

**IMPACTO DEL CONTROL DE ADMISIÓN EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED
LTE**



**Juan Carlos Majín Narváez
Ricardo Andrés Muñoz Arcos**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Octubre de 2014**

IMPACTO DEL CONTROL DE ADMISIÓN EN EL DESEMPEÑO DE UNA RED LTE



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

**Juan Carlos Majín Narváez
Ricardo Andrés Muñoz Arcos**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Octubre de 2014**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LTE	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES	4
1.3 ARQUITECTURA LTE.....	5
1.3.1 Equipo de Usuario	7
1.3.2 E-UTRAN	7
1.3.3 EPC.....	10
1.4 PARTICULARIDADES RADIO DE LA TECNOLOGÍA LTE.....	11
1.4.1 Flexibilidad en el Espectro	11
1.4.2 Sistemas de Múltiple Antenas.....	12
1.4.3 Estructura de Trama LTE.....	12
1.5 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO	13
1.5.1 Control de Potencia	13
1.5.2 Control de Movilidad	14
1.5.3 Planificación de Paquetes.....	14
1.5.4 Balanceo de Carga	14
1.5.5 Control de Admisión (AC)	14
2. CAPÍTULO II. CONTROL DE ADMISIÓN EN LTE	15
2.1 INTRODUCCIÓN	15
2.2 CALIDAD DE SERVICIO Y TIPOS DE CONTROL DE ADMISIÓN.....	16
2.2.1 Calidad de Servicio.....	16
2.2.2 Tipos de Control de Admisión.....	17
2.3 TIPOS DE ACCESO ALEATORIO	18
2.4 PARÁMETROS DE QoS ASOCIADOS AL CONTROL DE ADMISIÓN EN LTE ...	19
2.5 ASPECTOS DE LA INTERFAZ RADIO RELACIONADOS CON EL CONTROL DE ADMISIÓN.....	21
2.5.1 Información del Estado del Canal (CSI, <i>Channel State Information</i>)	21
2.6 ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN DE RECURSOS	22
3. CAPÍTULO III. SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS	24
3.1 INTRODUCCIÓN	24

3.2	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN	24
3.2.1	Herramientas Software para la Simulación del Control de Admisión en Redes LTE.	24
3.3	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	26
3.3.1	Definición de Escenarios y Casos de Simulación	26
3.3.2	Definición de Características Técnicas de los Escenarios de Simulación ...	29
3.3.3	Ejecución de las Simulaciones	30
3.3.4	Análisis de Resultados	30
3.3.5	Otros Resultados del Análisis de las Simulaciones.....	48
4.	CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS ..	55
4.1	CONCLUSIONES.....	55
4.1.1	Respecto al Desarrollo de la Simulación.....	55
4.1.2	Respecto a los Resultados de Simulación	55
4.2	RECOMENDACIONES	56
4.3	TRABAJOS FUTUROS	57
	BIBLIOGRAFÍA	58
	ANEXO A	64
	ANEXO B	67
	ANEXO C	68
	ANEXO D	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Arquitectura de tecnologías 2G/3G.	5
Figura 1.2 Arquitectura general de LTE.	6
Figura 1.3 Arquitectura en bloques de LTE.	6
Figura 1.4 Funciones del eNodeB y relación con otros elementos.	8
Figura 1.5 Pila de protocolos de la interfaz radio del sistema LTE.	9
Figura 1.6 Modos de operación de LTE.	12
Figura 1.7 Estructura de trama LTE.	13
Figura 2.1 Control de admisión en una red LTE.	16
Figura 2.2 Portadores dedicado y por defecto.	16
Figura 2.3 Acceso basado en contienda.	18
Figura 2.4 Acceso regulado.	19
Figura 3.1 Diagrama de flujo del Control de Admisión.	28
Figura 3.2 Código control de admisión.	29
Figura 3.3 Sector de una celda LTE.	29
Figura 3.4 Promedio asignación RB.	31
Figura 3.5 <i>Throughput</i> 5 UE-1.4 MHz.	33
Figura 3.6 <i>Throughput</i> 10 UEs-1.4 MHz.	33
Figura 3.7 <i>Throughput</i> 20 UEs-1.4 MHz.	33
Figura 3.8 <i>Throughput</i> 5 UE-3 MHz.	35
Figura 3.9 <i>Throughput</i> 10 UE-3 MHz.	36
Figura 3.10 <i>Throughput</i> 20 UE-3 MHz.	36
Figura 3.11 <i>Throughput</i> 5 UE-5 MHz.	38
Figura 3.12 <i>Throughput</i> 10 UE-5 MHz.	38
Figura 3.13 <i>Throughput</i> 20UE-5 MHz.	39
Figura 3.14 <i>Throughput</i> 5 UEs-1.4 MHz.	41
Figura 3.15 <i>Throughput</i> 10 UE-1.4 MHz.	41
Figura 3.16 <i>Throughput</i> 20 UE-1.4 MHz.	41
Figura 3.17 <i>Throughput</i> 5UE-3 MHz.	43
Figura 3.18 <i>Throughput</i> 10UE-3 MHz.	43
Figura 3.19 <i>Throughput</i> 20UE-3 MHz.	44

Figura 3.20 <i>Throughput</i> 5UE-5 MHz.	46
Figura 3.21 <i>Throughput</i> 10UE-5 MHz.	46
Figura 3.22 <i>Throughput</i> 20UE-5 MHz.	46
Figura 3.23 Comparación <i>throughput</i> AC-1.4 MHz-5 UEs y NAC-1.4 MHz-5 UEs.	48
Figura 3.24 Celda completa LTE.	49
Figura 3.25 Dos celdas LTE.....	50
Figura 3.26 ECDF y Diagramas de Dispersión, NAC-1.4 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.	51
Figura 3.27 ECDF y Diagramas de Dispersión, AC-1.4 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.	52
Figura 3.28 Probabilidad de Bloqueo para cada ancho de banda.	53
Figura B.1 Pruebas con diferentes TTIs.....	67
Figura C.1 Distribución normal de <i>throughput</i>	68
Figura C.2 Distribución normal de <i>throughput</i>	69
Figura C.3 Distribución normal de <i>throughput</i>	69
Figura D.1 ECDF y Diagramas de Dispersión, NAC-3 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.	70
Figura D.2 ECDF y Diagramas de Dispersión, AC-3 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.	70
Figura D.3 ECDF y Diagramas de Dispersión, NAC-5 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.	71
Figura D.4 ECDF y Diagramas de Dispersión, AC-5 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Anchos de banda y sus respectivos bloques de recursos.	11
Tabla 2.1 Asignación de QCI en función del servicio.	20
Tabla 2.2 Tabla de CQI.....	22
Tabla 3.1 Comparación cualitativa entre simuladores para redes LTE.....	25
Tabla 3.2 Definición de escenarios y casos de simulación.....	27
Tabla 3.3 Parámetros de los escenarios de simulación.	30
Tabla 3.4 Resultados NAC-1.4 MHz y 5 UEs.....	31
Tabla 3.5 Resultados NAC-1.4 MHz y 10 UEs.....	32
Tabla 3.6 Resultados NAC-1.4 MHz y 20 UEs.....	32
Tabla 3.7 Resultados NAC-3 MHz y 5 UEs.....	34
Tabla 3.8 Resultados NAC-3 MHz y 1 0UEs.....	34
Tabla 3.9 Resultados NAC-3 MHz y 20 UEs.....	35
Tabla 3.10 Resultados NAC-5 MHz y 5 UEs.....	37
Tabla 3.11 Resultados NAC-5 MHz y 10 UEs.....	37
Tabla 3.12 Resultados NAC-5 MHz y 20 UEs.....	37
Tabla 3.13 Resultados AC-1.4 MHz y 5 UEs.....	39
Tabla 3.14 Resultados AC-1.4 MHz y 10 UEs.....	40
Tabla 3.15 Resultados AC-1.4 MHz y 20 UEs.....	40
Tabla 3.16 Resultados AC-3 MHz y 5 UEs.....	42
Tabla 3.17 Resultados AC-3 MHz y 10U Es.....	42
Tabla 3.18 Resultados AC-3 MHz y 20U Es.....	43
Tabla 3.19 Resultados AC-5 MHz y 5U Es.....	44
Tabla 3.20 Resultados AC-5 MHz y 10U Es.....	45
Tabla 3.21 Resultados AC-5 MHz y 20U Es.....	45
Tabla 3.22 Valores de media y desviación estándar del <i>throughput</i> para un sector.....	47
Tabla 3.23 <i>Throughput</i> celda completa.....	49
Tabla 3.24 <i>Throughput</i> dos celdas.....	50
Tabla 3.25 Resumen del desempeño de una red LTE sin y con control de admisión.....	53

Tabla A.1 Parámetros de configuración para los tres planificadores.....	64
Tabla A.2 Prueba con 3 usuarios.....	64
Tabla A.3 Prueba con 5 usuarios.....	64
Tabla A.4 Prueba con 10 usuarios.....	65
Tabla A.5 Prueba con 3 usuarios.....	65
Tabla A.6 Prueba con 5 usuarios.....	65
Tabla A.7 Prueba con 10 usuarios.....	65
Tabla A.8 Prueba con 3 usuarios.....	66
Tabla A.9 Prueba con 5 usuarios.....	66
Tabla A.10 Prueba con 10 usuarios.....	66
Tabla A.11 Comparacion del rendimiento.....	66
Tabla B.1 Parámetros de simulación.....	67

LISTADO DE ACRONIMOS

4G	<i>Fourth Generation</i> , Cuarta Generación.
AC	<i>Admission Control</i> , Control de Admisión.
AMC	<i>Adaptative Modulation and Coding</i> , Modulación y Codificación Adaptativa.
ARP	<i>Allocation and Retention Priority</i> , Prioridad de Asignación y Retención.
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i> , Solicitudes de Repetición Automática.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BLER	<i>Block Error Rate</i> , Tasa de Error de Bloque.
BS	<i>Bearer Service</i> , Servicio Portador.
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> , Estación Base Transceptora.
BW	<i>Bandwidth</i> , Ancho de Banda.
CN	<i>Core Network</i> , Núcleo de Red.
CP	<i>Control Plane</i> , Plano de Control.
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i> , Indicador de la Calidad de Canal.
CSI	<i>Channel State Information</i> , Información del Estado del Canal.
CSR	<i>Channel Status Report</i> , Reporte del Estado del Canal.
DL	<i>Downlink</i> , Enlace de Bajada.
eNodeB	<i>Evolved Node B</i> , Nodo B Evolucionado.
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Paquetes Evolucionado.
EPS	<i>Evolved Packet System</i> , Sistema de Paquetes Evolucionado.
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> , Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada.
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i> , Duplexación por División de Frecuencia.
GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i> , Tasa de Bit Garantizada.

H-ARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> , Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida.
HSS	<i>Home Subscriber Server</i> , Servidor de Suscriptores Locales.
ICIC	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i> , Coordinación e Interferencia entre Celda.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
LB	<i>Load Balancing</i> , Balanceo de Carga.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Término.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MBR	<i>Maximum Bit Rate</i> , Tasa Máxima de Bit.
MC	<i>Mobility Control</i> , Control de Movilidad.
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i> , Esquema de Modulación y Codificación.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiples Entradas y Múltiples Salidas.
MM	<i>Mobility Management</i> , Gestión de Movilidad.
MME	<i>Mobility Management Entity</i> , Entidad de Gestión de Movilidad.
MR	<i>Maximum Rate</i> , Tasa Máxima.
NAS	<i>Non-Access Stratum</i> , Estrato de no Acceso.
N-GBR	<i>No Guaranteed Bit Rate</i> , Tasa de Bit No Garantizada.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
PC	<i>Power Control</i> , Control de Potencia.
PCC	<i>Policy and Charging Control</i> , Políticas de Control y Tarificación.
PCRF	<i>Policy and Charging Resource Function</i> , Funciones de Políticas y Tarificación de Recursos.
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i> , Canal Físico de Control de Enlace de Bajada.
PDCCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos.

PDN-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i> , Pasarela de red de Paquetes de Datos.
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada.
PF	<i>Proportional Fair</i> , Proporcional Justo.
PMI	<i>Precoding Matrix Indicator</i> , Indicador de la Matriz de Pre-codificación.
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i> , Canal Físico de Acceso Aleatorio.
PS	<i>Packet Scheduling</i> , Planificación de Paquetes.
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada.
QCI	<i>QoS Class Identifier</i> , Identificador de Clase de Calidad de Servicio.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RB	<i>Resource Block</i> , Bloque de Recurso.
RE	<i>Resource Element</i> , Elemento de Recurso.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RI	<i>Rank Indicator</i> , Indicador de Rango.
RLC	<i>Radio Link Control</i> , Control del Enlace Radio.
RNC	<i>Radio Network Controller</i> , Controlador de Red Radio.
RRC	<i>Radio Resource Control</i> , Control de Recursos Radio.
RRM	<i>Radio Resource Management</i> , Gestión de Recursos Radio.
SAE	<i>System Architecture Evolution</i> , Evolución de la Arquitectura del Sistema.
SC-FDMA	SC-FDMA, <i>Single Carrier Division Frequency Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única.
S-GW	<i>Serving Gateway</i> , Pasarela de Servicio.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> , Relación Señal a Interferencia más Ruido.
SMS	<i>Short Message Service</i> , Servicio de Mensajería Corta.

SRS	<i>Sounding Reference Signal</i> , Señales de Referencia para Sondeo.
TDD	<i>Time Division Duplex</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TTI	<i>Transmission Time Interval</i> , Intervalo de Transmisión.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.
UL	<i>Uplink</i> , Enlace de Subida.
UP	<i>User Plane</i> , Plano de Usuario.
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i> , Módulo de Identificación Universal.
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i> , Voz sobre Protocolo Internet.

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas han evolucionado vertiginosamente en los últimos años, haciéndose cada día más transversales a las actividades cotidianas del ser humano. Una de las áreas que ha sido permeada por esta evolución son las comunicaciones móviles celulares.

La denominada Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*), inserta a las comunicaciones móviles en un nuevo concepto de arquitectura móvil mejorada, planteando el aumento en las velocidades de transmisión de datos, con una menor latencia y una mejora en la eficiencia espectral [1].

En las tecnologías celulares convencionales, el tráfico de voz se transfiere a través de la red mediante conmutación de circuitos; las nuevas tecnologías como LTE cambian este paradigma de comunicación, ya que la transferencia de datos y voz se realiza por medio de conmutación de paquetes. En LTE la diferenciación de tráfico y la Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) se logran mediante una adecuada asignación de recursos, donde se tienen en cuenta parámetros o indicadores de QoS que son interpretados y soportados por la red [2]-[5].

Para garantizar un uso eficiente de los recursos y alcanzar los requisitos de calidad previamente establecidos, se tienen diferentes procedimientos que hacen parte de la Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*), por medio de la cual se optimiza la asignación de recursos radio, los cuales se distribuyen entre los usuarios de la red móvil [1], [4].

Uno de estos procedimientos es el Control de Admisión (AC, *Admission Control*), el cual opera basado en el conocimiento sobre la capacidad total del sistema y las cargas generadas por las aplicaciones en el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) sobre la red; éste regula el acceso por medio de diferentes funcionalidades para evitar la sobrecarga y así, no deteriorar el servicio de las conexiones establecidas y de la nueva conexión [4]-[5].

Dado que la tecnología LTE soporta diferentes tipos de tráfico como Voz sobre el Protocolo Internet (VoIP, *Voice over Internet Protocol*), video y datos, uno de sus desafíos es la asignación apropiada de los recursos; para lo cual el control de admisión se utiliza como medio para la optimización de recursos radio, con el fin de cumplir los nuevos requerimientos de los usuarios en cuanto a velocidad de datos y QoS.

Con base en lo anterior, este proyecto de grado realiza mediante simulación un análisis del impacto del control de admisión en el desempeño de una red LTE.

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

1. Capítulo I. Introduce los conceptos fundamentales y generalidades de una red LTE.
2. Capítulo II. Presenta los aspectos más relevantes asociados al control de admisión en LTE.
3. Capítulo III. Describe de forma general las herramientas software disponible para simular el procedimiento de control de admisión en LTE y presenta las simulaciones realizadas con su análisis correspondiente.
4. Capítulo IV. Se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de todo el proyecto y se presentan una serie de ideas para futuros trabajos e investigaciones en este campo.

1. CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LTE

1.1 INTRODUCCIÓN

Los dispositivos móviles se han convertido en una herramienta de comunicación indispensable en la vida cotidiana de las personas, ya que permiten interconectarse con otros dispositivos mientras el usuario se encuentra en movimiento, además proporcionan servicios de valor agregado ofrecidos por redes externas. El crecimiento de los suscriptores móviles y las aplicaciones soportadas en Internet hacen que el volumen de tráfico en las redes crezca exponencialmente, requiriendo un mayor Ancho de Banda (BW, *Bandwidth*). Los nuevos requerimientos de los usuarios en cuanto a movilidad, escalabilidad y QoS han hecho que diversas organizaciones de investigación y proveedores de servicios alrededor del mundo se encuentren estudiando y analizando nuevas tecnologías móviles con el fin de implementar sistemas que permitan hacer un mejor uso del espectro radioeléctrico [1]-[3].

