

**ANÁLISIS DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN EL ENLACE DESCENDENTE
SOBRE EL DESEMPEÑO DE UNA RED LTE**



**Víctor Enrique Orobio Pérez
Héctor Julio Hurtado Cano**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Telecomunicaciones
Popayán, Mayo 2015**

**ANÁLISIS DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN EL ENLACE DESCENDENTE
SOBRE EL DESEMPEÑO DE UNA RED LTE**



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

**Víctor Enrique Orobio Pérez
Héctor Julio Hurtado Cano**

**Director
Ing. Oscar Josué Calderón Cortés**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Telecomunicaciones
Popayán, Mayo 2015**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. BASE TEÓRICA.....	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 REQUISITOS DEL SISTEMA LTE	2
1.3 ARQUITECTURA GLOBAL DE LTE.....	3
1.3.1 Equipo de Usuario	4
1.3.2 Red de Acceso E-UTRAN.....	4
1.3.2.1 Funcionalidades del eNB	4
1.3.2.2 Interfaces.....	4
1.3.2.2.1 Interfaz Radio.....	5
1.3.2.2.2 Capa Física.....	5
1.3.2.2.3 Capa de Enlace.....	6
1.3.2.2.4 Capa de Red.....	6
1.3.3 Red Troncal EPC.....	6
1.4 GENERALIDADES DE LTE.....	7
1.4.1 Técnicas de Acceso Múltiple.....	7
1.4.2 MIMO.....	8
1.4.3 Canales Físicos	8
1.4.4 Estructura de Recursos de LTE en Tiempo y Frecuencia	8
1.4.5 Portadora Radio.....	9
1.5 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO	10
1.5.1 Control de Admisión Radio	10
1.5.2 Control de Servicios Portadores Radio	10
1.5.3 Balanceo de Carga	10
1.5.4 Control de Potencia	10
1.5.5 Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida.....	10
1.5.6 Adaptación del Enlace	11
1.5.7 Planificación de Paquetes.....	11
CAPÍTULO II. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE	12
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.2 DEFINICIÓN Y OBJETIVO DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES.....	12

2.3	CONCEPTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES.....	12
2.3.1	Información de Calidad del Canal.	12
2.3.2	Adaptación de la Tasa de Transmisión	13
2.3.3	Coordinación de Interferencia Inter-Celda.....	14
2.4	PROCESO DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN DL.....	14
2.5	FUNCIONAMIENTO DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES.....	15
2.6	FORMAS DE CLASIFICAR LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES.....	16
2.6.1	Con Base en la Capa en que Opera y Como se Asignan los Recursos	16
2.6.1.1	<i>Planificación Semi-Persistente</i>	17
2.6.1.2	<i>Planificación Dinámica</i>	18
2.6.2	Con Base en la Información de Calidad de Canal.....	18
2.6.2.1	<i>Planificación Que No Tiene en Cuenta el Estado del Canal</i>	19
2.6.2.2	<i>Planificación Que Tiene en Cuenta el Estado del Canal</i>	19
2.6.3	Con Base en el Dominio en el que se Realice	19
2.6.3.1	<i>Planificación en el Dominio del Tiempo</i>	20
2.6.3.2	<i>Planificación en el Dominio de la Frecuencia</i>	20
2.7	SÍNTESIS DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES.....	21
2.8	DIFERENCIA ENTRE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN DL Y EN UL	25
 CAPÍTULO III. ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE		26
3.1	INTRODUCCIÓN	26
3.2	PRINCIPIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA UN ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE	26
3.3	FORMA EN QUE UN ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES ASIGNA RECURSOS EN LTE	27
3.4	ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES SELECCIONADOS	27
3.4.1	Round Robin.....	27
3.4.2	Best CQI	29
3.4.3	Proportional Fair	30
3.5	PARÁMETROS DE DESEMPEÑO	31
3.6	CONSIDERACIONES FINALES.....	32
 CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN, RESULTADOS y ANÁLISIS		34
4.1	INTRODUCCIÓN	34

4.2 ASPECTOS GENERALES SOBRE SIMULACIÓN DE REDES LTE	34
4.2.1 Simulación a Nivel de Enlace.....	34
4.2.2 Simulación a Nivel de Sistema.....	34
4.3 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	36
4.3.1 Herramientas Software para Simular Redes LTE.....	36
4.3.2 Metodología de Simulación.....	37
4.3.2.1 <i>Definición de los Escenarios y Casos de Simulación</i>	38
4.3.2.2 <i>Definición de las Características Técnicas de los Escenarios de Simulación</i>	40
4.3.2.3 <i>Ejecución de las Pruebas de Simulación</i>	41
4.3.2.4 <i>Análisis de los Resultados</i>	42
4.3.2.4.1 <i>Escenario de Simulación No 1</i>	42
4.3.2.4.2 <i>Escenario de Simulación No 2</i>	51
4.3.2.4.3 <i>Escenario de Simulación No 3</i>	56
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	63
5.1 INTRODUCCIÓN	63
5.2 CONCLUSIONES.....	63
5.3 RECOMENDACIONES	64
5.4 TRABAJOS FUTUROS	65
REFERENCIAS	67
ANEXO A.....	71
ANEXO B.....	75
ANEXO C	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Arquitectura global del sistema LTE	3
Figura 1.2. Pila de protocolos de la interfaz radio del sistema LTE	5
Figura 1.3. Técnicas de acceso múltiple a nivel físico	7
Figura 1.4. Estructura de la subtrama	8
Figura 2.1. Adaptación de la tasa de transmisión.....	13
Figura 2.2. Modelo del planificador de paquetes en el enlace descendente.....	14
Figura 2.3. Funcionamiento de la planificación de paquetes	15
Figura 2.4. Planificación de paquetes en las capas.....	17
Figura 2.5. Planificación semi-persistente	17
Figura 2.6. Planificación dinámica.....	18
Figura 2.7. Tipos de planificación dinámica.....	19
Figura 2.8. Planificación en el dominio del tiempo.....	20
Figura 2.9. Planificación en el dominio de la frecuencia	20
Figura 2.10. Clasificación de la planificación de paquetes	24
Figura 3.1. Diagrama de flujo del algoritmo Round Robin	28
Figura 3.2. Diagrama de flujo del algoritmo Best CQI.....	29
Figura 3.3. Diagrama de flujo del algoritmo Proportional Fair.....	30
Figura 3.4. Parámetros para evaluar el desempeño de una red LTE	31
Figura 4.1. Escenarios posibles en un simulador a Nivel de Sistema.....	35
Figura 4.2. Escenario de Simulación No 1	38
Figura 4.3. Escenario de Simulación No 2	39
Figura 4.4. Escenario de Simulación No 3	39
Figura 4.5. <i>Fairness</i> para BW 3 MHz	43
Figura 4.6. <i>Throughput</i> del sector para BW 3 MHz	43
Figura 4.7. <i>Throughput</i> pico, medio y borde para BW 3 MHz	44
Figura 4.8. <i>Throughput</i> para los UEs, BW 3 MHz.....	46
Figura 4.9. SINR para los UEs, BW 3 MHz	46
Figura 4.10. Asignación de PRBs por UE, BW 3 MHz.....	46
Figura 4.11. <i>Fairness</i> para BW 5 MHz	47
Figura 4.12. <i>Throughput</i> del sector para BW 5 MHz.....	48
Figura 4.13. <i>Throughput</i> pico, medio y borde para BW 5 MHz	48
Figura 4.14. <i>Throughput</i> para los UEs, BW 5 MHz.....	50

Figura 4.15. Asignación de PRBs por UE, BW 5 MHz	50
Figura 4.16. SINR para los UEs, BW 5 MHz	50
Figura 4.17. Resultados de simulación para el escenario 2 con RR.....	51
Figura 4.18. Resultados de simulación para el escenario 2 con Best CQI.....	51
Figura 4.19. Resultados de simulación para el escenario 2 con PF	51
Figura 4.20. ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear RR para el escenario 2	53
Figura 4.21. ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear Best CQI para el escenario 2	53
Figura 4.22. ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear PF para el escenario 2	54
Figura 4.23. Sector 1 del escenario de simulación No 2.....	55
Figura 4.24. Resultados de simulación para el escenario 3 con RR.....	56
Figura 4.25. Resultados de simulación para el escenario 3 con Best CQI.....	56
Figura 4.26. Resultados de simulación para el escenario 3 con PF	57
Figura 4.27. Celda central del escenario de simulación No 3.....	57
Figura 4.28. ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear RR para la celda central del escenario 3.....	59
Figura 4.29. ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear Best CQI para la celda central del escenario 3	60
Figura 4.30. ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear PF para la celda central del escenario 3.....	60
Figura A.1 <i>Fairness</i> para BW 10 MHz.....	71
Figura A.2 <i>Throughput</i> del sector para BW 10 MHz.....	72
Figura A.3 <i>Throughput</i> pico, medio y borde para BW 10 MHz	72
Figura A.4 <i>Throughput</i> para los UEs, BW 10 MHz	73
Figura A.5 SINR para los UEs, BW 10 MHz.....	74
Figura A.6 Asignación de PRBS por UE, BW 10 MHz.....	74
Figura B.1 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear RR en el sistema de 7 celdas	75
Figura B.2 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear Best CQI en el sistema de 7 celdas	75
Figura B.3 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear PF en el sistema de 7 celdas	76
Figura C.1 Sistema de 7 celdas con factor de reusó 1	77
Figura C.2 FFR en el sistema de 7 celdas	77
Figura C.3 Planificación de paquetes conjunta.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Identificador de Clase de QoS para LTE.....	9
Tabla 2.1. Relación entre el CQI y la modulación.....	13
Tabla 2.2. Relación entre la canalización y el número de PRBs disponibles	15
Tabla 2.3. Criterios de asignación de recursos.....	16
Tabla 2.4. Formas de realizar la planificación de paquetes	21
Tabla 2.5. Características de los principales algoritmos de planificación de paquetes.....	22
Tabla 3.1. Parámetros de desempeño y su relevancia de acuerdo a los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados	32
Tabla 4.1. Comparación simulación a Nivel de Enlace vs Nivel de Sistema	35
Tabla 4.2. Tabla comparativa de las herramientas de simulación.....	37
Tabla 4.3. Escenarios y Casos de Simulación.....	40
Tabla 4.4. Valores de Potencia de Transmisión en LTE	40
Tabla 4.5. Parámetros de los Escenarios de Simulación	41
Tabla 4.6. Comparativa en términos de <i>fairness</i> y <i>throughput</i> con BW 3 MHz.....	42
Tabla 4.7. Eficiencia espectral y <i>throughput</i> pico, medio y borde para el sector con BW 3 MHz.....	42
Tabla 4.8. UE <i>Throughput</i> para RR, Best CQI y PF, BW 3 MHz.....	44
Tabla 4.9. SINR para RR, Best CQI y PF, BW 3 MHz	44
Tabla 4.10. PRBs asignados por RR, Best CQI y PF, BW 3 MHz.....	45
Tabla 4.11. Comparativa en términos de <i>fairness</i> y <i>throughput</i> , BW 5 MHz	47
Tabla 4.12. Eficiencia espectral y <i>throughput</i> pico, medio y borde para el sector, BW 5 MHz.....	47
Tabla 4.13. UE <i>Throughput</i> para RR, Best CQI y PF, BW 5 MHz.....	49
Tabla 4.14. SINR para RR, Best CQI y PF, BW 5 MHz	49
Tabla 4.15. PRBs asignados por RR, Best CQI y PF, BW 5 MHz.....	49
Tabla 4.16. <i>Throughput</i> y <i>fairness</i> en la celda	52
Tabla 4.17. <i>Throughput</i> y <i>fairness</i> por sector	55
Tabla 4.18. <i>Throughput</i> y <i>fairness</i> en el sistema de 7 celdas	57
Tabla 4.19. <i>Throughput</i> y <i>fairness</i> en la celda central del sistema.....	58
Tabla 4.20. <i>Throughput</i> y <i>fairness</i> obtenidos en los escenarios 2 y 3.....	58
Tabla A.1 Comparativa en términos de <i>fairness</i> y <i>throughput</i> , BW 10 MHz.....	71
Tabla A.2 Eficiencia espectral y <i>throughput</i> pico, medio y borde para el sector con BW 10 MHz.....	71

Tabla A.3 UE <i>Throughput</i> para RR, Best CQI y PF, BW 10 MHz	72
Tabla A.4 SINR para RR, Best CQI y PF, BW 10 MHz.....	73
Tabla A.5 PRBs asignados por RR, Best CQI y PF, BW 10 MHz	73
Tabla C.1 <i>Throughput</i> y <i>fairness</i> en el sistema de 7 celdas al emplear el planificador FFR	78

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Probabilidad que tiene un usuario de ser asignado por RR	27
Ecuación 3.2. Asignación de recursos del RR	27
Ecuación 3.3. Métrica del RR	28
Ecuación 3.4. Métrica del Best CQI	29
Ecuación 3.5. Asignación de recursos del PF	30
Ecuación 3.6. Métrica del PF	31

LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP:	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (<i>Third Generation Partnership Project</i>)
AMC:	Modulación y Codificación Adaptativa (<i>Adaptive Modulation and Coding</i>)
ARQ:	Solicitud de Repetición Automática (<i>Automatic Repeat reQuest</i>)
BER:	Tasa de Error de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
BW:	Ancho de Banda (<i>BandWidth</i>)
CoMP:	Coordinación Multipunto (<i>Coordinate MultiPoint</i>)
CQI:	Indicador de Calidad del Canal (<i>Channel Quality Indicator</i>)
CSR:	Reporte de Estado del Canal (<i>Channel Status Report</i>)
DL:	Enlace Descendente (<i>DownLink</i>)
eNB:	Nodo B Evolucionado (<i>evolved Node B</i>)
FDPS:	Planificación de Paquetes en el Dominio de la Frecuencia (<i>Frequency Domain Packet Scheduling</i>)
FFR:	Reusó de Frecuencia Fraccional (<i>Fractional Frequency Reuse</i>)
EPC:	Núcleo de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet Core</i>)
EPS:	Sistema de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet System</i>)
E-UTRAN:	Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionado (<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>)
GBR:	Tasa de Bit Garantizada (<i>Guaranteed Bit-Rate</i>)
HARQ:	Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida (<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>)
HSS:	Servidor de Suscriptores Locales (<i>Home Subscriber Server</i>)
HO:	Traspaso (<i>Handover</i>)
ICI:	Interferencia Inter-Celda (<i>Inter-Cell Interference</i>)
ICIC:	Coordinación de Interferencia Inter-Celda (<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>)
IDE:	Entorno de Desarrollo Integrado (<i>Integrated Development Environment</i>)
IP:	Protocolo Internet (<i>Internet Protocol</i>)
LA:	Adaptación del Enlace (<i>Link Adaptation</i>)
LTE:	Evolución a Largo Término (<i>Long Term Evolution</i>)
MAC:	Control de Acceso al Medio (<i>Medium Access Control</i>)
MCS:	Esquema de Modulación y Codificación (<i>Modulation and Coding Scheme</i>)
MIMO:	Múltiples Entradas Múltiples Salidas (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>)
MME:	Entidad de Gestión de Movilidad (<i>Mobility Management Entity</i>)
NAS:	Estrato de no Acceso (<i>Non-Access Stratum</i>)
Non-GBR:	Tasa de Bit no Garantizada (<i>Non-Guaranteed Bit-Rate</i>)
OFDMA:	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>)
OSI:	Interconexión de Sistemas Abiertos (<i>Open System Interconnection</i>)

PAPR:	Relación Potencia Pico a Potencia Media (<i>Peak to Average Power Ratio</i>)
PDCCH:	Canal Físico de Control para el Enlace Descendente (<i>Physical Downlink Control Channel</i>)
PDCP:	Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (<i>Packet Data Convergence Protocol</i>)
PDSCH:	Canal Físico Compartido para el Enlace Descendente (<i>Physical Downlink Shared Channel</i>)
PRB:	Bloque de Recursos Físicos (<i>Physical Resource Block</i>)
PDN-GW:	Puerta de Enlace a la Red de Paquetes de Datos (<i>Packet Data Network Gateway</i>)
PUCCH:	Canal Físico de Control para el Enlace Ascendente (<i>Physical Uplink Control Channel</i>)
QCI:	Identificador de Clase de QoS (<i>QoS Class Identifier</i>)
RAC:	Control de Admisión Radio (<i>Radio Admission Control</i>)
RB:	Portador Radio (<i>Radio Bearer</i>)
RBC:	Control de Servicios de Portadores Radio (<i>Radio Bearer Control</i>)
RNC:	Controlador de la Red Radio (<i>Radio Network Controller</i>)
RLC:	Control del Enlace Radio (<i>Radio Link Control</i>)
RRC:	Control de Recursos Radio (<i>Radio Resource Control</i>)
RRM:	Gestión de Recursos Radio (<i>Radio Resource Management</i>)
QoS:	Calidad de Servicio (<i>Quality of Service</i>)
SC-FDMA:	Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Única Portadora (<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>)
S-GW:	Puerta de Enlace de Servicio (<i>Serving Gateway</i>)
SPS:	Planificación Semi-Persistente (<i>Semi-Persistent Scheduling</i>)
SNR:	Relación Señal a Ruido (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
TDPS:	Planificación de Paquetes en el Dominio del Tiempo (<i>Time Domain Packet Scheduling</i>)
TTI:	Intervalo de Tiempo de Transmisión (<i>Transmission Time Interval</i>)
UE:	Equipo de Usuario (<i>User Equipment</i>)
UL:	Enlace Ascendente (<i>UpLink</i>)
UMTS:	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>)
VoIP:	Voz sobre IP (<i>Voice over IP</i>)

INTRODUCCIÓN

Las redes Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) se están constituyendo en una de las principales opciones de comunicación en el contexto móvil celular, buscan soportar una amplia gama de aplicaciones y servicios de diferente naturaleza y elevadas tasas de transferencia [1].

El Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*), define a LTE como una arquitectura basada en el Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*), más flexible que tecnologías anteriores, capaz de garantizar Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) extremo a extremo a las aplicaciones y servicios de acuerdo a sus requerimientos. Además, ofrece un aumento en las velocidades de transmisión de datos, tanto para el Enlace Descendente (DL, *DownLink*), como el Enlace Ascendente (UL, *UpLink*), una menor latencia y una mejora en la eficiencia espectral [2, 3, 4].

Con base en estas ventajas, cada vez son más los operadores móviles que utilizan LTE, para ofrecer una mayor gama de servicios con tarifas planas. Esta mejora en los modelos de negocio, provoca una mayor demanda en los recursos, de tal forma que los operadores móviles incorporan en sus redes estrategias para gestionarlos de forma eficaz.

La Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), representa un conjunto de funciones para garantizar el uso eficiente de los recursos disponibles entre los Equipos de Usuarios (UE, *User Equipment*) que hacen uso de la red [5, 6]. El 3GPP, enuncia las funciones de la RRM, pero en ningún momento establece la forma específica como deben implementarse, esto hace parte de las estrategias de cada operador [4].

La planificación de paquetes es una de las funciones más importantes de la RRM, ya que de esta función depende que los recursos se manejen eficientemente. Existen muchos enfoques sobre cómo realizar la planificación de paquetes, y la forma en que se realice tiene un gran impacto en el desempeño de la red.

Con base a lo anterior, este trabajo de grado realiza mediante simulación un análisis y evaluación del impacto que tiene la planificación de paquetes en el enlace descendente sobre el desempeño de una red LTE.

Este documento se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I: introduce los conceptos generales y contextualiza la tecnología LTE.

Capítulo II: explica la función de la planificación de paquetes.

Capítulo III: realiza una descripción de los algoritmos de planificación de paquetes fundamentales.

Capítulo IV: describe la metodología de simulación y presenta los resultados y análisis de los mismos.

Capítulo V: expone las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de todo el trabajo de grado. Además, se presentan los posibles trabajos futuros a partir del trabajo desarrollado.

1. CAPÍTULO I. BASE TEÓRICA

1.1. INTRODUCCIÓN

Las redes de telefonía móvil han sufrido una gran transformación incorporando múltiples avances tecnológicos que han mejorado la prestación de servicios y posibilitado que sean cada vez más los usuarios que hacen uso del teléfono celular como un elemento indispensable en sus vidas diarias. Los operadores móviles reconocen que el aumento de usuarios, requiere de mejoras en sus infraestructuras para ofrecerles la calidad de servicio esperada. Al aumentar los usuarios también lo hacen los servicios que utilizan, los cuales son cada vez más complejos y requieren un mayor Ancho de Banda (BW, *BandWidth*) lo que puede saturar rápidamente la capacidad de las redes actuales [7].

Como respuesta a estos requerimientos surge la tecnología Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) [8, 9], que define una arquitectura optimizada y brinda mayor capacidad que las tecnologías anteriores, lo que permite ejecutar servicios más avanzados.

LTE nace como la mezcla de varias tecnologías y protocolos que dan como resultado un nuevo sistema de red evolucionado, con la capacidad de duplicar la eficiencia espectral de los sistemas de la generación anterior, aumentar la capacidad de la red en términos de tasa de bit, bajas latencias y mejora en la velocidad de transferencia de datos, manteniendo una QoS extremo a extremo con alta seguridad, para ofrecer servicios de cualquier naturaleza a los usuarios, en cualquier momento, en cualquier lugar, con un mínimo costo posible [4].

Para lograr estos objetivos el 3GPP a través de la especificación 8 (R8, *Release 8*), conforma dos grupos de estudio: uno dedicado a la evolución de la interfaz radio, llamada Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) y otro dedicado al desarrollo de las especificaciones de funcionamiento del núcleo de red, denominado Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*). La unión de los dos componentes introduce una arquitectura más simple y mejorada. Las investigaciones y desarrollos de ambos grupos de trabajo dio origen a lo que hoy se conoce como Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [10].

La eliminación del tradicional nodo Controlador de la Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*) de los Sistemas de Tercera Generación (3G, *Third Generation*), la implementación de la técnica de acceso múltiple basada en la división de frecuencias ortogonales y un enfoque en la conmutación de paquetes para el envío de tráfico de datos, son algunas de las novedades que implementa el EPS para lograr una alta eficiencia espectral, mayor velocidad de transmisión de datos y menor latencia. Además, incorpora un conjunto de funciones alojadas en la estación base o Nodo B Evolucionado (eNB, *evolved Node B*) [2, 5, 9] conocidas como funciones RRM [6], que permiten manejar de forma adecuada los recursos disponibles de la red para obtener una alta QoS.

1.2. REQUISITOS DEL SISTEMA LTE

Con el fin de soportar de manera eficiente las nuevas aplicaciones, las redes LTE se han concebido con requisitos muy ambiciosos que sobrepasan ampliamente las

características de las redes 3G, diseñadas principalmente para el servicio conmutado de voz. Algunos requisitos se resumen así [6, 11, 12]:

- **Velocidad de datos:** objetivo de 100 Mbps en tasa de transmisión pico en DL y 50 Mbps en UL, con un ancho de banda de 20 MHz.
- **Eficiencia espectral:** la tasa de transferencia de bits que se debe tener es de 5 bits/s/Hz para DL y 2.5 bits/s/Hz en UL, siendo 3 ó 4 veces superior a las tecnologías 3G.
- **Desempeño:** el *throughput*¹ medido para el usuario en DL debe ser entre 3 y 4 veces superior a redes 3G y para UL entre 2 y 3 veces.
- **Latencia:** la suma de retardos temporales dentro de la red y el establecimiento de conexión, deben estar en el orden de 5 ms para la transmisión/recepción de la información, y 100 ms para los mensajes de control intercambiados entre el UE y la red.
- **Ancho de banda:** debe soportar anchos de banda escalables de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- **Interconexión:** garantizar la conexión física y lógica entre redes 3GPP y redes no-3GPP.
- **Movilidad:** el sistema debe ser óptimo para baja velocidad del UE (0-15 Km/h); debe tener altas prestaciones para velocidades cercanas a los 120 Km/h y para velocidades mayores a 350 Km/h debe tener capacidad para mantener la conexión.

1.3. ARQUITECTURA GLOBAL DE LTE

La Figura 1.1 ilustra de forma simplificada la arquitectura del sistema LTE, denominada EPS [13]. El diseño de esta arquitectura se basa en los requisitos expuestos en el apartado anterior; para ello el estándar define una estructura de red plana y descentralizada, reduciendo al máximo la jerarquía y disminuyendo el número de componentes e interfaces que ocupa la red [14].

La arquitectura se divide en tres bloques básicos: el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*), desde donde se conecta a la red y a través del cual se reciben los servicios; la red de acceso, constituida por los eNBs, permite la movilidad del usuario dentro del área de cobertura de la red; y finalmente el núcleo de red, formado por el subsistema de conmutación de paquetes, responsable del establecimiento de la trayectoria a través de la cual el intercambio de la información tiene lugar.

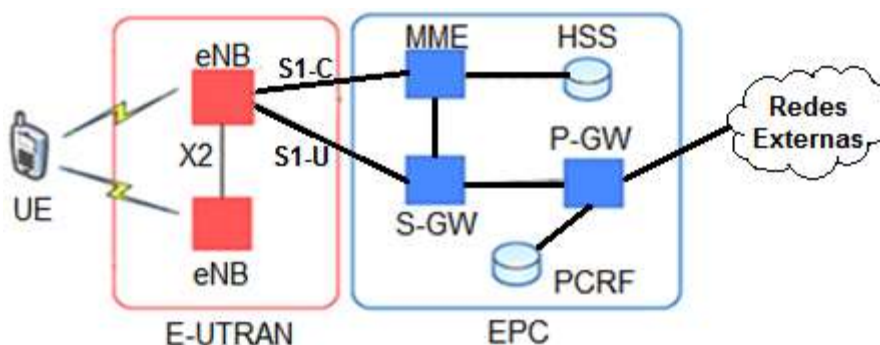


Figura 1.1 Arquitectura global del sistema LTE. Basado en [4].

¹*Throughput*: medida de la eficiencia de una red o parte de esta, expresada como la tasa de transferencia de datos con información útil.

1.3.1. Equipo de Usuario

El UE también llamado terminal móvil, es el elemento que permite hacer uso de los servicios que ofrece la red. También cuenta con funciones de gestión de movilidad, reporte de localización y traspasos (HO, *Handover*) [15].

1.3.2. Red de Acceso E-UTRAN

La red de acceso se simplifica considerablemente. Se eliminan los nodos intermedios como el RNC, que en tecnologías anteriores era el responsable de enviar la información de voz o datos de las estaciones base al núcleo de red y controlar las comunicaciones entre los UE y estaciones base. La estación base, conocida en el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) como nodo B, se transforma en el nodo B evolucionado, notado eNB. Generalmente el nodo B tiene funcionalidades mínimas y es controlado por el RNC. Sin embargo, con un eNB no hay elemento controlador de red separado. Esto simplifica la arquitectura y reduce la latencia de todas las acciones de la interfaz radio, lo cual permite el funcionamiento de nuevas aplicaciones sensibles al retardo y la disminución de la señalización entre los componentes de la red.

1.3.2.1. Funcionalidades del eNB

El eNB integra todas las funciones de la red de acceso, de tal forma que todos los procesos específicos de la interfaz radio comienzan o terminan en él. Algunas de ellas son [16, 17]:

- **Mecanismos de aviso (*Paging*):** los procedimientos de *Paging* son mensajes de señalización entre la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*), el eNB y el UE. Estos mensajes de señalización son necesarios para localizar un UE en la red cuando está en estado inactivo (*idle*), y se desconoce su localización exacta. El *Paging* lo utiliza la red para informar al UE que existe tráfico entrante dirigido hacia él.
- **Medición y entrega de HO:** este proceso es utilizado por el eNB para garantizar la continuidad del servicio cuando el UE se desplaza a lo largo de una zona de cobertura o para transferir el servicio a otro eNB. El HO se lleva a cabo mediante el análisis de las mediciones de nivel de la señal portadora.
- **Gestión de Recursos Radio:** son funciones encargadas de controlar el uso eficiente de los recursos radio, como la potencia de transmisión/recepción, el acceso al canal, la liberación de los recursos para la transmisión sobre la interfaz radio entre el UE y el eNB, entre otros.

1.3.2.2. Interfaces

Un eNB se comunica con el resto de los elementos de la red mediante las interfaces x2, s1 y la interfaz radio, como se muestra en la Figura 1.1. La interfaz x2 conecta dos eNBs adyacentes, a través de ella, los eNBs intercambian mensajes de señalización para una gestión más eficiente de los recursos radio (por ejemplo, mensajes de información para reducir las interferencias), así como tráfico de los usuarios del sistema cuando estos se desplazan de una celda a otra durante un proceso de *handover* [18]. El eNB se conecta al núcleo de red a través de la interfaz s1, que a su vez se encuentra conformada por

dos interfaces: una para conectarse al nodo encargado de las funciones de control del núcleo de red, y otra que se encarga de las funciones de transferencia de los paquetes de usuario entre el eNB y el núcleo de red a través de la denominada Puerta de Enlace de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*) [4].

1.3.2.2.1. Interfaz Radio

La interfaz radio permite la interconexión y el envío de tráfico y señalización entre el UE y el eNB. Esta interfaz utiliza una torre de protocolos para la transmisión de datos y se encuentra dividida en capa de enlace, capa física y capa de red, como lo muestra la Figura 1.2.

La torre de protocolos se divide en dos planos [19].

- El plano de usuario, destinado al envío de la información de usuario (paquetes IP generados por el terminal móvil o enviados a él).
- El plano de control o señalización, destinado a transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el terminal móvil, los cuales permiten un correcto funcionamiento del sistema.

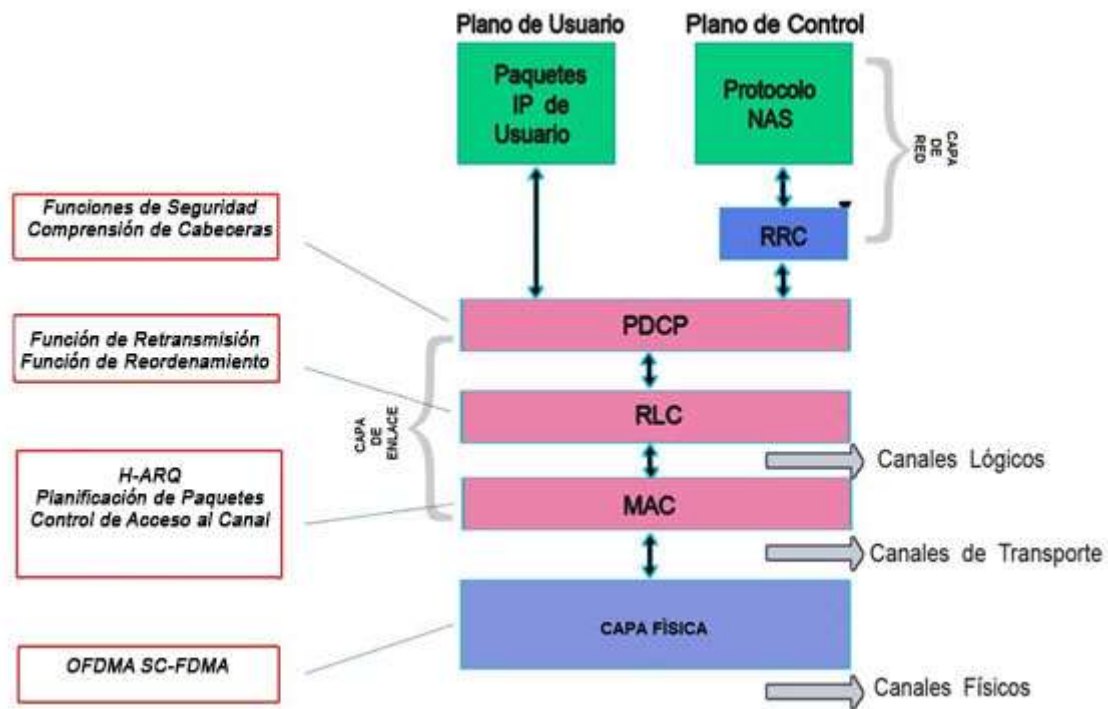


Figura 1.2 Pila de protocolos de la interfaz radio del sistema LTE. Basado en [4, 20].

