.0; - Technical Specification Group Services and System Aspects; Architecture enhancements for non-3GPP accesses (Release 8)", Sophia Antipolis - Francia, 2007.
- [9] J. Karlsson y M. Riback, "Initial field performance measurements of LTE", Ericsson Rev, 2008.
- [10] P. Díaz et al, Estrategias de mitigación de interferencia en una red LTE, Popayán - Colombia , 2012.



- [11] A. Hamza et al, "A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks", *ommun. Surv. Tutorials*.
- [12] L. Wang y C. Yeh, "3-cell network MIMO architectures with sectorization and fractional frequency reuse", *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 29, pp.1185-1199, 2011.
- [13] M. Olsson, "SAE and the Evolved Packet Core: Driving the Mobile Broadband Revolution", Elsevier, 2009.
- [14] 3GPP, "TS 36.101; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception", Sophia Antipolis - Francia, 2011.
- [15] E. Dahlman y S. Parkvall, "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband", United Kingdom: Elsevier, 2011.
- [16] M. Franceschetti y R. Meester, "Random Networks for Communication. From Statistical Physics to Information Systems", United Kingdom: Springer Science+Business Media, 2009.
- [17] A. Syed, "Dimensioning of LTE Network Description of Models and Tool , Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface", Helsinki, 2009.
- [18] D. L. Mendo Tomás, "Capacidad en Sistemas Celulares W-CDMA", Madrid, 2001.
- [19] R. Agusti et al, "Elementos de arquitectura y gestión de recursos radio en UMTS", Madrid: Vodafone, 2004.
- [20] «<http://lteuniversity.com>,» 21 Diciembre 2010. [En línea]. Available: [http://lteuniversity.com/get\\_trained/expert\\_opinion1/b/donhanley/archive/2010/12/21/1xev-do-vs-lte-channel-quality-reporting.aspx](http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/donhanley/archive/2010/12/21/1xev-do-vs-lte-channel-quality-reporting.aspx). [Último acceso: 9 Enero 2014].
- [21] 3GPP, "TS 36 213 V8.8.0; LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 8.8.0 Release 8)", Sophia Antipolis - Francia, 2009.



- [22] Telefónica, "LTE: Long Term Evolution; Capa Física y Planificación en LTE ", Madrid, 2010.
- [23] Adaptive Signal Processing and Information Theory Research Group, "Overview of AMC in LTE", 2012.
- [24] J. Ramis et al, "Algoritmos de Planificación de recursos para redes inalámbricas 4G", España, 2010.
- [25] Y. Barayan y I. Kostanic, "Performance Evaluation of Proportional Fairness Scheduling in LTE", San Francisco, USA, 2013.
- [26] R. Pressman, "Ingeniería del Software un enfoque práctico, 5 ed.", España: Mc Graw Hill-Interamericana de España, 2002.
- [27] "S. Engineering and S. Committee, IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications", 1998.
- [28] «<http://es.wikipedia.org>,» [En línea]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Requisito\\_no\\_funcional](http://es.wikipedia.org/wiki/Requisito_no_funcional). [Último acceso: 15 Febrero 2015].
- [29] D. Marcano, "Generalidades de Redes Celulares", Lima , Perú, 2011.
- [30] K. A. Electronic, "Multi-band Panel Antenna K742215.", Rosenheim, Alemania.
- [31] 3GPP, TR 36.942 - V8.2.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios,", Sophia Antipolis, Francia, 2009.
- [32] «<http://en.wikipedia.org>,» [En línea]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Single-input\\_single-output\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Single-input_single-output_system). [Último acceso: Febrero 15 2015].
- [33] 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),", Sophia Antipolis, Francia, 2009.



- [34] J. Cáceres Jiménez, "Planificación Radioeléctrica de una Red LTE", Sevilla, España, 2014.
- [35] C. O. Sánchez Sorzano, "Curso de utilización práctica de MATLAB", Madrid, 2006.
- [36] L. Rodríguez Ojeda, "MATLAB: Conceptos Básicos y Programación", Guayaquil, Ecuador, 2004.
- [37] wikipedia, «<http://es.wikipedia.org>,» [En línea]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n\\_de\\_distribuci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Funci%C3%B3n_de_distribuci%C3%B3n). [Último acceso: 15 Febrero 2015].
- [38] «<http://www.tuveras.com>,» [En línea]. Available: <http://www.tuveras.com/estadistica/estadistica02.htm>. [Último acceso: 15 Febrero 2015].