Existe una tecnología denominada LTE, permite obtener altas tasas de transmisión y recepción de datos y una menor latencia en el procesamiento de señales. También garantiza QoS, minimiza el consumo de batería en el equipo de usuario y trabaja con diferentes anchos de banda y bandas de frecuencia. Estos objetivos son definidos por el Proyecto de Cooperación en sistemas de Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*), a través de la especificación 8 (R8, *Release 8*) [4]-[6].

En comparación con el modelo de conmutación de circuitos de los sistemas celulares anteriores, LTE define una arquitectura plana y sencilla para brindar únicamente servicios basados en conmutación de paquetes. Las especificaciones del 3GPP denominan a la arquitectura de la tecnología de LTE como Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*) [7]. Esta nueva arquitectura presenta la misma esencia de las tecnologías anteriores, dividiendo el sistema en tres elementos: primero el UE, el cual permite acceder a los servicios y aplicaciones que ofrece la red. Segundo, la Red de Acceso Evolucionada (E-UTRAN, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), la cual se encarga de la transmisión y recepción de información entre los UEs y el Núcleo de Red (CN, *Core Network*); en ésta entidad se encuentra la estación base denominada Nodo B Evolucionado (eNodeB, *evolved NodeB*), que integra las funcionalidades de gestión, control y decisión de la red de acceso. Finalmente, se tiene el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*), encargado de proporcionar conectividad basada en el Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*) entre los UE conectados al sistema y las redes externas [8]-[9].

Uno de los elementos principales de la arquitectura LTE es la red de acceso E-UTRAN, compuesta por la interconexión de múltiples eNodeB, los cuales son responsables de todas las funciones radio. Una de ellas es la RRM [10]-[11], la cual consiste en utilizar de forma eficiente el espectro radioeléctrico (por ser este un recurso escaso y limitado). Esta función permite distribuir de forma adecuada los recursos de la red, minimizar el consumo de potencia por parte del usuario, brindar mayor capacidad y cobertura por celda y garantizar unos niveles mínimos de QoS asociados a un servicio, entre otros [12].

El control de admisión es uno de los procedimientos de la RRM, el cual opera basado en el conocimiento de la capacidad total del sistema y las cargas generadas por las aplicaciones de los UE sobre la red. Este procedimiento regula el acceso a los recursos por medio de diferentes funcionalidades para evitar la sobrecarga y así no deteriorar la QoS de las conexiones ya establecidas en el sistema [13-15].

Debido al enfoque de este proyecto, se presenta una descripción general de la evolución de sistemas de comunicaciones, la arquitectura LTE, sus particularidades y la importancia de la gestión de recursos radio para optimizar y hacer uso eficiente de los recursos radio.

1.2 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES

Las comunicaciones móviles han evolucionado desde los sistemas celulares de primera generación, los cuales se caracterizaban por ser analógicos, transportar sólo servicios de voz y la QoS ofrecida a los usuarios era muy baja. Posteriormente se introdujo la segunda generación que se caracterizaba por ser digital, lo que trajo consigo la reducción del tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles e incorporó nuevos servicios como el identificador de llamada, Servicios de Mensajería Corta (SMS, *Short Message Service*) y mensajes de voz entre otros. Por otro lado, la implementación de la tercera generación permite la transmisión de grandes volúmenes de información, necesarios para ejecutar aplicaciones como videoconferencia, conexión a Internet, etc. Los sistemas de comunicaciones móviles han evolucionado hasta lo que hoy se conoce como Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*). Se trata de sistemas de comunicación digital que integran casi todos los tipos de servicios requeridos por los clientes, desde la voz hasta los datos, y están soportados en conmutación de paquetes [16].

La Figura 1.1 muestra los elementos que conforman la arquitectura de las redes 2G/3G. Por un lado está la Estación Base Transceptora (BTS, *Base Transceiver Station*) o Nodo B, el elemento central dentro de una celda que realiza funciones de transmisión y recepción de señales, pero no cuenta con mecanismos de control, decisión y gestión de recursos radio. También establece la conexión o el enlace de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*) con los terminales móviles. Por otro lado, el Controlador de Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*) es un elemento de alta jerarquía en la red que controla todas las BTS, realiza la gestión de recursos y Gestión de Movilidad (MM, *Mobility Management*). Además se encarga de la seguridad de los datos realizando el procedimiento de encriptación. Finalmente el núcleo de red es la entidad encargada del enrutamiento, conmutación de circuitos o paquetes, gestión de la ubicación del usuario móvil y servicios de autenticación [9], [13], [17]-[21].

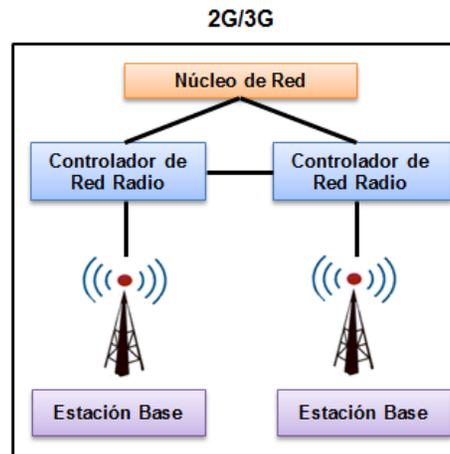


Figura 1.1 Arquitectura de tecnologías 2G/3G. Basado en [22].

El 3GPP es un grupo compuesto por organismos de normalización que se enfoca en la evolución de sistemas móviles celulares como es el caso de LTE (4G). Esta tecnología surge en noviembre de 2004 con el fin de mejorar la QoS, ofrecer altas tasas de datos a través de la E-UTRAN y flexibilizar el uso de las bandas de frecuencia. Por otro lado, permite mejorar la capacidad y cobertura mediante el uso de técnicas de acceso radio como: Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el Enlace de Bajada (DL, *Downlink*) y Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Division Frequency Multiple Access*) en el Enlace de Subida (UL, *Uplink*). Estas técnicas optimizan el tráfico basado en IP [17]-[22].

1.3 ARQUITECTURA LTE

LTE cambia el paradigma de comunicación, ya que la transferencia de datos y voz se hace de manera digital por medio de conmutación de paquetes. LTE fusiona dos elementos de las tecnologías 2G/3G: la BTS y el RNC, en un nuevo elemento de red llamado eNodeB como lo muestra la Figura 1.2 [9]. Este eNodeB se convierte en la parte inteligente de la red, permitiendo realizar funciones de gestión, decisión y control. Adicionalmente, permite que el envío y recepción de señales se haga de forma más rápida al tener una arquitectura simple y con menos elementos [1], [4], [19], [23].

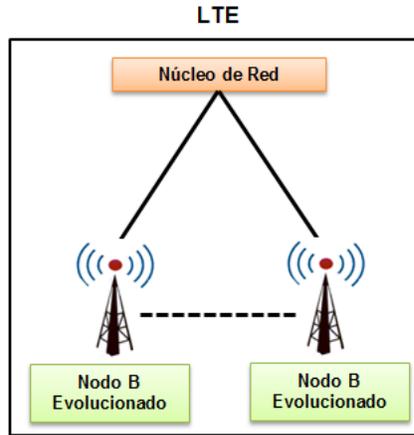


Figura 1.2 Arquitectura general de LTE. Basado en [23].

Los elementos más importantes de la arquitectura LTE son el equipo de usuario, la E-UTRAN y el EPC, como se observa en la Figura 1.3 [4], [6], [8]:

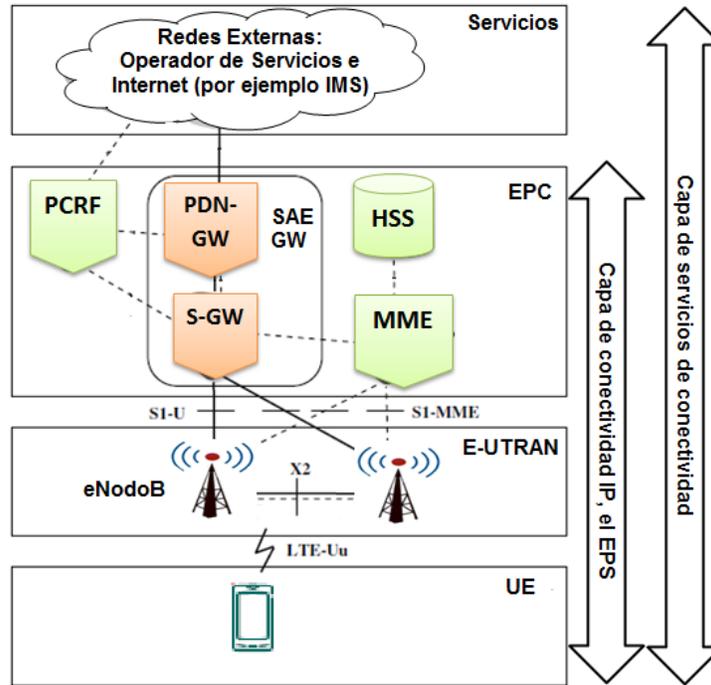


Figura 1.3 Arquitectura en bloques de LTE. Basado en [5].

Una descripción general acerca de los principales componentes mostrados en la figura anterior se presenta en las siguientes secciones.

1.3.1 Equipo de Usuario

Dispositivo que permite acceder a los servicios y aplicaciones que ofrece la red por medio de la interfaz de usuario (LTE-Uu) como muestra la Figura 1.3. Además contiene un Módulo de Identificación de Suscriptor Universal (USIM, *Universal Subscriber Identity Module*) que permite el reconocimiento y autenticación del usuario. También cuenta con funciones de gestión de movilidad, reporte de localización y trasposos (HO, *Handover*) [24].

1.3.2 E-UTRAN

Entidad que integra todas las funcionalidades de la red de acceso y está conformada por un conjunto de elementos llamados eNodeB; los cuales pueden intercambiar información de señalización y de datos de usuarios a través de la interfaz X2 como se indica en la Figura 1.3. La E-UTRAN debe cumplir unos objetivos planteados por LTE como alta eficiencia espectral, bajo tiempo de ida y vuelta y flexibilidad en frecuencia y ancho de banda [4], [6], [8], [25].

1.3.2.1 eNodeB

Elemento que integra todas las funcionalidades de la red de acceso y se encarga de proporcionar la conectividad entre el UE y el Núcleo de Paquetes Evolucionado; separa el Plano de Usuario (UP, *User Plane*) y el Plano de Control (CP, *Control Plane*). En el UP se hace la compresión y descompresión de encabezados IP, cifrado de datos y enrutamiento de tráfico hacia el EPC. Por otro lado, el CP realiza funciones como RRM, encargada del control de admisión, asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace descendente como ascendente; gestión de movilidad, control de interferencia entre estaciones bases y medición de HO entre distintas tecnologías de acceso. También soporta un control mejorado sobre la QoS, gestionando adecuadamente los recursos, protocolos y aplicaciones, de acuerdo con los diferentes requerimientos de los usuarios [4], [5], [8], [25].

Es importante resaltar que un eNodeB está asociado a múltiples usuarios móviles, los cuales se encuentran dentro del área de cobertura de su celda. Sin embargo, un usuario móvil solo puede estar conectado a un solo eNodeB a la vez; para que un usuario haga parte del dominio de otro eNodeB, lo hace por medio de HO. En esta función se incluye el intercambio de información sobre la señalización con otros eNodeB y con la Entidad de Gestión de Movilidad (MME, *Mobility Management Entity*). La Figura 1.4 describe las funciones y la relación del eNodeB con otros elementos [5].

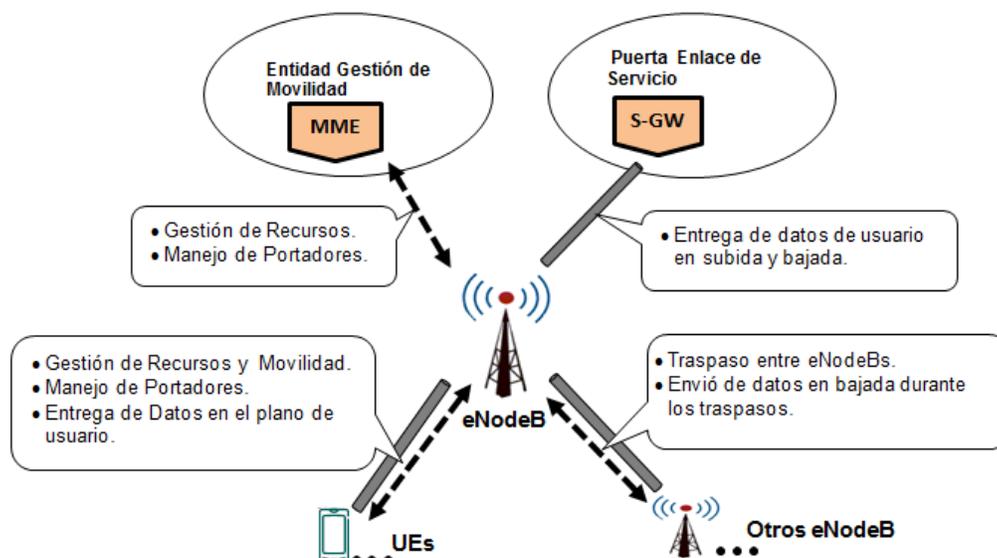


Figura 1.4 Funciones del eNodeB y relación con otros elementos. Basado en [5].

1.3.2.2 Protocolos de la Interfaz Radio

A través de la interfaz radio se da el flujo de tráfico entre el UE y el eNodeB, utilizando una serie de protocolos aplicables a la información de usuario, así como también señalización y control, como muestra la Figura 1.5. Dicha interfaz está conformada por una pila de protocolos a nivel físico y de enlace (nivel 1 y 2 del modelo de referencia OSI). El nivel de enlace contiene 3 subniveles: El Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos (PDCP, *Packet Data Convergence Protocol*), el Control del Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*) y Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*). Estos subniveles, junto con el nivel físico, comparten tanto el plano de usuario como el plano de control. La interfaz radio incorpora un protocolo adicional de nivel 3 respecto al modelo de referencia OSI, denominado Control de Recursos Radio (RRC, *Radio Resource Control*) [4]-[5], [8].

El RRC establece, libera o modifica un *portador radio*¹ y gestiona los traspasos de usuarios entre el eNodeB y el UE; también transporta mensajes que llevan información de movilidad desde y hacia el usuario. Adicionalmente, el RRC maneja la señalización del protocolo de Nivel de Estrato de No Acceso (NAS, *Non-Access Stratum*) como muestra la Figura 1.5, el cual se encarga de la autenticación, autorización y gestión de movilidad para terminales que no tienen una conexión establecida [26]-[29].

¹ Es la transferencia de paquetes IP entre el eNodeB y un UE.

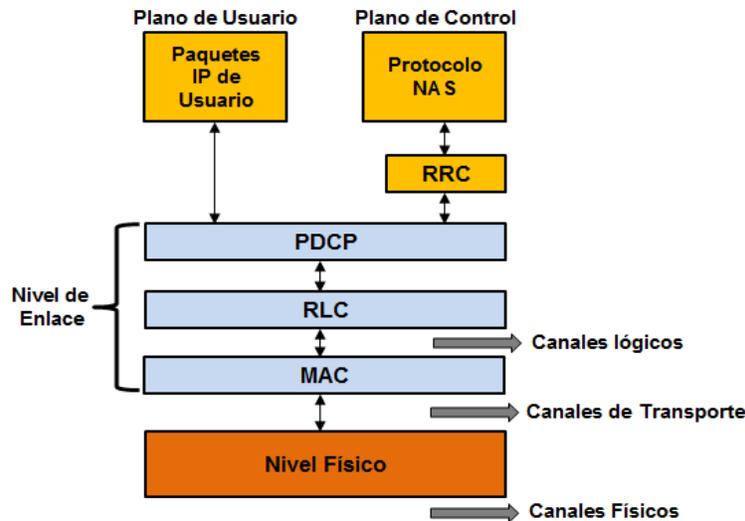


Figura 1.5 Pila de protocolos de la interfaz radio del sistema LTE. Basado en [4].