1.3.2.2.2. Capa Física

Se encarga de implementar las técnicas de acceso al medio y permite conectar la interfaz radio con la capa de enlace, al ofrecer los mecanismos físicos de transmisión/recepción a través del espectro radioeléctrico. Entre sus funciones se encuentran la codificación y decodificación del canal, modulación y demodulación, mapeo de la señal a los recursos físicos tiempo-frecuencia y soporte para múltiples antenas [4, 21].

1.3.2.2.3. Capa de Enlace

La capa de enlace es la encargada de controlar el acceso a los recursos y realizar detección y corrección de errores, es decir, los procesos necesarios para que el eNB asigne los recursos de los que dispone a los UEs que los soliciten [18]. Sus subcapas son:

- **Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*):** encargada de comprimir y descomprimir las cabeceras de los paquetes IP y de cifrar los mismos para mantener la integridad de la información. Además agrega bits a la cabecera que indican la secuencia de los paquetes [22].
- **Control del Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*):** encargada de detectar y corregir errores en las tramas mediante la Solicitud de Repetición Automática (ARQ, *Automatic Repeat reQuest*), además de ordenarlas y re-ensamblarlas para entregarlas a la subcapa PDCP [23]. Es responsable de la transmisión fiable de la información a través de la interfaz aire.
- **Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*):** las funciones MAC son las de multiplexar y demultiplexar los diferentes paquetes que provienen de la capa RLC para enviarlos por la capa física a los diferentes usuarios mediante los canales lógicos². Además se encarga de controlar el acceso a la red tanto para UL como para DL y permitir que los recursos sean repartidos de la mejor manera entre los usuarios [24].

1.3.2.2.4. Capa de Red

La capa de red está conformada por la subcapa Control de Recursos Radio (RRC, *Radio Resource Control*). Tiene como función la movilidad y los procesos de HO, además maneja la señalización del protocolo Estrato de no Acceso (NAS, *Non-Access Stratum*), el cual es el encargado de la autenticación del UE y el control de sesiones para establecer y mantener la conectividad entre el UE y EPC [22].

1.3.3. Red Troncal EPC

La EPC dispone de una arquitectura de red simplificada compuesta por el dominio de paquetes únicamente, capaz de soportar todos los servicios y con capacidades de interconectar con redes públicas [25].

El dominio de conmutación de circuitos desaparece por completo de esta arquitectura, ya que todas las aplicaciones, incluidas la voz y otros servicios de tiempo real, logran funcionar eficientemente debido a la baja latencia y alta velocidad de transferencia de datos ofrecida por la red. La EPC está conformada por las siguientes entidades [4]:

- **S-GW:** proporciona el punto de anclaje en la EPC con respecto a la movilidad del UE entre eNBs. Opera en el plano de usuario.
- **Puerta de Enlace a la Red de Paquetes de Datos (PDN-GW, *Packet Data Network Gateway*):** es la pasarela hacia Internet o a otras redes de datos externas, por lo que almacena dos tipos de información, la identidad y localización del UE. Opera en el plano de usuario.

² Canales lógicos: se utilizan para describir el tipo de información que se transmite a través de la interfaz radio [4].

- **MME:** se encarga de gestionar la movilidad de los usuarios y administrar el acceso de los mismos a través de la E-UTRAN, por lo cual es responsable del seguimiento del UE cuando se encuentra en modo *idle*. También forma parte de la activación y desactivación de las Portadoras Radio para conectar el UE a una red en particular. Opera en el plano de control.
- **Servidor de Suscriptores Locales (HSS, Home Subscriber Server):** almacena y administra todo lo relativo a los datos de suscripción de los usuarios, es decir el perfil del usuario. Interactúa con la MME mediante el protocolo *Diameter*³ que realiza el proceso de autenticación. Opera en el plano de control.
- **Función de Políticas y Reglas de Tarificación (PCRF, Policy and Charging Rules Function):** establece reglas de tarificación y control de QoS de las sesiones de cada usuario del sistema. Opera en el plano de control.

1.4. GENERALIDADES DE LTE

1.4.1. Técnicas de Acceso Múltiple

El acceso al canal radio en LTE se realiza mediante dos técnicas de transmisión, una para cada enlace; Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en DL y Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Única Portadora (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para UL [26].

La Figura 1.3 muestra las señales OFDMA y SC-FDMA. Estas tienen como objetivo hacer un uso eficiente del BW para proporcionar altas velocidades de transferencia de datos y hacer frente al desvanecimiento de frecuencia selectiva en el canal radio. La principal ventaja de estas técnicas es que las subportadoras son ortogonales entre sí permitiendo una mayor eficiencia espectral.

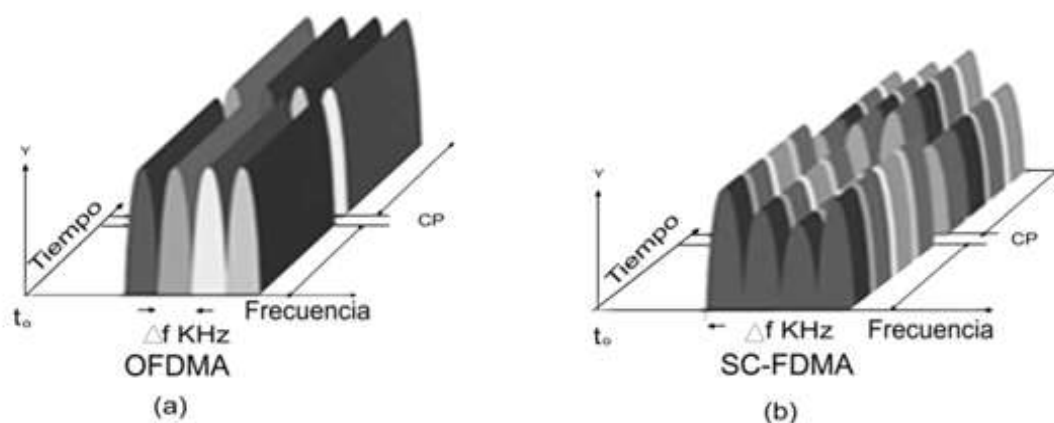


Figura 1.3 Técnicas de acceso múltiple a nivel físico. Basado en [28].

³ *Diameter*: es un protocolo de red para la autenticación de los usuarios que se conectan remotamente a internet.

1.4.2. MIMO

La técnica de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*) es una técnica que aumenta la eficiencia espectral de una red inalámbrica al trabajar en el dominio espacial, explotando fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para aumentar la velocidad de transmisión o reducir la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) [29].

1.4.3. Canales Físicos

Para transmitir eficientemente la señalización del sistema y los datos de los usuarios situados en la zona de cobertura del eNB a través de la interfaz radio, se emplean los canales físicos de tráfico y canales físicos de control. Los más importantes para el desarrollo de la tesis son [4, 30]:

- **Canal Físico de Control para el Enlace Descendente** (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*): utilizado para transmitir información de señalización a los UE. Mediante este canal se informa a los UE que recibirán una asignación de recursos.
- **Canal Físico de Control para el Enlace Ascendente** (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*): utilizado para realizar peticiones de asignación de recursos. Se emplea para optimizar la asignación de recursos en el enlace descendente, al transmitir información acerca de la calidad del canal.
- **Canal Físico Compartido para el Enlace Descendente** (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*): utilizado para la transmisión de los datos de usuario, incluyendo aquellos que corresponden a retransmisiones.

1.4.4. Estructura de Recursos de LTE en Tiempo y Frecuencia

La Figura 1.4 muestra la estructura de los recursos en los dominios de tiempo y frecuencia para LTE. En el dominio del tiempo la duración de una trama es 10 ms y está compuesta por 10 subtramas de 1 ms de duración cada una. Cada subtrama está compuesta por dos intervalos de tiempo de 0.5 ms, para un total de 20 intervalos de tiempo (*slots*). En cada intervalo de tiempo se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM.

En el dominio de la frecuencia, los recursos se agrupan en unidades de 12 subportadoras (color verde) separadas 15 KHz, ocupando así un total de 180 KHz y 0.5 ms [6]. De tal forma que 7 símbolos con 12 subportadoras, forman lo que se denomina un Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*).

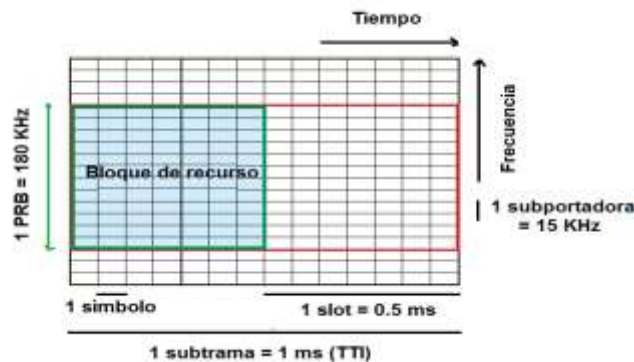


Figura 1.4 Estructura de la subtrama. Basado en [30].

1.4.5. Portadora Radio

Una Portadora Radio (RB, *Radio Bearer*) es un canal lógico (túnel) establecido entre el UE y el eNB. La RB está encargada de la QoS en la E-UTRAN. Cuando el UE se une a la red, se crean dos tipos de portadoras, una por defecto y otra dedicada. La portadora por defecto es usada para la conectividad básica e intercambio de mensajes de control y queda establecida durante toda la vida útil de la conexión. Las portadoras dedicadas, en su lugar se establecen cada vez que se crea un servicio específico. De acuerdo a lo anterior y dependiendo de los requisitos de calidad de servicio, las RBs se clasifican como: portadora de Tasa de Bit Garantizada (GBR, *Guaranteed Bit-Rate*) o portadora de Tasa de Bit no Garantizada (Non-GBR, *Non-Guaranteed Bit-Rate*) [31].

En este contexto, la definición general de QoS se traduce en variables que caracterizan el rendimiento experimentado por los usuarios. Un conjunto de parámetros de QoS, se asocia a una portadora dependiendo de los datos de la aplicación que transporta, lo que permite clasificar distintos tipos de flujo. En LTE, a través del Identificador de Clase de QoS (QCI, *QoS Class Identifier*) se definen varias clases de servicio [32]. La Tabla 1.1 muestra cada clase de servicio caracterizada por el tipo de portadora (GBR y Non-GBR), el nivel de prioridad, el retardo de entrega máxima admitido y pérdidas de paquetes.

QCI	Tipo de portadora	Prioridad	Retardo de paquetes [ms]	Pérdidas de paquetes	Servicio
1	GBR	2	100	10^{-2}	Voz
2	GBR	4	150	10^{-3}	Video
3	GBR	5	300	10^{-6}	Video no conversacional
4	GBR	3	50	10^{-3}	Juegos en tiempo real
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Señalización IMS
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Voz, video, juegos interactivos
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Video (<i>buffered streaming</i>)

Tabla 1.1 Identificador de Clase de QoS para LTE [4].

1.5. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

La RRM se encarga de administrar eficientemente los recursos de la red, así se constituye como uno de los aspectos más importantes para los operadores, dado que los recursos son escasos y costosos. La gestión de recursos encierra un amplio rango de técnicas y funciones que permiten entregar un alto *throughput* al sistema [4, 5, 16, 18]. Todas las funciones RRM están localizadas en el eNB, haciendo que otras entidades del EPC como la S-GW y la MME sean independientes de la tecnología de acceso radio, en este sentido, las funciones RRM en LTE tienen una arquitectura distribuida entre las distintas estaciones base [4, 8].

1.5.1. Control de Admisión Radio

El Control de Admisión Radio (RAC, *Radio Admission Control*) determina si un usuario nuevo puede conectarse o no al eNB. El requisito básico que tiene el RAC es proteger la QoS de los usuarios que ya están transmitiendo, al solo permitir el ingreso de un nuevo usuario si existen los recursos suficientes para satisfacer su requerimiento de QoS. El RAC hace uso de los parámetros de prioridad de QoS para tomar decisiones, de tal forma que privilegia a las RBs con mayor prioridad.

1.5.2. Control de Servicios Portadores Radio (RBC, *Radio Bearer Control*)

El RBC es la función encargada de establecer la RB tras una aceptación de transmisión de datos por el RAC, considerando la QoS para un nuevo servicio; además, se ocupa de la liberación de las RBs cuando se termina la sesión.

1.5.3. Balanceo de Carga

El Balanceo de Carga es un mecanismo utilizado para repartir el tráfico entre los eNBs de la red, cuando un eNB se encuentra sobrecargado y otros eNBs se encuentran trabajando muy por debajo de su capacidad.

1.5.4. Control de Potencia

El control de potencia gestiona el consumo energético tanto en el eNB como en el UE, de tal manera que no afecte la correcta recepción en los puntos de cobertura de un eNB. Este no solamente es de importancia para la vida de la batería de los UE, sino que representa un factor importante para la gestión de interferencias intrínsecas al control de potencia.

1.5.5. Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida (HARQ, *Hybrid Automatic Repeat reQuest*)

HARQ se implementa a nivel de la subcapa MAC, para corregir errores introducidos por el canal radio y garantizar una transmisión fiable a través del canal. Se puede definir como una técnica que combina el Control de Errores hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*) y el Control de Errores hacia Atrás (BEC, *Backward Error Correction*). La FEC consiste en enviar información redundante en cada transmisión para posibilitar la detección de errores en el receptor. BEC se implementa con mecanismos de retransmisión selectiva ARQ, en los cuales el receptor solicita la retransmisión de los datos que en el decodificador han sido determinados como erróneos.

1.5.6. Adaptación del Enlace

La Adaptación del Enlace (LA, *Link Adaptation*), intenta extraer el máximo rendimiento del canal (en términos de tasa de transmisión) mediante el Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) que permita enviar el mayor número de bits por símbolo ante unas condiciones del canal.

1.5.7. Planificación de Paquetes

La planificación de paquetes está a cargo de la asignación de porciones de espectro entre los usuarios, para lo cual realiza una selección de los UE y les asigna los recursos para que estos realicen sus transmisiones ordenadamente a través de la interfaz radio [4], y así evitar los cuellos de botella que se pueden generar en el momento que varios usuarios quieran hacer uso de los recursos de la red.

La planificación de paquetes persigue maximizar la eficiencia espectral a través de una política de asignación de recursos eficaz.

Como LTE está orientado a la transmisión de datos y cada una de las transmisiones se lleva a cabo a través de canales compartidos, la forma como se realice la planificación impacta directamente en el desempeño de la red.

2. CAPÍTULO II. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En las redes de telecomunicaciones, uno de los mecanismos para lograr una asignación eficiente de los recursos y que esté acorde a los requerimientos de los usuarios es la planificación de paquetes. La planificación de paquetes es una funcionalidad de la RRM que se encarga de decidir cuál es el próximo paquete a transmitir y a que usuario corresponde.

La planificación de paquetes desempeña un papel fundamental en la administración de los recursos del sistema, la forma en que se lleve a cabo determina en gran medida el desempeño de la red, especialmente en una que presente alta carga de tráfico [33].

2.2. DEFINICIÓN Y OBJETIVO DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES

De las funciones RRM la más relevante para cumplir el objetivo de asignar los recursos de forma eficiente es la planificación de paquetes. El planificador de paquetes reside en el eNB y su función consiste en realizar una selección inteligente de los usuarios para asignarles los recursos que estos requieren [4]. La forma en que se seleccionan los usuarios y se asignan los recursos depende de una estrategia específica, la cual es dada por el algoritmo de planificación de paquetes que se emplee.

El objetivo de la planificación de paquetes es optimizar el *throughput* en la celda mediante una adecuada estrategia al asignar los recursos [11].

2.3. CONCEPTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES

En las redes LTE existen unos aspectos que interactúan con los procesos de planificación y que se deben tener en cuenta al momento de analizarla.

2.3.1. Información de Calidad del Canal

Para la estimación de la calidad del canal en el DL, el eNB configura a los UE para que le envíen los Reportes de Estado del Canal (CSR, *Channel Status Report*) de todo el ancho de banda en uso o de una sub-banda en particular. Estos reportes contienen recomendaciones sobre los parámetros de transmisión que son más convenientes de utilizar en función de la calidad del canal. Entre la información enviada en los CSR, la más relevante para el planificador de paquetes es el Indicador de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), el cual se calcula con base a la SNR y corresponde a un valor entre 0 y 15 que representa la calidad del canal percibida por el usuario en un Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*) determinado. Cada valor de CQI tiene asociado un nivel de modulación, como lo muestra la Tabla 2.1. Entre mejor sea la calidad del canal percibida por el usuario, más alto es el valor de CQI medido y la modulación elegida es de un orden mayor. Entre más alto sea el orden de la modulación, mayor será la tasa de transmisión alcanzable.

Para los planificadores de paquetes que tienen en cuenta el estado del canal, el reporte de CQI es clave para su correcto funcionamiento y logro de sus objetivos de planificación.

CQI	Modulación
0	Fuera de Rango
1	QPSK
2	QPSK
3	QPSK
4	QPSK
5	QPSK
6	QPSK
7	16QAM
8	16QAM
9	16QAM
10	16QAM
11	16QAM
12	64QAM
13	64QAM
14	64QAM
15	64QAM

Tabla 2.1 Relación entre el CQI y la modulación [36].

2.3.2. Adaptación de la Tasa de Transmisión

La adaptación de la tasa de transmisión está muy relacionada con la Adaptación del Enlace – LA, la cual puede ser vista como parte del planificador de paquetes y determina la modulación y codificación que será empleada en cada enlace [9]. EL planificador de paquetes puede consultar el módulo de LA para conocer una estimación de la tasa de transmisión soportada por usuarios en la celda para diferentes asignaciones de PRBs [11].

El planificador de paquetes influye en el proceso de adaptación de la tasa de transmisión al elegir cual esquema de modulación y codificación es más adecuado de utilizar. La Figura 2.1 ilustra el proceso que se lleva a cabo para realizar la adaptación de la tasa de transmisión.

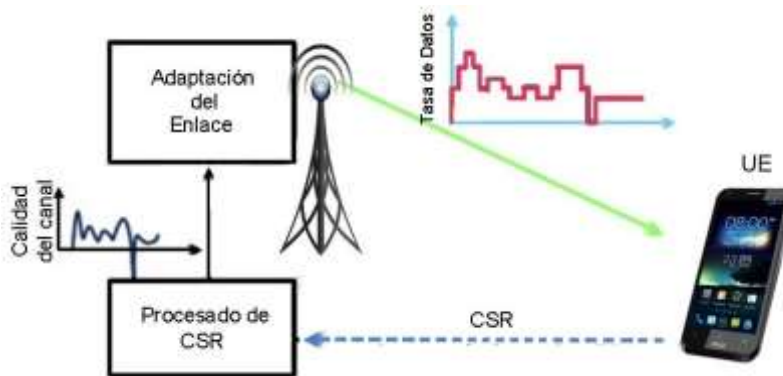


Figura 2.1 Adaptación de la tasa de transmisión.

El UE envía el CSR al eNB. A partir de este, el eNB determina la calidad del canal, con base a esta se elige la modulación que será usada en el enlace, la cual repercute en la tasa de datos con la que se esté transmitiendo información al UE.

2.3.3. Coordinación de Interferencia Inter-Celda

La Interferencia Inter-Celda (ICI, *Inter-Cell Interference*) afecta negativamente la calidad del canal percibida por el usuario. Para disminuir su impacto, al momento de asignar los recursos se tiene en cuenta restricciones que vienen en la información de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*) intercambiada entre eNBs, especialmente para los usuarios ubicados en los bordes de la celda, debido a que en celdas adyacentes se emplea la misma frecuencia, y son los usuarios más afectados por la ICI, reduciendo el *throughput* que podrían alcanzar.

2.4. PROCESO DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN DL

El planificador de paquetes es el encargado de realizar la asignación de recursos, para llevar a cabo esta función requiere de la interacción con otros módulos. La Figura 2.2 presenta el proceso que se sigue al asignar recursos desde el eNB al UE.

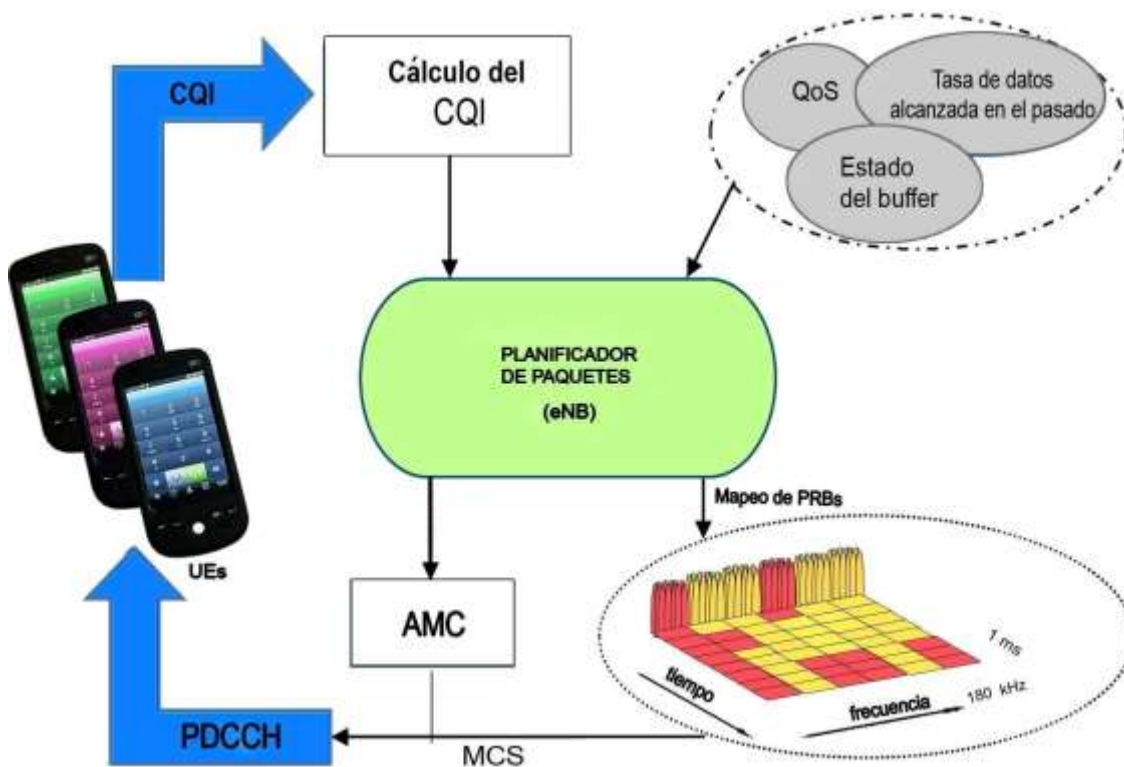


Figura 2.2 Modelo del planificador de paquetes en el enlace descendente. Basado en [37].

El proceso realizado se divide en una serie de operaciones que se repiten en cada TTI:

- 1) Los UE decodifican las señales de referencia, calculan el CQI y lo envían al eNB.
- 2) El planificador de paquetes considera uno o varios criterios de asignación de recursos en la toma de decisiones de planificación.
- 3) El módulo de Modulación y Codificación Adaptativa (AMC, *Adaptive Modulation and Coding*) elige el MCS que será usado para la transmisión de la información de cada uno de los usuarios planificados.
- 4) La identificación del usuario y los PRBs asignados se envían a los UE a través del canal PDCCH.
- 5) Los UE leen el PDCCH y si han sido planificados, reciben la información a través del PDSCH.

2.5. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES

Una característica esencial de LTE es la flexibilidad en su uso del espectro. Esto permite que LTE pueda operar en diferentes anchos de banda, desde 1.4 MHz hasta 20 MHz.

En LTE los recursos que el planificador de paquetes le puede asignar a un usuario están representados por los PRB y el número de ellos que tenga disponible depende de la canalización empleada; esta relación se muestra en la Tabla 2.2.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

Tabla 2.2 Relación entre la canalización y el número de PRBs disponibles.

El planificador de paquetes, subtrama a subtrama, decide cual usuario transmite y en que PRB. Por lo tanto, el planificador de paquetes se encarga de asignar la pareja supportadora/periodo de tiempo a cada usuario, como ilustra la Figura 2.3.

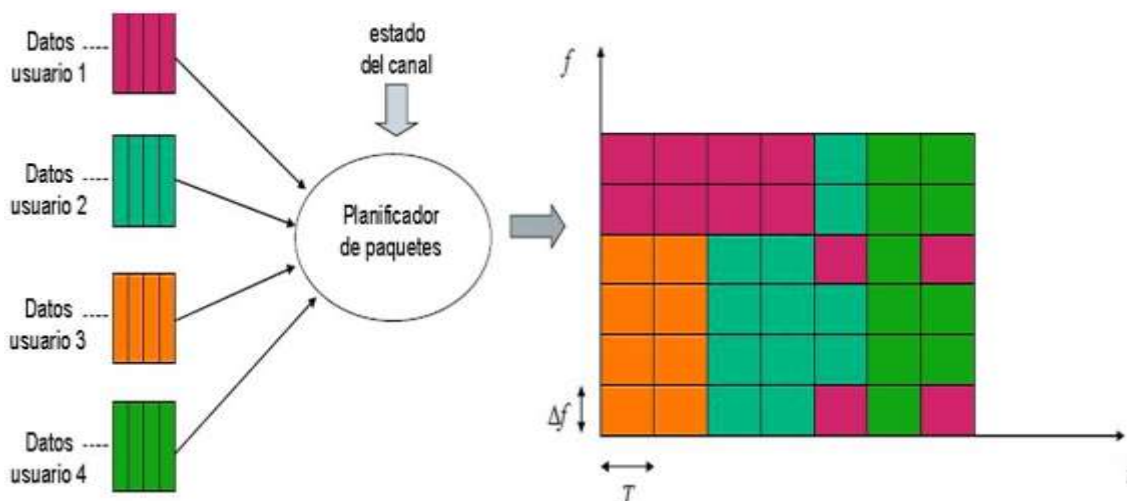


Figura 2.3 Funcionamiento de la planificación de paquetes. Basado en [4].

Debido a restricciones por señalización, solo a un número limitado de usuarios puede asignársele recursos en un mismo TTI [11]. El planificador de paquetes según un criterio de asignación de recursos (por ejemplo, el estado del canal), selecciona los usuarios que serán planificados.

Para adaptar la asignación de recursos a las rápidas variaciones del canal, en LTE el planificador de paquetes toma decisiones cada 1 ms, siendo este tiempo, la duración de la subtrama. Por lo tanto, al momento de tomar esas decisiones para asignar los recursos el planificador de paquetes puede tener en cuenta varios factores, la Tabla 2.3 resume los principales.

Criterios de Asignación	Definición
Reporte de información de calidad del canal	La planificación se realiza según la calidad del canal percibida por el usuario.
Estado de las colas de transmisión	Información sobre los usuarios que están esperando una asignación de recursos.
Estado de los buffers	Informa sobre los paquetes que están por transmitir y puede emplearse para minimizar el retardo en la entrega de estos.
Requerimientos de calidad de servicio	Se utilizan los valores QCI para priorizar unas transmisiones sobre otras.
Historial de transmisión	Al asignar recursos se tiene en cuenta el historial de transmisión de los usuarios con el fin de realizar una planificación más equitativa.
Retransmisiones HARQ	Cuando se requieren retransmisiones, parte de los recursos deben destinarse a ellas.
Interferencia en celdas cercanas	Al asignar recursos se tiene en cuenta las condiciones de interferencia que están presentando los usuarios.

Tabla 2.3 Criterios de asignación de recursos.

Un planificador de paquetes selecciona un usuario, de acuerdo a la prioridad de asignación de recursos que este tenga respecto a los demás usuarios. La prioridad es dada por al menos uno de los criterios de asignación de recursos [34].

2.6. FORMAS DE CLASIFICAR LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES

El estudio realizado identificó que existen varios factores que afectan la forma en que se realiza la asignación de recursos, lo que lleva a diferentes enfoques en la clasificación de la planificación de paquetes. Estos enfoques no son mutuamente excluyentes, por el contrario, están relacionados.

2.6.1. Con Base en la Capa en que Opera y Como se Asignan los Recursos

La función de planificación de paquetes en redes LTE puede realizarse en la capa 2 o capa 3 de acuerdo al modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*). Si al asignar los recursos no se requiere toma de decisiones rápidas, la planificación de paquetes se lleva a cabo en la capa 3 y se denomina Planificación Semi-Persistente (SPS, *Semi-Persistent Scheduling*), por el contrario si la asignación de recursos debe adecuarse a los cambios frecuentes de la calidad del canal de transmisión, la planificación se realiza en la capa 2 y recibe el nombre de Planificación Dinámica.

La Figura 2.4 muestra el tipo de planificación de paquetes que se realiza de acuerdo a la capa en que se lleve a cabo.

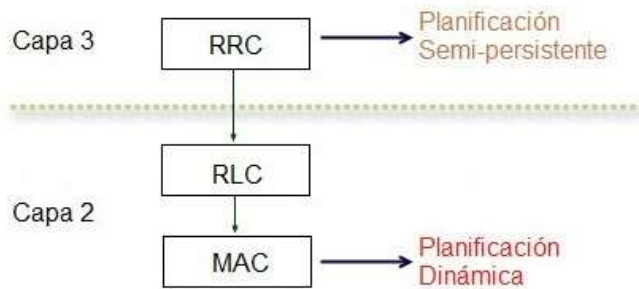


Figura 2.4 Planificación de paquetes en las capas.

2.6.1.1. Planificación Semi-Persistente

Cada vez que se planifica un usuario se le informa mediante el PDCCH que próximamente recibirá recursos. En servicios que se caracterizan por tener un tráfico que llega de forma regular y en pequeños volúmenes (por ejemplo, VoIP), asignar recursos subtrama a subtrama, es una forma poco eficiente de planificar los paquetes, ya que los recursos empleados en señalización pueden ser superiores a los usados para los datos.

La SPS en lugar de asignar recursos cada subtrama, lo hace para varias de ellas a la vez, para lo cual se configura una periodicidad que indica el número de subtramas durante las que el UE recibirá una cantidad fija de recursos [11]. Realizar la planificación de esta forma tiene las siguientes ventajas:

- Al reducir el uso de recursos destinados a señalización, se pueden atender más usuarios simultáneamente.
- El tipo de servicios para el que se usa SPS, se caracteriza por tener requerimientos estrictos de retardo. La asignación fija de recursos, reduce el tiempo de planificación.

La Figura 2.5 muestra la forma en que se asignan recursos al utilizar la Planificación Semi-Persistente.

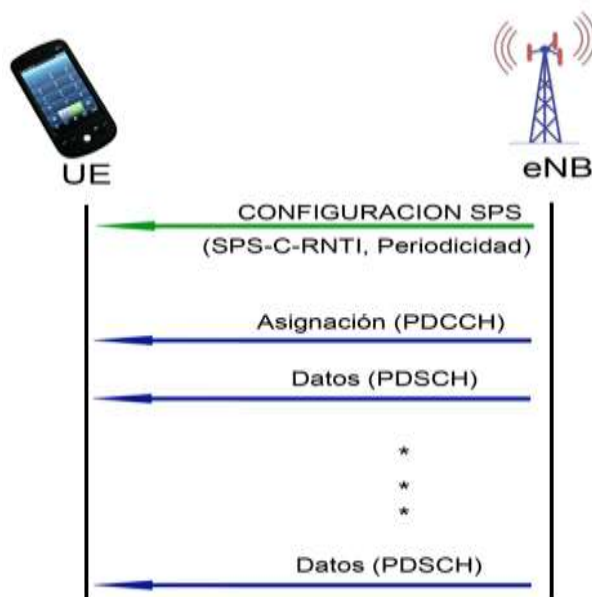


Figura 2.5 Planificación semi-persistente

El UE es preconfigurado por el eNB con un SPS-C-RNTI⁴ (*Semi-Persistent Scheduling Cell Radio Network Temporary Identifier*) y una periodicidad. Así el UE al recibir una asignación, usa el SPS-C-RNTI (en lugar del C-RNTI), y esa asignación es válida para el número de subtramas configuradas.