Cada nivel y subnivel de la pila de protocolos cumple unas determinadas funciones tanto para el plano de usuario como para el plano de control, como se explica a continuación:

- **Nivel de Enlace:** este nivel se encarga del acceso al medio, detección y corrección de errores. Además realiza control de congestión y define el formato de los paquetes de datos por medio de unos subniveles que los conforman como muestra la Figura 1.5 [30]-[32]:
 - **Subnivel PDCP:** se encarga de la compresión del encabezado de los paquetes IP que llegan al eNodeB con el fin de reducir el número de bits a través de la interfaz radio. Por otro lado, es responsable del cifrado de los datos de usuario para proteger la integridad de los mismos. De igual forma, la cabecera añadida por el protocolo PDCP contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP para que se haga una entrega ordenada y elimine duplicados debido al HO. Cabe resaltar que el cifrado y la protección de la integridad de la información son obligatorios en flujos de señalización transmitidos a través del plano de control, mientras que el cifrado es opcional en flujos de datos en el plano de usuario.
 - **Subnivel RLC:** se encarga de la segmentación y concatenación de los paquetes para adaptar el tamaño de estos a las capacidades de transmisión de la interfaz radio, lo cual permite establecer enlaces más fiables. Adicionalmente maneja Solicitudes de Repetición Automática (ARQ, *Automatic Repeat Request*), cuya función es reenviar paquetes en caso de que lleguen con errores.
 - **Subnivel MAC:** se encarga de controlar el acceso al canal radio por medio de la planificación dinámica, la cual asigna recursos a los UE que disponen de las mejores condiciones de canal en un instante de tiempo igual a 1ms. Al mismo tiempo realiza control de errores mediante la Solicitud de Retransmisión

Automática Híbrida (H-ARQ, *Hybrid Automatic Repeat Request*), en la cual la información se envía con redundancia y en recepción realiza detección y corrección de errores, si los hay. Finalmente, selecciona el formato de transmisión como tipo de modulación y tamaño de bloque a utilizar en el nivel físico [4].

➤ **Nivel Físico:** es el encargado de implementar las configuraciones físicas para que la información no sea tan susceptible al ruido e interferencias, entre otros. Las funciones más comunes que realiza el nivel físico son [8], [33]-[35]:

- Codificación y decodificación de canal.
- Modulación y demodulación.
- Implementación de técnicas de acceso SC-FDMA en UL y OFDMA en DL.
- Implementación de sistemas de múltiple antena.
- Gestión adecuada de potencia en transmisión tanto para el UE como para el eNodeB.

Por otra parte, la relación entre niveles y subniveles se da con diferentes tipos de canales así: los canales lógicos se establecen entre la RLC y la MAC y su función es describir el tipo de información de usuario y/o señalización que se transmite por medio de la interfaz radio. Por otra parte, los canales de transporte se establecen entre la MAC y la capa física y describen cómo y con qué características se transmite la información a través de la interfaz radio; también multiplexan diversos canales lógicos en canales de transporte. Finalmente, los canales físicos describen mecanismos de transmisión y recepción por medio del enlace radio para el usuario y la señalización del sistema [4]-[5], [36].

1.3.3 EPC

El EPC maneja una arquitectura plana basada en conectividad IP que permite optimizar y explotar las nuevas capacidades ofrecidas por la E-UTRAN. Además, gestiona la interoperabilidad con otras redes pertenecientes a la familia 3GPP y no asociadas a este estándar. El núcleo del sistema EPC está compuesto de entidades de red que son controladas mediante el plano de usuario y plano de control creado por LTE [5].

En el plano de usuario se encuentra la Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE, *System Architecture Evolution*) conformada por dos pasarelas, como se observó en la Figura 1.3 [4], [8]-[9], [26]:

- Pasarela de red de Paquetes de Datos (PDN-GW, *Packet Data Network Gateway*): encargada de conectar a los usuarios móviles con las redes externas, asignando al usuario una dirección IP única que puede ser IPv4 o IPv6. También permite la gestión de movilidad para la conexión entre redes 3GPP y no 3GPP.
- Pasarela de Servicio (S-GW, *Serving Gateway*): esta entidad actúa como pasarela del plano de usuario entre la E-UTRAN y la red troncal EPC. La asignación de la S-GW adecuada para cada usuario está limitada a criterios

geográficos, así como el balance de cargas. Finalmente se encarga de hacer el enrutamiento de los datos de usuario.

El plano de control cuenta con tres entidades para la señalización, gestión de movilidad, tarificación y bases de datos, como muestra la Figura 1.3 estas son [4], [8]-[9], [26]:

- **MME:** se encarga de gestionar la movilidad de los usuarios y administrar el acceso de los mismos a través de la E-UTRAN. Autenticar y permitir el acceso de los usuarios a la red y señalar la movilidad entre los eNodeB y redes 3GPP. La MME puede cambiar dependiendo de la zona en que se encuentre dentro del sistema LTE.
- **Servidor de Suscriptores Locales (HSS, Home Subscriber Server):** es la base de datos central encargada de almacenar información de suscripción de usuarios locales y visitantes. Consulta y modifica periódicamente la información del UE dependiendo de las condiciones que esté experimentando. También registra la ubicación de los usuarios, información que es solicitada periódicamente por la MME. En el servidor HSS se encuentra información referente a identificadores universales de usuario, identificadores de servicio, información de seguridad, cifrado, etc.
- **Funciones de Políticas y Tarificación de Recursos (PCRF, Policy and Charging Resource Function):** es la entidad autorizada para determinar las Políticas de Control y Tarificación (PCC, Policy and Charging Control), manejar los servicios en término de la QoS, permitir nuevos modelos de negocio y proporcionar una interfaz para los procesos de facturación y cobro.

1.4 PARTICULARIDADES RADIO DE LA TECNOLOGÍA LTE

1.4.1 Flexibilidad en el Espectro

La flexibilidad en el espectro se refiere a la capacidad de la red de operar con diferentes anchos de banda según sean las necesidades demandadas. LTE trabaja con anchos de banda desde 1.4 MHz hasta 20 MHz, para los cuales se asignan diferentes Bloques de Recursos (RB, *Resource Block*) como se muestra en la Tabla 1.1. Además, LTE utiliza el espectro de dos formas para administrar los flujos de tráfico de subida y bajada: Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplex*) también conocido como espectro par y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplex*) o espectro dispar. La diferencia en las dos formas de duplexación radica en que FDD usa un canal de frecuencia para subida y otro para bajada; en tanto, TDD usa el mismo canal para subida y bajada pero en diferentes instantes de tiempo, como muestra la Figura 1.6 [1], [4], [37]-[38].

BW (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
RB	6	15	25	50	75	100

Tabla 1.1 Anchos de banda y sus respectivos bloques de recursos.

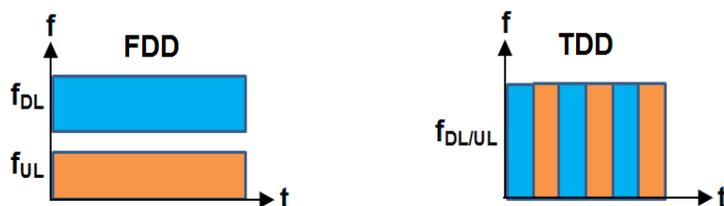


Figura 1.6 Modos de operación de LTE. Basada en [1].

1.4.2 Sistemas de Múltiple Antenas

Los sistemas de antenas con Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) son estructuras de varias antenas para la transmisión y recepción de información, acompañadas de técnicas de procesado de señal con distintos niveles de complejidad. Dichos sistemas permiten a LTE mejorar el rendimiento en cuanto a QoS, eficiencia espectral, capacidad de usuarios por celda y velocidad de transmisión de usuario.

MIMO funciona de dos formas: diversidad y multiplexación espacial [1], [4], [7], [22], [39]-[41].

- **Diversidad Espacial:** son varias antenas por medio de las cuales se envía la misma información de usuario, lo que incrementa la QoS de la Señal recibida y disminuye la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*). Adicionalmente, combate efectos de desvanecimientos que se presentan durante la trayectoria de la señal.
- **Multiplexación Espacial:** son varias antenas por medio de las cuales se envía y recibe una porción diferente de información por cada una, lo que incrementa la eficiencia espectral y la capacidad de la red LTE. Así mismo, las antenas transmisoras introducen una firma en la señal enviada para que cada antena receptora pueda reconocer y recuperar la información que le pertenece; reconstruyendo las porciones de información las cuales son ordenadas para interpretar correctamente los datos originales en el receptor.

1.4.3 Estructura de Trama LTE

Los usuarios LTE comparten recursos en el dominio del tiempo como de la frecuencia. Desde el punto de vista temporal los recursos físicos de un sistema LTE están divididos en tramas de 10ms, cada una de ellas compuesta a su vez por 10 subtramas, las cuales contienen dos slots de 0.5 ms. Además, cada slot contiene 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo de si el prefijo cíclico es extendido o normal respectivamente. En el dominio de la frecuencia la unidad de transmisión consta de 12 subportadoras, las cuales presentan una separación entre ellas de 15 kHz.

La unidad básica de información que el eNodeB puede asignar a un usuario es un bloque de recurso, el cual está conformado por un ancho de banda de 180 kHz, equivalente a 12 subportadoras y 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo del prefijo cíclico, como muestra la Figura 1.7 [5], [38].

Un Elemento de Recurso (RE, *Resource Element*) es la unidad más pequeña de un RB que ocupa un símbolo OFDM en el dominio del tiempo y una subportadora en el dominio de la frecuencia [13].

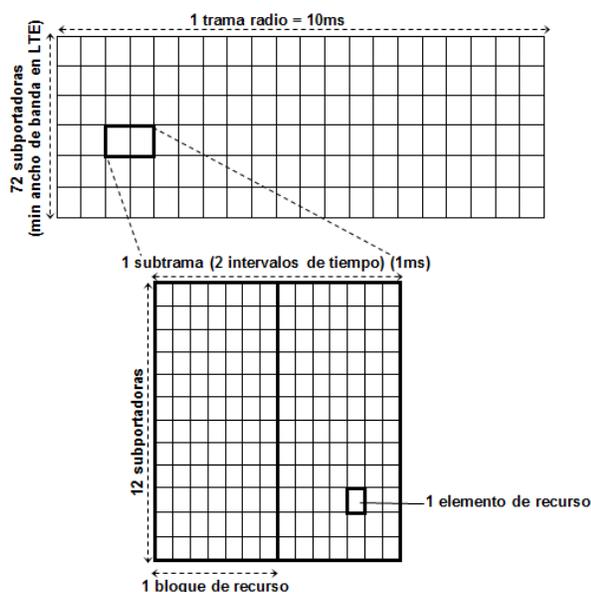


Figura 1.7 Estructura de trama LTE. Basado en [13].

1.5 GESTIÓN DE RECURSOS RADIO

Los sistemas móviles celulares se ven afectados por diferentes factores, entre los cuales se encuentran: variaciones en la propagación, variaciones en el flujo de tráfico y movilidad de usuarios. Además, deben soportar múltiples solicitudes de conexión a la red, cada una con una QoS diferente [5], [18], [29].

Dentro de los procedimientos que tiene la RRM están: el Control de Potencia (PC, *Power Control*), Modulación y Codificación Adaptativa (AMC, *Adaptive Modulation and Coding*), Coordinación e Interferencia entre Celda (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*), Control de Movilidad (MC, *Mobility Control*), Planificación de Paquetes (PS, *Packet Scheduling*), Balanceo de Carga (LB, *Load Balancing*) y Control de Admisión. Todos los procedimientos anteriores se desarrollan con el fin de asegurar que los recursos radio sean utilizados eficientemente, ajustándose a las necesidades de cada servicio y usuario [4]-[5], [8], [36], [39].

1.5.1 Control de Potencia

En LTE el control de potencia es un procedimiento que se realiza únicamente en el enlace ascendente, debido a que en el enlace de bajada el eNodeB conoce la potencia disponible en todo momento de la transmisión y no tiene restricciones. También permite mantener un nivel adecuado de potencia para cualquier punto de la celda reduciendo los niveles de interferencia. El enlace ascendente usa la portadora única

para que los terminales móviles transmitan con una baja potencia, lo que permite alargar la duración de la batería y disminuir la interferencia intercelular.

1.5.2 Control de Movilidad

El control de movilidad permite que los usuarios accedan a los servicios ofrecidos por el sistema desde cualquier ubicación de la celda. Este procedimiento asegura que los terminales tengan las mejores condiciones en cuanto a calidad de señal para comunicarse con otros terminales que hacen parte del sistema o redes externas. Adicionalmente se encarga de la reelección y traspaso de celda por medio de las medidas que entrega el usuario al eNodeB.

1.5.3 Planificación de Paquetes

La PS se encarga de asignar de forma dinámica los recursos que tiene la red entre los usuarios; dependiendo de las condiciones del estado del canal y requerimientos de QoS. También selecciona el formato de modulación y codificación para la transmisión de señales en la interfaz radio aumentando la capacidad de la celda y garantizando una alta eficiencia espectral. La planificación en LTE se realiza cada 1 ms.

1.5.4 Balanceo de Carga

Es un procedimiento que distribuye los recursos radio dependiendo de la demanda y disponibilidad de los mismos; se ejecuta por medio del ajuste de parámetros asociados a la movilidad para lograr que los usuarios cambien de celda cuando no haya disponibilidad de recursos y no degradar la QoS de la red. Este procedimiento se hace en situaciones de descompensación de carga en las redes móviles celulares, donde unos determinados eNodeB están sobrecargados y otros están trabajando muy por debajo de su capacidad de operación normal.

1.5.5 Control de Admisión (AC)

El AC es uno de los procedimientos más importantes que alberga la RRM y se encarga de decidir si una nueva petición de conexión por parte de un usuario es aceptada o no. Además, asegura que cada vez que llegue una nueva petición de conexión con determinados requerimientos, se pueda garantizar la QoS para las conexiones ya establecidas y para la nueva petición de servicio; si esta condición no se cumple, se rechaza la solicitud de conexión. El AC tiene en cuenta aspectos como la interferencia, la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) experimentada por cada terminal y la QoS requerida por cada UE para tomar la decisión de admisión. Estas decisiones de planificación en LTE se hacen cada 1ms, es decir, cada Intervalo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*).

Este capítulo brinda una visión general de la arquitectura LTE y sus principales características; uno de los procedimientos que se resalta es el control de admisión el cual va a favorecer el establecimiento de conexiones con niveles aceptables de calidad de servicio. El siguiente capítulo abordará en detalle la forma en que opera el control de admisión y qué parámetros contribuyen a que este procedimiento sea exitoso dentro de una red LTE.

2. CAPÍTULO II. CONTROL DE ADMISIÓN EN LTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Este procedimiento permite utilizar eficientemente los recursos radio, aceptando nuevas peticiones de conexión mientras existan recursos en la red y garantizando la QoS de las conexiones ya establecidas, denegando el servicio a nuevas solicitudes cuando no existan recursos disponibles. Este procedimiento tiene en cuenta algunos aspectos como: la interferencia, la SINR experimentada por cada terminal y la QoS requerida por cada UE para tomar la decisión de admisión [4], [42]-[45].

Para que el sistema LTE funcione y haga uso eficiente de los recursos radio, se necesita de un correcto funcionamiento del AC; si la red acepta una solicitud de conexión cuando no hay recursos suficientes para admitirla se producirá una degradación en la QoS para los usuarios que tienen sesiones establecidas. Por el contrario, si el sistema rechaza una solicitud cuando tiene los recursos para aceptarla, el proveedor de servicios está perdiendo eficiencia en el uso de los recursos radio y aumenta la tasa de bloqueo del sistema. El AC en LTE no se rige por un estándar, ya que depende del operador de servicios y de los recursos disponibles para satisfacer los requerimientos de QoS de los usuarios que hacen parte de la red. Existen dos clasificaciones para el AC: estático y dinámico [4].

El AC en el sistema LTE se realiza por medio del estudio y análisis de parámetros asociados a la QoS como: la Prioridad de Asignación y Retención (ARP, *Allocation and Retention Priority*), la Tasa de Bit Garantizada (GBR, *Guaranteed Bit Rate*), Tasa de Bit No Garantizada (N-GBR), Tasa Máxima de Bit (MBR, *Maximum Bit Rate*) y el Identificador de Clase de Calidad de Servicio (QCI, *QoS Class Identifier*) [4]-[5], [39].

La Figura 2.1 ilustra un ejemplo de control de admisión en un sistema LTE conformado por 5 usuarios. La red sólo posee recursos para admitir 3 de ellos (quienes se encuentran dentro del patrón de radiación de color verde) a los cuales el sistema les debe mantener una determinada QoS durante toda la sesión establecida. El algoritmo de AC como criterio utiliza y analiza las condiciones que está experimentando cada usuario dejando ingresar solo a los que cumplan determinados requisitos como: la SINR, el Indicador de la Calidad de Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), entre otros. En esta figura también se observa que el “usuario 1” experimenta buenas condiciones, siendo admitido por el sistema; el “usuario 2” no cumple con los requisitos impuestos en el control de admisión por lo cual se deniega la solicitud de conexión. Finalmente el sistema seguirá analizando las peticiones dejando entrar a los “usuarios 3 y 4” los cuales sí presentan condiciones aptas [4]-[5].

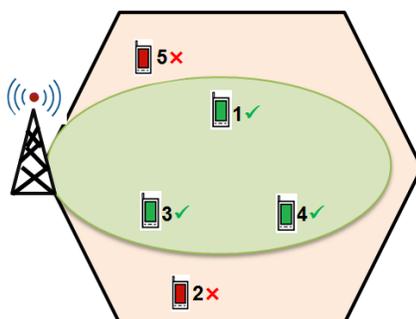


Figura 2.1 Control de admisión en una red LTE. Por los autores.

En las secciones subsiguientes se presentan los tipos de control de admisión, parámetros y algunos aspectos de la interfaz radio relacionados con este procedimiento. Finalmente se describen las estrategias de planificación más utilizadas por los sistemas LTE [42].

2.2 CALIDAD DE SERVICIO Y TIPOS DE CONTROL DE ADMISIÓN

2.2.1 Calidad de Servicio

La manera de gestionar la QoS en el sistema LTE se estructura en torno a la definición de lo que se denomina Servicio Portador (BS, *Bearer Service*), el cual realiza la transferencia de información con parámetros de QoS entre el núcleo de la red y un equipo de usuario. Todos los paquetes IP que fluyen en la red asociados a un mismo servicio portador reciben el mismo trato de QoS [4]-[5], [12], [14], [42], [36].

Existen dos clases de servicios portadores, uno de los cuales se denomina *servicio portador dedicado*, el cual suele estar vinculado a la existencia de una aplicación final que requiere un trato específico de QoS. Estos servicios necesitan gran cantidad de recursos y cotas estrictas en términos de retardo. Por otro lado se encuentra el *servicio portador por defecto*, cuyos valores ya vienen previamente establecidos en la suscripción del usuario y, como tal, dicha información se encuentra almacenada en la base de datos del sistema LTE.

La Figura 2.2 ilustra los servicios portadores dedicados y por defecto, utilizados para el transporte de datos entre un equipo de usuario y el eNodeB, según sean los requerimientos de calidad de servicio del servicio final.

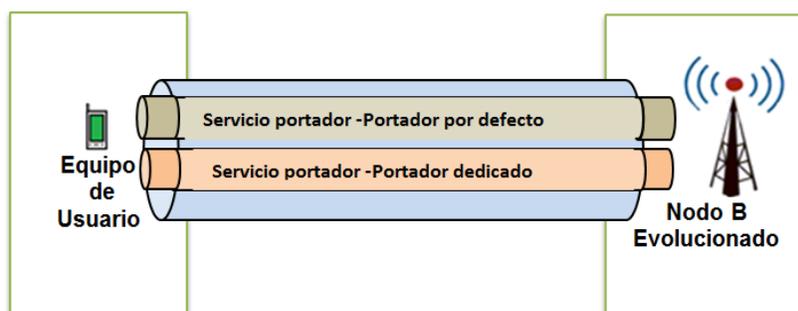


Figura 2.2 Portadores dedicado y por defecto. Basado en [4].

2.2.2 Tipos de Control de Admisión

El número de usuarios que pueden ser admitidos con una determinada calidad de servicio está limitado por los recursos radio, tales como ancho de banda y potencia. Por lo general, mientras más recursos se asignan a un usuario, mayor QoS puede lograr. El propósito del AC es controlar el equilibrio entre el número de usuarios en el sistema y la calidad de servicio que experimenta si es admitido. En la literatura existen dos clases de AC: el estático y el dinámico [4]-[5], [8], [12], [14]-[15], [46]-[47].

- **Control de Admisión Estático:** utiliza la tasa de bit garantizada como único criterio de admisión y no tiene en cuenta las condiciones del canal de cada usuario. Lo anterior se representa en la ecuación 2.1, en donde K indica el número total de usuarios que pueden ser admitidos por un determinado sistema LTE. La sumatoria de la GBR requerida por el nuevo usuario (GBR_{new}) y la GBR requerida por todos los terminales ya conectados (GBR_i), debe ser menor o igual al *throughput* total de la celda (R_{max}).

$$\sum_{i=1}^K GBR_{new} + GBR_i \leq R_{max} \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 no analiza al usuario en función de la calidad del canal y no tiene en cuenta la posición de éste en la celda. Por esta razón, este control de admisión se considera ineficiente, puesto que un usuario LTE experimenta diferentes condiciones respecto al estado del canal debido al movimiento durante la conexión.

- **Control de Admisión Dinámico:** este tipo de control de admisión realiza la estimación del estado del canal radio y los recursos disponibles en el sistema LTE mediante las Señales de Referencia para Sondeo (SRS, *Sounding Reference Signal*). Dichas señales son utilizadas para informar al eNodeB acerca del comportamiento del canal en el enlace de subida con el fin de asignar recursos a los usuarios que experimenten buenas condiciones para la transmisión de información hacia el eNodeB.

Una característica del control de admisión dinámico es que la información de la celda incluye carga del sistema, número y posición de usuarios en el sistema LTE e interferencia, entre otros. Adicionalmente, el AC dinámico toma la decisión de admisión en función de los recursos ocupados, ya que la nueva petición debe superar un umbral definido de acuerdo al proveedor de servicios.

Las señales SRS transportan información sobre el estado del canal y los requerimientos de QoS de cada usuario; estas señales son procesadas por el eNodeB para comprobar si se puede asignar los recursos solicitados por la nueva conexión. Para aceptar esta nueva petición de servicio, se debe verificar que el umbral de tasa de bits del sistema no haya llegado a su límite máximo con el ingreso del nuevo usuario. Finalmente, el eNodeB envía la respuesta a través de Reporte del Estado del Canal (CSR, *Channel Status Report*).

El criterio utilizado por el control de admisión dinámico se basa en las medidas de los RBs como lo indica la ecuación 2.2. Siendo K los bloques de recursos disponibles en el sistema dependiendo del ancho de banda de LTE en el que se esté trabajando, N_i hace referencia a los RB de los usuarios que están actualmente conectados y N_{new} el número de RB solicitados por la nueva conexión. El resultado de la sumatoria debe ser menor o igual al número total de RB del ancho de banda disponible.

$$\sum_{i=1}^K N_i + N_{new} \leq N_{tot} \quad (2.2)$$

2.3 TIPOS DE ACCESO ALEATORIO

El acceso aleatorio es el proceso mediante el cual un usuario móvil se conecta a un determinado eNodeB dentro del sistema LTE. Dicho acceso se lleva a cabo cuando el terminal está en la búsqueda de una celda y accede a la red móvil, realiza proceso de handover, re-selección de celda, entre otros.

LTE cuenta con dos tipos de acceso, los cuales se detallan a continuación [4, 5, 39]:

- **Acceso Basado en Contienda:** se aplica para todos los casos de acceso general, procesos de transferencia de llamadas y transferencia de información en el enlace de subida. También coordina y establece los mecanismos de planificación que se llevan a cabo cuando no hay información para transmitir en el enlace ascendente y descendente, como se muestra en la Figura 2.3. El acceso basado en contienda se inicia por el usuario, el cual envía información al eNodeB acerca de su estado. Finalmente este procedimiento debe resolver problemas de colisiones cuando múltiples usuarios estén enviando información simultáneamente hacia el eNodeB.

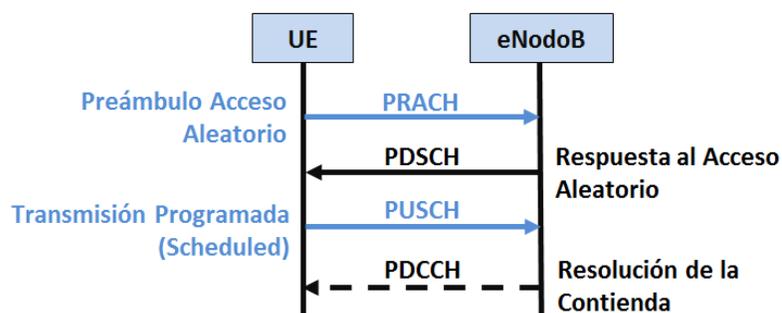


Figura 2.3 Acceso basado en contienda. Tomado de [4].

Mediante el Canal Físico de Acceso Aleatorio (PRACH, *Physical Random Access Channel*) se envía un preámbulo al eNodeB; éste da respuesta a la petición mediante el Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*) realizando una asignación inicial de recursos, necesaria para el siguiente paso que es la transmisión programada. Seguidamente, el equipo de usuario informa al eNodeB mediante el Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*) sobre sus datos de identificación y solicita el establecimiento de una nueva conexión. Por último, el eNodeB envía un reconocimiento positivo al terminal móvil para que se conecte a la red mediante el

Canal Físico de Control de Enlace de Bajada (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*) [4]-[5], [18].

- **Acceso Regulado:** sólo se aplica en *handover* y no se presentan problemas de colisiones, ya que el eNodeB asigna secuencias preestablecidas para cada usuario. En el acceso regulado el proceso lo inicia el eNodeB, el cual realiza la asignación de una secuencia preámbulo mediante el canal PDCCH. Luego, el móvil utiliza la secuencia preámbulo que se le ha asignado y envía un paquete de acceso PRACH; de igual manera que en el acceso en contienda. Finalmente el eNodeB envía la respuesta a la solicitud de acceso por parte del terminal móvil en el canal PDSCH; en este punto se da por terminado el proceso ya que el eNodeB conoce la identidad del equipo de usuario como lo muestra la Figura 2.4 [4]-[5], [18].

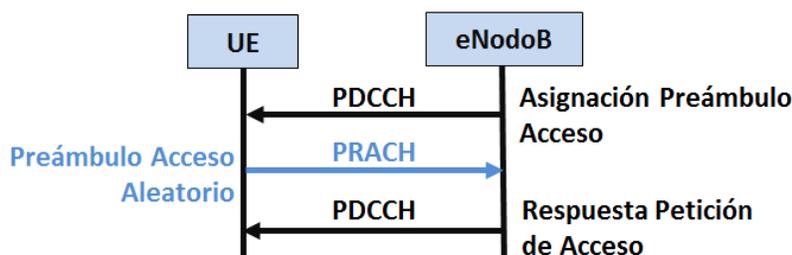


Figura 2.4 Acceso regulado. Tomado de [4].

2.4 PARÁMETROS DE QoS ASOCIADOS AL CONTROL DE ADMISIÓN EN LTE

El tráfico en LTE está basado en los protocolos IPV4 e IPV6, en donde cada paquete enviado contiene un vínculo lógico entre el UE y la PDN-GW con el fin de proporcionar una calidad de servicio específica a lo largo de toda la ruta [48].

Los parámetros para la definición y el comportamiento de la QoS en LTE son: el QCI, la prioridad de asignación y retención, la tasa máxima de bit y la tasa de bit garantizada [4], [18], [29], [48]-[51].

- **QCI:** es un parámetro que identifica un determinado servicio ofrecido por el sistema LTE. La selección del valor de QCI para un determinado servicio utiliza una serie de parámetros procesados en cada una de las partes de la arquitectura LTE. Estos parámetros pueden ser configurados por el operador o ser previamente configurados por el fabricante del equipo. Debido a los diferentes servicios ofrecidos por la red de cuarta generación, el 3GPP ha especificado unos QCI en términos de tipo de servicio portador, retardo, prioridad y tasa de pérdidas de paquetes en situaciones de no congestión. El QCI maneja múltiples servicios diferenciándolos por su velocidad de bit ofrecida al usuario como lo indica la Tabla 2.1.

QCI	Tipo	Prioridad	Retardo [ms]	Tasa de pérdida de paquetes	Ejemplo
1	GBR	2	100	10^{-6}	Voz conversacional
2		4	150	10^{-3}	Video conversacional (transmisión en vivo)
3		3	50	10^{-3}	Juegos en tiempo real
4		5	300	10^{-6}	Video no conversacional (<i>buffered streaming</i>)
5	N-GBR	1	100	10^{-6}	Señalización IP en sistemas multimedia
6		6	300	10^{-6}	Video basado en el protocolo de transporte (e-mail, ftp, archivos compartidos, etc.)
7		7	100	10^{-3}	Voz, <i>streaming</i> de video, juegos interactivos
8		8	300	10^{-6}	<i>Streaming</i> de video, servicios basados en el protocolo de transporte (chat, e-mail, web, ftp, etc.)
9		9	300	10^{-6}	

Tabla 2.1 Asignación de QCI en función del servicio. Basado en [49].

- **Tasa de Bit Garantizada:** LTE proporciona y mantiene una velocidad mínima de transmisión para determinados servicios que no toleran pérdidas de paquetes; se utiliza normalmente para aplicaciones como voz sobre IP (VoIP) que necesitan altas tasas de bits para su correcto funcionamiento.
- **Tasa No Garantizada:** no garantiza ningún tipo de velocidad de bit en particular y se utiliza para servicios como la señalización y navegación web.
- **Tasa Máxima de Bit:** se encarga de acotar la velocidad máxima de bits por medio de un mecanismo denominado control de tasa; el volumen de tráfico que exceda el MBR se descarta por el sistema.
- **ARP:** indica las prioridades en un rango de 1-16; se utiliza en los procesos de establecimiento, modificación y desactivación de un servicio portador. El valor numérico de estas prioridades se utiliza en el procedimiento de control de admisión cuando el sistema no cuenta con suficientes recursos disponibles para responder a múltiples solicitudes de conexión; de la misma manera el ARP también se puede utilizar para dar acceso a portadores con prioridades altas y desactivar determinados servicios con prioridades bajas.

2.5 ASPECTOS DE LA INTERFAZ RADIO RELACIONADOS CON EL CONTROL DE ADMISIÓN

La interfaz radio permite la interconexión entre el terminal móvil y el eNodeB con el fin de transportar información y señalización de usuario. Tal señalización lleva las condiciones en las que se encuentra el canal del terminal móvil en el sistema LTE. El AC analiza esta información para tomar la decisión de admitir o no al usuario.

2.5.1 Información del Estado del Canal (CSI, *Channel State Information*)

En el sistema LTE, la asignación de los recursos se determina dependiendo de las condiciones que esté experimentando cada usuario. Para estimar dichas condiciones, LTE utiliza señalización tanto en el enlace ascendente como en el descendente [4]-[5], [39].

- **Estimación estado de canal en DL:** para este proceso el eNodeB configura los terminales móviles para que estén enviando el reporte del estado del canal. La transmisión de estas señales a través del PUSCH se puede configurar de forma periódica o no periódica dependiendo de los criterios establecidos en el eNodeB. Por otra parte, el CSR no contiene información del estado del canal que percibe un usuario en el enlace de bajada; por el contrario contiene recomendaciones por parte del equipo de usuario de los parámetros de transmisión más adecuados en función de las características del canal percibidas (SINR) para el enlace de bajada. El CSR contiene la siguiente información [4]-[5], [39]:
 - **Indicador de Rango (RI, *Rank Indicator*):** proporciona una recomendación sobre el rango de transmisión MIMO para utilizar por parte del equipo terminal en el enlace descendente. RI solo necesita ser informado por los usuarios que estén configurados en modo de multiplexación espacial.
 - **Indicador de la Matriz de Pre-codificación (PMI, *Precoding Matrix Indicator*):** indica cuál de las matrices de pre-codificación debe ser utilizada para la transmisión en el enlace descendente. Del mismo modo que el RI, el PMI sólo reporta la recomendación si el terminal está configurado en modo de multiplexación espacial.
 - **CQI:** representa y describe 16 valores posibles de Esquemas de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) con base en las características que el usuario está experimentando en ese momento. Además, informa constantemente al eNodeB sobre los posibles valores a utilizar en el proceso de adaptación del enlace. Al final el eNodeB procesa la información recibida por parte del usuario y utiliza el esquema de modulación y codificación adecuado según la Tabla 2.2 definida en la norma 3GPP TS 36.213 [4], [29], [52]-[53].

Indicador de CQI	Modulación	Tasa de codificación x 1024	Eficiencia
0	Rango de corte		
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	120	0,2344
3	QPSK	193	0,3770
4	QPSK	308	0,6016
5	QPSK	449	0,8770
6	QPSK	602	1,1758
7	16QAM	378	1,4766
8	16QAM	490	1,9141
9	16QAM	616	2,4063
10	64QAM	466	2,7305
11	64QAM	567	3,3223
12	64QAM	666	3,9023
13	64QAM	772	4,5234
14	64QAM	873	5,1152
15	64QAM	948	5,5547

Tabla 2.2 Tabla de CQI. Basado en [5].

- **Estimación de canal en UL:** el sistema LTE en UL utiliza señales específicas denominadas SRS, las cuales permiten estimar las condiciones del canal analizando la señal en los RBs asignados a cada usuario para la transmisión. Este proceso es muy importante porque permite que las funciones de la RRM se realicen de manera precisa, en especial la adaptación del enlace y la asignación de recursos radio [4]-[5], [12], [18], [29], [48], [52].

Las SRS son señales que transmiten los usuarios de forma periódica al eNodeB; estas se envían en el último símbolo SC-FDMA en cada subtrama y brindan información sobre las condiciones del estado del canal en UL. Las mejores condiciones del estado del canal las experimenta el usuario cuando se encuentra cerca al eNodeB; a medida que se aleja de este punto sus pérdidas aumentan, por lo cual se degrada la señal.