2.6.1.2. Planificación Dinámica

En la Planificación Dinámica el planificador de paquetes toma decisiones sobre la asignación de recursos a los usuarios subtrama a subtrama, es decir cada 1 ms, de esa forma puede reaccionar rápidamente a los cambios que afectan la eficiencia en la asignación de recursos, como por ejemplo, la calidad del canal.

La Figura 2.6 muestra la forma en que se asignan recursos al emplear la Planificación Dinámica.

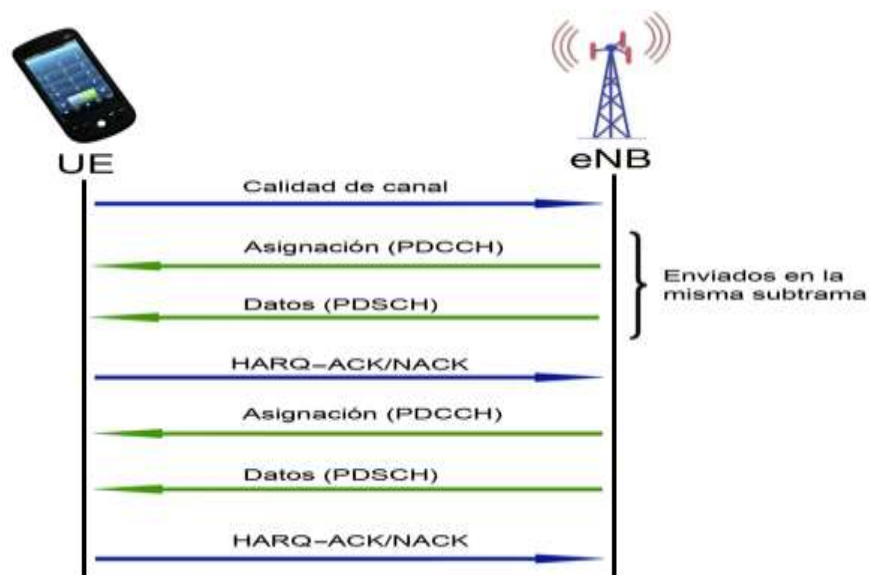


Figura 2.6 Planificación dinámica

El UE envía al eNB las mediciones de calidad del canal. El eNB a través del PDCCH le informa al usuario que ha sido seleccionado para recibir una asignación de recursos, por lo tanto debe estar pendiente del canal PDSCH para recibir los datos. El UE envía al eNB la confirmación o no de recibo de la información y de ser necesario solicita retransmisión de la misma.

2.6.2. Con Base en la Información de Calidad del Canal

Dependiendo de si en la toma de decisiones de asignación de recursos, se emplea o no el CQI, la planificación de paquetes se divide en: teniendo en cuenta el estado de canal (*Channel-aware Scheduling*) y sin tener en cuenta el estado del canal (*Channel-unaware Scheduling*).

La Figura 2.7 ilustra la diferencia entre la planificación *channel-unaware* y *channel-aware*.

⁴ El C-RNTI (*Cell Radio Network Temporary Identifier*) es un identificador asignado por el eNB al UE durante el intercambio de información, si en lugar del C-RNTI se emplea el SPS-RNTI significa que la planificación configurada es semi-persistente.

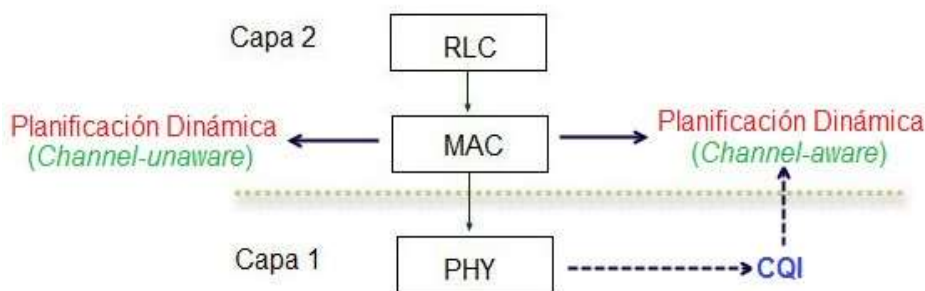


Figura 2.7 Tipos de planificación dinámica

La planificación dinámica *channel-aware* es más compleja de realizar que la *channel-unaware*, puesto que requiere una continua retroalimentación de información de la capa física.

2.6.2.1. Planificación Que No Tiene en Cuenta el Estado del Canal

En la planificación *channel-unaware*, el UE no envía mediciones de calidad del canal al eNB, por lo tanto las decisiones sobre la asignación de recursos se toman sin tener en cuenta la calidad del canal.

La planificación de paquetes *channel-unaware* se puede dividir en tres grupos.

- Distribución equitativa: se distribuyen los recursos por igual entre los usuarios.
- Basado en el tiempo de expiración: a cada paquete se le asigna un tiempo de vida (*deadline*) y el planificador transmite los paquetes que tengan el tiempo de vida más próximo a terminar.
- Basado en la tasa: se distribuyen los recursos de manera que se logre que todos los usuarios terminen con el mismo *throughput*.

2.6.2.2. Planificación Que Tiene en Cuenta el Estado del Canal

En la planificación *channel-aware*, el UE envía mediciones de calidad del canal al eNB. Estas mediciones se emplean por el planificador de paquetes al momento de asignar los recursos a los usuarios.

Al emplear la planificación *channel-aware* el planificador de paquetes saca provecho de la diversidad multiusuario, ya que al tener que asignar los recursos entre múltiples usuarios, es más probable encontrar alguno que tenga una buena calidad del canal y asignarle los recursos a ese usuario. Lo anterior debido a que cada usuario percibe el canal de forma diferente, así que si se elige para asignarle recursos en cada subtrama al usuario que tenga la mejor condición del canal, se logra que el sistema trabaje más cercano a su capacidad [4]. Entre más usuarios tenga el sistema (siempre y cuando no se sobrepase su capacidad), el beneficio de la diversidad multiusuario es mayor.

2.6.3. Con Base en el Dominio en el que se Realice

La planificación de paquetes se lleva a cabo asignando recursos en tiempo y frecuencia, así, se divide en: Planificación de Paquetes en el Dominio del Tiempo (TDPS, *Time Domain Packet Scheduling*) y Planificación de Paquetes en el Dominio de la Frecuencia (FDPS, *Frequency Domain Packet Scheduling*).

2.6.3.1. Planificación en el Dominio del Tiempo

TDPS es aquella en la que la asignación de recursos está caracterizada únicamente por la cantidad de tiempo que el planificador de paquetes le da al usuario para acceder al canal de transmisión. Cuando se emplea TDPS, en cada TTI solo un usuario recibe recursos.

La Figura 2.8 ilustra cómo se realiza TDPS considerando dos usuarios, cada uno representado por un color. Cada vez que se planifica un usuario, recibe el total de PRBs disponibles. En definitiva, cada usuario recibe el 50% de recursos en tiempo y el 50% del total de recursos.

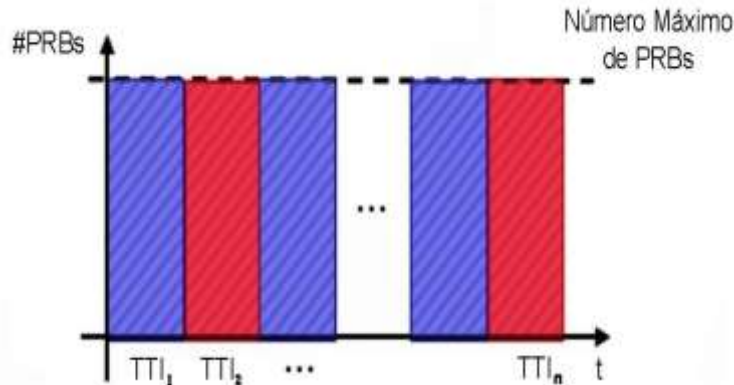


Figura 2.8 Planificación en el dominio del tiempo.

2.6.3.2. Planificación en el Dominio de la Frecuencia

FDPS es aquella en la que no solo la asignación de recursos está dada por la cantidad de tiempo que se le da al usuario para acceder al canal de transmisión, sino también por la elección de las subportadoras en la que cada usuario transmite. Así, si se elige convenientemente las subportadoras que estén presentando las mejores condiciones de canal, evitando transmitir en las que no, se obtiene un mejor desempeño del sistema. Cuando se emplea FDPS en cada TTI los recursos se reparten entre múltiples usuarios.

Para realizar una planificación en el dominio de la frecuencia se requiere conocer la calidad del canal de cada usuario para cada PRB, de forma que se pueda seleccionar para la asignación de recursos al usuario con la más alta prioridad en ese PRB [34].

La Figura 2.9 ilustra cómo se realiza FDPS al considerar a dos usuarios. En cada TTI los PRBs se distribuyen entre los usuarios atendidos por el planificador de paquetes. Esta es la principal diferencia respecto a TDPS donde en cada TTI se le asignan PRBs solo a un usuario.

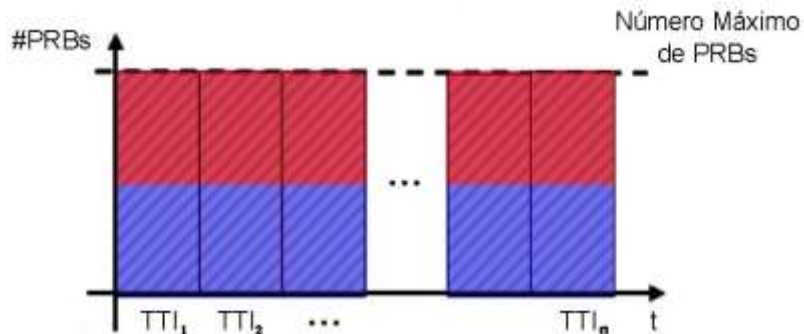


Figura 2.9 Planificación en el dominio de la frecuencia.

Al emplear FDPS, no solo los recursos en tiempo y frecuencia son compartidos entre los usuarios planificados, sino también la potencia de transmisión disponible en la celda. En contraste, al usar TDPS al solo ser un usuario planificado en cada instante de tiempo, dispone de toda la potencia de transmisión del eNB [33]. FDPS ofrece un mejor desempeño que TDPS, sin embargo su buen funcionamiento depende significativamente de la precisión de los CSR [35].

2.7. SÍNTESIS DE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES

La Tabla 2.4 resume las formas de clasificar la planificación de paquetes y la relación entre ellas.

Forma de realizar la planificación	TDPS	FDPS	<i>Channel-unaware</i>	<i>Channel-aware</i>
Dinámico	✓	✓	✓	✓
Semi-Persistente	✓	✗	✓	✗

Tabla 2.4 Formas de realizar la planificación de paquetes. Por los autores.

La Tabla 2.4 evidencia que la planificación de paquetes dinámica, recibe ese nombre no solo por la toma de decisiones sobre la asignación de recursos cada TTI, sino también por las distintas formas en que puede realizarse, lo que permite un amplio grado de elección sobre cómo se llevará a cabo la planificación de paquetes. En cambio la SPS, asigna recursos solamente en el dominio del tiempo y sin tener en cuenta las condiciones de canal, siendo esta su principal desventaja, ya que al asignar recursos durante una periodicidad determinada, en ese intervalo, el MCS se mantiene fijo y no se adecua a las variaciones del canal. La planificación de paquetes *channel-unaware* al asignar recursos sin considerar la información de calidad del canal, planifica únicamente en el dominio del tiempo, en cambio, La planificación de paquetes *channel-aware* que si tiene en cuenta la calidad del canal, planifica tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia.

La planificación de paquetes se implementa a través de algoritmos, debido a la importancia que estos tienen en el desempeño de la red, son tema actualmente de gran actividad en investigaciones y trabajos sobre LTE, es así que en la literatura existen una gran cantidad de propuestas de algoritmos de planificación de paquetes, los cuales son mejoras de algoritmos existentes o intentos por corregir una debilidad en la planificación. Estudiar en detalle los distintos tipos de algoritmos de planificación de paquetes está más allá del alcance del presente trabajo de grado.

Para cumplir con el objetivo del trabajo de grado, se requiere contar con algoritmos de planificación de paquetes que tengan muy distintas estrategias de asignar los recursos y observar como varia el desempeño de la red según el algoritmo de planificación de paquetes que se emplee.

Los algoritmos básicos de planificación de paquetes son los que asignan los recursos con mayores diferencias entre ellos, por lo cual, entre estos se eligieron los considerados para el desarrollo del trabajo de grado.

La Tabla 2.5 detalla los algoritmos básicos de planificación de paquetes más importantes y sus principales características.

Algoritmo de planificación de paquetes	Forma en que se realiza la planificación	Estrategia de asignación de recursos	Objetivo de la planificación
<i>Round Robin</i>	<i>Channel-unaware</i>	<i>Fair Queuing</i>	Asignar la misma cantidad de recursos a todos los usuarios.
<i>Max-Min Fairness</i>			Se asignan los recursos en el orden creciente de las peticiones (primero las más pequeñas, luego las más grandes).
<i>Blind Equal Throughput</i>			Todos los usuarios transmiten con el mismo <i>throughput</i> .
<i>Earliest Deadline First</i>		<i>Deadline Based</i>	A cada paquete se le asigna un tiempo de vida y se planifica aquel con el tiempo de vida más próximo a expirar.
<i>Resource Preemption</i>		<i>Buffer State Based</i>	A cada paquete se le asigna una prioridad y se transmiten los paquetes en orden descendente de las prioridades.
<i>Best CQI</i>	<i>Channel-aware</i>	<i>Throughput Maximization</i>	Asignar cada PRB al usuario que pueda lograr el máximo <i>throughput</i> en el actual TTI.
<i>Throughput to Average</i>			Maximizar el <i>throughput</i> garantizando un mínimo nivel de servicio a todos los usuarios.
<i>Proportional Fair</i>		<i>Proportional Fairness</i>	Asignar los recursos de forma que se logre un equilibrio entre <i>throughput</i> y <i>fairness</i> .
<i>Delay Sensitive</i>		<i>Deadline Based</i>	Planificar los paquetes de acuerdo al requerimiento de retardo máximo.
<i>Buffer-aware</i>		<i>Buffer State Based</i>	Se prioriza la planificación de paquetes según el estado de los buffers.

Tabla 2.5 Características de los principales algoritmos de planificación de paquetes.

Los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados son: *Round Robin* (RR), *Best CQI* y *Proportional Fair* (PF), al ser los que presentan las mayores diferencias en la forma en que seleccionan los usuarios a los cuales se les asigna los recursos. RR y Best CQI están en extremos opuestos, el primero asigna los recursos exclusivamente basado en un criterio *fairness* y el segundo únicamente realiza la asignación de recursos buscando maximizar el *throughput*. PF se ubica a medio camino entre los dos, asigna los recursos con un criterio de *fairness* tratando al mismo tiempo de maximizar el *throughput*.

En LTE se manejan distintas clases de tráfico, y a cada una ellas los algoritmos de planificación de paquetes deben asignarles los recursos solicitados. No obstante, el estudio realizado evidenció que hay una tendencia en la literatura de proponer algoritmos de planificación de paquetes orientados a una clase de tráfico (color morado en la clasificación). Cuando se dice que el planificador de paquetes está enfocado para una clase de tráfico no significa que no pueda asignar recursos a todas las clases de tráfico, sino que lo hace de una manera más eficiente frente a la clase de tráfico para la cual fue diseñado. La mayoría de los algoritmos propuestos que se especializan en una clase de tráfico se pueden clasificar así:

- Planificadores de paquetes para tasa garantizada: el parámetro fundamental que se tienen en cuenta es la GBR de forma que la planificación se centra en satisfacer este requerimiento. El tráfico al que está destinado es aquel en el cual la GBR es un parámetro sensible, como por ejemplo, una videollamada.
- Planificadores de paquetes para garantizar entrega a tiempo: el parámetro fundamental en los que se basa es el retardo, de manera que la planificación tiene como objetivo cumplir con el requerimiento de retardo extremo a extremo para la entrega de paquetes. El tráfico al que está destinado es aquel en el cual el retardo es un parámetro sensible, como por ejemplo, juegos en línea.
- Planificadores de paquetes dinámicos para VoIP: como se detalló en el ítem 2.6.1.1, en LTE por defecto para VoIP se emplea la Planificación Semi-Persistente, no obstante hay propuestas de algoritmos que enuncian que pueden planificar dinámicamente a los usuarios que usen este servicio de una forma más eficiente que la SPS.

Con base en el estudio llevado a cabo, en la Figura 2.10 se realiza una clasificación de la planificación de paquetes, desde el nivel más básico hasta llegar a los algoritmos de planificación de paquetes. Los diferentes matices de verde identifican la estructura básica de la planificación de paquetes, el color morado identifica una tendencia sobre la planificación de paquetes y el color rosado resalta los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados para el desarrollo del trabajo de grado.

La planificación de paquetes en un primer nivel se divide en semi-persistente y dinámica. En LTE, la Planificación Semi-Persistente se emplea típicamente para VoIP. Por su parte, la Planificación Dinámica se puede realizar teniendo en cuenta el estado del canal o no. Si no se tiene en cuenta el estado del canal, posibles estrategias de asignación de recursos son: distribución equitativa, basada en el tiempo de expiración y basada en la tasa. Si se tiene en cuenta el estado del canal, al asignar los recursos se tienen varios factores en consideración, por lo que las maneras en las que se puede realizar la asignación de recursos no se diferencian tan claramente como para el caso en el que no se tiene en cuenta el estado del canal. No obstante, las orientaciones más comunes al asignar los recursos son: basada en el retardo, maximizar el *throughput*, proporcionalmente justa y basada en el estado de los *buffers*.

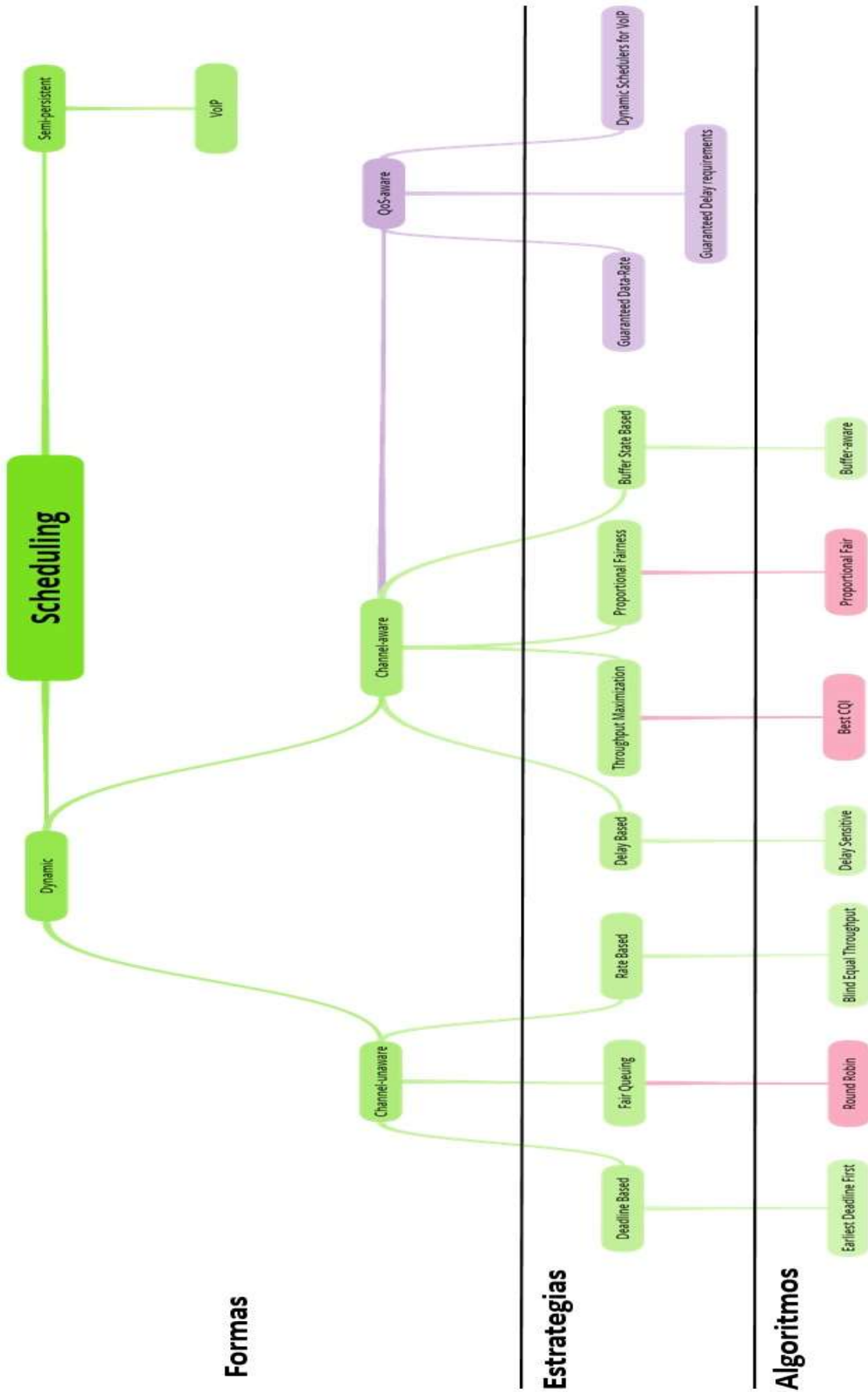


Figura 2.10 Clasificación de la planificación de paquetes. Por los autores.

En la clasificación presentada, las estrategias plantean la idea general que se sigue al realizar la planificación de paquetes y los algoritmos representan la forma puntual en como esta se lleva a cabo. Cada estrategia de asignación de recursos tiene un sinnúmero de algoritmos, la Figura 2.10 muestra el más representativo de cada estrategia.

2.8. DIFERENCIA ENTRE LA PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN DL Y EN UL

La planificación de paquetes es una función que se lleva a cabo tanto en el enlace ascendente como en el descendente. En ambos enlaces el proceso realizado es esencialmente el mismo, pero existen unas diferencias que es necesario tenerlas en cuenta al ejecutar la planificación, las cuales hacen que el estudio deba realizarse de forma independiente en cada enlace.

En el enlace ascendente en lugar de OFDMA, se emplea como técnica de acceso al medio el esquema SC-FDMA, al ser más eficiente energéticamente. Para realizar la planificación de paquetes en el enlace ascendente, el suministro de potencia depende de la batería del UE, esto impone limitaciones en el funcionamiento de los algoritmos, por lo cual los algoritmos de planificación de paquetes para el enlace ascendente deben considerar como un requisito fundamental la eficiencia energética. Por el contrario en el enlace descendente, la planificación de paquetes al partir de los eNBs no deben preocuparse por el suministro de potencia. Esta diferencia tiene un gran impacto en la elección del mecanismo de planificación de paquetes, y permite que en el enlace descendente la planificación de paquetes pueda realizarse de una forma más versátil.

El trabajo realizado en el presente trabajo de grado es sobre la planificación de paquetes para el enlace descendente y por lo tanto estará enfocado en los algoritmos de planificación para este enlace.

En este capítulo se presentaron los conceptos que permiten comprender la función de la planificación de paquetes en una red LTE.

En el capítulo 3 se realiza una descripción de los algoritmos de planificación de paquetes considerados para la evaluación de los parámetros de desempeño, concluyendo así la base teórica necesaria para proceder con el desarrollo e implementación de los escenarios de simulación.

3. CAPÍTULO III. ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE

3.1. INTRODUCCIÓN

Los algoritmos constituyen el corazón de la planificación de paquetes, definen la forma en que se eligen a los usuarios que transmiten o reciben, y cómo y cuándo deben hacerlo. Tener algoritmos que cumplan a cabalidad con esta función resulta una tarea compleja, y más si se trata de redes inalámbricas, en particular de redes LTE, ya que no solo deben tenerse en cuenta las características de la interfaz radio, sino también otros requisitos; relacionados con la capacidad, con los servicios y con el desempeño del sistema [38].

El estándar LTE indica que debe realizarse la planificación de paquetes y especifica que se requiere para llevarla a cabo (medidas de calidad del canal, señalización necesaria para asignación de recursos, etc.), pero no muestra como, por lo tanto los operadores cuentan con una gran versatilidad al momento de elegir como quieren planificar a sus usuarios.

3.2. PRINCIPIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA UN ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE

No existe el algoritmo de planificación de paquetes ideal, teóricamente se podría construir uno, pero en la práctica no sería implementable, puesto que los recursos computacionales son limitados y la planificación de paquetes es solo una más de las tantas funciones que se llevan a cabo en una red LTE [37]. Es por eso por lo que la estrategia implementada por cada algoritmo de planificación de paquetes se centra en unos pocos aspectos, pero más allá de las diferencias en la estrategia que sigue cada algoritmo de planificación de paquetes al asignar los recursos, existen unos principios que todos los algoritmos de planificación de paquetes empleados en LTE deben tratar de cumplir:

- **Baja complejidad:** la complejidad de un algoritmo de planificación de paquetes está dada por la cantidad de recursos computacionales que requiere al planificar a los usuarios. Un algoritmo de planificación de paquetes debe tomar decisiones cada 1 ms, por lo tanto una baja complejidad es un requisito esencial para garantizar que los tiempos de procesamiento al realizar los cálculos que determinan como se asignan los recursos, no sean excesivos.
- **Escalabilidad lineal:** medida de la habilidad del algoritmo de planificación de paquetes para realizar su tarea correctamente conforme aumenta la carga de trabajo. Debido a la continua variación del número de usuarios a planificar y de PRBs disponibles, es importante que la asignación de recursos siga un comportamiento lineal, de forma que sea escalable.
- **Eficiencia espectral:** determina que tan bien se aprovecha el ancho de banda del sistema, así se puede evaluar la forma en que el algoritmo de planificación de paquetes ha repartido los recursos entre los usuarios, y con ello la consecución del objetivo de la RRM.
- **Maximización del *throughput*:** *el throughput* es un parámetro determinante en el desempeño de la red, por lo tanto, los algoritmos de planificación de paquetes

deben buscar alcanzar el *throughput* por usuario más alto posible, de forma que el sistema trabaje lo más próximo a su capacidad.

- *Fairness*: determina como han sido compartidos los recursos entre los usuarios. Un algoritmo de planificación de paquetes que se enfoque en lograr la maximización del *throughput*, puede llevar a una asignación injusta de los recursos entre los usuarios, por eso, los algoritmos de planificación de paquetes deben considerar criterios de *fairness*, con el fin de que a todos los usuarios se les garantice un mínimo nivel de servicio.

La baja complejidad y la escalabilidad son principios que se complementan, pero maximizar el *throughput* (conexo a la eficiencia espectral) y el *fairness* a la vez no es posible. LTE al ser una red inalámbrica, por la presencia del canal radio ocasiona que sea difícil maximizar el *throughput* y lograr una asignación de recursos equitativa al mismo tiempo en esta red [39].

3.3. FORMA EN QUE UN ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES ASIGNA RECURSOS EN LTE

La mejor forma de asignar los recursos puede llevar a problemas complejos, por esto, los algoritmos de planificación de paquetes en LTE están basados en el cálculo de métricas por cada PRB y para cada usuario, así los principios de baja complejidad y escalabilidad lineal están garantizados, pues cada PRB es asignado al usuario con la más alta métrica, independientemente de otros PRBs. Al realizar la asignación de recursos un algoritmo de planificación de paquetes debe decidir para cada PRB n y en cada subtrama t , el usuario que debe transmitir. Esta decisión se realiza con base a la comparación de métricas.

La métrica está dada por la expresión matemática que determina la prioridad de transmisión de cada usuario en cada PRB, esta se define con base en: calidad del canal, estado de las colas de transmisión, estado de los *buffers*, requerimientos de QoS, historial de transmisión, retransmisiones HARQ e ICI. En cada TTI, el algoritmo de planificación de paquetes calcula la métrica para determinar a qué usuario se le asignará un determinado PRB. Cada algoritmo de planificación de paquetes realiza de forma diferente el cálculo de la métrica, pero de forma general todos los algoritmos de planificación asignan el j -th PRB al i -th usuario si su métrica m_{ij} es la más grande.

3.4. ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES SELECCIONADOS

3.4.1. Round Robin (RR)

RR es un algoritmo de planificación que no tiene en cuenta el estado del canal [40]. Su objetivo de planificación es: “asignar por igual los recursos entre los usuarios”.

La probabilidad de que a un usuario se le asignen recursos, está dada por:

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

Y responde a la siguiente expresión [2]:

$$J = \max_{i=1 \dots N} (Q_i(t)) \quad (3.2)$$

Donde N , es el número total de usuarios a tener en cuenta en la asignación, $Q_i(t)$ la cantidad de información por transmitir del UE e i es el UE seleccionado en el instante t . J es el UE que recibe la asignación dentro del conjunto i .

La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo del algoritmo RR.

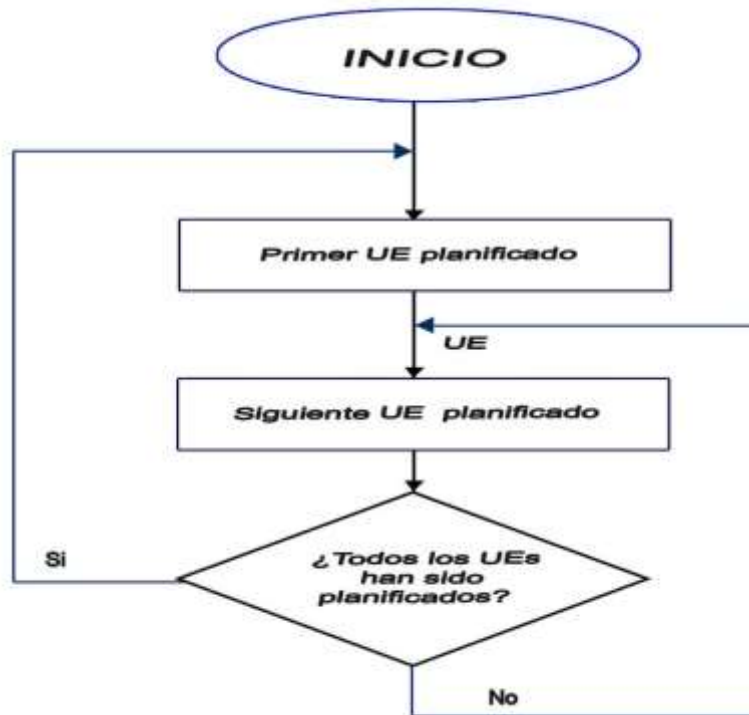


Figura 3.1 Diagrama de flujo del algoritmo Round Robin

El funcionamiento responde a la ecuación (3.2). Los recursos se asignan a los usuarios de forma cíclica [41], el planificador va asignando recursos usuario por usuario, de manera que cuando se termine de planificar a todos los usuarios, cada uno de ellos habrá recibido la misma cantidad de recursos.

La métrica del RR se muestra en la ecuación (3.3).

$$m_{ij}^{RR} = t - T_i \quad (3.3)$$

Donde t es el tiempo actual y T_i es la última vez que el usuario fue planificado.