2.6 ESTRATEGIAS DE PLANIFICACIÓN DE RECURSOS

Una vez que se da la admisión de los usuarios, el estándar LTE define estrategias para realizar la distribución de los recursos disponibles entre aquellos que ingresan al sistema, pero no define estrategias específicas para decidir dentro de qué bloque de recurso de una determinada subtrama al usuario transmisor. Estas estrategias son implementadas por parte del operador móvil; algunas de las cuales son: Tasa Máxima (MR, *Maximum Rate*), Operación por Turnos (RR, *Round Robin*), Justo Proporcional (PF, *Proportional Fair*), entre otras [4]-[5], [15], [29].

- **Maximum Rate:** esta estrategia asigna recursos a los usuarios que presentan mejores condiciones respecto al estado del canal. Esto es, a los usuarios más cercanos al eNodeB siempre se les va a asignar más recursos, impidiendo las transmisiones de los usuarios más distantes.

- **Round Robin:** esta estrategia asigna recursos a cada usuario durante un instante de tiempo sin considerar las condiciones del canal radio. Al no considerar dichas condiciones, no está adaptándose a las necesidades de los usuarios puesto que aquellos que tengan peor condición de canal necesitarán más tiempo para lograr una QoS aceptable respecto a los que tienen mejores condiciones.
- **Proportional Fair:** esta estrategia obtiene la máxima capacidad de la celda mediante un reparto justo, realizando un promedio de los recursos entre los usuarios. Los usuarios cercanos al eNodeB que experimentan buenas condiciones se les asigna una menor cantidad de recursos y a los más distantes se les fija una mayor cantidad de recursos para cumplir con el promedio estipulado en el sistema.

Después de haber presentado los diferentes aspectos relacionados con el control de admisión en una red LTE, se enuncian a continuación los aspectos generales que inciden en dicho proceso.

- Recursos disponibles por parte de la red.
- Reglas particulares por el proveedor para la implementación del AC.
- Número de usuarios.
- Tipo de control de admisión.
- Tipo de servicio (GBR, N-GBR).
- Prioridad del servicio.
- Condiciones del canal que este experimentando el usuario.
- Planificador utilizado por la red.

Con los tipos de control de admisión descritos, características, parámetros asociados a este procedimiento y planificadores más utilizados en LTE, se obtiene una descripción general acerca de la importancia del AC en una red.

En el siguiente capítulo se abordan de manera general las distintas herramientas de simulación disponibles para una red LTE, se enfatiza en los programas elegidos para tal fin y se presentan los escenarios a simular, sus características, pruebas y análisis de resultados.

3. CAPÍTULO III. SIMULACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 INTRODUCCIÓN

Con el ánimo de cuantificar el impacto del proceso de control de admisión en las redes LTE, en el presente capítulo se presentan los aspectos principales de la simulación y el análisis de los resultados correspondiente.

3.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Las herramientas de simulación candidatas deben soportar las características fundamentales de un sistema LTE, además de permitir la implementación de un módulo de control de admisión y cumplir con los siguientes requerimientos:

- Configuración de áreas de trabajo LTE.
- Facilidad de desarrollo de un módulo de control de admisión.
- Portabilidad de Software.
- Soporte para diferentes usuarios móviles.
- Licenciamiento.
- GUI.
- Soporte de señales de referencia en UL y DL.
- Manejo de indicadores de QoS.

Con los requerimientos mencionados anteriormente es posible realizar un proceso de simulación acorde a los requerimientos planteados.

3.2.1 Herramientas Software para la Simulación del Control de Admisión en Redes LTE.

A continuación se brinda una descripción de las principales herramientas de simulación para redes LTE, las cuales modelan principalmente lo relacionado con la movilidad de los usuarios, patrones de radiación, tráfico a transmitir y demás.

- **NS-3 (*Network Simulator*)**: el simulador NS-3 es un simulador de redes de eventos discretos orientado principalmente para la investigación y el uso educativo. El proyecto NS-3 inició en 2006 y es un proyecto de código abierto soportado en Linux. Algunas de las razones para utilizar NS-3 incluyen la realización de estudios que son más difíciles o imposible de realizar con los sistemas reales, para estudiar el comportamiento del sistema en un entorno altamente controlado, y para aprender acerca de cómo funcionan las redes de LTE. El simulador tiene dos componentes principales: el Módulo de LTE y el Módulo EPC y permite apoyar la evaluación de los siguientes aspectos de las redes LTE: Gestión de Recursos Radio, planificación de paquetes, coordinación de interferencia entre celdas y acceso dinámico [54]-[55].
- **OPNET Modeler**: es un software de simulación para comunicaciones de datos, se encuentra desarrollado en C/C++; cuenta con diferentes entornos para el modelado y topologías de red, incorpora un amplio conjunto de librerías para las tecnologías MPLS, WiMax, UMTS, LTE, entre otras, permite el análisis de protocolos IPv4 e

IPv6 que se manejan en LTE. Admite simular flujos de mensajes de datos, pérdida de paquetes, entre otros. Además, OPNET tiene una interfaz gráfica GUI para establecer el tráfico de la red, cuenta con un módulo para el control de admisión permitiendo el análisis de parámetros asociados a la calidad de servicio en LTE como QCI, ARP, GBR [56]-[57].

- **System Level Simulator:** el simulador para redes LTE a nivel de sistema es una herramienta con la cual se puede realizar planeación celular y planificación de paquetes. Además permite evaluar el rendimiento para sistemas LTE Única Entrada Única Salida (SISO, *Single Input and Single Output*) y MIMO. El simulador está desarrollado en Matlab y la utilización para el uso académico es gratuita. El software posee un desarrollo modular, permitiendo la creación e implementación de nuevos módulos dependiendo del análisis a realizar. La herramienta admite la variación y modificación de diferentes parámetros como ancho de banda, modo de transmisión, número de usuarios, número de eNodeB, potencia de transmisión, entre otros [58]-[60].

La Tabla 3.1, presenta una comparación cualitativa de las herramientas consideradas para la simulación de redes LTE.

Características	NS-3	OPNET	System Level Simulator
Portabilidad	✓	x	✓
Open Source	✓	x	✓
GUI	x	✓	x
Desarrollo continuo	✓	✓	✓
Facilidad al configurar	x	✓	✓
Control de admisión	x	✓	x
Licencia académica	✓	x	✓
Áreas de trabajo reales	x	✓	✓
Soporte para diferentes usuarios móviles	✓	✓	✓
Soporte para señales de referencia	x	✓	✓
Manejo de indicadores de QoS	x	✓	✓

Tabla 3.1 Comparación cualitativa entre simuladores para redes LTE. Por los autores.

Como simulador para la ejecución del trabajo de grado se eligió System Level Simulator desarrollado por la universidad de Viena (Austria), este simulador permite la configuración de la frecuencia de operación, ubicación de los usuarios en la celda, tiempo de simulación, velocidad de los usuarios, entre otros. Esta herramienta no cuenta con módulo de control de admisión, pero ya que posee características de Código Abierto (*Open Source*) se puede realizar la implementación del mismo [58].

3.3 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología de simulación adoptada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se basa en la descrita por Ülgen y Wojcik en [61]-[62] y consta de los pasos descritos a continuación:

- **Definición de los Escenarios y Casos de Simulación:** se definen los escenarios a implementar con sus casos de simulación, a partir de los cuales se ejecutarán las simulaciones.
- **Definición de las Características Técnicas de los Escenarios de Simulación:** se presentan los parámetros definidos para la ejecución de las simulaciones.
- **Ejecución de las Simulaciones:** en esta fase se ejecutarán las diferentes simulaciones correspondientes a los escenarios definidos.
- **Análisis de Resultados:** finalizada la ejecución de las simulaciones, se obtienen los resultados arrojados por el simulador para su análisis correspondiente.

3.3.1 Definición de Escenarios y Casos de Simulación

Para el desarrollo del presente proyecto se consideran dos escenarios: el primero de ellos es un escenario básico que corresponde a una red que no tiene implementado el control de admisión (NAC), el segundo escenario es una red en la cual se implementa un módulo de AC.

Para los dos escenarios descritos se trabajará con anchos de banda de 1.4 MHz, 3 MHz y 5 MHz. En estos dos escenarios y para cada uno de los anchos de banda indicados, el número de usuarios con los que se realizarán las simulaciones será de 5, 10 y 20.

Para todas las simulaciones realizadas para los escenarios 1 y 2, las posiciones de los usuarios van a ser las mismas con el ánimo de poder establecer condiciones similares.

Finalmente y con el ánimo de comprobar el funcionamiento del control de admisión en un ambiente más ajustado al comportamiento de los usuarios móviles, se desarrolla un tercer escenario en el cual los usuarios van a tener una *entrada aleatoria*². El ancho de banda y el número de usuarios variarán de forma similar que para los dos primeros escenarios.

Los escenarios y casos de simulación se muestran en la Tabla 3.2.

² En una de las 5000 simulaciones los usuarios se ubican en diferentes puntos del sector.

Escenarios de Simulación		
Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
NAC con Usuarios Estáticos	AC con Usuarios Estáticos	AC con Usuarios Aleatorio
Casos de Simulación		
Caso 1	Caso 2	Caso 3
1.4 MHz	3 MHz	5 MHz
Número de Usuarios		
5 Usuarios	10 Usuarios	20 Usuarios

Tabla 3.2 Definición de escenarios y casos de simulación. Por los Autores.

La teoría indica que un procedimiento de control de admisión en LTE está muy relacionado con un planificador [4]-[5], [63]-[64]. Con el ánimo de desarrollar un trabajo de una manera acertada se hará un análisis para seleccionar cual planificador tiene mejor comportamiento respecto a *throughput* para implementar el AC requerido para el presente trabajo de grado.

Para el proceso de selección del planificador se analizaron: *Round Robin*, *Best CQI* y *Resource Fair*. Con ellos se realizaron una serie de pruebas de una red sin control de admisión, para que se constituyese en el punto de partida del proceso de selección; en este proceso se varió el número de usuarios y estos estuvieron siempre en posiciones idénticas para los tres planificadores analizados.

Como resultado de las simulaciones y del análisis realizado se estableció que el planificador que mejor se comporta en un contexto de redes sin AC es *Resource Fair*; en el anexo A se encuentra el detalle de las pruebas realizadas y la información de los planificadores. A partir de este punto la implementación de los diferentes escenarios y del módulo de AC se realizará tomando como base este planificador.

3.3.1.1 Implementación del Control de Admisión

El control de admisión implementado es de tipo dinámico al considerar que se aproxima a las condiciones reales de una red LTE y lo que está experimentando cada usuario; este se realizó en Matlab y se integró a la herramienta System Level Simulator.

La Figura 3.1 presenta el diagrama de flujo del Control de Admisión propuesto y la Figura 3.2 muestra las líneas que implementan el control de admisión dinámico

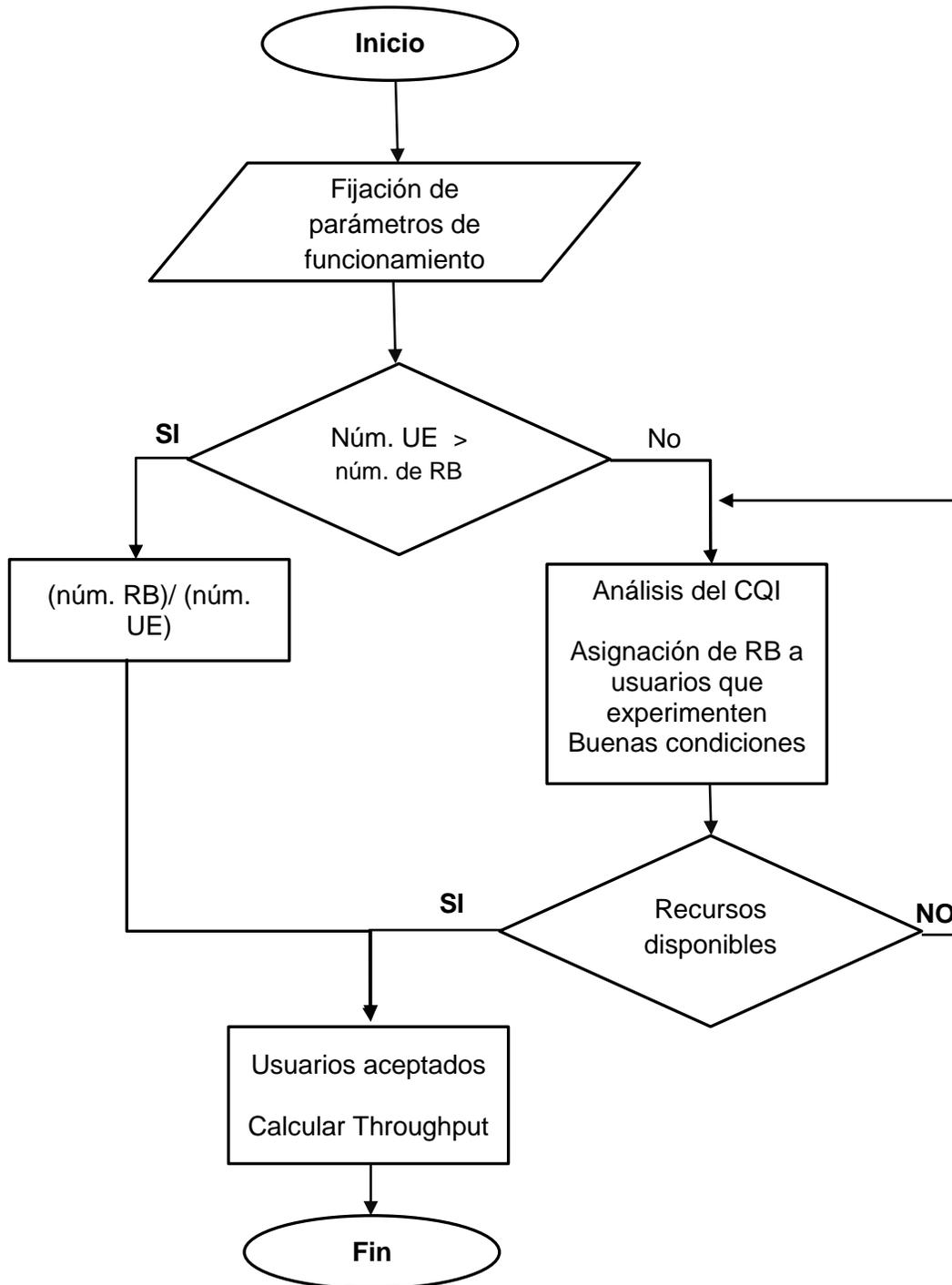


Figura 3.1 Diagrama de flujo del Control de Admisión. Por los Autores.

```
function RBs = RF_scheduler(obj,N_UE,N_RB,c)

numb = zeros(N_UE,1);
if(N_RB/2>N_UE) % número de recursos mayor a número de usuario.
    x = N_UE;
    RB_asignados=N_RB/N_UE;
    numb(1:x) = RB_asignados;
    numb(x+1:end) = 0;
else % número de usuarios mayor a número de recursos.
    RB_asignados=2; % numero de RBs que se asignan a los usuarios aceptados.
    RBs=N_RB;
    for i=1:N_UE % analiza el numero de usuarios disponibles en la red.
        if RBs>0 && (c(i)>=2|| floor(c(i)*10000)/10000==0.1706) % condición para asignación de RBs basado en
            % el CQI.
                numb(i)=RB_asignados;
                RBs=RBs-RB_asignados; %guarda la cantidad de recursos disponibles.
            else
                numb(i)=0; % asigna un cero cuando se terminan los recursos.
            end
        end
    end
end
```

Figura 3.2 Código control de admisión.

3.3.2 Definición de Características Técnicas de los Escenarios de Simulación

A continuación se procede a la descripción del área de estudio y las características técnicas para el proceso de simulación.

- **Área de estudio:** las medidas de desempeño en la telefonía celular se pueden establecer por sistema, celda y sector; siendo las medidas por sector las que alcanzan un mayor grado de precisión. Además las medidas por sector alcanzan mayores velocidades de datos debido a que se maneja una menor área de cobertura y menor número de usuarios, lo cual se ve reflejado en la disminución de carga de tráfico, multitrayecto, atenuación, interferencia y desvanecimiento [65-66]. El área de estudio elegida es un sector de 120 grados de una celda LTE como lo indica la Figura 3.3

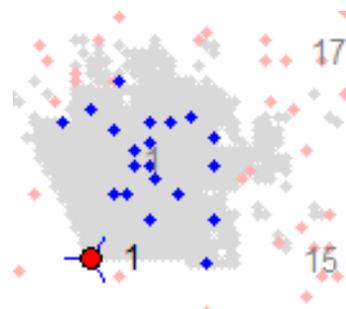


Figura 3.3 Sector de una celda LTE.