Observando los parámetros que intervienen en el cálculo de la métrica se nota que el *fairness* está dado únicamente por la cantidad de tiempo en la que el canal está ocupado por cada usuario, pues la calidad del canal no se considera.

3.4.2. Best CQI

Best CQI es un algoritmo de planificación de paquetes que al momento de asignar los recursos tiene en cuenta el estado del canal. Su objetivo de planificación es: “asignar los recursos al usuario que tenga las mejores condiciones del canal”.

La Figura 3.2 ilustra el diagrama de flujo del algoritmo Best CQI.

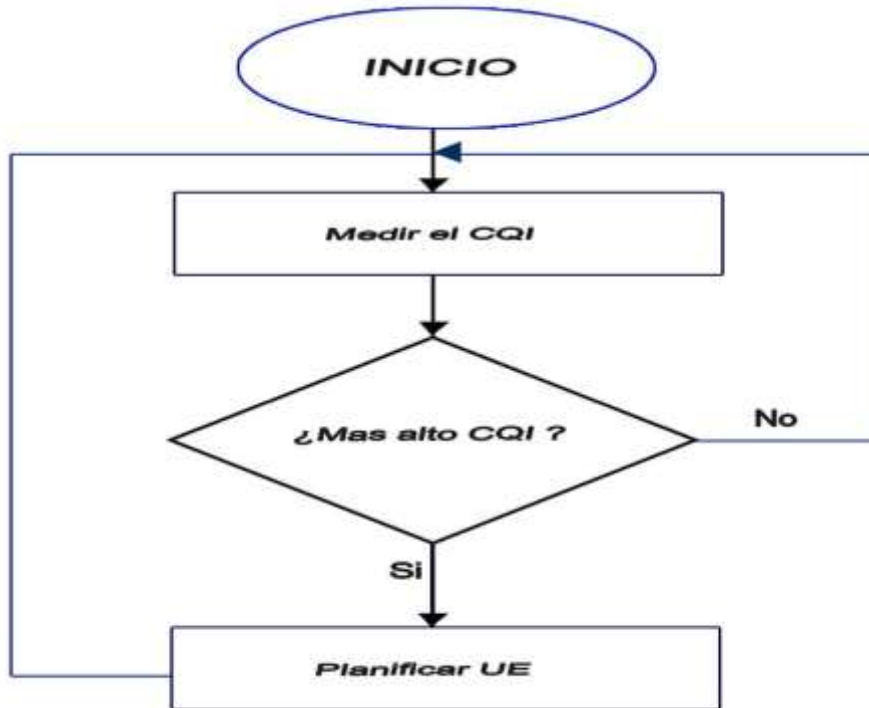


Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo Best CQI

Best CQI requiere conocer todos los CQIs de los usuarios a ser planificados. Al intentar asignar recursos a un usuario el algoritmo compara su CQI con el del resto de los usuarios, si es el más alto lo planifica y el proceso vuelve a comenzar, sino selecciona al siguiente usuario, hasta encontrar el que tenga el CQI más alto.

La métrica del Best CQI se muestra en la ecuación (3.4).

$$m_{ij}^{Best\ CQI} = d_j^i(t) \quad (3.4)$$

Donde $d_j^i(t)$ representa la tasa de transmisión esperada para el i -th usuario en el tiempo t sobre el j -th PRB. Se calcula con base al reporte de CQI enviado por el usuario.

El cálculo de la métrica para el Best CQI depende exclusivamente del *throughput* alcanzable por el usuario, entre mejor sea la calidad del canal medida, mayor será el *throughput* que el usuario pueda conseguir.

Con Best CQI los usuarios que experimenten malas condiciones del canal tienen menos probabilidad de que se le asignen recursos [41].

3.4.3. Proportional Fair (PF)

PF es un algoritmo que tiene en cuenta el estado del canal. Su objetivo de planificación es: “balancear la asignación de recursos entre los usuarios que tienen un buen estado del canal y los que no lo tienen”.

Este algoritmo de planificación de paquetes intenta maximizar la capacidad de la red garantizando una tasa mínima de transmisión para cada UE, de tal forma que, asigna una prioridad más baja a los UE que han tenido una tasa de transmisión alta, de esta forma permite que los usuarios con malas condiciones de canal puedan transmitir.

El algoritmo PF responde a la ecuación (3.5) de la siguiente manera: $m_{k,n} = \log(1 + SNR_K(n))$ representa la realimentación de la calidad del canal del UE k en la subtrama n y $M_{k,n}(t)$, corresponde a la medida promedio del *throughput* para el UE k calculado en la subtrama n .

Por tanto, PF al asignar los recursos, realiza un seguimiento del *throughput* promedio $M_{k,n}(t)$, de cada UE en cada subportadora. En un TTI, el algoritmo PF transmite en cada subportadora los datos del UE k , que tenga el j más grande de entre todos los usuarios activos en el sistema.

$$j(k, t) = \arg \max_k \left(\frac{m_{k,n}}{M_{k,n}(t)} \right) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

La Figura 3.3 muestra el diagrama de flujo del algoritmo PF.

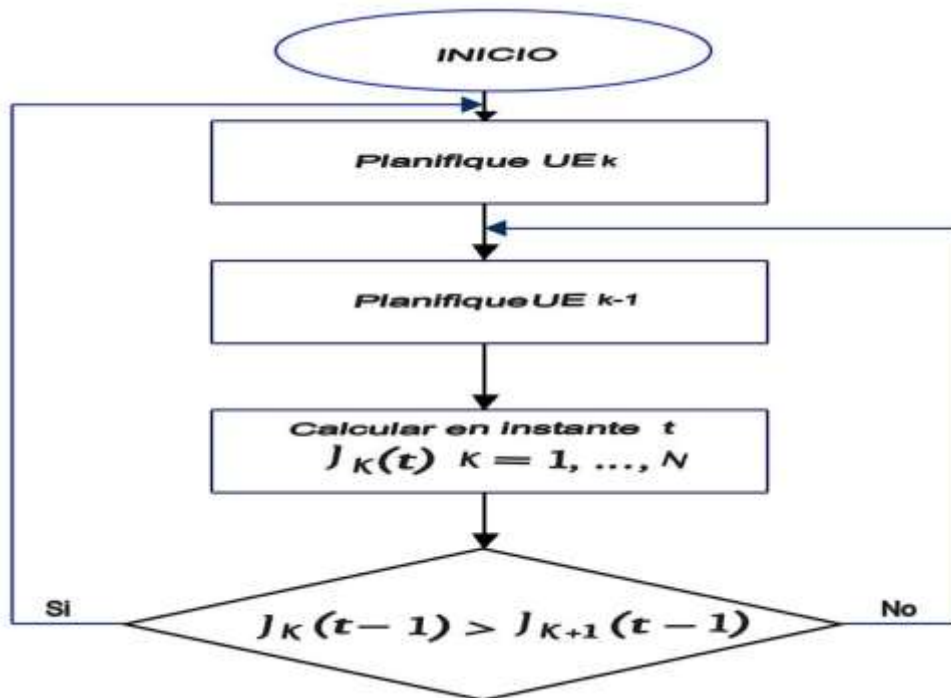


Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo Proportional Fair

Para asignar los recursos, se tiene en cuenta, en primer lugar $m_{k,n}(t)$ que representa la tasa máxima que se puede transmitir en el siguiente intervalo de tiempo según la SNR medida y en segundo lugar $M_{k,n}$ que es la tasa promedio en la que se ha estado transmitiendo. Entonces el planificador selecciona para transmitir el UE con mayor $j(k, t)$ entre un conjunto k de UE.

La ecuación (3.6) muestra la métrica del PF.

$$m_{ij}^{PF} = \frac{d_j^i(t)}{R^i(t-1)} \quad (3.6)$$

Donde $R^i(t-1)$ es el *throughput* promedio logrado por el i -th usuario.

Para el cálculo de la métrica del PF no solo se tiene en cuenta la tasa de transmisión esperada con base a la calidad del canal, sino también el *throughput* pasado logrado por el usuario, con lo que los usuarios que no estén experimentando buenas condiciones de canal no se quedan sin asignación de recursos [42].

3.5. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

El desempeño de una red LTE se evalúa mediante la medición de parámetros, los cuales influyen en el correcto funcionamiento del sistema. La Figura 3.4 identifica los parámetros más relevantes asociados a las tareas de los algoritmos de planificación de paquetes que afectan el desempeño de una red LTE.

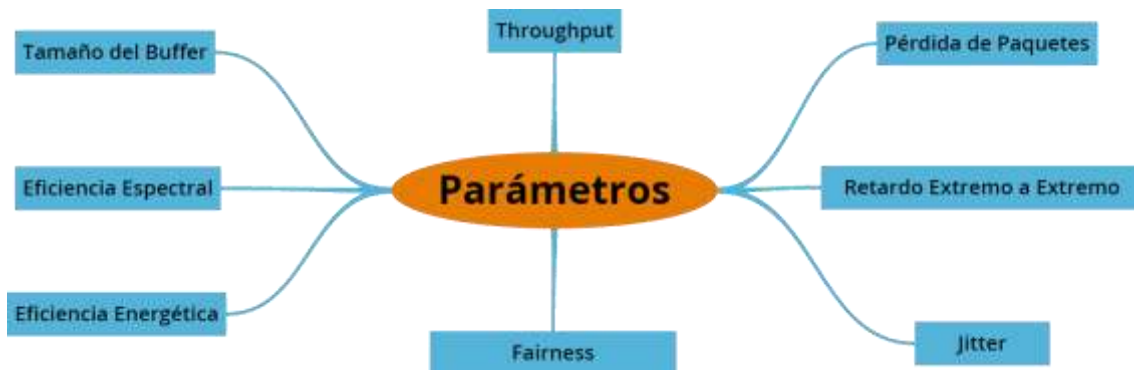


Figura 3.4 Parámetros para evaluar desempeño de una red LTE

- **Throughput:** se define como la tasa de transferencia de datos de usuario y representa la capacidad de datos que un elemento de la red puede transmitir en un periodo de tiempo dado. El *throughput* que afecta el desempeño de la red según el algoritmo de planificación de paquetes empleado es aquel que se mide en el enlace entre el eNB y el UE, el cual depende de la modulación empleada, la cual a su vez se determina acorde a la calidad de canal experimentada por el usuario.
- **Retardo Extremo a Extremo:** es el tiempo que tarda un paquete en viajar desde el origen hasta el destino. Se determina por la suma de todos los retardos que sufre el paquete al transitar por la red y el enlace inalámbrico.
- **Variación de Retardo (Jitter):** se define como la variación de los retardos presentados entre paquetes de datos consecutivos que forman parte de un mismo tráfico.

- **Fairness:** medida que indica el grado de equidad con el que se han atendido a los usuarios. En una red de telefonía móvil, el grado de equidad está determinado con base a otro parámetro, generalmente el *throughput*.
- **Pérdida de paquetes:** ocurre cuando paquetes que viajan a través de la red, no llegan a su destino. Estas pérdidas se deben principalmente a que el canal inalámbrico es afectado por factores que ocasionan fallas en el enlace o degradan la señal.
- **Tamaño del buffer:** mientras se planifican, los paquetes se almacenan en *buffers*, haciendo que el tamaño de estos varíe continuamente.
- **Eficiencia espectral:** se define como la tasa de datos que se envía sobre un ancho de banda y permite determinar el aprovechamiento que hace del mismo.
- **Eficiencia energética:** medida que identifica el consumo de energía por parte del algoritmo de planificación de paquetes al momento de realizar sus tareas de asignación de recursos.

La Tabla 3.1 presenta posibles parámetros que permiten evaluar el desempeño de la red, y cuáles de ellos son los esenciales a considerar, de acuerdo a los criterios de asignación de recursos de los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i>	Retardo	<i>Jitter</i>	<i>Fairness</i>	Pérdida de Paquetes	Tamaño del <i>Buffer</i>	Eficiencia Espectral	Eficiencia Energética
RR	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Best CQI	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗
PF	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗

Tabla 3.1 Parámetros de desempeño y su relevancia de acuerdo a los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados.

Por lo tanto, los parámetros considerados para evaluar el desempeño de la red en el desarrollo del presente trabajo de grado son: *throughput*, *fairness* y eficiencia espectral, puesto que la información de calidad del canal es el criterio de asignación de recursos principal que consideran los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados. La calidad del canal afecta directamente la consecución del *throughput* y la eficiencia espectral. *Fairness* se considera como parámetro, ya que permite determinar el tratamiento que les da los algoritmos de planificación de paquetes a los usuarios.

3.6. CONSIDERACIONES FINALES

Las diferencias entre las estrategias de planificación son visibles en una red con alta carga de tráfico [20], de lo contrario, en una red con baja carga, el sistema cuenta con los recursos suficientes para satisfacer las peticiones de los usuarios, por lo tanto, más allá del algoritmo de planificación de paquetes que se emplee, cada usuario recibirá los

recursos que solicite y así la diferencia entre emplear un algoritmo de planificación u otro se reduce.

Otro aspecto importante a considerar al evaluar el impacto de la planificación de paquetes en el desempeño de la red, es el tipo de tráfico considerado. Para observar las diferencias al emplear distintos algoritmos de planificación de paquetes, es conveniente usar el peor caso de tráfico, el cual está dado por el modelo *full buffer*, en el que siempre hay información por transmitir desde el eNB a todos los UEs en la celda. Si se emplea un modelo de tráfico que no sea *full buffer*, es decir que la información a transmitir en los buffers es finita, la información se transmite de forma intermitente e inclusive hay periodos largos en los que no hay información a transmitir, es el caso, por ejemplo del modelo de tráfico de navegación web. Una página web tiene un determinado tamaño y después de transmitirla, no hay información a transmitir para el UE, hasta que el usuario abra una nueva página. Para este caso, Best CQI, una vez que el usuario con el mejor CQI ya no tenga información a transmitir, asignará recursos al siguiente usuario con mejor condición del canal y que no tenga el buffer vacío, así Best CQI logrará un mayor grado de *fairness* respecto al modelo *full buffer* y las diferencias en la forma de asignar los recursos frente a los demás algoritmos de planificación de paquetes no será tan evidente [41].

En este capítulo se explicaron los algoritmos de planificación de paquetes seleccionados para el desarrollo del trabajo y los parámetros relacionados con las tareas de planificación mediante los cuales se evalúa el desempeño de una red LTE.

En el siguiente capítulo se definen los escenarios de trabajo y simulaciones a realizar con el fin de evaluar el impacto de la planificación de paquetes en el enlace descendente sobre el desempeño de una red LTE.

4. CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe la simulación; metodología, herramienta software y definición de los escenarios mediante los cuales se evaluará el desempeño de la red según el algoritmo de planificación de paquetes empleado. También se presentarán los resultados y el análisis de los mismos.

4.2. ASPECTOS GENERALES SOBRE SIMULACIÓN DE REDES LTE

Las herramientas de simulación son fundamentales para reflejar el desempeño de la red ante cambios introducidos en la configuración de la misma, permitiendo realizar pruebas que lleven a evaluar y predecir el comportamiento de modelos abstractos de un sistema, que en un ambiente real serían difíciles y costosos de implementar.

Lo primero que se debe tener en cuenta sobre la simulación de redes celulares es el nivel de abstracción requerido. La simulación de una red LTE puede realizarse a nivel de enlace o a nivel de sistema. Cuál de las dos opciones elegir dependerá de lo que se requiera evaluar.

4.2.1. Simulación a Nivel de Enlace

La simulación a nivel de enlace analiza lo que pasa en el enlace de comunicación radio entre el eNB y uno o más UEs; se utiliza para evaluar y optimizar las propiedades de la capa física y los algoritmos que se emplean en ella. Este tipo de simulación requiere un modelo detallado del enlace radio, lo cual genera una mayor complejidad al ejecutar simulaciones, por tal razón es difícil extender este tipo de simulación a otras capas del modelo de comunicación [43].

En la simulación a nivel de enlace generalmente la ICI no es considerada y el impacto de la planificación de paquetes está restringido a un UE; simular todos los enlaces radio entre los UEs y los eNBs es una forma poco práctica debido a la gran cantidad de recursos computacionales que podrían ser requeridos [45].

4.2.2. Simulación a Nivel de Sistema

En las simulaciones a nivel de sistema la capa física se abstrae por modelos matemáticos que capturan las características esenciales de la misma con una alta precisión y una baja complejidad [44].

La simulación a nivel de sistema está orientada a evaluar el desempeño de la red bajo diferentes configuraciones. Generalmente se pueden implementar los escenarios mostrados en la Figura 4.1. Una celda con un usuario, una celda con múltiples usuarios y múltiples celdas con múltiples usuarios.

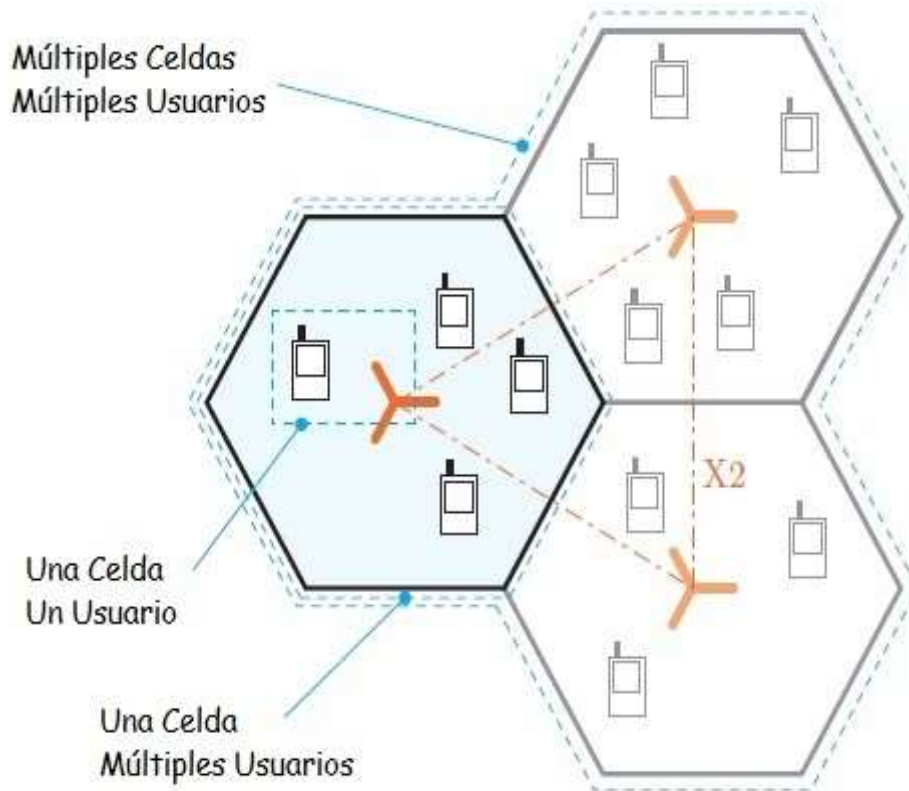


Figura 4.1 Escenarios posibles en un simulador a Nivel de Sistema.

En el escenario de una celda con múltiples usuarios se puede analizar entre otras cosas, las funcionalidades RRM, entre ellas la planificación de paquetes.

El escenario de múltiples celdas con múltiples usuarios, permite estudiar entre otras cosas, la ICI y la planificación de paquetes conjunta (*Coordinated Scheduling*).

La Tabla 4.1 resume las principales diferencias entre la simulación a nivel de enlace y a nivel de sistema.

Nivel de Enlace	Nivel de Sistema
Objetivo: estudiar el comportamiento del enlace.	Objetivo: estudiar el desempeño de la red.
Un único enlace	Múltiples enlaces
Una celda	Múltiples celdas
Un eNB	Múltiples eNBs
Énfasis en la Capa Física	Énfasis en todas las capas. La Capa Física es abstraída por un modelo simplificado.

Tabla 4.1 Comparación simulación a Nivel de Enlace vs Nivel de Sistema. Basado en [43].

En el desarrollo del trabajo se requiere configurar una red LTE y probar su desempeño con diferentes algoritmos de planificación de paquetes, por lo tanto, el tipo de simulación adecuado es a nivel de sistema.

4.3. SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

La herramienta de simulación debe soportar los siguientes requerimientos y/o configuraciones:

- Simulación a nivel de sistema para redes LTE.
- Simulación para el enlace descendente.
- Diferentes escenarios (sector, una celda, múltiples celdas).
- Anchos de banda desde 1.4 hasta 20 MHz.
- Algoritmos de planificación de paquetes *channel-aware* y *channel-unaware* con muy distintos objetivos de planificación.

4.3.1. Herramientas Software para Simular Redes LTE

A continuación se describen los simuladores a nivel de sistema que fueron considerados.

- **LTE-Sim:** Simulador de código libre, basado en C++ empleando el paradigma orientado a objetos. Para su funcionamiento requiere un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) y un ambiente Linux. Permite la simulación de mecanismos de planificación de paquetes tanto en UL como en DL en ambientes de múltiples celdas y múltiples usuarios teniendo en cuenta la movilidad del usuario, optimización de los recursos radio, técnicas de reusó de frecuencias y el módulo AMC. En el funcionamiento de los mecanismos de planificación de paquetes se ha introducido el concepto de *channel-sensitive*⁵ [46,47].
- **LTE MAC Lab:** Herramienta software para DL desarrollada en Matlab. Permite estudiar el comportamiento de la red, centrándose en las funcionalidades RRM, especialmente en la planificación de paquetes y la adaptación del enlace bajo diferentes modelos de propagación y movilidad [48].
- **Nemo Handy, Nemo Outdoor y Nemo Analyze:** Herramientas de la suite profesional Nemo para el análisis de redes. Soporta diferentes tecnologías, entre ellas LTE. Mediante sus herramientas permite analizar cualquier aspecto de la red, las mediciones se obtienen en entornos reales y posteriormente se analizan con las herramientas software [49].
- **LTE Downlink System Level Simulator:** Simulador para DL implementado en Matlab que emplea las capacidades de la programación orientada a objetos. Permite simulaciones para ambientes de una celda y múltiples celdas con variación en el número de usuarios, movilidad y posición. Para cada ambiente se pueden realizar un amplio rango de configuraciones, las más relevantes son: ancho de banda, número de antenas en transmisión y recepción, modo de transmisión, número de tramas a simular, modelo del canal y soporte para diferentes algoritmos de planificación [50-51].

⁵ Otra forma de decir que los algoritmos de planificación de paquetes tienen en cuenta el estado del canal.

La Tabla 4.2 resume las principales características de los simuladores descritos.

Características	LTE-SIM	LTE MAC Lab	Nemo	LTE Downlink System Level Simulator
Nivel de sistema	✓	✓	✓	✓
Para DL	✓	✓	✓	✓
Open source	x	✓	x	✓
Freeware	✓	x	x	x
Licencia académica	✓	x	x	✓
Interfaz gráfica	x	x	✓	x
Facilidad al configurar	x	✓	✓	x
Facilidad de uso	x	✓	✓	x
Manejo de diferentes escenarios	✓	✓	✓	✓
Soporte de todos los anchos de banda para LTE	✓	✓	✓	✓
Algoritmos de planificación de paquetes <i>Channel-aware</i>	✓	✓	✓	✓
Algoritmos de planificación de paquetes <i>Channel-unaware</i>	x	✓	x	✓
Algoritmos de planificación de paquetes con muy distintos objetivos de planificación	x	✓	x	✓

Tabla 4.2 Tabla comparativa de las herramientas de simulación. Por los Autores.

LTE Downlink System Level Simulator se eligió como herramienta de simulación, al ser el más adecuado para verificar el desempeño de la red al probar los algoritmos de planificación de paquetes con diferentes escenarios y configuraciones de red. Además tiene bien modelada la capa física y es un simulador computacionalmente eficiente [45].

LTE Downlink System Level Simulator se obtuvo mediante una licencia académica otorgada por el Instituto de Telecomunicaciones de la Universidad de Viena para usar la versión 1.8r1375 del simulador.

4.3.2. Metodología de Simulación

La Metodología de simulación adoptada para realizar el trabajo de grado se basa en [52, 53] y se resume en los siguientes pasos:

- a. **Definición de los escenarios y casos de simulación:** se definen los escenarios a implementar con sus respectivos casos de simulación, a partir de los cuales se ejecutarán las simulaciones.
- b. **Definición de las características de los escenarios de simulación:** se presentan los parámetros definidos en los escenarios para la ejecución de las simulaciones.
- c. **Ejecución de las simulaciones:** con los escenarios, los casos y los parámetros definidos, se ejecutarán las simulaciones.
- d. **Análisis de resultados:** finalizada la ejecución de las simulaciones, se presentan los resultados arrojados por el simulador con su análisis correspondiente.

4.3.2.1. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación

Para analizar el impacto que tiene la planificación de paquetes en el desempeño de una red LTE, se emplean 3 escenarios de simulación, el primero tiene 3 casos, mientras que el segundo y tercero constan de 1 caso cada uno.

- **Escenario 1:** Se define un sector que representa un área urbana con 10 usuarios con posiciones fijas. La Figura 4.2 muestra el escenario 1.

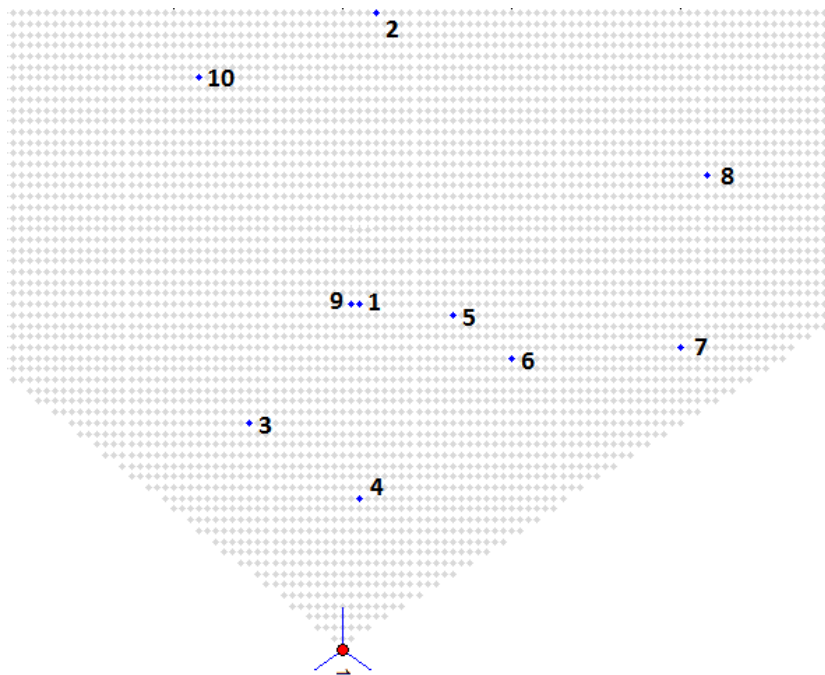


Figura 4.2 Escenario de Simulación No 1.

- **Escenario 2:** Se define una celda con tres sectores, compuesta por 60 usuarios. Los usuarios tienen movilidad. En la Figura 4.3 se aprecia la configuración de la celda y la distribución de los usuarios en ella. Los números en color gris identifican los sectores.

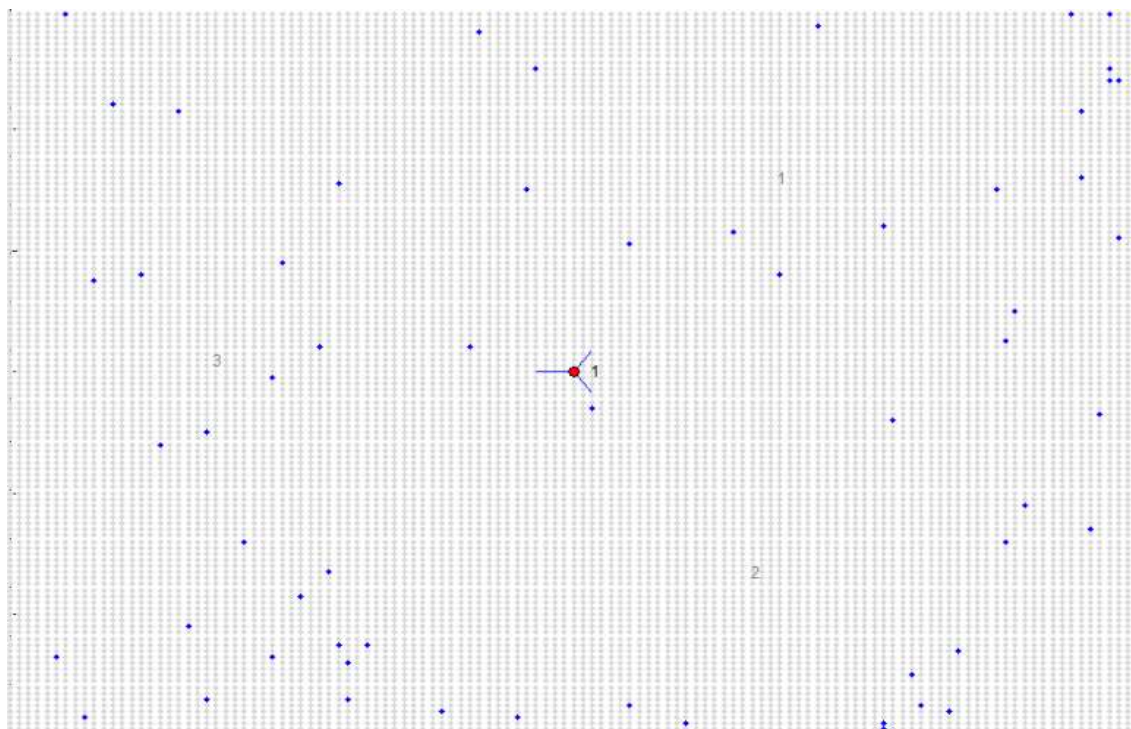


Figura 4.3 Escenario de Simulación No 2.

- **Escenario 3:** Se define un sistema de 7 celdas, donde cada celda tiene la configuración del escenario 2. La Figura 4.4 muestra el escenario 3.

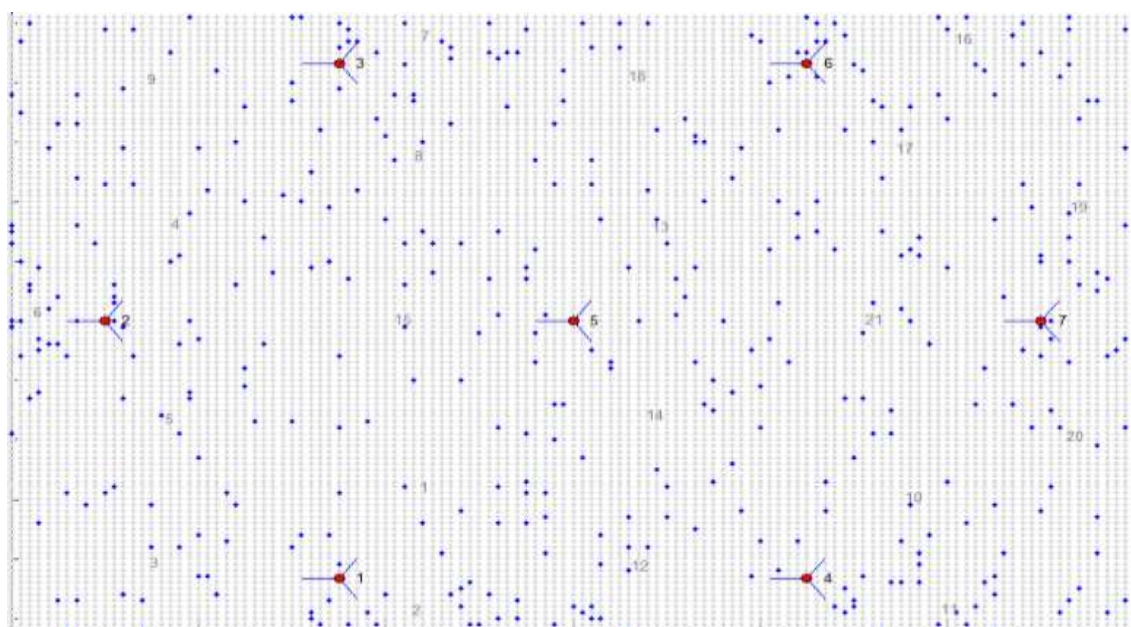


Figura 4.4 Escenario de Simulación No 3.

Para cada escenario se definen casos de simulación, cuya variación entre ellos está dada por: el área de trabajo, el ancho de banda y/o el número de usuarios. Los escenarios y sus casos de simulación se resumen en la Tabla 4.3.

Escenarios de Simulación					
Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
Sector		Celda		Sistema de 7 Celdas	
Casos de Simulación					
Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	
3 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz	20 MHz	
Número de Usuarios					
10 Usuarios		60 Usuarios		420 Usuarios	

Tabla 4.3 Escenarios y Casos de Simulación.

4.3.2.2. Definición de las Características Técnicas de los Escenarios de Simulación

En LTE La potencia de transmisión varía de acuerdo al ancho de banda empleado, la relación entre ambos parámetros se muestra en la Tabla 4.4.

Parámetro	Valor
Potencia de Transmisión	20 Watts, para 1.4, 3 y 5 MHz
	40 Watts, para 10, 15 y 20 MHz

Tabla 4.4 Valores de Potencia de Transmisión en LTE. Basado en [54].

El modelo de canal *Typical Urban*⁶ fue el elegido para las simulaciones con anchos de banda de 3, 5 y 10 MHz, sin embargo este modelo no es adecuado para anchos de banda superiores a 10 MHz, razón por la cual para los escenarios 2 y 3 se empleó el modelo de canal *extPedB*, que es una extensión de los modelos de canal de la ITU para el ancho de banda de 20 MHz [55].

⁶ *Typical Urban* es un modelo de canal que se emplea en simulaciones de redes inalámbricas para caracterizar el medio de propagación en un ambiente urbano.

La Tabla 4.5 presenta los parámetros de simulación seleccionados para la configuración de la red de cada uno de los escenarios.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Área de trabajo	1 Sector	1 Celda (3 Sectores)	7 Celdas (21 Sectores)
Número de Usuarios	10	60	420
Ancho de Banda	3, 5, 10 MHz	20 MHz	
Número de PRBs	15 (3 MHz) 25 (5 MHz) 50 (10 MHz)	100	
Distancia entre eNBs	-	-	1 Km
Modelo de Propagación	TS 36.942 – Área Urbana		
Perdidas por acoplamiento	70 dB – Área Urbana [12]		
Tipo de Antena	KATHREIN 742212		
Configuración de Antenas (NTX x NRX)	1 x 1		
Frecuencia de Operación	2100 MHz		
Potencia de Transmisión	20 Watts (3 y 5 MHz) 40 Watts (10 MHz)	40 Watts	
Modelo de Canal	TU (Typical Urban)	extPedB (Extension of PedB)	
Velocidad del UE	0 Km/h	3 Km/h	
Duración de la Simulación	30 Subtramas	100 Subtramas	
Modelo de Tráfico	Full Buffer⁷		
Algoritmo de Planificación de Paquetes	Round Robin Proportional Fair Best CQI		

Tabla 4.5 Parámetros de los Escenarios de Simulación.

4.3.2.3. Ejecución de las Pruebas de Simulación

La ejecución de las pruebas de simulación se llevó a cabo en la herramienta LTE Downlink System Level Simulator. Para el escenario 1 como está limitado a un sector y

⁷ *Full Buffer* indica que la celda está cargada siempre al 100% independientemente del número de usuarios en la celda.

cuenta con pocos usuarios, el tiempo de simulación elegido fue de 30 subtramas (30 TTIs) y se realizaron 1000 iteraciones. Para el escenario 2 que fue configurado con una celda (con tres sectores) y el número de usuarios es mayor al del escenario 2, el tiempo de simulación seleccionado fue de 100 subtramas (100 TTIs) y se realizaron 5000 iteraciones. Para el escenario 3 que corresponde a un sistema conformado por 7 celdas como la que fue configurada para el escenario 2, el tiempo de simulación fue de 100 subtramas y se realizaron 15000 iteraciones.

4.3.2.4. Análisis de los Resultados

El análisis de resultados se basa en los parámetros de desempeño de la red: *throughput*⁸, *fairness*⁹ y eficiencia espectral. Otros datos que se tienen en cuenta en el análisis son: SINR, posición de los UEs y el número de PRBs asignados¹⁰ a cada UE.

4.3.2.4.1. Escenario de Simulación No 1

- **Caso 1: 3 MHz**

En el ancho de banda de 3 MHz se manejan 15 PRBs. En la Tabla 4.6 se realiza una comparación en términos de *throughput* y *fairness* medidos en el sector para los diferentes algoritmos de planificación de paquetes. La Tabla 4.7 permite observar el desempeño del sector en términos de la eficiencia espectral y el *throughput* pico, medio y borde.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> promedio en el sector [Mb/s]	<i>Fairness index</i>
RR	8,38	0,86
Best CQI	11,53	0,549387
PF	10,73	0,96021

Tabla 4.6 Comparativa en términos de *fairness* y *throughput* con BW 3 MHz.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> pico de UE [Mb/s]	<i>Throughput</i> promedio de UE [Mb/s]	<i>Throughput</i> borde de UE [Mb/s]	Eficiencia Espectral promedio de UE [bit/cu]
RR	1,24	0,84	0,26	3,21
Best CQI	3,26	1,15	0	4,92
PF	1,32	1,07	0,55	4,24

Tabla 4.7 Eficiencia espectral y *throughput* pico, medio y borde para el sector con BW 3 MHz.

⁸ Se emplearan diferentes mediciones de *throughput*: por usuario, por sector, por celda y por sistema. Además de Indicadores Claves de Desempeño (KPI, *Key Performance Indicators*): *throughput* pico (*peak*), medio (*mean*) y borde (*edge*).

⁹ Para redes que manejan tráfico, el parámetro de desempeño clave es el *throughput*, por lo tanto, el *fairness* deberá estar basado en el equilibrio con el que se ha distribuido el *throughput*, entre los usuarios. En [56] se explica la medición de *fairness* adoptada por el simulador, denominada *fairness index*.

¹⁰ Los PRB asignados a cada UE son dados por la herramienta de simulación en valores promedio por subtrama a lo largo de las simulaciones, por lo cual no corresponden a números enteros.

Los resultados se muestran en la Figura 4.5, donde se puede ver como PF obtiene el *fairness* más alto, lo cual indica que asigna los recursos de forma más equitativa, no obstante, no alcanza el mayor *throughput*.

La Figura 4.6 muestra el *throughput* alcanzado en el sector por los algoritmos de planificación de paquetes, siendo Best CQI el que obtiene mejor resultado, el cual lo logra a cambio de un bajo *fairness*, debido a que éste asigna los recursos a los usuarios que tienen las mejores condiciones del canal, dejando a los que no (UEs cerca del borde) sin recursos o muy pocos. RR ofrece un mínimo nivel de servicio a todos los usuarios asignándoles recursos sin importar su posición en el sector. Por su parte PF aunque tiene en cuenta las condiciones de canal no deja a ningún usuario sin asignarle recursos.

Las Figuras 4.6 y 4.7 muestran que RR obtiene el peor resultado de *throughput* debido a que no tiene en cuenta las condiciones del canal para la asignación de los recursos, obteniendo un desempeño del sector muy inferior a los resultados logrados cuando se emplearon los algoritmos de planificación de paquetes que si tienen en cuenta el estado del canal.

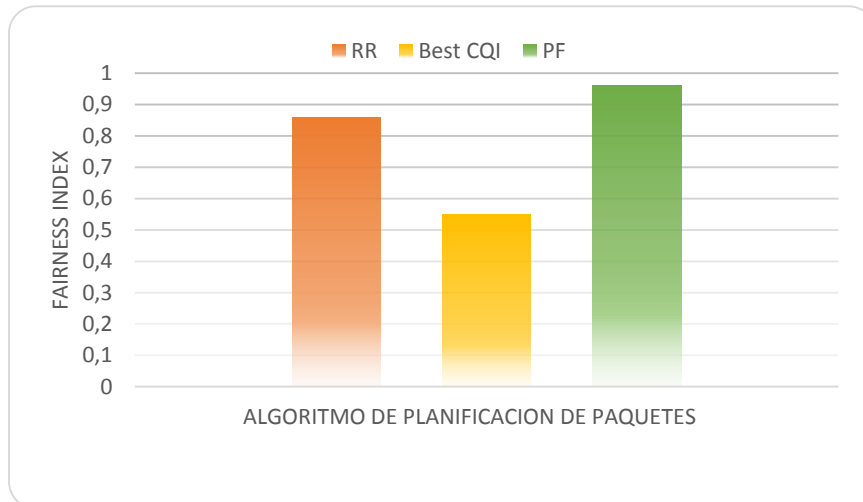


Figura 4.5 Fairness para BW 3 MHz.

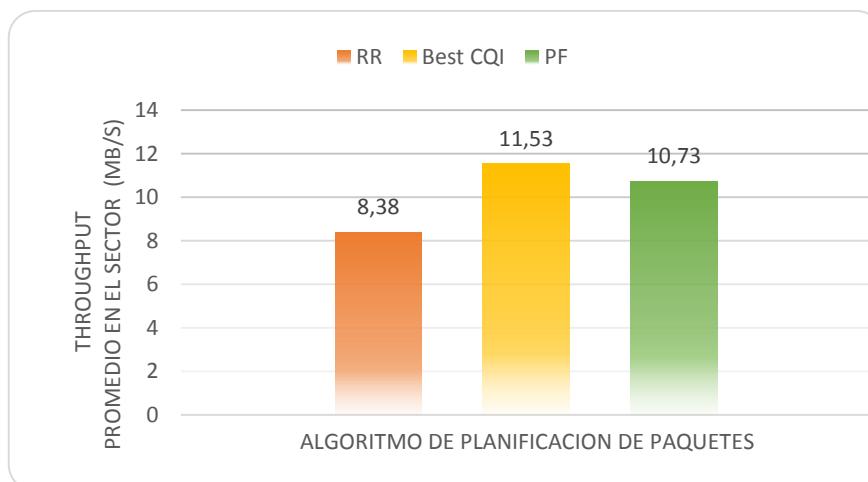


Figura 4.6. Throughput del sector para BW 3 MHz.

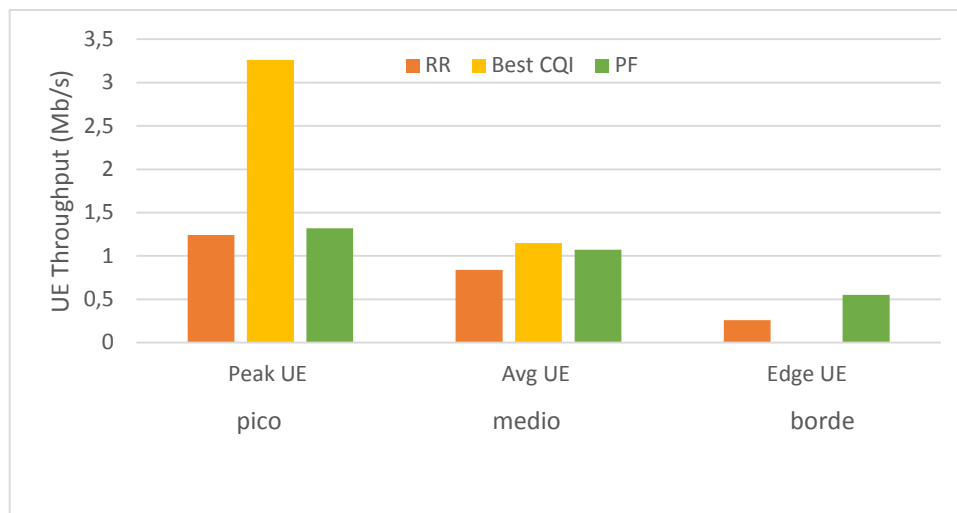


Figura 4.7 Throughput pico, medio y borde para BW 3 MHz.

Las Tablas 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los resultados de los 10 UEs del sector para cada uno de los algoritmos de planificación de paquetes.

Throughput promedio por UE [Mb/s]			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	1,189	1,93	1,22
2	1,237	2,27	1,18
3	0,66	0,26	1,09
4	1,08	1,55	1,22
5	0,9045	1,15	1,18
6	0,749	0,17	1,01
7	0,256	0	0,55
8	0,2784	0	0,81
9	1,11	3,28	1,32
10	0,91	0,94	1,15

Tabla 4.8 UE Throughput para RR, Best CQI y PF, BW 3 MHz.

SINR			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	29,04	28,99	28,99
2	27,94	27,94	22,74
3	18,26	14,24	18,4
4	27,95	27,95	27,95
5	22,67	22,74	22,74
6	16,3	0	16,08
7	5,05	0	4,77
8	11,39	0	11,33
9	29,29	29,29	29,29
10	23,65	23,78	23,78

Tabla 4.9 SINR para RR, Best CQI y PF, BW de 3 MHz.

Promedio de PRBs por TTI y UE			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	1,5	2,37	1,67
2	1,5	2,8	1,63
3	1,5	0,3	1,33
4	1,5	1,9	1,67
5	1,5	1,33	1,4
6	1,5	0,2	1,6
7	1,5	0	1,2
8	1,5	0	1,23
9	1,5	4,5	1,87
10	1,5	1,1	1,4

Tabla 4.10 PRBs asignados por RR, Best CQI y PF, BW 3 MHz.

Para el análisis de estos resultados se tomaron en cuenta los UE2, UE3, UE4, UE7, UE9, UE10 por su posición en el sector.

El sector está caracterizado en sus bordes con diferentes niveles de interferencia; el borde inferior derecho presenta fuertes interferencias, el borde superior es libre de interferencias y el borde inferior izquierdo presenta interferencias intermedias entre los otros dos bordes.

El algoritmo de planificación de paquetes Best CQI al asignar recursos a los usuarios busca maximizar el *throughput* del sector y no es justo ya que solo asigna recursos a los usuarios con mejores condiciones de canal (SINR alto). Esto se refleja en los resultados de la simulación en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10, donde se observa que el UE9 que se encuentra ubicado en una posición central del sector y con mejor condición de canal (SINR 29,29 dB) se le asigna una cantidad considerable de recursos. El UE7 no recibe recursos (0 PRBs) debido a que está ubicado en la región del sector con peor condición del canal (SINR 0 dB), cerca del borde inferior derecho que está caracterizado con fuertes interferencias. El UE2 y el UE10 a pesar de encontrarse lejos del eNB (en el borde superior del sector) obtienen 2,8 y 1,1 PRBs, dado que en este punto las interferencias son casi nulas obteniendo una SINR de 27,94 y 23,78 dB respectivamente, en comparación con el UE3, que a pesar de estar ubicado cerca al eNB obtiene una medición de SINR de 14,24 dB y tan solo 0,3 PRBs asignados. Esto se debe a que el UE3 por su ubicación en el sector experimenta condiciones del canal intermedias (cerca al borde inferior izquierdo), en comparación a las zonas donde están ubicados los UEs que reciben la mayoría de recursos.

Los resultados obtenidos con PF muestran que todos los UE obtienen asignación de PRBs. El UE que menos PRBs recibe es el UE7 con 1,2 PRBs asignados, debido a que es el UE que tiene las peores condiciones de canal, como se observa en la Figura 4.9, donde es el UE que presenta las peores medidas de SINR; lo contrario al UE9, que es el usuario con medición de SINR mas alta y recibe 1,87 PRBs. Con esto se puede observar que PF al asignar los recursos tiene en cuenta las condiciones del canal pero no deja sin asignación de los mismos a ningún usuario. PF asigna a cada usuario la tasa de transmisión que requiere dando una prioridad menor para transmitir a los UE con mejores condiciones de canal y evitar así que se lleven todos los recursos, como ocurre con Best CQI. RR no tiene en cuenta las variaciones del canal del usuario y como lo muestra la Figura 4.10, asigna cíclicamente la misma cantidad de PRBs a cada UE.

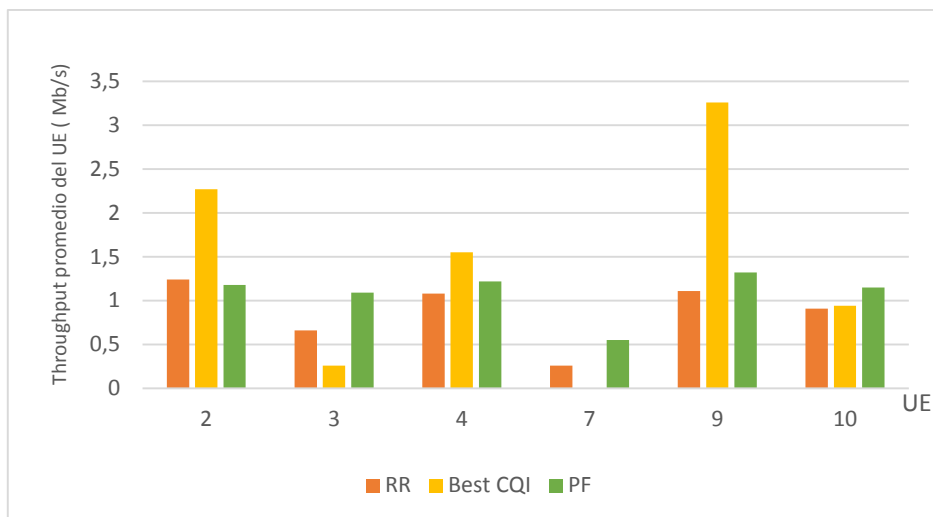


Figura 4.8 Throughput para los UEs, BW 3 MHz.

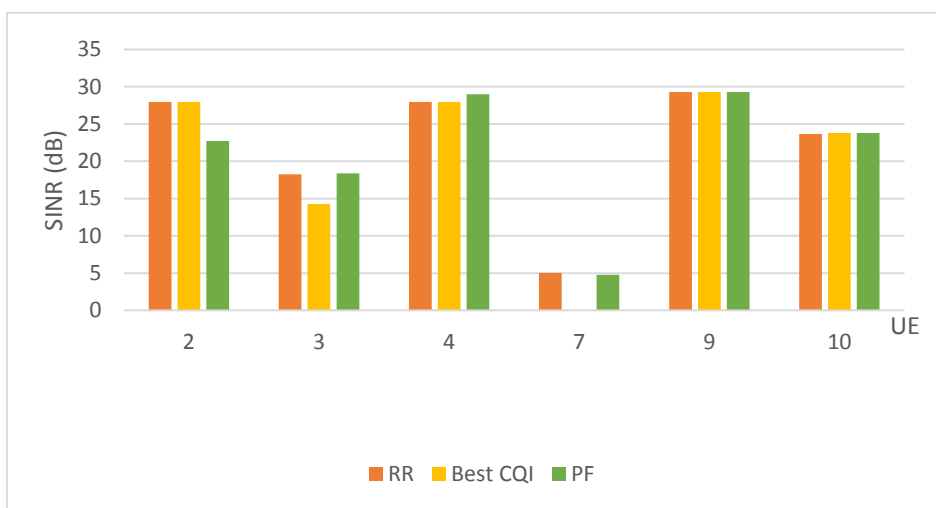


Figura 4.9 SINR para los UEs, BW 3 MHz.

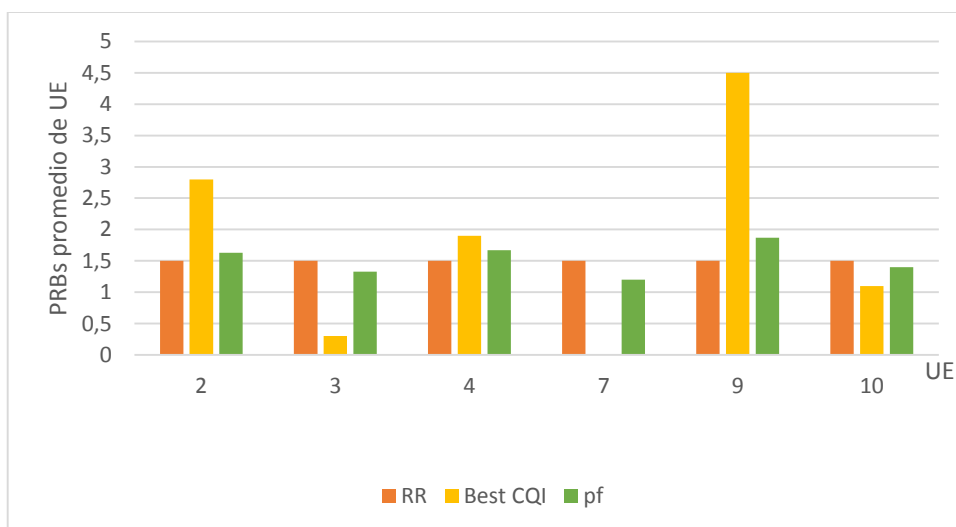


Figura 4.10 Asignación de PRBs por UE, BW 3 MHz.

• **Caso 2: 5 MHz**

Como lo indican las Tablas 4.11 y 4.12, para el BW de 5 MHz, se evidencia un aumento en los valores de *fairness* y *throughput* obtenidos en comparación al caso de 3 MHz. Estos resultados se deben a que al aumentar el BW, también aumentan el número de PRBs disponibles; de 15 PRBs (3 MHz), los algoritmos de planificación de paquetes pasan a disponer de 25 PRBs (5 MHz), por esta razón, los algoritmos de planificación de paquetes cuentan con más recursos para distribuirlos entre los mismos 10 UEs.

Algoritmo de planificación de paquetes	Throughput promedio en el sector [Mb/s]	Fairness index
RR	18,05	0,94
Best CQI	21,13	0,7511
PF	20,86	0,9962

Tabla 4.11 Comparativa en términos de *fairness* y *throughput*, BW 5 MHz.

Algoritmo de planificación de paquetes	Throughput pico de UE [Mb/s]	Throughput promedio de UE [Mb/s]	Throughput borde de UE [Mb/s]	Eficiencia Espectral promedio de UE [bit/cu]
RR	2,13	1,8	0,86	4,3
Best CQI	3,72	2,11	0,23	5,19
PF	2,19	2,09	1,83	4,94

Tabla 4.12 Eficiencia espectral y *throughput* pico, medio y borde para el sector, BW 5 MHz.

Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran que los tres algoritmos de planificación de paquetes conservan el mismo grado de equidad en la distribución de recursos frente al caso de 3 MHz.

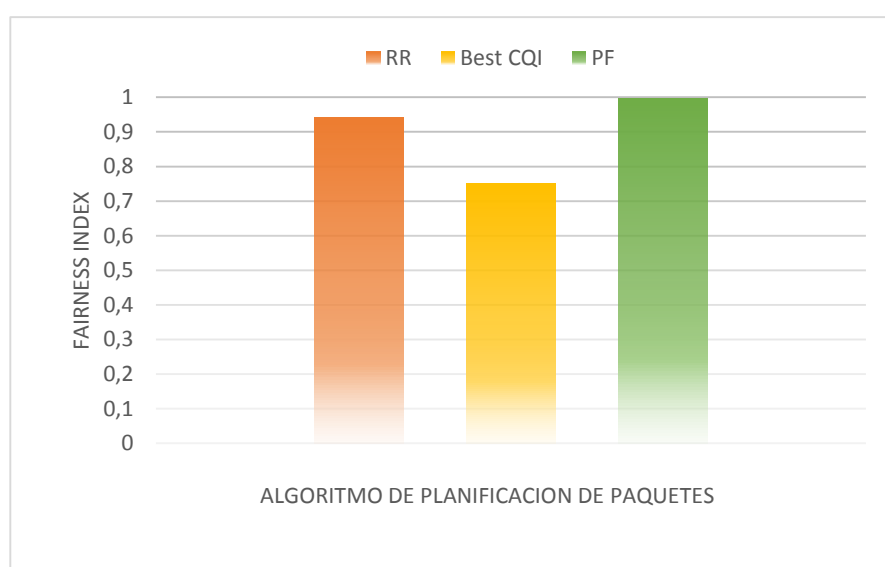


Figura 4.11 *Fairness* para BW de 5 MHz.

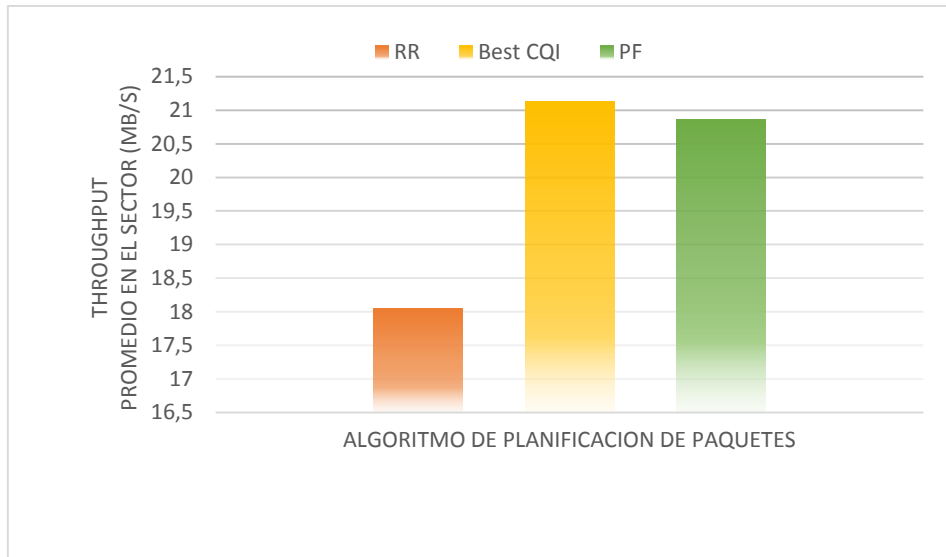


Figura 4.12 *Throughput* del sector para BW de 5 MHz.

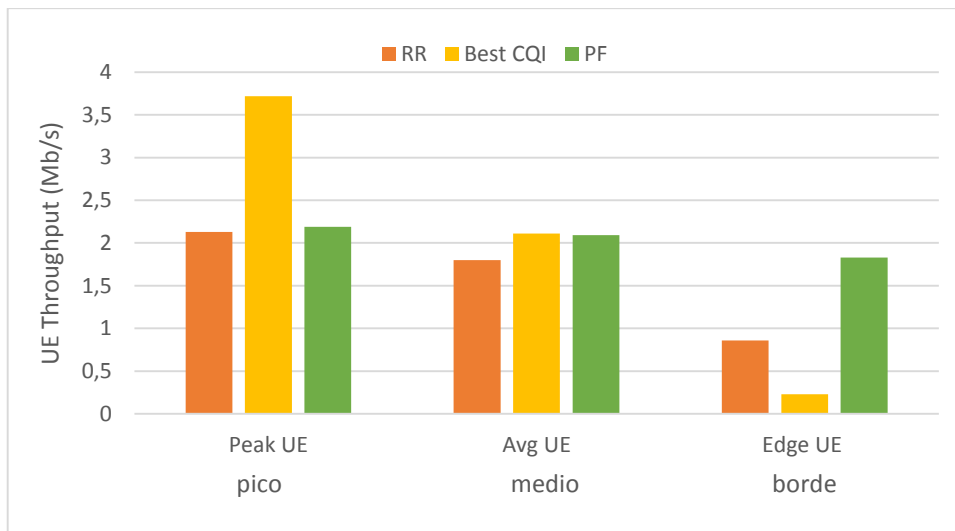


Figura 4.13 *Throughput* pico, medio y borde para BW 5 MHz.

Las Tablas 4.13, 4.14 y 4.15 muestran los resultados por UE al emplear cada uno de los algoritmos de planificación de paquetes con el ancho de banda de 5 MHz.

Al aumentar el ancho de banda los valores de *throughput* y asignación de PRBs por UE aumentaron como se puede observar en las Figuras 4.14 y 4.15. RR y PF con el ancho de banda de 5 MHz tienen el mismo comportamiento que para el ancho de banda de 3 MHz, con la diferencia de que al existir más PRBs el número de asignación de estos a los UEs aumenta. Por ejemplo, RR en el caso de 3 MHz asigna a todos los usuarios 1,5 PRBs, mientras que para el caso de 5 MHz la asignación es de 2,5 PRBs. Para Best CQI con el ancho de banda de 5 MHz al tener más PRBs disponibles no deja a ningún usuario sin asignación de recursos, aunque la diferencia entre los PRBs asignados a los usuarios con buenas condiciones de canal, y los usuarios que no las tienen, como lo indica la Figura 4.15 sigue siendo grande. El UE9 recibió 4,23 PRBs mientras que el UE7 solo recibió 0,27 PRBs. Para estos mismos UEs, PF asignó 2,57 PRBs al UE9 y al UE7 2,2 PRBs.

Throughput promedio por UE [Mb/s]			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	2,12	3,33	2,15
2	2,03	3	2,15
3	1,61	0,95	2,13
4	2,1	3,14	2,16
5	2,1	2,54	2,16
6	1,86	1,31	2,13
7	0,86	0,23	1,83
8	1,12	0,38	1,84
9	2,13	3,72	2,19
10	2,13	2,54	2,13

Tabla 4.13 UE *Throughput* para RR, Best CQI y PF, BW 5 MHz.

SINR			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	28,04	28,97	29,02
2	27,55	27,36	27,55
3	18,24	18,4	23,63
4	28,04	27,94	28,04
5	22,65	23,56	22,65
6	16,28	16,08	18,24
7	5,016	0	11,38
8	11,38	0	5,016
9	29,26	29,26	29,26
10	23,63	22,73	16,28

Tabla 4.14 SINR para RR, Best CQI y PF, BW 5 MHz.

Promedio de PRBs por TTI y UE			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	2,5	3,8	2,57
2	2,5	3,43	2,53
3	2,5	1,1	2,57
4	2,5	3,6	2,6
5	2,5	2,9	2,53
6	2,5	1,5	2,57
7	2,5	0,27	2,2
8	2,5	0,43	2,33
9	2,5	4,23	2,57
10	2,5	2,9	2,53

Tabla 4.15 PRBs asignados por RR, Best CQI y PF, BW 5 MHz.

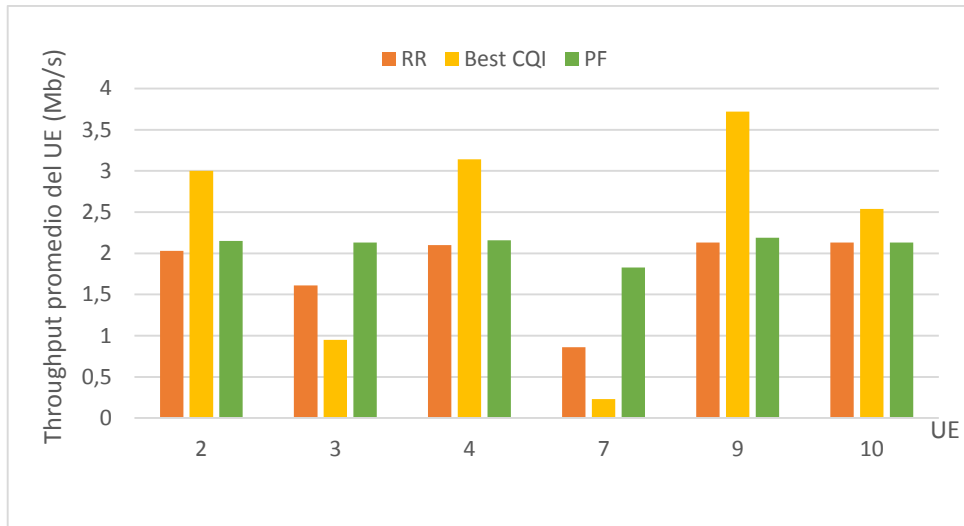


Figura 4.14 *Throughput* para los UEs, BW 5 MHz.