Este sector representa un área urbana con geometría de red hexagonal y está conformado por un número determinado de usuarios, los cuales se están moviendo a una velocidad de 1.38 m/s, el patrón de radiación es direccional, sistema SISO y la distancia entre eNodeBs es de 500m según [59].

- **Parámetros de los escenarios de simulación:** para los tres escenarios, los parámetros técnicos de simulación son los mismos; sólo se varía el número de usuarios y el ancho de banda a simular, los cuales se muestran en la Tabla 3.3.

Parámetros de los Escenarios de Simulación	
Caso 1	1,4 MHz - 6RBs
Caso 2	3 MHz - 15RBs
Caso 3	5 MHz - 25RBs
Frecuencia	2.1 GHz
Número de UEs	5, 10 y 20 respectivamente
Pérdida por acoplamiento (REC TS 36.942)	70 dB Zona Urbana
Modelo de pérdida de propagación macroscópica	Zona Urbana ³ $L = 40(1 - 4 * 10^{-3} * h_{BS}) * \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(h_{BS}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{ dB}$
Tipo de Antena	Kathrin 742212
Planificador de Paquetes	Resource Fair
Tiempo de Simulación	10ms
Arreglo de Antenas	1x1
Potencia de transmisión	40 W [67]
Ganancia Antena	15 dBi
Altura del Transmisor	20 m
Altura del Receptor	1.5 m
Modelo de Canal	Winner fase II
Velocidad de los UEs	1,38 m/s (ITU Peatonal A)
Figura de Ruido	7 dB
Modelo de Tráfico	Full Buffer [67-69]

Tabla 3.3 Parámetros de los escenarios de simulación.

3.3.3 Ejecución de las Simulaciones

La ejecución de las simulaciones se llevó a cabo en la herramienta System Level simulator [58]-[60]. Para determinar cuál sería el tiempo adecuado para realizar las simulaciones, se hicieron simulaciones que muestran una tendencia en cuanto a la asignación promedio de RBs como lo indica el anexo B, el cual especifica el tiempo de simulación seleccionado que es de 10ms (10TTIs). Para los dos primeros escenarios se realizaron 100 iteraciones y para el tercer caso las iteraciones realizadas fueron 5000.

3.3.4 Análisis de Resultados

Para el análisis de resultados se tomaron como base los datos obtenidos del simulador: *throughput*, CQI, número de RB asignados y posición de los usuarios.

³ h_{BS} : Altura de la antena de la Estacion Base (BS) en metros.

R : Distancia del Equipo de Usuario (UE) a la Estacion Base (BS) en Km.

f : Frecuencia portadora en MHz.

3.3.4.1 Escenario 1 – (NAC)

- **Caso 1: 1.4 MHz-6 RB**

Las Tablas 3.4, 3.5 y 3.6 indican el comportamiento de una red LTE sin aplicar el AC. Se verifica que no se mantiene ningún nivel de *throughput*, en algunos casos debido a las malas condiciones que experimentan los usuarios el *throughput* es cero.

Como se indica en [8], la asignación de RBs se realiza en números enteros, siendo la unidad mínima 1RB. Debido a que el UE experimenta diferentes condiciones durante la sesión, el simulador hace un promedio de RB asignados durante el tiempo de simulación; si se tienen buenas condiciones de canal se asigna un número entero de RB que está dentro del rango de 1-2, en caso contrario se asigna un 0.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	1	0,35	Si	0-4	0,059
	2	1,28	5	Si	15	1,080
	3	1,14	1,48	Si	0-11	0,284
	4	1,42	1,13	Si	2-8	0,272
	5	1,14	3,34	Si	10-15	0,669
<i>Throughput sector</i>						2,364

Tabla 3.4 Resultados NAC-1.4 MHz y 5 UEs.

La Figura 3.4, muestra la asignación de bloques de recursos durante los 10TTIs (10 sub tramas) de la sesión establecida, dicha asignación se realiza dependiendo de las condiciones que esté experimentando el usuario. Por ejemplo, para el usuario resaltado en color rojo en la Figura 3.4, el promedio es 1.28RB.

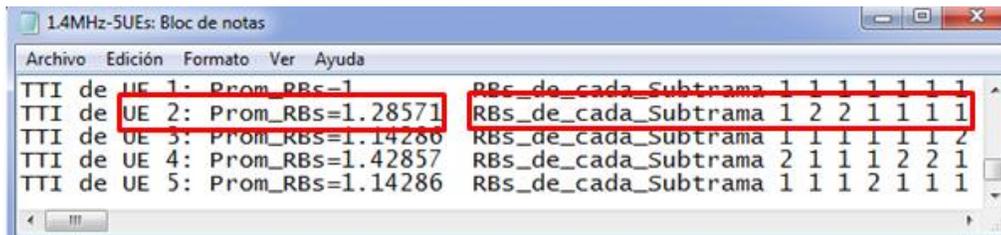


Figura 3.4 Promedio asignación RB.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	0,43	0	No	0-1	0
	2	0,42	4,87	Si	6-15	0,350
	3	0,57	0,77	Si	2-10	0,073
	4	0,42	5	Si	8-15	0,36
	5	0,57	0,60	Si	0-5	0,058
	6	0,86	4,86	Si	11-15	0,700
	7	0,57	0,57	Si	0-5	0,054
	8	0,57	1,02	Si	0-7	0,098
	9	0,71	0,28	Si	0-6	0,034
	10	0,71	0,37	Si	0-5	0,044
<i>Throughput sector</i>						1,771

Tabla 3.5 Resultados NAC-1.4 MHz y 10 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	0,42	1,25	Si	0-8	0,090
	2	0,28	0	No	0-8	0
	3	0,14	5,14	Si	10-15	0,123
	4	0,28	1,14	Si	0-8	0,054
	5	0,42	0,57	Si	0-6	0,041
	6	0	0	No	8-14	0
	7	0,28	4,35	Si	4-15	0,209
	8	0,42	0,66	Si	0-5	0,048
	9	0,28	4,14	Si	4-15	0,198
	10	0,57	0,21	Si	0-4	0,020
	11	0,28	0,35	Si	0-5	0,017
	12	0,14	0,42	Si	0-5	0,010
	13	0,28	0,38	Si	0-5	0,018
	14	0,42	0,14	Si	0-4	0,010
	15	0,14	0	No	2-7	0
	16	0,28	2,14	Si	6-9	0,102
	17	0,42	3,22	Si	6-12	0,232
	18	0,42	1,54	Si	0-9	0,074
	19	0,14	0,71	Si	3-6	0,017
	20	0,428	1,38	Si	1-10	0,099
<i>Throughput sector</i>						1,32

Tabla 3.6 Resultados NAC-1.4 MHz y 20 UEs.

Las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7, muestran el comportamiento del *throughput* para 5, 10 y 20 usuarios, que están bajo un sistema sin AC.

Se observa que del TTI 1 al TTI 3 el *throughput* es cero, debido a que dichos TTIs los utiliza el simulador para los procesos de señalización realizados en LTE [58]-[59], por lo cual no son considerados. Además, se muestra que el *throughput* máximo se alcanza cuando la red cuenta con un menor número de usuarios. La Figura 3.5 presenta un comportamiento sin variaciones severas en *throughput*, dado que la red atiende a un volumen reducido de usuarios.

En los casos donde el número de usuarios va aumentando, se observa que las sesiones establecidas presentan mayores variaciones como lo muestran las Figuras 3.6 y 3.7. Además, la mayoría de las gráficas que describen el comportamiento del *throughput* tiene caídas hasta cero, por lo cual no se garantiza ninguna calidad de servicio en la red, porque la red no puede realizar una distribución continua y justa de los recursos.

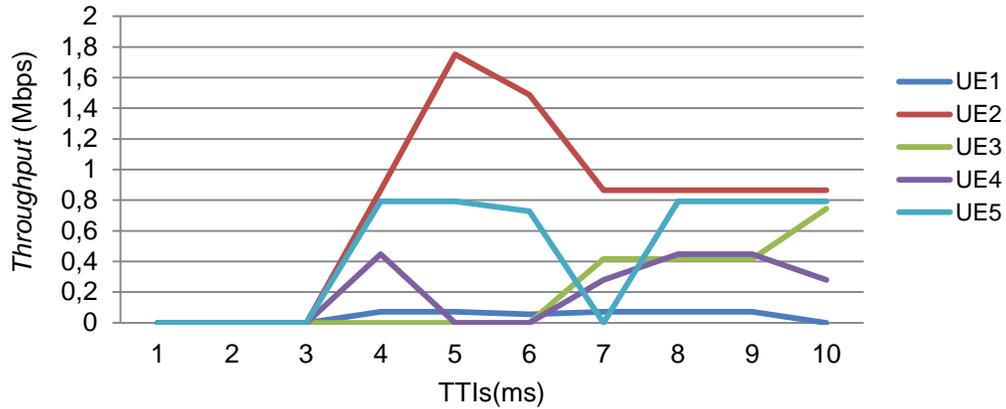


Figura 3.5 Throughput 5 UE-1.4 MHz.

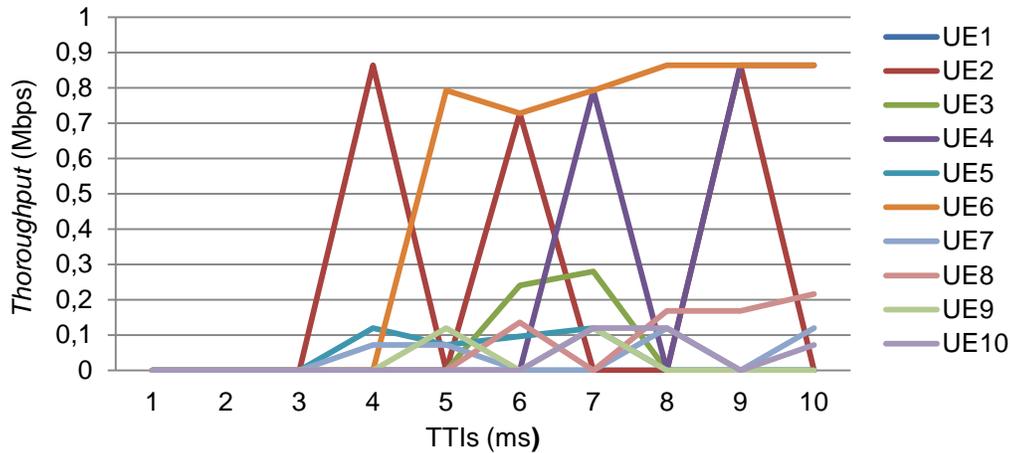


Figura 3.6 Throughput 10 UEs-1.4 MHz.

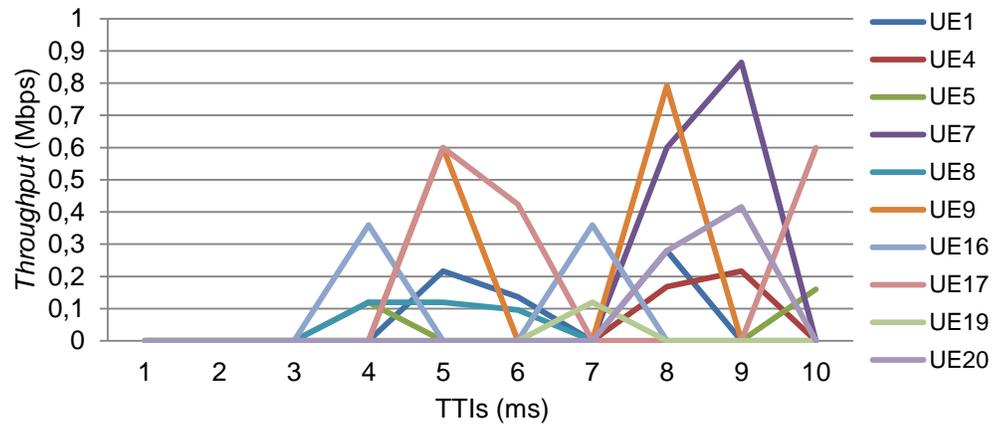


Figura 3.7 Throughput 20 UEs-1.4 MHz.

• **Caso 2: 3 MHz-15 RB**

En el ancho de banda de 3 MHz se manejan 15RB. Para el caso de 5 usuarios, el planificador intenta realizar un reparto equitativo de bloques de recursos asignando a 3 de los 5 usuarios 3RB.

En el caso de 10 y 20 usuarios, a todos los usuarios se les asignan recursos, pero como los usuarios experimentan en algún instante malas condiciones de canal, el resultado de la asignación promedio de RBs es decimal. El *throughput* total del sector es mayor que para el caso anterior porque la red maneja mayores recursos. Como se indican en las Tablas 3.7, 3.8 y 3.9.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	<i>Throughput</i> prom. [Mb/s]
NAC	1	2,14	0,13	Si	0-7	0,140
	2	3	2,14	Si	4-15	2,450
	3	3	1,47	Si	1-14	1,470
	4	2,57	0,17	Si	0-7	0,170
	5	3	1,95	Si	5-15	1,950
<i>Throughput</i> sector						6,180

Tabla 3.7 Resultados NAC-3 MHz y 5 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	<i>Throughput</i> Prom. [Mb/s]
NAC	1	1,43	0,31	Si	0-6	0,075
	2	1,57	1,89	Si	5-15	0,500
	3	1,85	4,40	Si	11-15	1,374
	4	1,57	3,73	Si	5-13	0,984
	5	1,42	4,51	Si	9-15	1,083
	6	1,14	5,05	Si	8-15	0,971
	7	1,28	3,39	Si	4-13	0,733
	8	1,28	0,40	Si	0-7	0,086
	9	1,71	5,13	Si	6-15	1,478
	10	1,71	3,84	Si	7-15	1,106
<i>Throughput</i> sector						8,39

Tabla 3.8 Resultados NAC-3 MHz y 10 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	<i>Throughput</i> prom. [Mb/s]
	1	0,71	0,238	Si	0-3	0,028
	2	0,71	5,143	Si	7-15	0,617
	3	1	5,027	Si	12-15	0,844
	4	0,71	4,981	Si	5-15	0,597
	5	0,85	5,143	Si	13-15	0,740
	6	0,43	5,142	Si	10-15	0,370
	7	0,85	3,452	Si	6-13	0,497
	8	0,71	0,714	Si	0-5	0,086
	9	0,85	4,285	Si	3-15	0,617

NAC	10	0,57	3,857	Si	6-15	0,370
	11	0,85	0,380	Si	0-6	0,054
	12	0,85	0	No	1-10	0
	13	0,57	1,321	Si	2-8	0,127
	14	1	1,442	Si	3-9	0,242
	15	0,85	1,166	Si	1-11	0,168
	16	0,71	0,457	Si	0-7	0,054
	17	0,71	1,352	Si	2-10	0,162
	18	0,71	0,771	Si	0-6	0,092
	19	0,57	0,547	Si	0-5	0,052
	20	0,71	0,657	Si	0-7	0,088
Throughput sector						5,8

Tabla 3.9 Resultados NAC-3 MHz y 20 UEs.

En el caso de 5 usuarios la red maneja un mayor número de recursos que, para el caso de 1.4 MHz, garantiza la entrada para tres usuarios los cuales presentan variaciones en su nivel de *throughput*, pero no caen hasta cero.

Para el caso de 10 y 20 usuarios, las señales que representan el comportamiento del *throughput* presentan fluctuaciones severas, puesto que no poseen ningún procedimiento que garantice la asignación de recursos en todos los instantes de la conexión. Como lo indican las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10

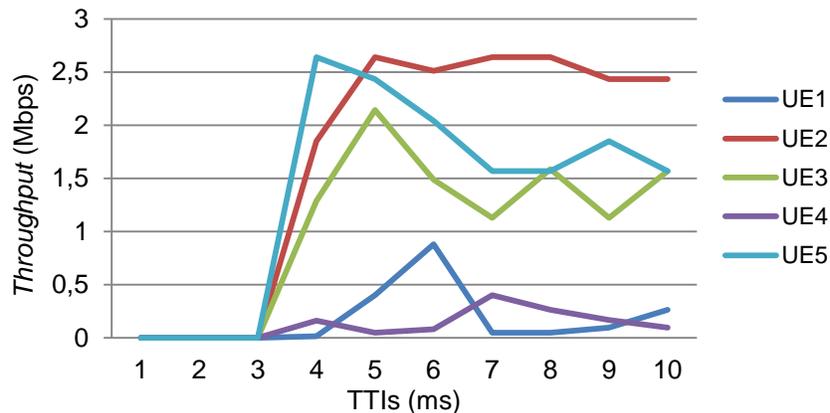


Figura 3.8 Throughput 5 UE-3 MHz.