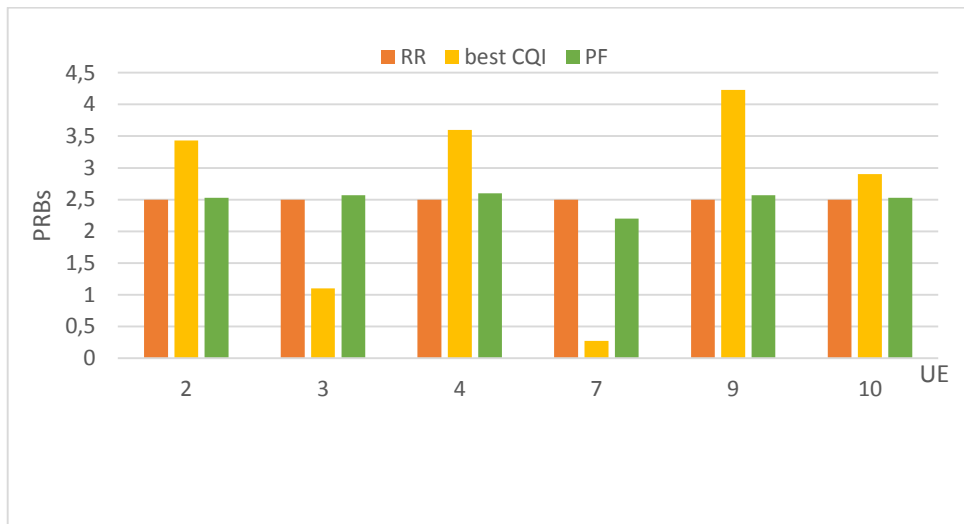


Figura 4.15 Asignación de PRBs por UE, BW 5 MHz.



Figura 4.16 SINR para los UEs, BW 5 MHz.

- **Caso 3: 10 MHz**

En el ancho de banda de 10 MHz se manejan 50 PRBs. Los cambios en los resultados al variar el ancho de banda a 10 MHz y mantener el mismo número de usuarios únicamente se ven influenciados por lo que ya se explicó para el caso de 5 MHz, los algoritmos de planificación de paquetes cuentan con mayor cantidad de recursos para distribuir entre los usuarios, lo cual aumenta el número de PRBs asignados a los mismos y por ende se incrementa el *throughput* por UE y también para el sector. En el anexo A se encuentran las tablas con los resultados y gráficas para el caso de 10 MHz.

4.3.2.4.2. Escenario de Simulación No 2

En las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran las estadísticas y resultados de las simulaciones del Escenario 2 para cada uno de los algoritmos de planificación de paquetes considerados.

Simulations statistics:	Cell statistics:
60 UEs	Fairness index: 0.816481
Avg. UE throughput: 2.64 Mb/s	Peak/Avg/Edge UE throughput: 4.16/2.64/0.55 Mb/s
Avg. UE spectral eff.: 3.15 bit/cu	Average cell throughput: 52.72Mb/s
Avg. RBs/TTI/UE: 4.92 RBs	Ignored cells (disabled): 0
Rank Indicator (RI) distribution:	mean RB occupancy: 98.50%
rank 1: 100.00%	

Figura 4.17 Resultados simulación para el escenario 2 con RR.

Simulations statistics:	Cell statistics:
60 UEs	Fairness index: 0.486956
Avg. UE throughput: 4.38 Mb/s	Peak/Avg/Edge UE throughput: 12.63/4.38/0.00 Mb/s
Avg. UE spectral eff.: 5.21 bit/cu	Average cell throughput: 87.52Mb/s
Avg. RBs/TTI/UE: 4.95 RBs	Ignored cells (disabled): 0
Rank Indicator (RI) distribution:	mean RB occupancy: 99.00%
rank 1: 35.58%	
rank 2: 64.42%	

Figura 4.18 Resultados simulación para el escenario 2 con Best CQI.

Simulations statistics:	Cell statistics:
60 UEs	Fairness index: 0.970265
Avg. UE throughput: 3.94 Mb/s	Peak/Avg/Edge UE throughput: 4.48/3.94/2.53 Mb/s
Avg. UE spectral eff.: 4.68 bit/cu	Average cell throughput: 78.74Mb/s
Avg. RBs/TTI/UE: 5.00 RBs	Ignored cells (disabled): 0
Rank Indicator (RI) distribution:	mean RB occupancy: 100.00%
rank 1: 5.20%	
rank 2: 94.80%	

Figura 4.19 Resultados simulación para el escenario 2 con PF.

La Tabla 4.16 muestra la comparación de los valores de *throughput* y *fairness* medidos en la celda según el algoritmo de planificación de paquetes empleado.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> promedio en la celda [Mb/s]	<i>Fairness index</i>
<i>RR</i>	57.72	0.82
<i>Best CQI</i>	87.52	0.48
<i>PF</i>	78.74	0.97

Tabla 4.16 *Throughput* y *fairness* en la celda.

Con RR, se obtuvo el *throughput* más bajo en la celda, lo que es una consecuencia de asignar los recursos sin tener en cuenta el estado del canal, por otro lado al ser un algoritmo de planificación de paquetes que le da el mismo tratamiento a todos los usuarios, obtiene una medida de *fairness* aceptable.

Best CQI al asignar recursos solo a los usuarios que tengan buenas condiciones del canal logra el *throughput* más alto, pero al realizar la asignación de esa forma, obtiene la medición más pobre de *fairness*.

Se destaca los resultados obtenidos al emplear el PF, ya que no solo logra un *throughput* alto en la celda (no muy lejos del logrado al usar Best CQI), sino que también obtiene la mejor medición de *fairness*, alcanzando prácticamente el valor de 1. Esto es una consecuencia de que PF al asignar los recursos tiene en cuenta el historial de transmisiones de los usuarios, con lo cual se logra que al final de las asignaciones de recursos estas se hagan de forma equilibrada entre los usuarios.

Comparando los resultados obtenidos al emplear RR y PF, donde PF obtuvo una medición de *fairness* de 0.97, lo que significa que fue más justo en la asignación de recursos que RR, el cual obtuvo una medición de *fairness* de 0.82. Aunque por principio RR asigna la misma cantidad de recursos a todos los usuarios, esto no garantiza que sea el algoritmo de planificación de paquetes más justo, ya que al no tener en cuenta la posición de los usuarios en la celda, al asignarle la misma cantidad de recursos a todos los usuarios, los que están cerca del eNB (mejores condiciones del canal) logran transmitir con un *throughput* más alto que los usuarios ubicados en posiciones más lejanas del eNB (peores condiciones del canal) que para satisfacer sus peticiones e igualar el *throughput* de los usuarios cerca al eNB requerirían más recursos de los asignados a estos.

En las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se muestran los resultados de *throughput* y eficiencia espectral obtenidos en la celda al emplear los algoritmos de planificación de paquetes RR, Best CQI y PF respectivamente. Las dos gráficas superiores corresponden al *throughput* y eficiencia espectral visualizadas mediante la Función de Distribución Acumulativa Empírica (ECDF, *Empirical Cumulative Distribution Function*), que para el caso del *throughput* indican la probabilidad de que un equipo de usuario ubicado aleatoriamente pueda lograr un cierto nivel de *throughput* de acuerdo a la calidad del canal que experimente [44]. En las gráficas de la ECDF el *throughput* pico corresponde al 95% de las curvas, es decir, el *throughput* de un usuario ubicado en una posición central de la celda. El *throughput* borde corresponde al 5 % de las curvas ECDF, lo que se interpreta como el *throughput* experimentado por usuarios ubicados en el borde de la celda [57]. Las dos graficas inferiores corresponden a los Diagramas de Dispersión, los cuales muestran el *throughput* y la eficiencia espectral según la SINR medida para cada usuario. Todos los usuarios se representan por puntos de color azul, y en caso de obtener la misma SINR se representan por puntos de color rojo.

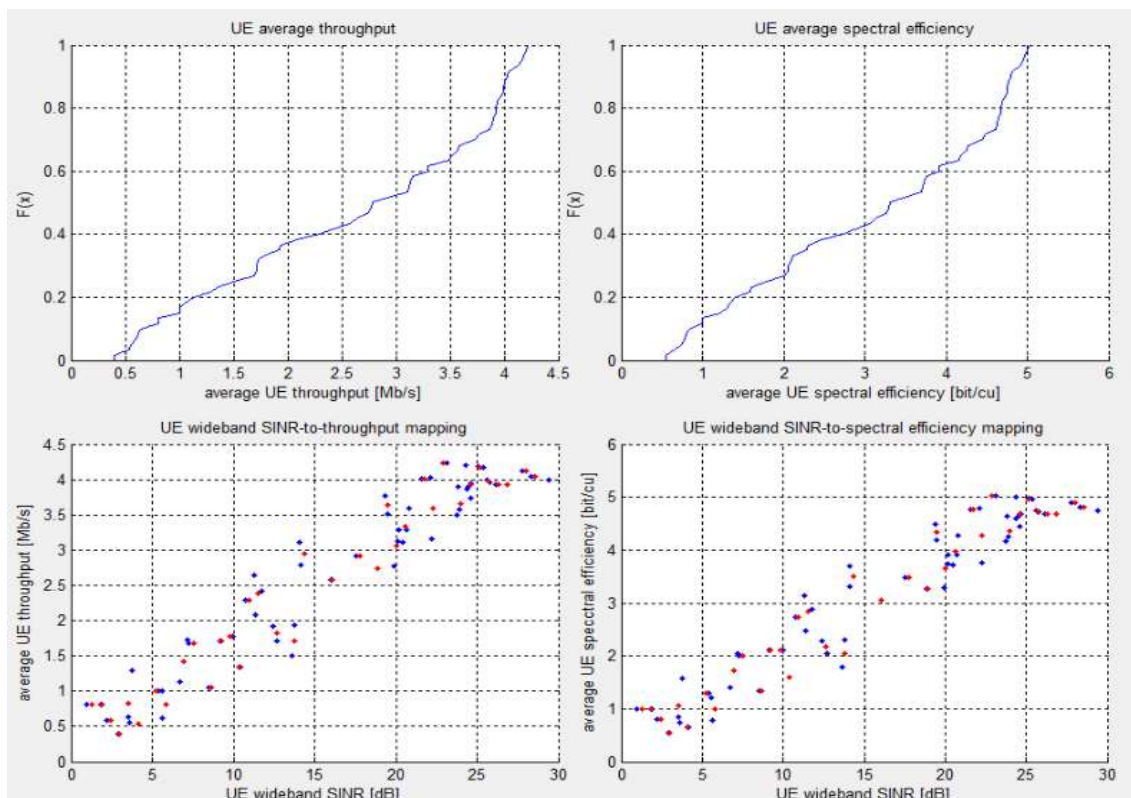


Figura 4.20 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear RR para el escenario 2.

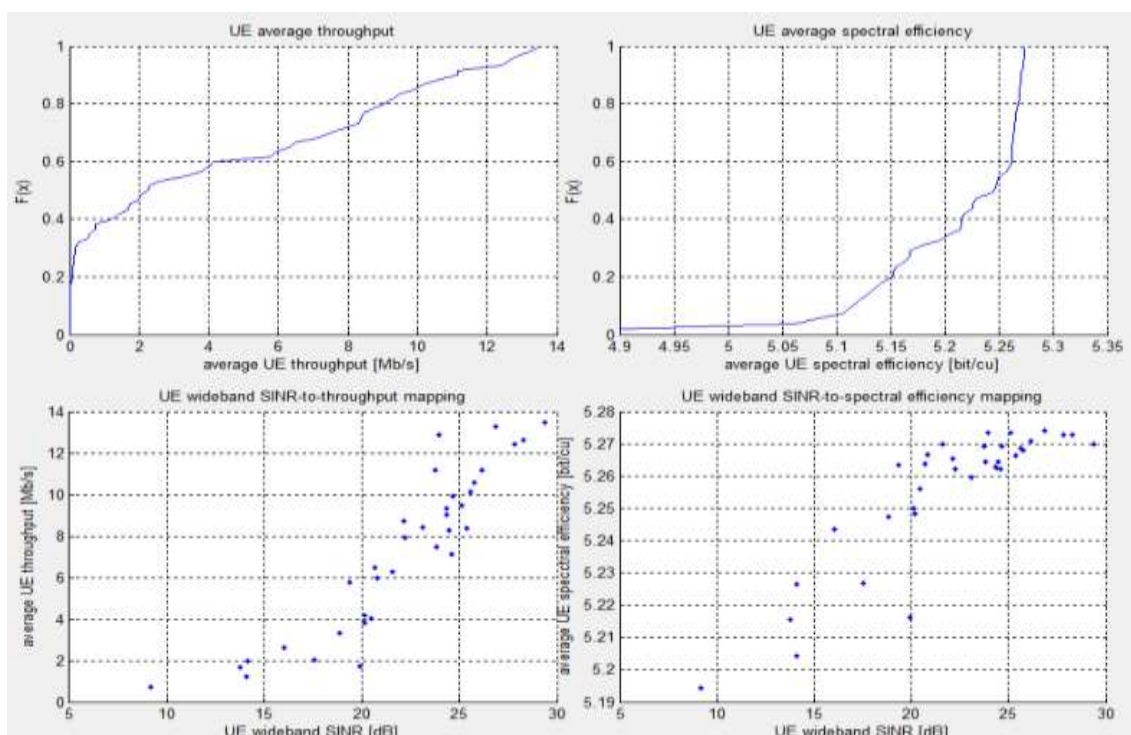


Figura 4.21 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear Best CQI para el escenario 2.

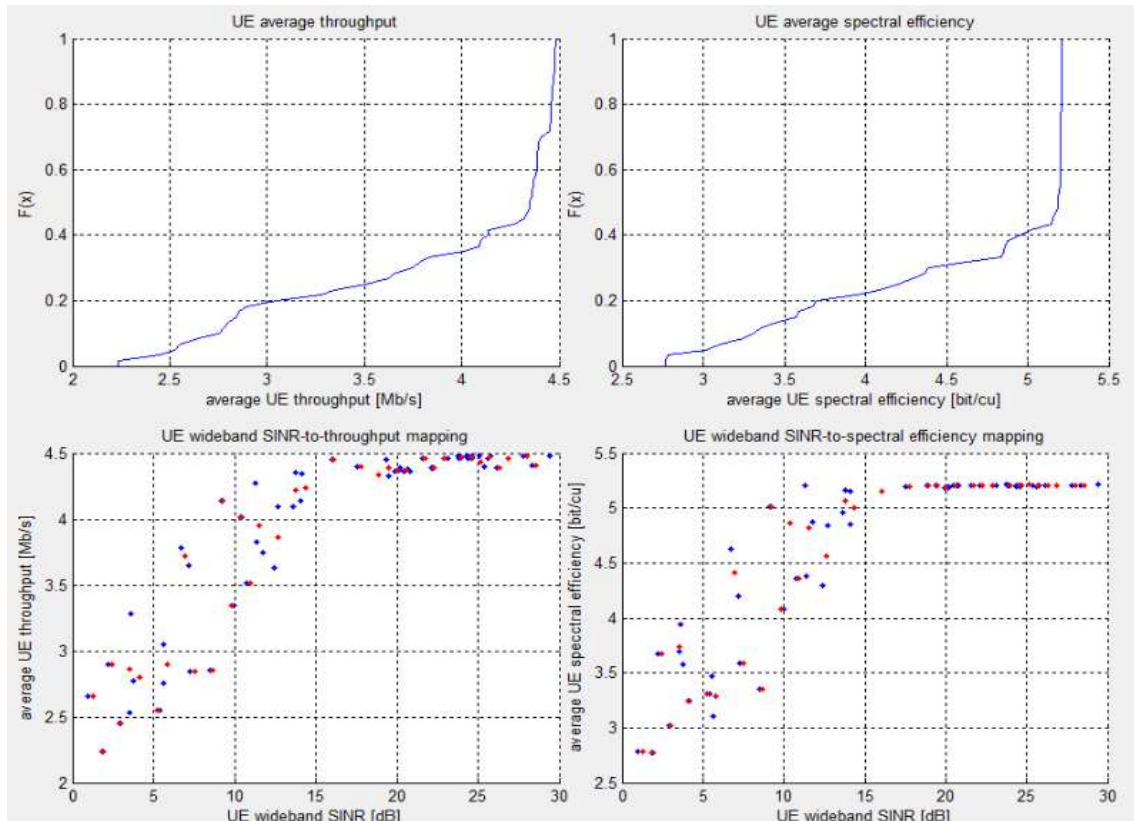


Figura 4.22 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear PF para el escenario 2.

Los diagramas de dispersión de *throughput* y eficiencia espectral obtenidos al usar RR tienen un comportamiento muy similar, esto se debe a que RR no tienen en cuenta el estado del canal. En ellos se observa como RR asigna recursos a usuarios que no tienen buenas condiciones del canal, lo cual le hace obtener los valores más bajos de *throughput* y eficiencia espectral entre los tres algoritmos de planificación de paquetes. Por el contrario en los diagramas de dispersión obtenidos al emplear Best CQI se observa cómo, sólo asigna recursos a usuarios con buenas condiciones del canal (la mayoría de ellos con una SINR por encima de los 20 dB), lo que permite alcanzar mayores valores de *throughput* y ser el algoritmo de planificación de paquetes con mejor eficiencia espectral. En los diagramas de dispersión obtenidos al usar PF, se muestra las ventajas que tiene sobre el RR al asignar los recursos teniendo en cuenta la calidad del canal del usuario lo que permite lograr mayores valores de *throughput*, sin llegar al nivel de los obtenidos al usar Best CQI, porque como se aprecia en las gráficas, PF también asigna recursos a usuarios que no están experimentando buenas condiciones del canal.

- **Análisis por Sectores**

En la Figura 4.3 se mostró el escenario 2, pero en ella no se puede apreciar la demarcación entre los sectores. La Figura 4.23 ilustra el sector 1 de la celda cuando es seleccionado en el simulador. De forma similar se obtienen las gráficas cuando se seleccionan los sectores 2 y 3.

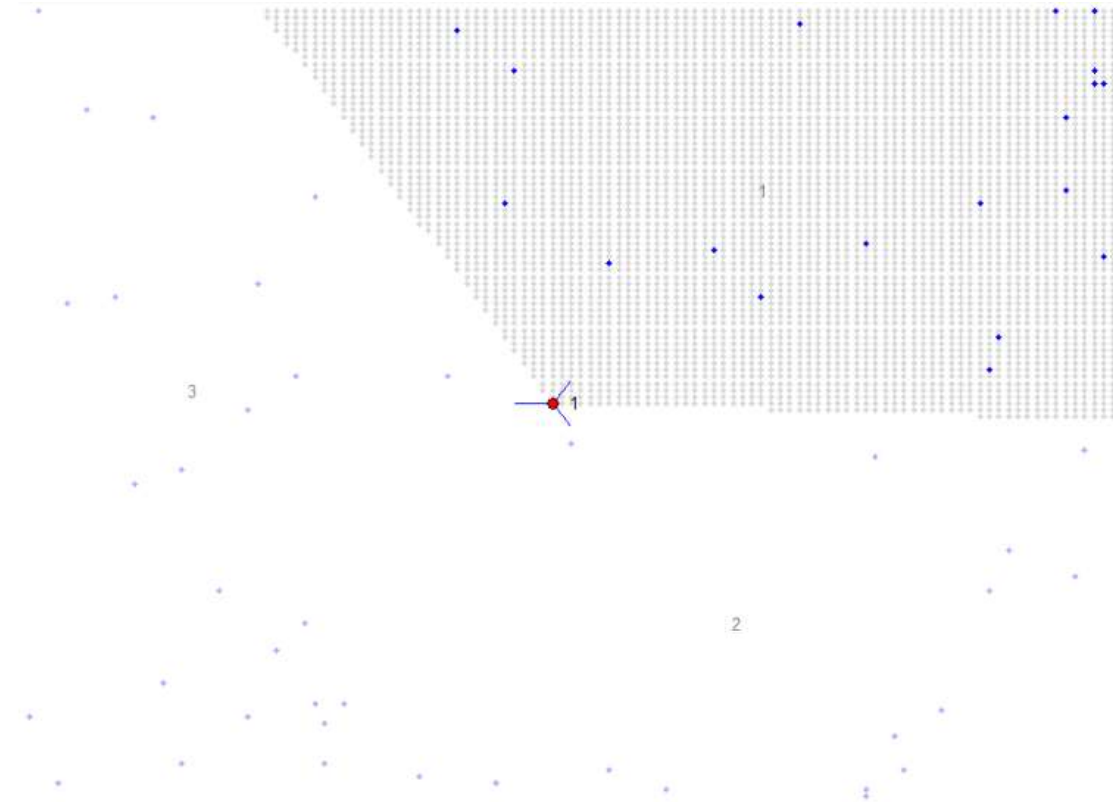


Figura 4.23 Sector 1 del escenario de simulación No 2.

La caracterización de los sectores está dada de la siguiente forma: el sector 1 es el de mejores condiciones del canal, el sector 3 es el de peores condiciones del canal y el sector 2 tiene condiciones del canal intermedias entre los sectores 1 y 3.

La Tabla 4.17 muestra los resultados por sector según el algoritmo de planificación de paquetes empleado.

Algoritmo de planificación de paquetes	Sector 1		Sector 2		Sector 3	
	<i>Throughput</i>	<i>Fairness</i>	<i>Throughput</i>	<i>Fairness</i>	<i>Throughput</i>	<i>Fairness</i>
RR	60.04	0.93	51.47	0.77	46.65	0.74
Best CQI	87.45	0.59	87.53	0.5	87.59	0.4
PF	84.38	0.99	78.54	0.96	73.31	0.95

Tabla 4.17 *Throughput* y *fairness* por sector.

Los resultados para RR y PF se ven directamente afectados por las condiciones del canal, mientras sean buenas (sector 1) ambos algoritmos de planificación de paquetes obtienen valores más altos de *throughput* y de *fairness*, los cuales van disminuyendo a medida que las condiciones del canal van empeorando (sectores 2 y 3).

La disminución en los valores mencionados es más evidente con RR, donde se pasa de un *throughput* de 60.04 Mb/s en el sector 1 a 46.65 Mb/s en el sector 3 y de una medición de *fairness* de 0.93 a 0.74 en los mismos sectores. Con PF, al adaptar la planificación

de paquetes al estado del canal, la disminución es menos sensible, el *throughput* del sector 1 al sector 3 pasa de 84.38 Mb/s a 73.31 Mb/s y el *fairness* de 0.99 a 0.95.

Los valores de *throughput* obtenidos al emplear Best CQI no se ven afectados por las condiciones del canal, en todos los sectores se mantiene sobre los 87 Mb/s, inclusive a medida que empeora las condiciones del canal, se observa una leve mejora en los valores de *throughput* obtenidos. Al empeorar las condiciones del canal lo que si se afecta es el grado de *fairness* con el que Best CQI distribuye los recursos, en el sector 1 el valor de *fairness* fue de 0.59 y en el sector 3 de 0.4. El *throughput* se mantiene estable debido a que Best CQI les asigna recursos exclusivamente a los usuarios que tienen las mejores condiciones del canal. El valor obtenido de *fairness* es mejor en el sector 1 porque todos los usuarios en general tienen buenas condiciones del canal y Best CQI distribuye los recursos entre más usuarios, en cambio el valor obtenido de *fairness* disminuye casi dos puntos en el sector 3, ya que al estar caracterizado con las peores condiciones del canal, Best CQI solo le da recursos a los usuarios con muy buenas condiciones del canal, dejando a los que no las tienen con muy pocos o sin ningún recurso.

Comparando los resultados obtenidos al emplear PF contra los obtenidos al usar Best CQI, en el sector 1 se observa que ambos algoritmos de planificación de paquetes logran valores de *throughput* muy similares, pero PF lo logra siendo significativamente más justo en la repartición de los recursos entre los usuarios. Al empeorar las condiciones del canal (sectores 2 y 3) el *throughput* obtenido por PF en el sector 1 va disminuyendo proporcionalmente a la reducción en la calidad del canal, mientras que Best CQI logra mantener el *throughput* independientemente de si las condiciones en general son buenas o malas.

4.3.2.4.3. Escenario de Simulación No 3

Las Figuras 4.24, 4.25 y 4.26 muestran las estadísticas y resultados de las simulaciones del Escenario 3 para cada uno de los algoritmos de planificación de paquetes considerados.

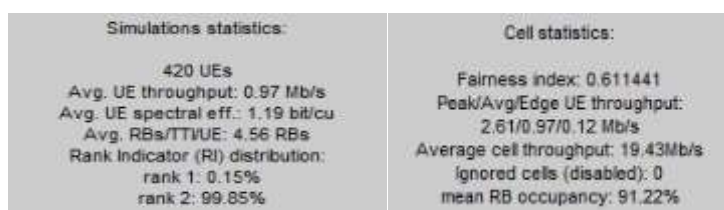


Figura 4.24 Resultados simulación para el escenario 3 con RR.

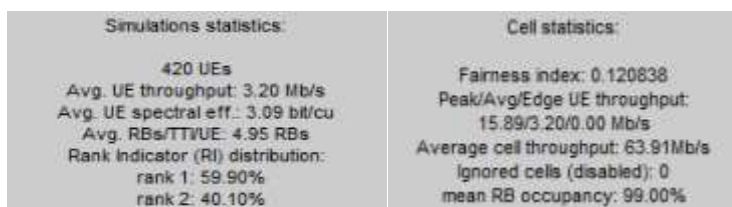


Figura 4.25 Resultados simulación para el escenario 3 con Best CQI.



Figura 4.26 Resultados simulación para el escenario 3 con PF.

La Tabla 4.18 muestra la comparación de los valores de *throughput* y *fairness* obtenidos en el sistema de 7 celdas según el algoritmo de planificación de paquetes empleado.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> promedio en la celda [Mb/s]	<i>Fairness index</i>
RR	19.43	0.61
Best CQI	63.91	0.12
PF	39.88	0.78

Tabla 4.18 *Throughput* y *fairness* en el sistema de 7 celdas.

Para cada uno de los algoritmos de planificación de paquetes se nota una reducción significativa del *throughput* y de la medición de *fairness* respecto a los obtenidos en el escenario 2. Para que los resultados sean comparables con los del escenario 2 se selecciona la celda central del sistema (celda 5), recordando que cada celda tiene la misma configuración que la celda del escenario 2. La Figura 4.27 muestra la celda central del sistema de 7 celdas.

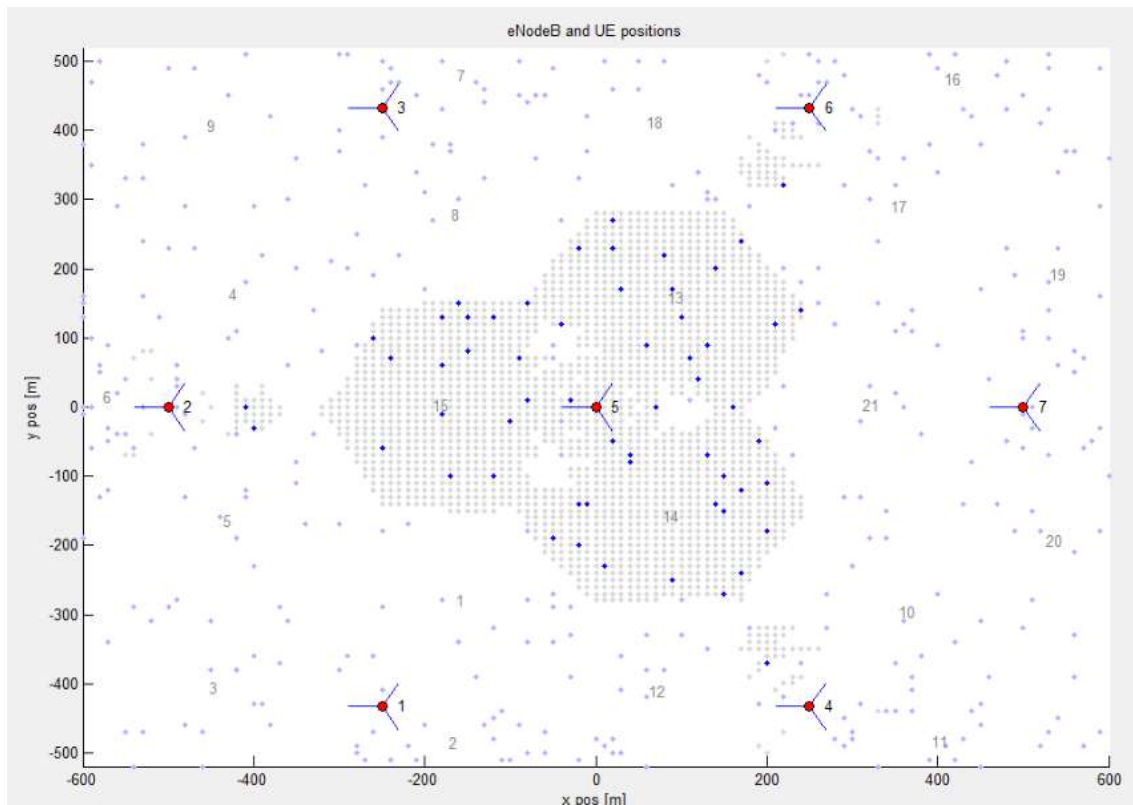


Figura 4.27 Celda central del escenario de simulación No 3.

La Tabla 4.19 muestra los resultados del *throughput* y *fairness* medidos en la celda central del sistema según el algoritmo de planificación de paquetes empleado.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> promedio en la celda [Mb/s]	<i>Fairness index</i>
RR	12.91	0.62
Best CQI	48.20	0.11
PF	29.16	0.78

Tabla 4.19 *Throughput* y *fairness* en la celda central del sistema.

La Tabla 4.20 resume los valores de *throughput* y *fairness* obtenidos en los escenarios 2 y 3.

Algoritmo de planificación de paquetes	Escenario 2		Escenario 3		Celda central Escenario 3	
	<i>Throughput</i>	<i>Fairness</i>	<i>Throughput</i>	<i>Fairness</i>	<i>Throughput</i>	<i>Fairness</i>
RR	57.72	0.82	19.43	0.61	12.91	0.62
Best CQI	87.52	0.48	63.91	0.12	48.20	0.11
PF	78.74	0.97	39.88	0.78	29.16	0.78

Tabla 4.20 *Throughput* y *fairness* obtenidos en los escenarios 2 y 3.

En cuanto a *throughput* los resultados obtenidos en el escenario 3 son de valores menores que los obtenidos en el escenario 2, pero mantienen la relación entre los algoritmos de planificación de paquetes. RR es el que alcanza el menor *throughput*, Best CQI logra el mayor *throughput* y PF obtiene un *throughput* que se ubica entre el logrado por RR y el alcanzado por Best CQI.

En cuanto a *fairness* hay una reducción en los valores medidos del escenario 3 respecto al escenario 2, donde lo más llamativo es el valor de *fairness* que se logra al emplear Best CQI, apenas 0.12, lo que significa que en el escenario 3 este algoritmo de planificación de paquetes está siendo muy injusto en la repartición de los recursos.

La reducción de los valores de *throughput* y *fairness* en el escenario 3 respecto a los logrados en el escenario 2 se debe a la presencia de múltiples eNBs, quienes ocasionan interferencias en las celdas que están contiguas a la celda a la que pertenece cada eNB, lo que lleva a empeorar las condiciones de canal en cada una de las celdas del sistema.

La celda central del sistema no solo obtiene peores resultados de *throughput* y *fairness* que el sistema en general, sino también respecto a cada una de las otras celdas, esto se debe a que la celda central está afectada por las interferencias que le ocasionan los seis eNBs restantes del sistema, mientras que cada una de las otras celdas, es afectada por las interferencias de tres de ellos.

En la celda central, al emplear RR, se obtiene un *throughput* de apenas 12.91 Mb/s, sensiblemente menor que el logrado en el escenario 2, de 57.72 Mb/s. En la celda central al estar afectada por las interferencias de cada uno de los otros eNBs, las

condiciones del canal son mucho peores en esa celda en comparación con la celda del escenario 2, y RR como planifica sin tener en cuenta el estado del canal, obtiene un *throughput* muy bajo. Con Best CQI y PF también se reducen los valores de *throughput* obtenidos respecto al escenario 2, pero al asignar recursos teniendo en cuenta la calidad del canal, obtienen un resultado de *throughput* mayor que el logrado con RR. En especial se destaca Best CQI, mientras con RR y PF se reduce el *throughput* en más de la mitad respecto al escenario 2 (casi 5 veces para RR y 3 para PF), Best CQI logra obtener la menor variación (un poco menos de la mitad) y así el mayor *throughput* de los 3 algoritmos de planificación de paquetes. Ese *throughput* lo logra con apenas un *fairness* de 0.11, lo que quiere decir, que prácticamente toda la contribución la hacen los usuarios ubicados lejos de los bordes.

Respecto al escenario 2, en la celda central del escenario 3 PF se mantiene como el algoritmo de planificación de paquetes más justo en la asignación de recursos, aunque con una reducción, de 0.97 a 0.78 en la medición de *fairness*. Lo que significa que mientras en la celda del escenario 2 PF dispone de los recursos suficientes para satisfacer las peticiones de los usuarios, en la celda central del sistema del escenario 3 los recursos son insuficientes.

En las Figuras 4.28, 4.29 y 4.30 se muestran las curvas ECDF y los diagramas de dispersión para la celda central del sistema al emplear los algoritmos de planificación de paquetes RR, Best CQI y PF respectivamente. Las curvas ECDF y los diagramas de dispersión para el sistema de 7 celdas se pueden apreciar en el Anexo B.

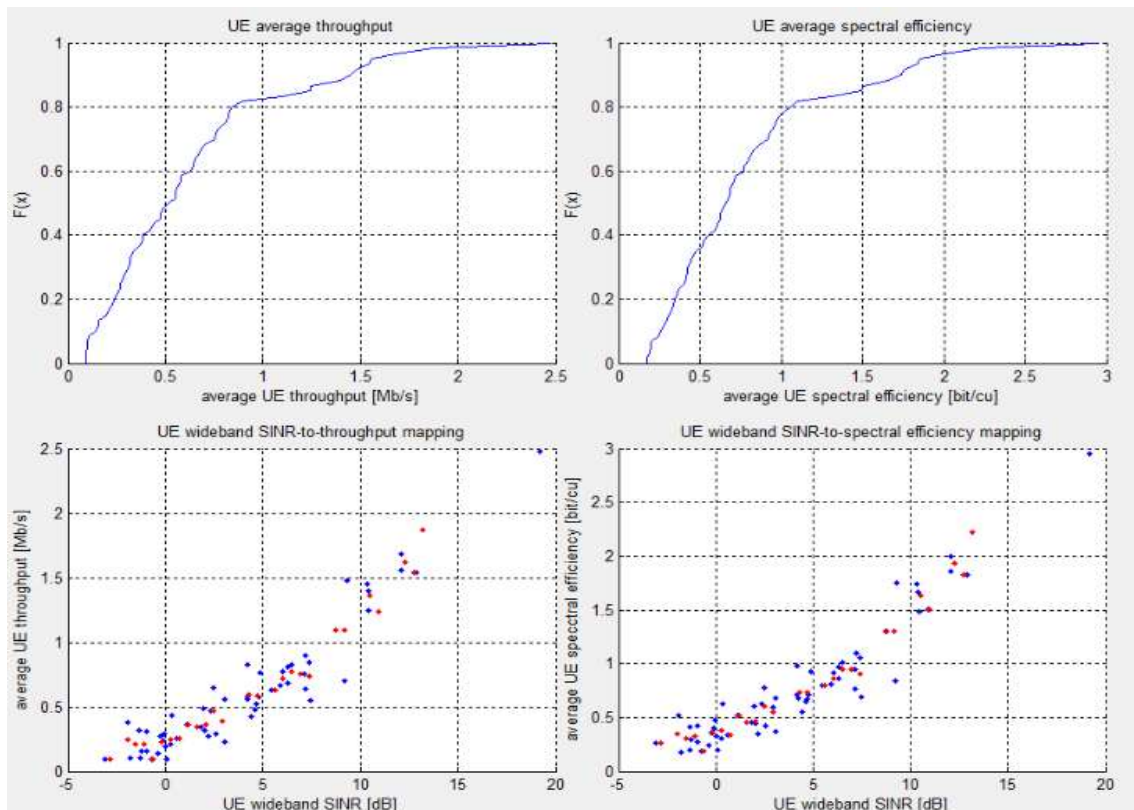


Figura 4.28 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear RR para la celda central del escenario 3.

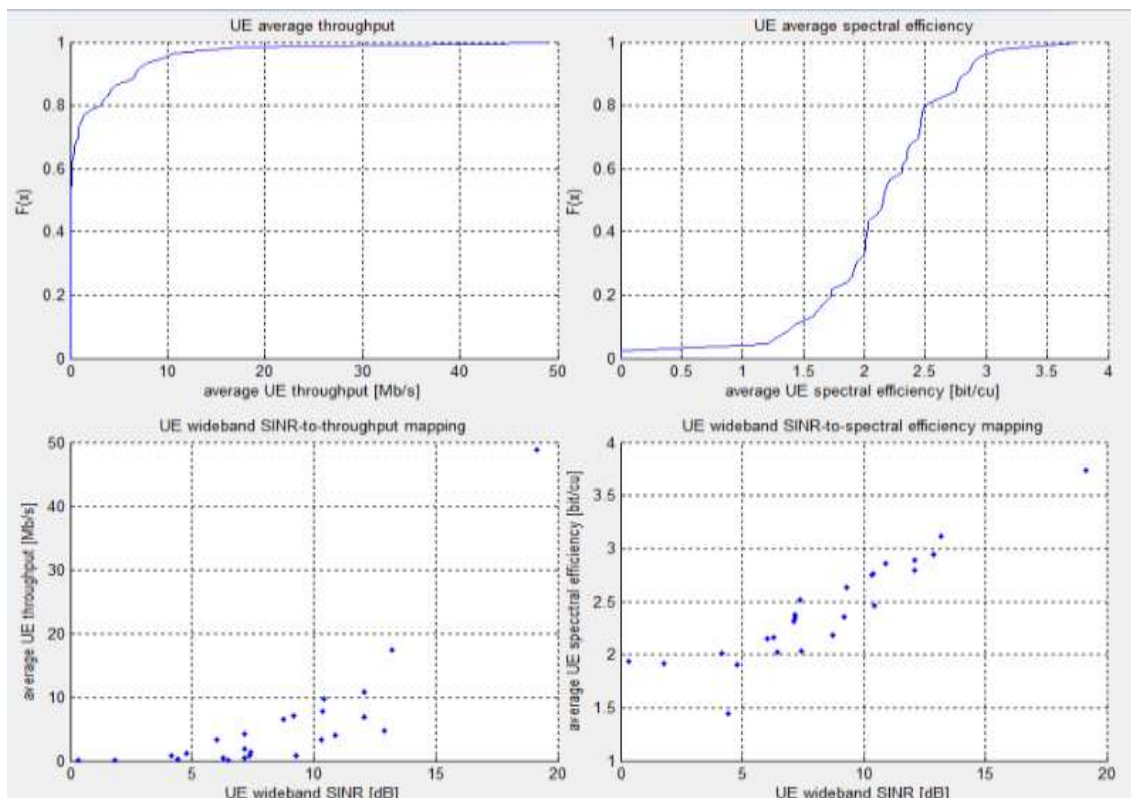


Figura 4.29 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear Best CQI para la celda central del escenario 3.

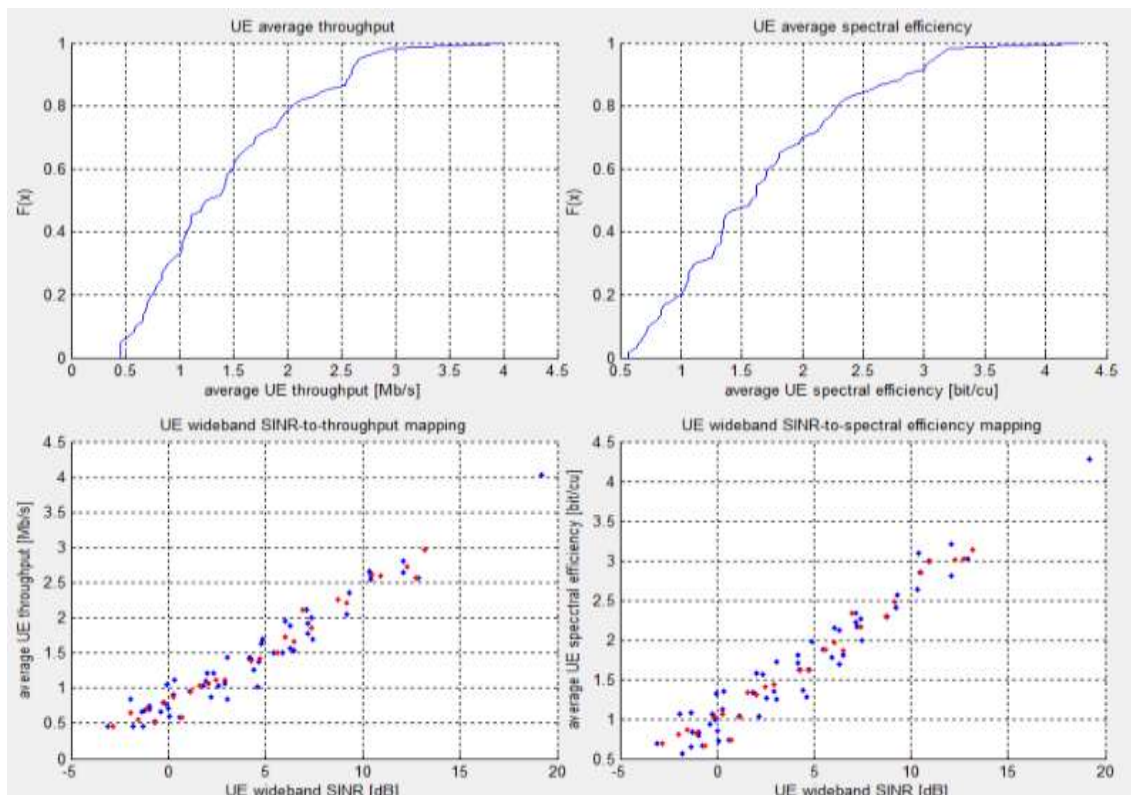


Figura 4.30 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear PF para la celda central del escenario 3.

Comparando las Figuras 4.28, 4.29 y 4.30 con las curvas ECDF y diagramas de dispersión obtenidos en el escenario 2, se observa una reducción en la SINR experimentada por los usuarios. Con RR en el escenario 2 la mayoría de usuarios tenían una SINR superior a 10 dB y varios de ellos sobrepasaban los 15 dB, mientras que en la celda central del escenario 3 la mayoría de usuarios experimentan una SINR inferior a 10 dB y solo uno sobrepasa los 15 dB. Con Best CQI en el escenario 2 la mayoría de usuarios experimentan una SINR superior a 20 dB, mientras que en la celda central del escenario 3 ningún usuario alcanza ese valor. Con PF en el escenario 2 la mayoría de usuarios tienen una medición de SINR superior a 10 dB, mientras que en la celda central del escenario 3 muy pocos usuarios sobrepasan ese nivel.

La reducción generalizada en la SINR de los usuarios de la celda central del escenario 3, ocasiona un reporte a los algoritmos de planificación de paquetes de un CQI menor al informado en el escenario 2, lo cual lleva a una elección de un esquema de modulación de menor orden y en consecuencia valores de *throughput* y eficiencia espectral menores en la celda respecto a los medidos en la celda del escenario 2.

Para que en el escenario 3 los algoritmos de planificación de paquetes puedan alcanzar los niveles de *throughput* de la celda del escenario 2, requerirían de la asignación de más recursos a los usuarios y por eso es que en el escenario 3 los recursos son insuficientes.

Comparando las curvas ECDF del escenario 2 con las del escenario 3 se nota en general una reducción en el *throughput* para todos los usuarios de la celda, pero la reducción es más fuerte para los usuarios ubicados en el borde de la misma (5% de las curvas ECDF).

Con los resultados de simulación en el escenario 3 queda reflejado el efecto negativo que tiene la presencia de otros eNBs en la función de los planificadores de paquetes y posterior desempeño de la red. Para hacer frente a la ICI, se emplean técnicas de Coordinación de Interferencia Inter-Celda, dos de ellas están estrechamente ligadas a la planificación de paquetes. En el anexo 2 se realiza una descripción de la aplicación de las técnicas de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR, *Fractional Frequency Reuse*) y Coordinación Multipunto (CoMP, *Coordinate Multipoint*) para el sistema del escenario 3.

De los resultados logrados para cada uno de los escenarios y sus respectivos casos de simulación, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El algoritmo de planificación de paquetes que se emplee afecta en gran medida el *throughput* de cada uno de los usuarios y el *throughput* de la celda, así como también el grado de *fairness* con el que se distribuyen los recursos entre los usuarios del sistema.
- Eficiencia espectral y *fairness* son principios deseables en un algoritmo de planificación de paquetes, pero van en sentido contrario, así que no es posible tener un algoritmo de planificación que logre el máximo *throughput* y al mismo tiempo sea totalmente justo en la asignación de los recursos.
- Los algoritmos de planificación de paquetes PF y Best CQI, que tienen en cuenta el estado del canal, realizan una asignación más eficiente de los recursos respecto al RR, que no tiene en cuenta el estado del canal.

- La principal ventaja de emplear el algoritmo de planificación de paquetes RR es que garantiza *fairness* a todos los usuarios del sistema, pero al no tener en cuenta las condiciones del canal logra *el throughput* más bajo por usuario y por celda.
- Al emplear RR se obtuvo el desempeño más bajo del sistema debido a que este algoritmo asigna los recursos sin tener en cuenta las condiciones del canal.
- RR es justo en el sentido de que entrega la misma cantidad de recursos a todos los usuarios, pero es injusto ya que al no considerar las condiciones de canal, no tiene en cuenta que los usuarios que no experimenten buenas condiciones de canal requieren mayor cantidad de recursos para igualar la tasa de transmisión de usuarios que si experimenten buenas condiciones de canal. Como resultado de esto, la eficiencia espectral en general no es maximizada.
- El algoritmo de planificación de paquetes Best CQI apunta a optimizar la eficiencia espectral del sistema por medio de la asignación de recursos a los UE con las mejores condiciones de canal.
- Best CQI incrementa la capacidad de la celda, aunque para lograrlo brinda un bajo nivel de *fairness*.
- Con Best CQI los UEs localizados cerca a los bordes de la celda, que tienen que hacer frente a las peores condiciones de canal de entre todos los usuarios, reciben muy pocos recursos, y en casos extremos ninguno.
- PF provee un punto intermedio entre los algoritmos RR y Best CQI. Es más justo en la asignación de recursos que RR y aunque no alcanza los valores de *throughput* de Best CQI, teniendo en cuenta que le asigna recursos a todos los usuarios, sus resultados son más que satisfactorios.
- PF al asignar recursos toma ventaja de las condiciones cambiantes del canal, pero adicionalmente al considerar el historial de transmisión de los usuarios, también asigna los recursos con un criterio de *fairness*.
- La ICI impacta de forma negativa la calidad del canal y con ello el trabajo realizado por los algoritmos de planificación de paquetes.
- La ICI ocasiona que se marquen claramente las diferencias en las formas que cada algoritmo de planificación de paquetes tiene al asignar los recursos. RR sigue asignando la misma cantidad de recursos a todos los usuarios, pero al no tener en cuenta la calidad del canal y con la ICI empeorando las condiciones de canal que experimentan los usuarios, consigue un *throughput* muy bajo. Best CQI continúa maximizando el *throughput*, pero para lograrlo, el grado de *fairness* con el que asigna recursos llega casi a cero. PF mantiene el equilibrio entre maximización del *throughput* y asignación de recursos justa, aunque la ICI ocasiona una reducción sensible en ambos valores.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, resultado del desarrollo del trabajo de grado. Las conclusiones se obtienen de acuerdo a los resultados obtenidos con base a los objetivos, las recomendaciones se basan en la metodología de trabajo y los trabajos futuros se dan como tema relacionado o complementario de la realización del trabajo de grado.

5.2. CONCLUSIONES

- Las simulaciones a nivel de sistema permiten estudiar el desempeño de la red LTE bajo diferentes configuraciones, como por ejemplo, variación en el número de usuarios y ancho de banda considerado. Los análisis se pueden realizar por sector, celda y sistema; lo que permite establecer comparaciones entre los resultados.
- Los resultados de las simulaciones permiten comprobar que los algoritmos de planificación paquetes RR, Best CQI y PF impactan de distinta forma el desempeño de la red LTE.
- Los algoritmos de planificación de paquetes que tienen en cuenta la calidad del canal (*Channel Aware*), obtienen un mejor desempeño de la red que aquellos que no la tienen (*Channel Unaware*).
- Un algoritmo de planificación de paquetes que se enfoque exclusivamente en maximizar el *throughput*, como lo hace Best CQI, ofrece un bajo *fairness* en la asignación de recursos. Aunque logra resultados muy próximos a la capacidad de la celda, requiere para ello dejar sin o con pocos recursos a muchos usuarios del sistema, típicamente los que experimentan las peores condiciones del canal, que son aquellos ubicados en los bordes de la celda y en posiciones lejanas del eNB.
- Un algoritmo de planificación de paquetes que asigne los recursos buscando el mayor grado de *fairness* sin considerar la calidad del canal, como lo hace RR, obtiene a cambio un bajo *throughput* por usuario y por celda.
- Un algoritmo de planificación de paquetes que asigne los recursos con un criterio de *fairness* y tenga en cuenta la calidad del canal, como lo hace PF, obtiene altos valores de *throughput* y al mismo tiempo no deja a ningún usuario sin asignación de recursos.
- Los resultados permiten comprobar que maximizar el *throughput* y asignar los recursos con un criterio de *fairness* son principios deseables en un algoritmo de planificación de paquetes, pero van en direcciones opuestas, por lo que es difícil lograr ambas cosas al tiempo. No obstante PF demostró, que es posible alcanzar altos valores de *throughput* y al mismo tiempo no dejar sin asignación de recursos a ningún usuario.

- En todos los casos PF obtiene una mayor medición de *fairness* que RR, pese a que este tiene por principio, asignar la misma cantidad de recursos a todos los usuarios. El mejor resultado del PF se debe a que planifica teniendo en cuenta la calidad del canal y el historial de transmisión de los usuarios, lo que le permite obtener el más alto valor de *fairness* en todos los casos. Por el contrario, RR al darle la misma cantidad de recursos a todos los usuarios, no tiene en cuenta que los usuarios que estén experimentando malas condiciones de canal, necesitarían más recursos para igualar el *throughput* de los usuarios que tengan buenas condiciones de canal.
- Aumentar el ancho de banda, manteniendo el mismo número de usuarios, hace que el algoritmo de planificación de paquetes disponga de mayor número de PRBs al asignar los recursos, con lo cual se logra alcanzar niveles de *throughput* y *fairness* más altos.
- Los algoritmos de planificación de paquetes más allá de las condiciones a las que tengan que enfrentarse cumplen sus objetivos de planificación, pero esas condiciones afectan la forma en que lo hacen. Específicamente, La ICI al empeorar las condiciones de canal, afecta negativamente la función de los algoritmos de planificación de paquetes, provocando que requieran mayor cantidad de recursos para satisfacer las peticiones de los usuarios y que el *throughput*, por ende también la eficiencia espectral, disminuyan significativamente, con lo que se reduce de manera importante el desempeño de la red.
- La ICI afecta menos a los algoritmos de planificación de paquetes que maximicen el *throughput*, como *Best CQI*, que a los algoritmos de planificación de *paquetes* que asignen recursos con un criterio de *fairness*, como RR y PF, puesto que en condiciones de interferencia, existen usuarios que presentan muy malas condiciones de canal y asignarle recursos a estos usuarios provoca un *throughput* reducido por usuario, y por lo tanto una disminución en el desempeño de la red.

5.3. RECOMENDACIONES

- Al seleccionar una herramienta de simulación es fundamental realizar un estudio previo de las posibilidades de configuración de la herramienta, de forma que se pueda determinar si ésta tiene todos los requisitos que se requieren para simular los escenarios y casos. Esto permite obtener variables que entreguen resultados más precisos para el análisis y evita que se presenten inconvenientes al no obtener los resultados que se requieren para cumplir los objetivos.
- Antes de simular los casos, es necesario conocer a fondo la teoría relacionada con el tema del trabajo de grado, así se puede hacer una correcta configuración de los escenarios y comprender los resultados obtenidos.
- Antes de desarrollar una simulación, es relevante definir claramente los escenarios y casos, puesto que esto permite estructurar adecuadamente las simulaciones para validar lo que se quiere comprobar.

- Al introducir los parámetros de configuración es importante verificar que estos sean los correctos para lo que se quiere evaluar, puesto que un parámetro mal configurado afecta la coherencia en los resultados.
- Al utilizar herramientas que permitan trabajar sobre el código fuente, se facilita la creación de archivos de simulación, que se adapten a los parámetros o elementos que se quieren evaluar.
- LTE Downlink System Level Simulator al finalizar la simulación, por defecto presenta una gran cantidad de resultados y gráficas sobre diferentes aspectos de LTE. Es importante configurar el simulador para que solo presente y grafique los resultados que se quieren obtener, de lo contrario los tiempos de simulación y uso de recursos se incrementan.
- LTE Downlink System Level Simulator fue implementado en Matlab usando las capacidades de la programación orientada a objetos, por lo tanto para emplear este simulador se requiere la versión de Matlab R2008a o una superior a esta, ya que es a partir de esta versión que Matlab soporta esta característica. Sin embargo, se recomienda utilizar la última versión de Matlab disponible, puesto que así se reducen los tiempos de ejecución de las simulaciones.

5.4. TRABAJOS FUTUROS

- **Impacto de la Planificación de Paquetes en el UL sobre el desempeño en una red LTE:** estudiar la planificación de paquetes enfocada en el UL y analizar cómo afecta el desempeño de la red.
- **Estudiar un criterio diferente a la calidad del canal, como factor principal en el que los algoritmos de Planificación de Paquetes se basen al asignar los recursos.** En el desarrollo del trabajo de grado, el factor principal que tuvieron en cuenta los algoritmos de planificación de paquetes al asignar los recursos fue la calidad del canal. Como se detalló, son muchos los criterios de asignación de recursos que un algoritmo de planificación de paquetes puede tener en cuenta. Se propone analizar la planificación de paquetes cuando la asignación de recursos se realiza con base a un factor principal diferente al estado del canal.
- **Impacto de la Velocidad de los UEs en la Planificación de Paquetes:** en el desarrollo del trabajo de grado se consideraron usuarios estáticos y usuarios peatonales. Se propone analizar cómo afecta la movilidad de los usuarios a la planificación de paquetes, en particular si se movilizan con altas velocidades.
- **Impacto del Handover en la Planificación de Paquetes:** se propone analizar el efecto que el Handover tiene para la planificación de paquetes en un sistema LTE.
- **Impacto de la CoMP en la Planificación de Paquetes en una red LTE:** para el sistema de 7 celdas, puede estudiarse el impacto que tiene la implementación de la CoMP en el trabajo realizado por los algoritmos de planificación de paquetes.

REFERENCIAS

- [1] Ciena, “Maximizar las Ventajas de LTE Mediante la Utilización de Soluciones Backhaul True Carrier Ethernet,” *TeleSemana* [Online]. Disponible en: http://www.telesemana.com/wp-content/uploads/reportes/6225/Maximizing_LTE_Benefits_Using_TCE_Backhaul_A4_WP_ES.pdf [Consultado: Mayo 2015].
- [2] SNS Telecom, “*LTE Encyclopedia*” [Online]. Disponible en: <http://sites.google.com/site/lteencyclopedia> [Consultado: Mayo 2015].
- [3] M. Alexander y V. Rodríguez, “Calidad del Servicio en Redes LTE Advanced,” *Cintel* [Online]. Disponible en http://cintel.org.co/wp-content/uploads/2013/05/02.Calidad_de_Servicio_en_Red.es.pdf [Consultado: Mayo 2015].
- [4] R. Agusti et al., *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. España: Fundación Vodafone España, 2010.
- [5] V. Quintero. *Gestión de Recursos Radio* [Online], Universidad del Cauca, [Diapositivas], Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/3GWCDMA/3G-4.pdf> [Consultado: Mayo 2015].
- [6] S. R. Ferrán, “*QoS-Control de Admisión Uplink en Long Term Evolution*,” Trabajo de Grado, Ingeniería Técnica Telecomunicación, especialidad Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2012.
- [7] H. Ruiz. Redes LTE/SAE. *La Prensa*, Nicaragua, 21 de Septiembre de 2013. p. 3C (En sección: Economía).
- [8] Ruckus Wireless, “Optimización para la cobertura y capacidad mientras se descargan datos de redes 3G/4G con tecnología 802.11 más inteligente” [Online]. Disponible en: <http://c541678.r78.cf2.rackcdn.com/wp/wp-3g-offload-es.pdf> [Consultado: Mayo 2015].
- [9] M. González, “*La Telefonía Móvil: El Impacto Social*,” Trabajo de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2012.
- [10] Leliwa, *LTE/EPS Technology*. Polonia: Leliwa, 2013.
- [11] P. Lescuyer y T. Lucidarme, *Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2008.
- [12] I. Galindo, “*Nuevas Tecnologías y Modelos de Negocio en Operadores Móviles*,” Trabajo de Grado, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, España, 2008.
- [13] J. Tamayo y R. Gonzalez, “*LTE y su Impacto en Colombia*,” Trabajo de Grado, Facultad de Ciencias Básicas e Ingenierías, Universidad Católica de Pereira, Colombia, 2012.
- [14] K. Soto, “*LTE, Evolución a Largo Plazo para el Acceso Inalámbrico de Banda Ancha Móvil*,” Tesis de Grado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Chile, 2009.
- [15] 3GPP, “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities*,” Tech. Specif. 36.306 v12.4.0 Release 12, 2015.
- [16] S. Sesia, I. Toufik y M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Gran Bretaña: John Wiley & Sons, 2011.

- [17] J. Zúñiga, F. Córdoba y V. Quintero, "Análisis del Desempeño a Nivel Físico del Enlace de Bajada de LTE," Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2013.
- [18] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Reino Unido: Elsevier, 2011.
- [19] I. Akyildiz, D. Gutierrez-Estevez y E. Chavarria, "The Evolution to 4G Cellular Systems," *Physical Communication*, vol. 3, no. 4, pp. 217-244, Dic. 2010.
- [20] S. Abeta et al., "Super 3G Technology Trends – Part 2: Research on Super 3G Technology," *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 55-62, Dic. 2006.
- [21] J. Díaz, "Análisis de Tráfico de Voz sobre IP (VoIP) en Redes LTE," Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.
- [22] T. Ali-Yahiya, *Understanding LTE and its Performance*. USA: Springer, 2011.
- [23] N. A. López, "Efecto de las Redes de Cuarta Generación (LTE) en los Servicios Móviles en Chile," Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile, 2011.
- [24] ITU-R, "Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced," Recommendation ITU-R M.2012-1, 2014.
- [25] N. Cardona, J. Olmos, M. García y J. Monserrat, *3GPP LTE: Hacia la 4G Móvil*. España: Marcombo, 2011.
- [26] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Reino Unido: John Wiley & Sons, 2009.
- [27] D. Marcano. *Capítulo 3: Acceso Múltiple OFDMA* [Online], Pontificia Universidad Católica del Perú. Disponible en: http://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/images/documentos/seccion_telecomunicaciones/Capitulo%203%20Acceso%20Multiple%20OFDMA.pdf [Consultado: Mayo 2015].
- [28] J. F. Restrepo, "Análisis y estudio técnico de la transferencia de tecnología para la prestación de servicios de telefonía y banda ancha móvil en Colombia a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnología LTE," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional, Colombia, 2011.
- [29] G. P. Perrino, "Análisis del Impacto del Uso de Técnicas de Múltiples Antenas en una Red Móvil LTE con la Herramienta De Simulación Atoll," Tesis de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2013.
- [30] N. Okubo, A. Umesh, M. Iwamura y H. Atarashi, "Overview of LTE Radio Interface and Radio Network Architecture for High Speed, High Capacity and Low Latency," *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 10-19, Jun. 2011.
- [31] H. Ekstrom, "QoS Control in the 3GPP Evolved Packet System," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 76-83, Feb. 2009.
- [32] 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture," Tech. Specif. 23.203 v13.3.0 Release 13, 2015.

- [33] A. Montilla, "Arquitectura de Red de Acceso Móvil de Cuarta Generación: Mobile-IP RAN," Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Telemática, Universidad Carlos III De Madrid, España, 2009.
- [34] Y. Wang et al., "Frequency and Time Domain Packet Scheduling Based on Channel Prediction with Imperfect CQI in LTE," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 5, no. 4, pp. 157-170, Agosto 2013.
- [35] A. Pokhariyal, T.E. Kolding y P. E. Mogensen, "Performance of Downlink Frequency Domain Packet Scheduling for the UTRAN Long Term Evolution," en *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE 17th International Symposium*, Helsinki, Finlandia, Sep. 2006, pp. 1-5.
- [36] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures," Tech. Specif. 36.213 v12.5.0 Release 12, 2015.
- [37] F. Capozzi et al., "Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 678-700, Jun. 2012.
- [38] 3GPP, "Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)," Tech. Rep. 36.913 v12.0.0 Release 12, 2014.
- [39] J. Ramis et al., "Algoritmos de Planificación de Recursos para Redes Inalámbricas 4G," en *XVI Jornadas Telecom I+D 2006*, Madrid, España, 2006.
- [40] M. T. Kawser et al., "Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE," *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 5, pp. 678-681, 2013.
- [41] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld y P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Gran Bretaña: Elsevier, 2007.
- [42] J. G. Choi y S. Bahk, "Cell-Throughput Analysis of the Proportional Fair Scheduler in the Single-Cell Environment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 766-778, 2007.
- [43] L. T. Thu et al., "D5.4 Final Version of System Level Simulator," CODIV project, 2013.
- [44] M. Wrulich, W. Weiler y M. Rupp, "HSDPA Performance in a Mixed Traffic Network," en *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring 2008*, Singapur, Mayo 2008, pp. 2056–2060.
- [45] J. C. Ikuno, M. Wrulich y M. Rupp, "System Level Simulation of LTE Networks," en *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) spring 2010*, Taipei, Taiwan, Mayo 2010, pp. 1-5.
- [46] [Online]. Disponible en: <http://telematics.poliba.it/index.php/en/component/content/article/97-tools/tools/158-lte-sim> [Consultado: Mayo 2015].
- [47] G. Piro et al., "Simulating LTE Cellular Systems: an Open Source Framework", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 498-513, Feb. 2011.
- [48] [Online]. Disponible en: <http://is-wireless.com/4g-simulators/lte-mac-lab> [Consultado: Mayo 2015].
- [49] [Online]. Disponible en: <http://www.anite.com/businesses/network-testing/our-solutions/optimization> [Consultado: Mayo 2015].