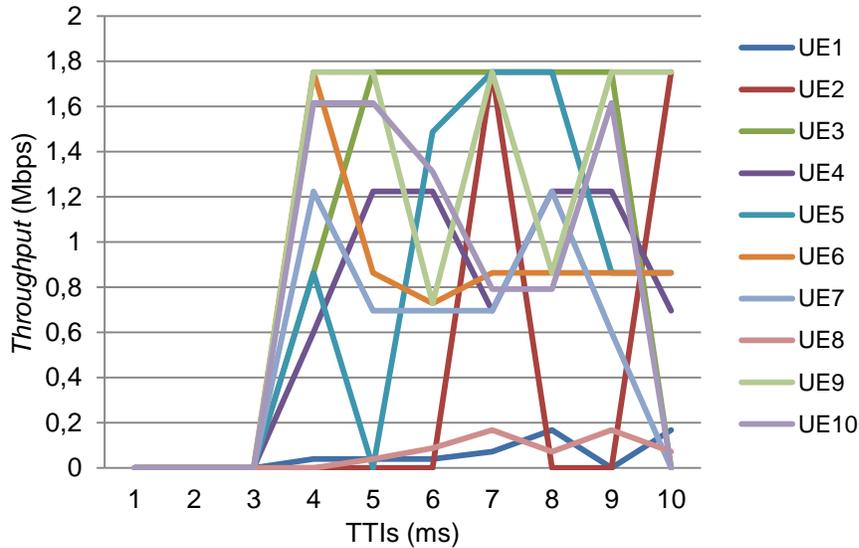


Figura 3.9 Throughput 10 UE-3 MHz.

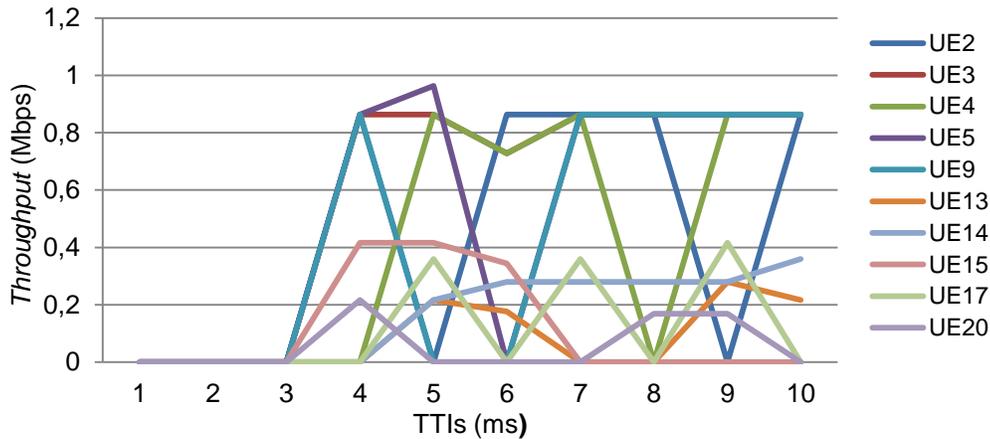


Figura 3.10 Throughput 20 UE-3 MHz.

• **Caso 3: 5 MHz-25 RB**

Como indica la teoría, el ancho de banda de 5 MHz maneja 25 RB; para el caso de 5 usuarios el planificador realiza un reparto equitativo de los RBs, asignando 5 RB para cada usuario. Lo anterior debido a que se maneja un volumen reducido de usuarios.

Cuando se incrementa el número de usuarios a 10 y 20, la red intenta asignar RB a todos los usuarios, pero como no cuenta con los recursos suficientes para satisfacer las necesidades de cada uno de ellos en todos los instantes, el promedio de asignación de RB es un número decimal. Como se muestra en las Tablas 3.10, 3.11 y 3.12.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	5	4,92	Si	10-15	4,134
	2	5	4,42	Si	10-15	3,714
	3	5	4,17	Si	8-15	3,506
	4	5	1,66	Si	0-11	1,400
	5	5	2,64	Si	5-14	2,218
<i>Throughput sector</i>						14,97

Tabla 3.10 Resultados NAC-5 MHz y 5 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	2,6	2,83	Si	4-14	1,22
	2	2,43	4,82	Si	9-15	1,97
	3	2,43	5,15	Si	11-15	2,10
	4	2,42	1,57	Si	0-12	0,64
	5	2,42	2,31	Si	0-12	0,94
	6	2,42	4,61	Si	8-15	1,88
	7	2,57	3	Si	2-15	1,29
	8	2,57	4,38	Si	6-15	1,89
	9	2,57	3,8	Si	4-15	1,60
	10	2,57	2,4	Si	0-13	1,10
<i>Throughput sector</i>						14,63

Tabla 3.11 Resultados NAC-5 MHz y 10 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	1,57	2,02	Si	0-11	0,530
	2	1,42	1,49	Si	0-10	0,350
	3	1,28	5,17	Si	10-15	1,110
	4	1	0,63	Si	0-5	0,100
	5	1,28	5,08	Si	5-15	1,090
	6	1,42	5,02	Si	4-15	1,200
	7	1	4,63	Si	2-15	0,770
	8	1	5,14	Si	8-15	0,860
	9	1,14	4,55	Si	1-15	0,870
	10	1,28	0,92	Si	0-7	0,200
	11	1,28	3,8	Si	0-13	0,820
	12	1,28	5,03	Si	6-15	1,080
	13	1,28	3,92	Si	0-15	0,840
	14	1,14	0,69	Si	7-6	0,130
	15	1	5,02	Si	7-15	0,840
	16	1,28	4,37	Si	2-15	0,940
	17	1,5	4,59	Si	1-15	1,100
	18	1,57	0,67	Si	0-9	0,170
	19	1,14	1,15	Si	0-7	0,320
	20	1,14	2,29	Si	0-11	0,440
<i>Throughput sector</i>						13,76

Tabla 3.12 Resultados NAC-5 MHz y 20 UEs.

Como la red maneja un número mayor de recursos, la señal que representa el *throughput* para 5 usuarios es regular, porque la red no se encuentra en congestión y posee los recursos suficientes para atender a este determinado número de usuarios, para 10 y 20 usuarios como la red no puede garantizar la asignación de recursos en todos los instantes, las señales de *throughput* presentan fluctuaciones muy marcadas. Como lo indican las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13

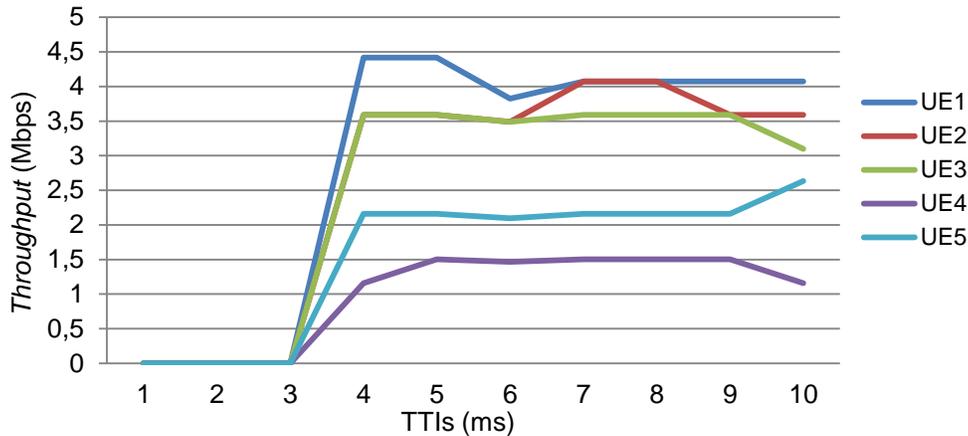


Figura 3.11 Throughput 5 UE-5 MHz.

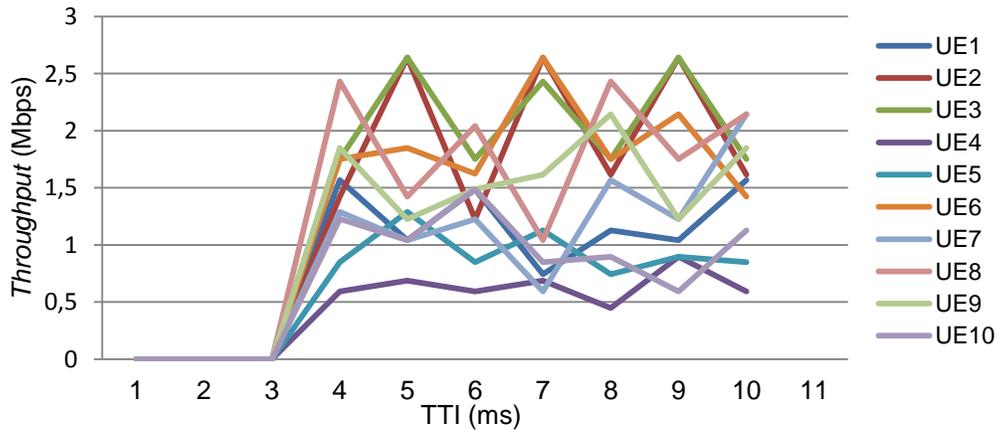


Figura 3.12 Throughput 10 UE-5 MHz.

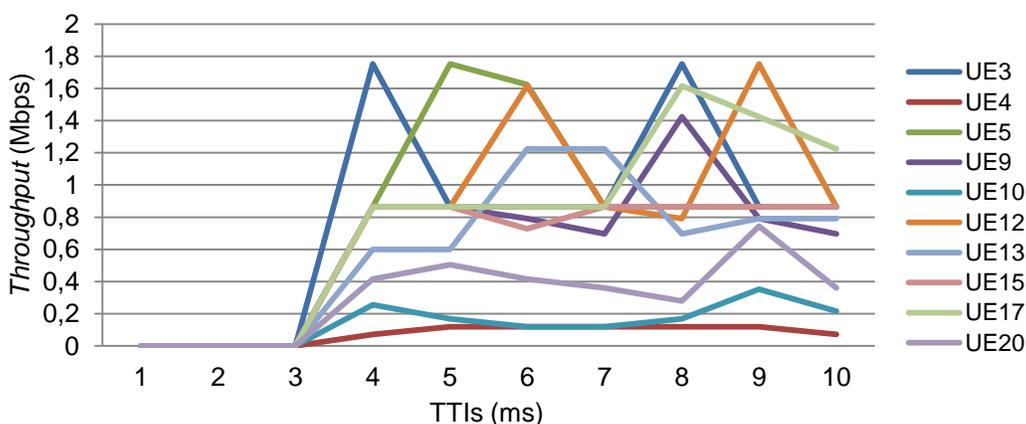


Figura 3.13 Throughput 20UE-5 MHz.

3.3.4.2 Escenario 2 – (AC)

- **Caso 1: 1.4 MHz-6 RB**

Las Tablas 3.13, 3.14 y 3.15, muestran el comportamiento para 5, 10 y 20 usuarios en una red LTE gobernada bajo el AC.

El control de admisión implementado realiza la distribución de los recursos (6 RB), de 2 RB a los usuarios que experimenten un CQI determinado propuesto en el módulo de AC.

Para el caso de 5 usuarios el sistema analiza las condiciones de cada uno, dejando entrar a los usuarios 2, 3 y 5, que experimentan eficiencias y rango de CQI altos, manteniendo siempre la asignación de RB y una determinada calidad de servicio en la red.

Para los casos de 10 y 20 usuarios, el AC sigue manteniendo el mismo comportamiento dejando entrar a los usuarios que experimenten mejores condiciones, manteniéndoles siempre su conexión establecida.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	0	0	No	0-4	0
	2	2	4,70	Si	14-15	1,580
	3	2	3,11	Si	7-14	1,040
	4	0	0	No	0-5	0
	5	2	4,15	Si	10-15	1,390
<i>Throughput sector</i>						4,020

Tabla 3.13 Resultados AC-1.4 MHz y 5 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	0	0	No	0-6	0
	2	2	5,10	Si	11-15	1,710
	3	0	0	No	5-8	0
	4	2	2,88	Si	8-15	0,970
	5	0	0	No	0-6	0
	6	2	3,34	Si	10-15	1,120
	7	0	0	No	0-2	0
	8	0	0	No	1-4	0
	9	0	0	No	5-7	0
	10	0	0	No	0-4	0
<i>Throughput sector</i>						3.800

Tabla 3.14 Resultados AC-1.4 MHz y 10 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	2	2,38	Si	5-10	0,80
	2	0	0	No	1-5	0
	3	2	5,10	Si	15	1,71
	4	0	0	No	1-7	0
	5	0		No	0-5	0
	6	2	3,65	Si	9-13	1,23
	7	0	0	No	5-15	0
	8	0	0	No	2-6	0
	9	0	0	No	8-15	0
	10	0	0	No	0-6	0
	11	0	0	No	1-8	0
	12	0	0	No	1-6	0
	13	0	0	No	3-8	0
	14	0	0	No	0-4	0
	15	0	0	No	4-10	0
	16	0	0	No	0-10	0
	17	0	0	No	5-13	0
	18	0	0	No	0-7	0
	19	0	0	No	0-6	0
	20	0	0	No	1-10	0
<i>Throughput sector</i>						3,74

Tabla 3.15 Resultados AC-1.4 MHz y 20 UEs.

Las Figuras 3.14, 3.15 y 3.16, muestran el comportamiento del *throughput* para 5, 10 y 20 usuarios. En cada caso, el AC analiza las condiciones de los usuarios dejando entrar a los que mejores características estén experimentando; en los 3 casos la red mantiene una determinada QoS, los usuarios experimentan pequeñas fluctuaciones en su *throughput* debido al movimiento.

Igual que para el caso sin AC, a medida que se aumenta el número de usuarios en la red, el *throughput* total del sector disminuye.

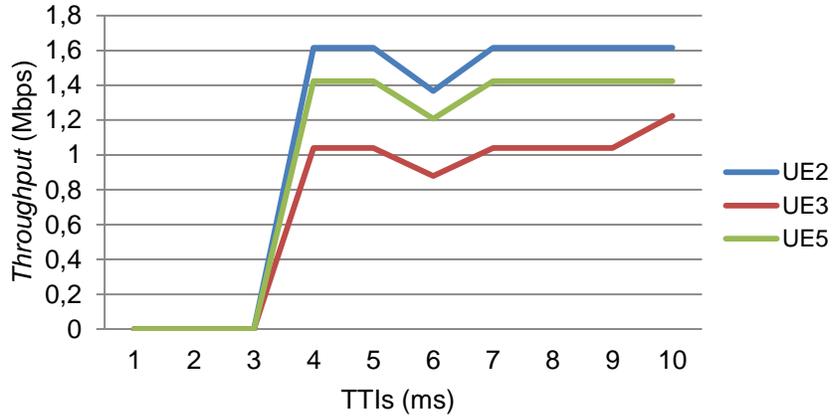


Figura 3.14 Throughput 5 UEs-1.4 MHz.

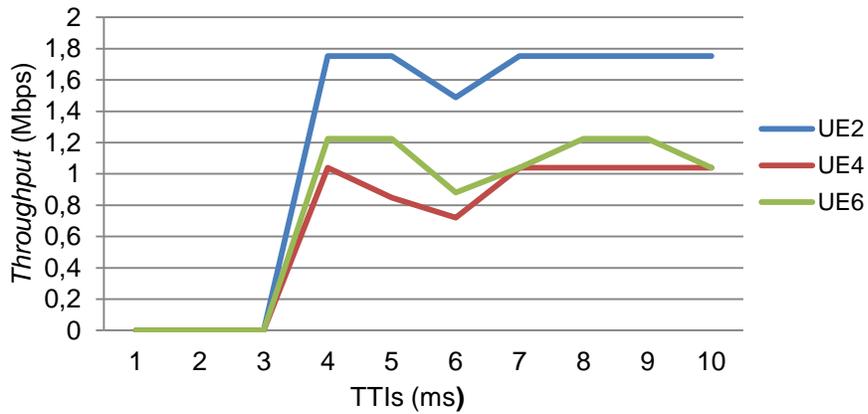


Figura 3.15 Throughput 10 UE-1.4 MHz.

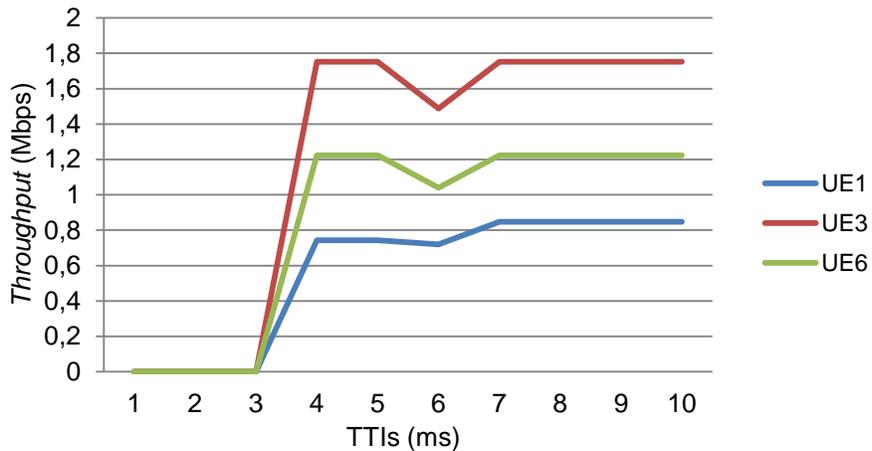


Figura 3.16 Throughput 20 UE-1.4 MHz.