- [50] [Online]. Disponible en: <http://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/lte-a-downlink-system-level-simulator> [Consultado: Mayo 2015].
- [51] Institute of Telecommunications - Vienna University of Technology, "Vienna LTE-A System Level Simulator v1.8r1375 List of Features" [Online]. Disponible en: http://www.nt.tuwien.ac.at/fileadmin/topics/simulators/FeatureList_SL.pdf [Consultado: Mayo 2015].
- [52] O. Ulgen, J. Black, B. Johnsonbaugh y R. Klungle, "Simulation Methodology – A Practitioner's Perspective," Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology, 2006.
- [53] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building", Simulation Methodology – Discrete Event Simulation, 2003.
- [54] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios." Tech. Rep. 36.942 v12.0.0 Release 12, 2014.
- [55] T. B. Sorensen, P. E. Mogensen y F. Frederiksen, "Extension of the ITU Channel Models for Wideband (OFDM) Systems," en *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Fall 2005*, Dallas, USA, Sep. 2005, pp. 392-396.
- [56] R. Jain, D. Chiu y W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems," Digital Equipment Corporation, 1984.
- [57] H. Holma y A. Toskala, *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. Gran Bretaña: John Wiley & Sons, 2004.
- [58] C. Thapa y C. Chandrasekhar, "Comparative Evaluation of Fractional Frequency Reuse (FFR) and Traditional Frequency Reuse In 3gpp-Lte Downlink," *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, vol. 2, no. 4, pp. 45-52, Agosto 2012.
- [59] T. D. Novlan et al., "Analytical Evaluation of Fractional Frequency Reuse for OFDMA Cellular Networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 4294-4305, Dic. 2011.
- [60] B. N. Fernández, L. A. González y C. M. Hernández, "Impacto del Reuso de Frecuencia Fraccional en la Reducción de Interferencia Intercelda En LTE," Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia, 2014.
- [61] 3GPP, "Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects," Tech. Rep. 36.819 v11.2.0, 2013.
- [62] S. Schwarz. *Coordinated Multi-Point (CoMP) in LTE* [Online], Universidad de Viena. Disponible en: http://www.nt.tuwien.ac.at/uploads/media/Wireless_seminar.pdf [Consultado: Mayo 2015].
- [63] 3G Americas. (2010). *3GPP Mobile Broadband Innovation Path to 4G: Release 9, Release 10 and Beyond: HSPA+, SAE/LTE and LTE-Advanced* [Online]. Disponible en: http://www.3g4g.co.uk/Broadband/MobileBroadband_Report01.pdf [Consultado: Mayo 2015].

ANEXO A

- Escenario de Simulación No 1: Caso 10 MHz

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> promedio en el sector [Mb/s]	<i>Fairness index</i>
RR	31,5	0,8938
Best CQI	41,15	0,62
PF	37,23	0,9628

Tabla A.1 Comparativa en términos de *fairness* y *throughput* con BW 10 MHz.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> pico de UE [Mb/s]	<i>Throughput</i> promedio de UE [Mb/s]	<i>Throughput</i> borde de UE [Mb/s]	Eficiencia Espectral promedio de UE [bit/cu]
RR	4,27	3,16	0,66	3,75
Best CQI	9,06	4,11	0	5,13
PF	4,18	3,72	1,86	4,41

Tabla A.2 Eficiencia espectral y *throughput* pico, medio y borde para el sector con BW 10 MHz.

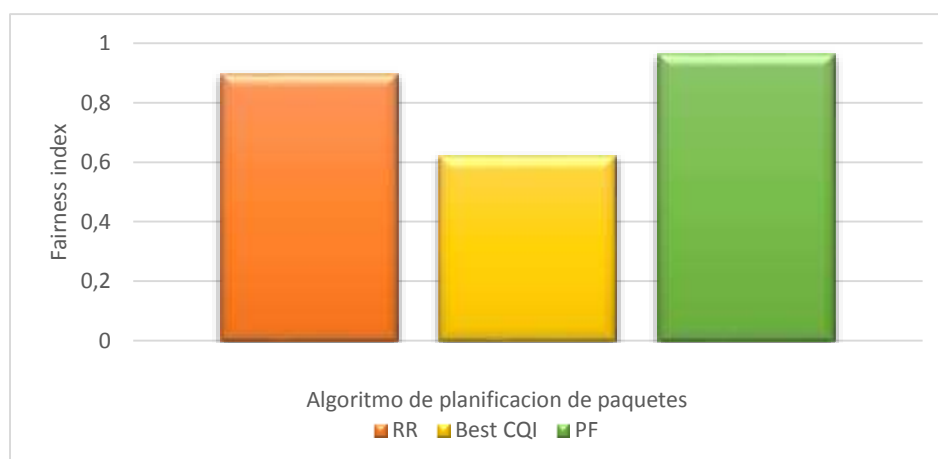


Figura A.1 *Fairness* para BW 10 MHz.



Figura A.2 *Throughput* del sector para BW de 10 MHz.

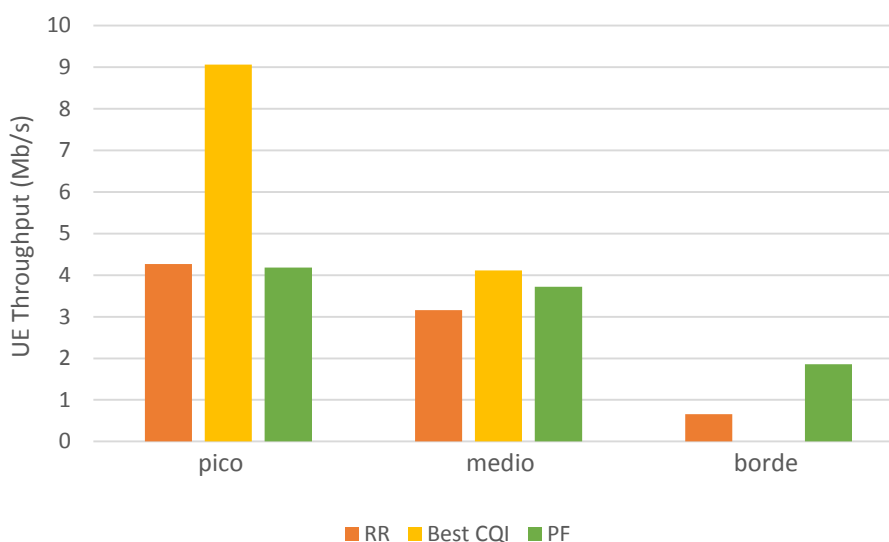


Figura A.3 *Throughput* pico, medio y borde para BW 10 MHz.

Throughput promedio por UE [Mb/s]			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	4,27	8	4,18
2	3,94	5,29	4,16
3	3	1,284	3,99
4	3,46	8,069	4,15
5	3,46	3,82	4,12
6	2,53	1,28	3,72
7	0,66	0	1,86
8	2,08	0	2,84
9	4,25	9,057	4,14
10	3,94	3,755	4,07

Tabla A.3 UE *Throughput* para RR, Best CQI y PF, BW 10 MHz.

SINR (dB)			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	28,96	28,92	28,96
2	26,03	26,19	26,03
3	18,2	16,07	18,2
4	22,6	27,94	27,98
5	22,6	22,71	22,6
6	16,25	16,07	16,25
7	5	0	5
8	11,36	0	11,36
9	28,96	29,2	27,98
10	26,03	23,07	23,09

Tabla A.4 SINR para RR, Best CQI y PF, BW 10 MHz.

Promedio de PRBs por TTI y UE			
UE	RR	BEST CQI	PF
1	5	9,6	5,37
2	5	6,1	5,33
3	5	2,3	4,8
4	5	9,5	5,2
5	5	4,33	4,87
6	5	1,47	4,9
7	5	0	4,7
8	5	0	4,7
9	5	10,93	5,33
10	5	4,27	4,8

Tabla A.5 PRBs asignados por RR, Best CQI y PF, BW 10 MHz.

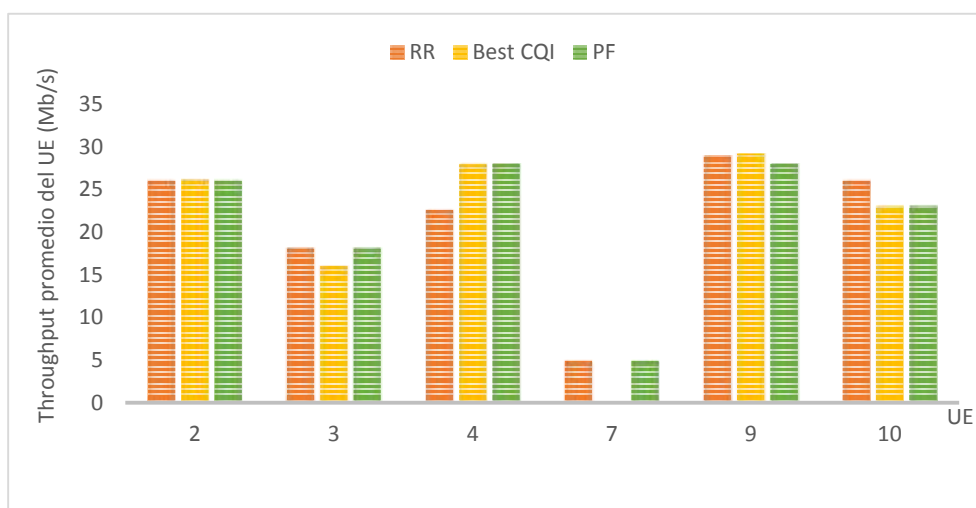


Figura A.4 Throughput para los UEs, BW 10 MHz.

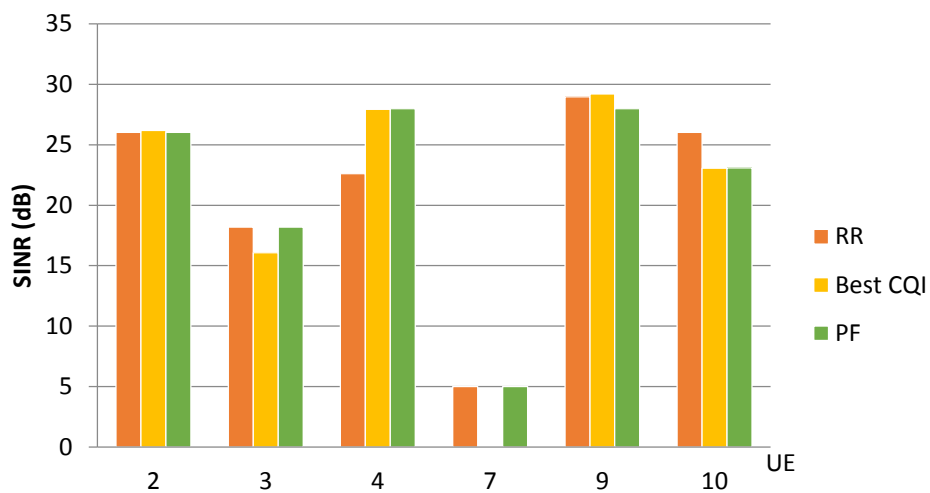


Figura A.5 SINR para los UEs, BW 10 MHz.

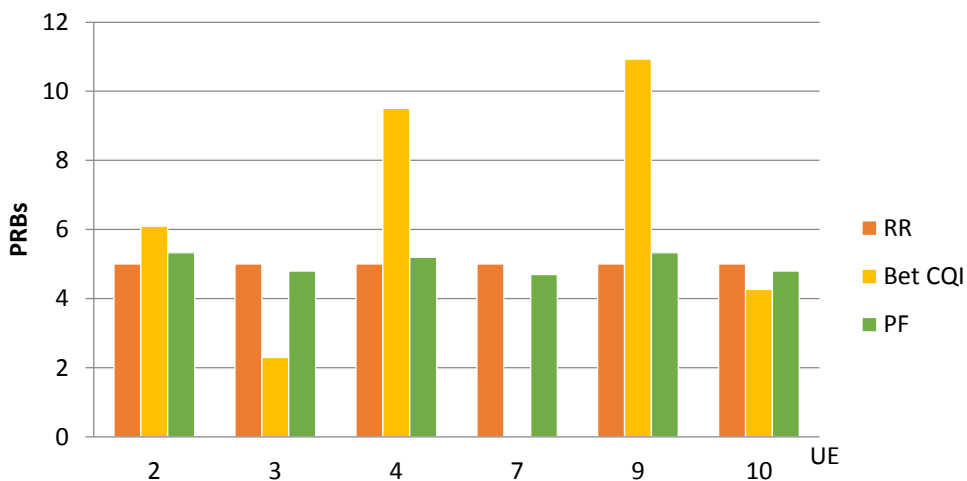


Figura A.6 Asignación de PRBs por UE, BW 10 MHz.

ANEXO B

- Escenario de Simulación No 3. Sistema de 7 celdas.

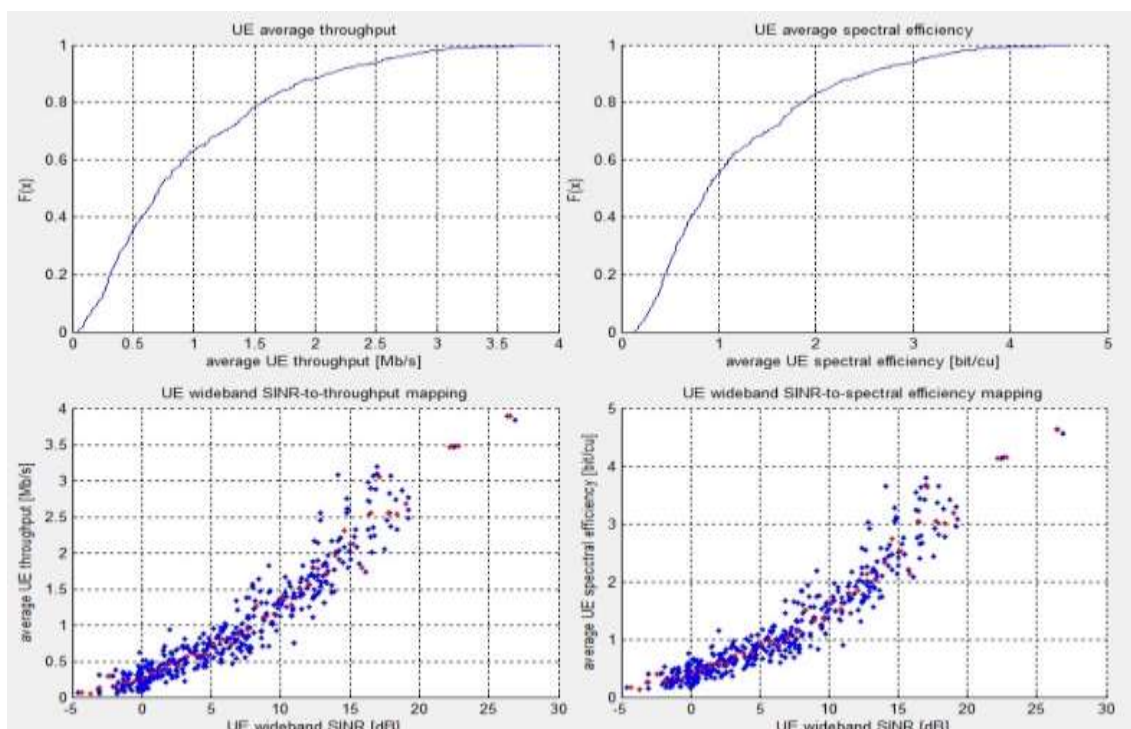


Figura B.1 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear RR en el sistema de 7 celdas.

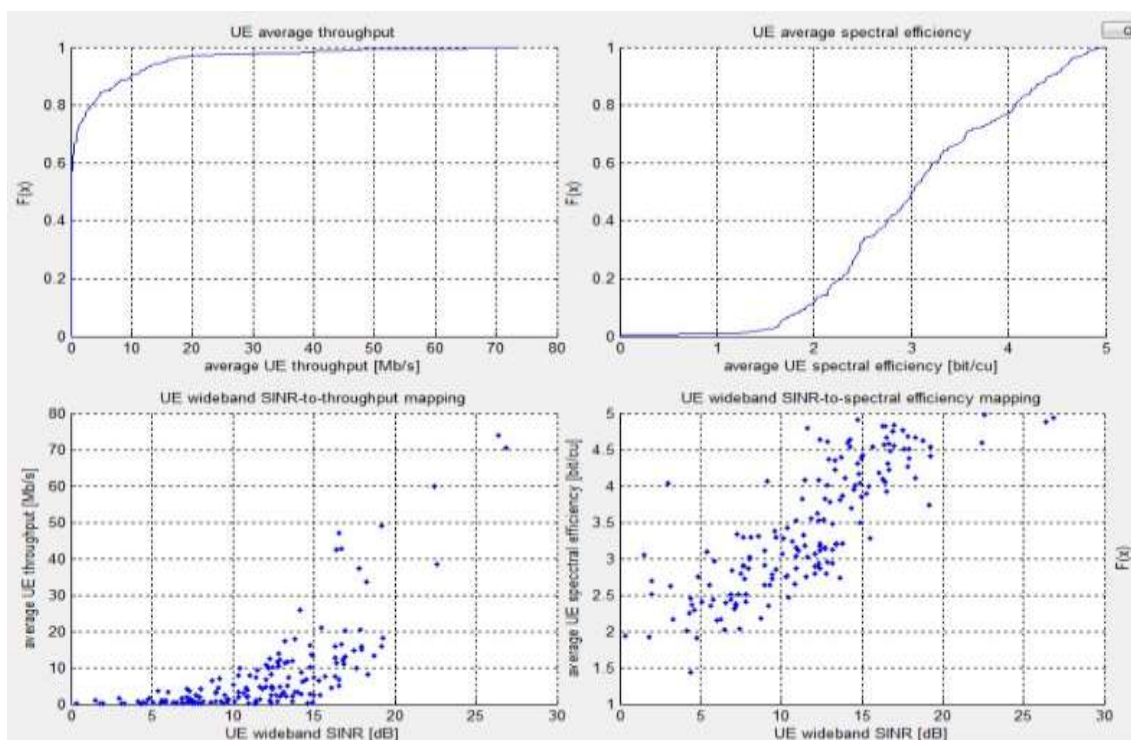


Figura B.2 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear Best CQI en el sistema de 7 celdas.

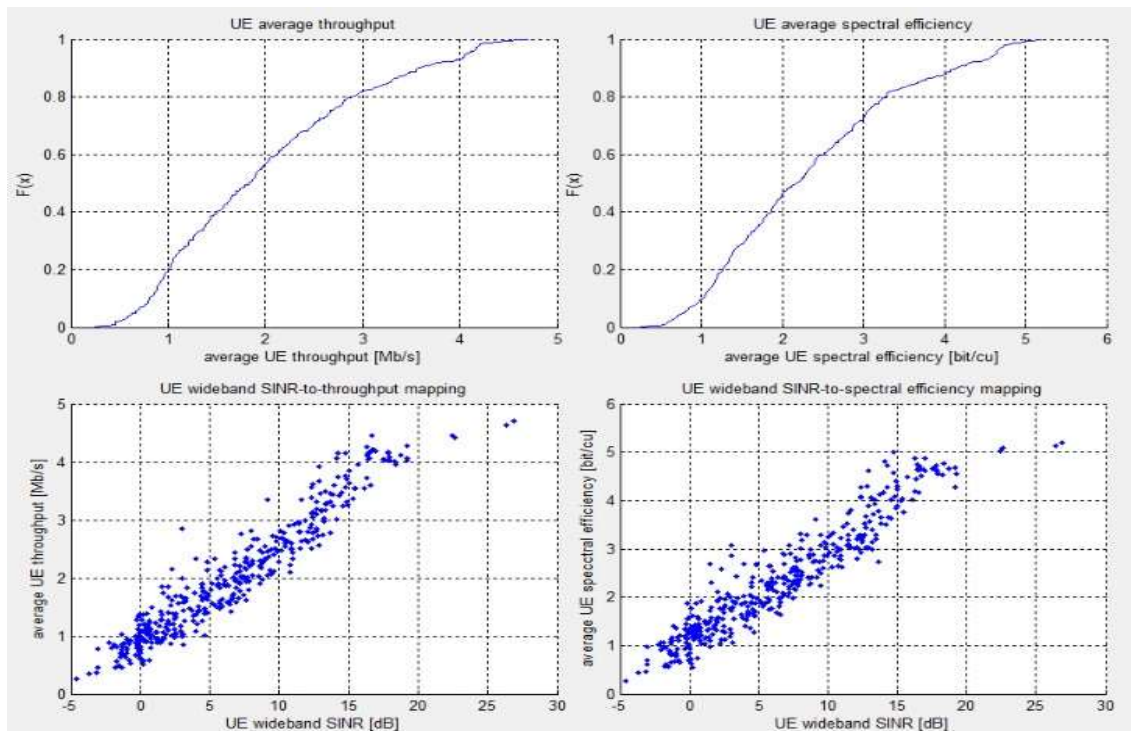


Figura B.3 ECDF y Diagramas de Dispersión obtenidos al emplear PF en el sistema de 7 celdas.

ANEXO C

C.1 Fractional Frequency Reuse

La Figura C.1 muestra la reutilización de frecuencia del sistema de 7 celdas del escenario 3.

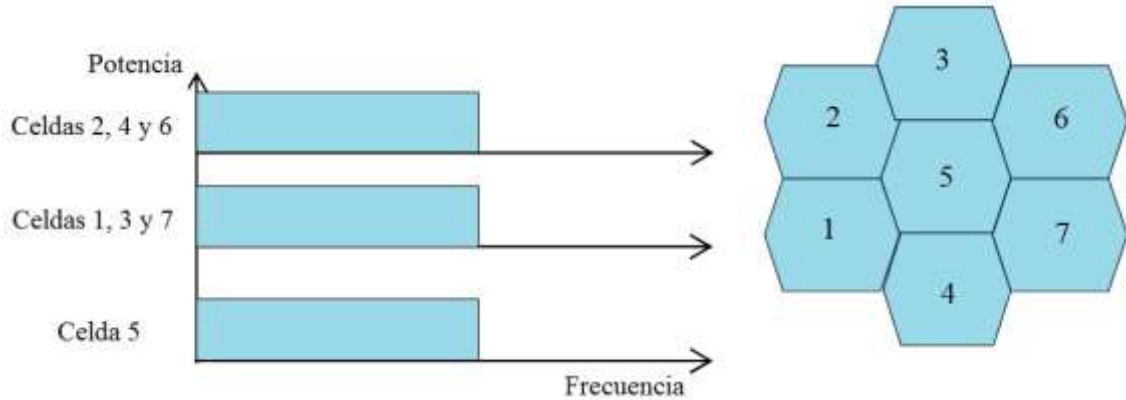


Figura C.1 Sistema de 7 celdas con factor de reuso 1. Basado en [58].

Para que en LTE en cada celda se puedan usar todos los PRBs disponibles, se emplea un factor de reuso 1, pero esto ocasiona altos niveles de interferencia en los bordes de las celdas y como se evidenció en los resultados obtenidos, al emplear la misma frecuencia en todas las celdas, la ICI impacta negativamente en el efecto que tienen los algoritmos de planificación de paquetes en el desempeño de la red.

FFR es la solución más empleada para reducir los efectos de la ICI, lo que hace es particionar el ancho de banda de forma que: (a) los usuarios ubicados en los bordes de celdas adyacentes no se interfieran entre sí, (b) se minimice la interferencia creada y recibida por usuarios ubicados en posiciones centrales de las celdas, (c) el algoritmo de planificación de paquetes disponga de más PRBs que si empleara un esquema de reuso de frecuencia tradicional [59]. La Figura C.2 ilustra la aplicación de FFR al sistema de 7 celdas.

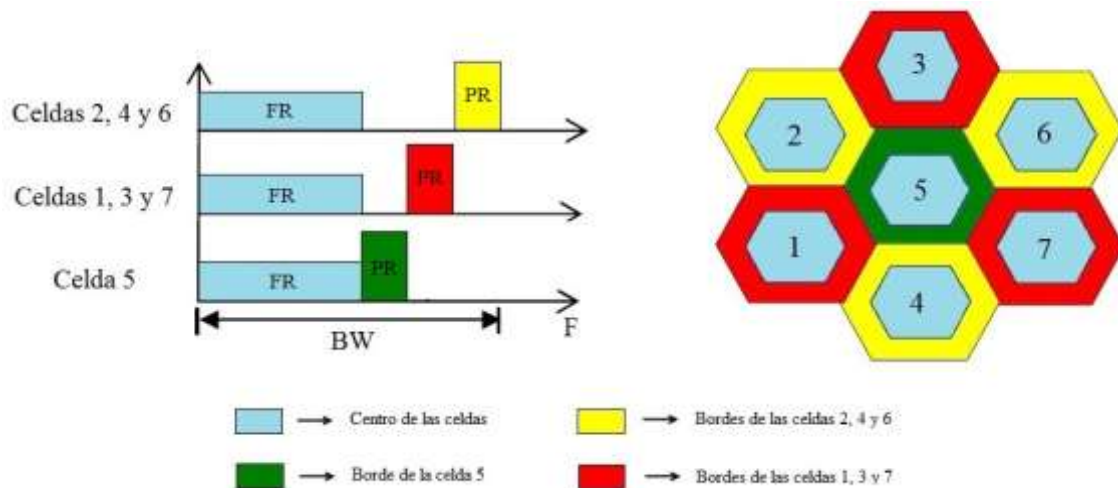


Figura C.2 FFR en el sistema de 7 celdas.

Cada celda del sistema se divide en dos zonas, la zona de Reuso Completo (FR, *Full Reuse*) y la zona de Reuso Parcial (PR, *Partial Reuse*). La FR corresponde al centro de

las celdas y en ella se utiliza la misma sub-banda de frecuencias, por su parte, la PR representa los bordes de la celda y en ella se manejan tres sub-bandas de frecuencias, de forma que en bordes de celdas contiguas se empleen frecuencias distintas.

En LTE Downlink System Level Simulator el reusó de frecuencia fraccional se implementa mediante un planificador de paquetes (FFR *scheduler*), para el cual se configura un algoritmo de planificación de paquetes para FR y otro algoritmo de planificación de paquetes para PR. Los algoritmos que se pueden elegir son: RR, Best CQI y PF, así que hay varias posibilidades de configuración, pero, los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo, demostraron que PF es el algoritmo de planificación de paquetes que logra el mayor equilibrio entre maximización del *throughput* y *fairness*, por lo tanto, la mejor configuración para FFR *scheduler*, es emplear PF tanto en la zona de reusó completo, como en la zona de reusó parcial.

La Tabla C.1 muestra los resultados logrados por FFR *scheduler* para el sistema de 7 celdas. Para efectos de comparación se adicionan los resultados obtenidos al emplear PF en el mismo sistema.

Algoritmo de planificación de paquetes	<i>Throughput</i> promedio en el sistema [Mb/s]	<i>Fairness index</i>
FFR <i>scheduler</i>	52.46	0.83
PF	39.88	0.78

Tabla C.1 *Throughput* y *fairness* en el sistema de 7 celdas al emplear el planificador FFR.

Al emplear el algoritmo de planificación de paquetes FFR *scheduler* en el escenario de simulación 3 se evidencia una mejora en los resultados obtenidos de *throughput* y *fairness*. Estos no alcanzan los niveles de los logrados en el escenario de simulación No 2 (en el que la ICI no se considera), pero FFR *scheduler* al planificar a los usuarios teniendo en cuenta las condiciones de interferencia entre las celdas, logra reducir el efecto que la ICI tiene y así mejorar el desempeño del sistema.

La tesis en [60] realiza un análisis detallado del impacto de FFR en la reducción de ICI en LTE.

C.2 Coordinated Multipoint

CoMP es introducida en LTE en la especificación 11 (R11, *Release 11*) [61]. LTE CoMP es considerado por la 3GPP como una técnica para mejorar, cobertura, *throughput* en el borde de la celda y el desempeño general del sistema. La idea básica que sigue es: cuando un equipo de usuario está localizado en el borde de la celda, es capaz de recibir señal de múltiples eNBs, si la señalización se transmite de forma coordinada entre los eNBs, el desempeño del sistema en el DL puede incrementarse significativamente.

Hay varias formas de implementar CoMP en LTE, la relacionada con la planificación de paquetes es denominada, *Coordinate Scheduling*. La Figura C.3 muestra cómo se realiza la planificación de paquetes conjunta. Un grupo de eNBs cooperan entre sí para la toma de decisiones sobre la asignación de recursos. Únicamente desde un eNB a la vez, se puede transmitir los datos e información sobre la asignación a un UE, pero las decisiones sobre la planificación se hacen entre los eNBs que hagan parte del grupo.

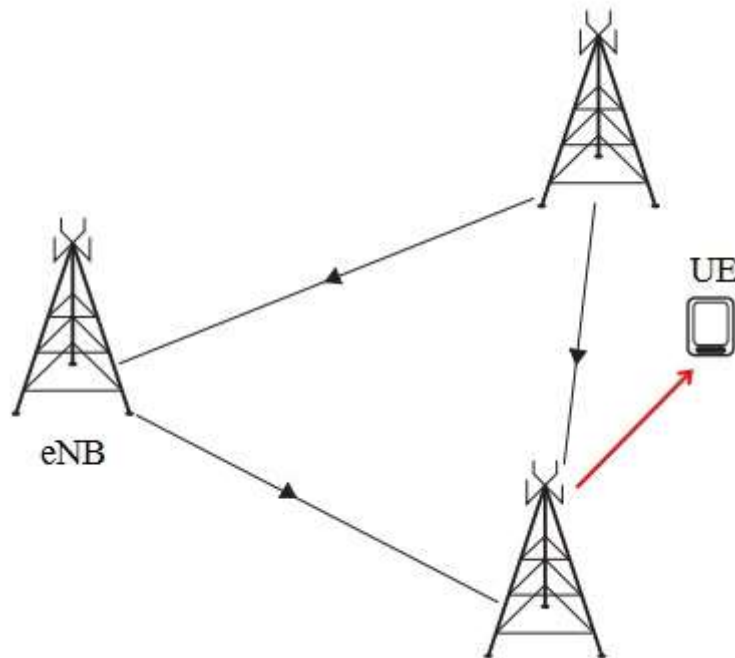


Figura C.3 Planificación de paquetes conjunta. Basado en [62].

Con *Coordinated Scheduling* se espera obtener un mejor desempeño del sistema, aunque al requerir para la toma de decisiones de planificación que los eNBs se comuniquen entre ellos, la latencia dentro del sistema aumenta [63].

En la versión de LTE Downlink System Level Simulator que se utilizó en el desarrollo de este trabajo de grado (v. 1.8r1375) viene implementado un módulo beta de CoMP, que se advierte es inestable y puede dar resultados no confiables, no obstante, se intentó para el escenario 3, simularlo activando el módulo CoMP, con el fin de observar que tanto mejora el desempeño del sistema. Este módulo se encuentra implementado en el simulador de dos formas: (i) *trivial*, solo para efectos de comparación, igual a No CoMP, cada eNB está en un sitio diferente; (ii) *global*, todos los eNBs están en el mismo sitio y potencialmente cooperando.

Al implementar CoMP *trivial* no se obtuvo cambio en los resultados y al implementar CoMP *global* se produjeron errores en la ejecución de simulación, por lo que habrá que esperar por una versión de LTE Downlink System Level Simulator que cuente con un módulo CoMP más completo y estable para evaluar con este simulador el impacto que tiene CoMP en la planificación de paquetes.