• **Caso 2: 3 MHz-15 RB**

En el ancho de banda de 3 MHz, el número de usuarios que pueden ser aceptados son 8 distribuidos así: 7 usuarios con 2 RB y un usuario con un 1 RB.

En el caso de 5 UE, la red se encuentra descongestionada y el AC hace un reparto justo entre los usuarios, por lo cual a cada uno le asigna 3 RB.

Para el caso de 10 y 20 usuarios, el AC analiza cuáles son los usuarios que experimentan mejores condiciones para ser aceptados, garantizándoles siempre una determinada QoS, como lo indican las Tablas 3.16, 3.17 y 3.18.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	3	5,06	Si	8-15	2,550
	2	3	5,16	Si	9-15	2,600
	3	3	3,60	Si	1-15	1,810
	4	3	3,32	Si	7-13	1,670
	5	3	2,06	Si	0-12	1,040
<i>Throughput sector</i>						9,670

Tabla 3.16 Resultados AC-3 MHz y 5 UEs.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	0	0	No	0-3	0
	2	2	4,24	Si	12-15	1,420
	3	2	3,64	Si	11-15	1,220
	4	2	4,15	Si	5-15	1,390
	5	2	4,54	Si	8-15	1,530
	6	2	4,87	Si	9-15	1,640
	7	2	2,21	Si	7-14	0,740
	8	0	0	No	3-9	0
	9	2	3,64	Si	8-15	1,220
	10	1	2,33	Si	8-13	0,390
<i>Throughput sector</i>						9,550

Tabla 3.17 Resultados AC-3 MHz y 10U Es.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	0	0	No	0-4	0
	2	2	5,21	Si	9-15	1,75
	3	2	4,24	Si	6-15	1,42
	4	2	3,81	Si	2-15	1,26
	5	2	2,47	Si	8-13	0,83
	6	2	4,70	Si	6-15	1,58
	7	2	2,21	Si	4-13	0,74
	8	0	0	No	0-6	0
	9	2	2,52	Si	6-14	0,85
	10	1	4,71	Si	7-14	0,79
	11	0	0	No	0-8	0
	12	0	0	No	0-8	0
	13	0	0	No	0-7	0
	14	0	0	No	0-8	0
	15	0	0	No	3-8	0
	16	0	0	No	3-10	0

	17	0	0	No	0-12	0
	18	0	0	No	0-3	0
	19	0	0	No	0-2	0
	20	0	0	No	1-8	0
<i>Throughput sector</i>						9,25

Tabla 3.18 Resultados AC-3 MHz y 20U Es.

Para el escenario de 5 usuarios se presenta una situación de descongestión, por lo que el AC mantiene e impide fluctuaciones bruscas en el *throughput*. Para 10 y 20 usuarios opera el AC dejando entrar a los usuarios que experimenten mejores condiciones, en este ancho de banda se alcanza un *throughput* mayor que para el caso de 1.4 MHz porque se manejan mayores recursos. Como lo muestra Las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19.

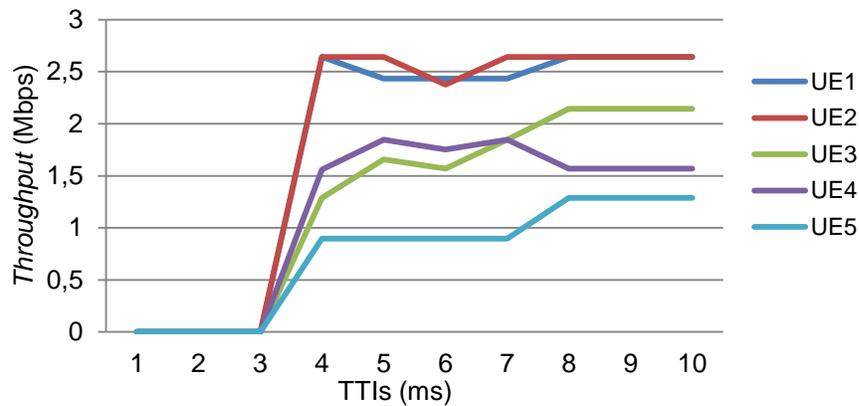


Figura 3.17 *Throughput* 5UE-3 MHz.

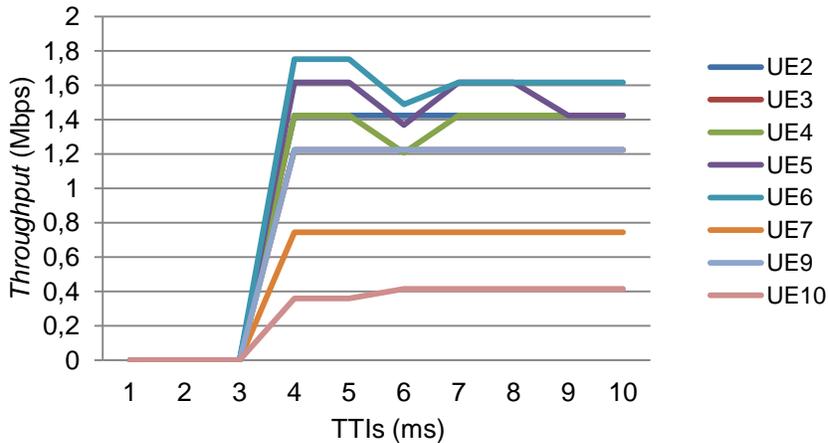


Figura 3.18 *Throughput* 10UE-3 MHz.

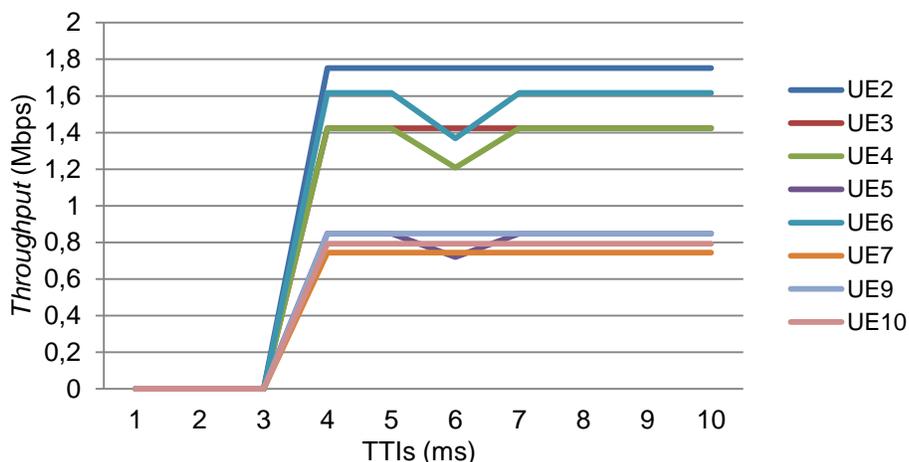


Figura 3.19 Throughput 20UE-3 MHz.

• Caso 3: 5 MHz-5RBS

Las Tablas 3.19, 3.20 y 3.21 muestran el comportamiento, de una red LTE gobernada bajo el AC en el ancho de banda de 5 MHz, el número total que puede aceptar la red con el procedimiento de AC implementado es de 13 usuarios.

Cuando se maneja un reducido volumen de usuarios, el algoritmo de AC implementado realiza un reparto justo de los RB entre los que experimenten buenas condiciones.

Para el caso de 5 UEs se hace un reparto justo de los recursos asignándole a cada usuario 5 RB. Para el caso de 10 usuarios, el AC establecido garantiza siempre que la distribución de RB se haga en números enteros, por lo cual a 8 usuarios se les asignan 3 RB, y un usuario con 1 RB, para un total de 25 RB que son los que maneja el ancho de banda de 5 MHz.

Para 20 usuarios el AC analiza las condiciones de cada UE, dejando acceder a la red a 13 usuarios, número al cual el AC puede garantizar una determinada QoS en la sesión establecida.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	5	5,25	Si	1-15	4,410
	2	5	3,67	Si	7-15	3,080
	3	5	3,60	Si	8-15	3,020
	4	5	1,79	Si	0-13	1,500
	5	5	5,25	Si	11-15	4,410
<i>Throughput sector</i>						16,440

Tabla 3.19 Resultados AC-5 MHz y 5U Es.

	Núm. Usuarios	Prom. RB Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	3	1,77	Si	7-12	0,896
	2	3	3,11	Si	8-14	1,560
	3	3	5,23	Si	9-15	2,640
	4	3	5,12	Si	12-15	2,580
	5	3	3,04	Si	9-15	1,530
	6	3	5,23	Si	12-15	2,640
	7	3	3,11	Si	4-13	1,560
	8	3	4,25	Si	2-15	2,140
	9	1	4,14	Si	7-15	0,696
	10	0	0	No	0	0
<i>Throughput sector</i>						16.260

Tabla 3.20 Resultados AC-5 MHz y 10U Es.

	Núm. Usuarios	Prom. RB Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Admitido	Rango CQI	Throughput prom. [Mb/s]
AC	1	0	0	No	5-13	0
	2	0	0	No	0-8	0
	3	2	5,21	Si	9-15	1,720
	4	0	0	No	0-8	0
	5	2	5,21	Si	10-15	1,720
	6	2	3,25	Si	0-15	1,090
	7	2	2,51	Si	6-15	0,840
	8	2	5,15	Si	12-15	1,730
	9	2	5,10	Si	10-15	1,710
	10	0	0	No	0-5	0
	11	2	4,7	Si	7-15	1,580
	12	2	2,4	Si	5-15	0,800
	13	2	2,4	Si	8-15	0,840
	14	0	0	No	0-6	0
	15	2	5,21	Si	11-15	1,750
	16	2	2,6	Si	5-15	0,870
	17	2	1,76	Si	7-15	0,590
	18	0	0	No	0-8	0
	19	0	0	No	0-6	0
	20	1	2,14	Si	3-11	0,360
<i>Throughput sector</i>						15,600

Tabla 3.21 Resultados AC-5 MHz y 20U Es.

Para el caso de 5 y 10 de usuarios, como el sistema no presenta un volumen significativo de usuarios, el AC mantiene el *throughput* de las conexiones establecidas impidiendo que falle la conexión. Para 20 usuarios la red presenta un elevado número de suscriptores, por lo que el AC actúa y mantiene la sesión para 13 usuarios, los cuales experimentan las mejores condiciones. Como lo indican Las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22.

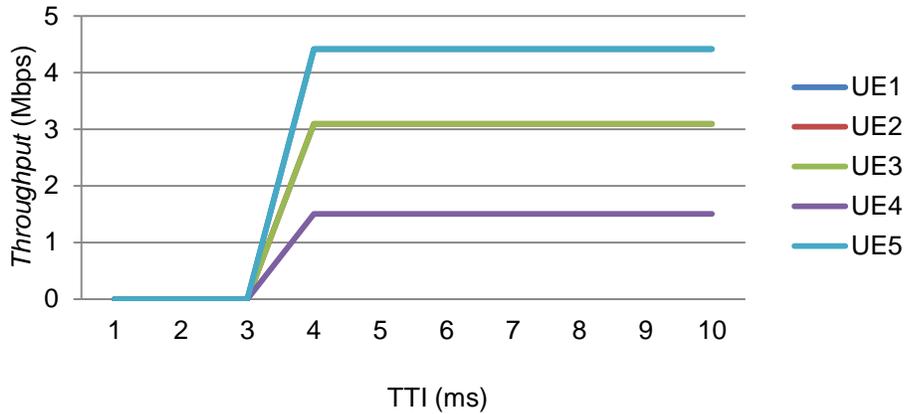


Figura 3.20 Throughput 5UE-5 MHz.

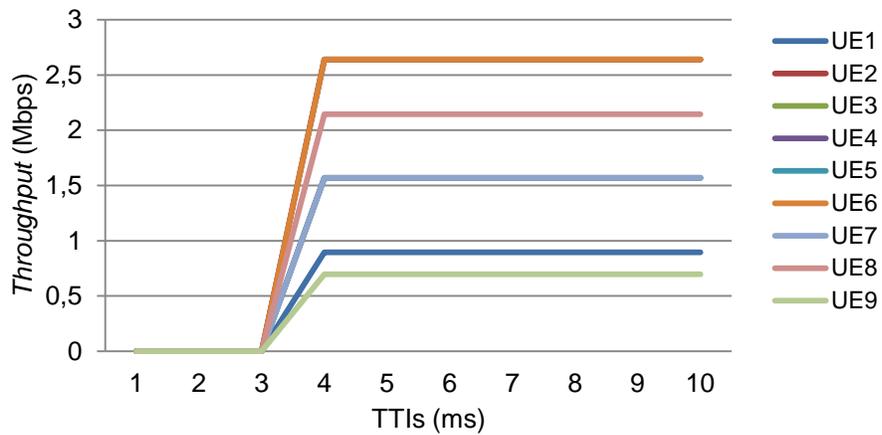


Figura 3.21 Throughput 10UE-5 MHz.

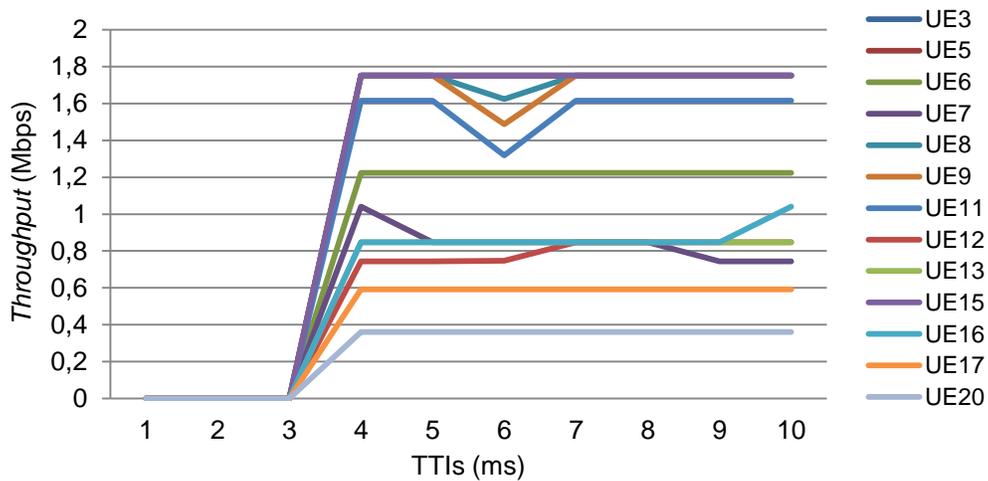


Figura 3.22 Throughput 20UE-5 MHz.

Los escenarios 1 y 2 muestran que para los diferentes anchos de banda analizados y con usuarios en iguales posiciones, el AC refleja un mejor comportamiento en el desempeño de la red.

Con el ánimo de analizar características más ajustadas a la realidad de una red LTE, se procede a analizar el escenario 3 el cual tiene entrada aleatoria de usuarios en cada una de las simulaciones.

3.3.4.3 Escenario 3

• Entrada Aleatoria de Usuarios

Para este nuevo caso de estudio únicamente se analiza el AC con entrada aleatoria de usuarios. Se realizaron un total de 5000 iteraciones para cada caso de estudio, intentando cubrir todas las posiciones del sector en que puede ubicarse un usuario. Para tener una certeza en los resultados, se realizaron simulaciones siguiendo el método Montecarlo [70], por medio del cual se hacen repeticiones de simulación de un escenario cuantas veces sea necesario para tener una aproximación estadística acertada de dicha muestra, para este caso de estudio se analiza el comportamiento de *throughput* promedio para cada escenario de 1.4 MHz, 3 MHz y 5 MHz.

La Tabla 3.22 indica los cálculos probabilísticos de las iteraciones para cada escenario, en donde se presentan los valores de la media y la desviación estándar para cada uno de ellos.

Se toma el *throughput* como parámetro para analizar el desempeño en este tercer escenario, dado que representa la tasa de éxito en la entrega de información sobre un canal de comunicaciones; la desviación estándar indica qué tan alejado o cerca al promedio del valor del *throughput* se encuentran los usuarios en las 5000 iteraciones.

El *throughput* obtenido para todos los casos del escenario 3 es más bajo que el del escenario 2; esto se debe a que en alguna de las simulaciones, el AC aceptó a menos usuarios de los que tiene establecido atender debido a las malas condiciones que estos están experimentando, por lo cual la asignación de RB está en un rango de 70% a 90% de RB asignados.

La información más detallada de las simulaciones y de los resultados obtenidos se muestra en el Anexo C.

THROUGHPUT			
Escenario		Promedio (μ)	Desv. Estándar (σ)
1.4 MHz	5 UEs	3,607481	0,533932
	10 UEs	3,402218	0,72164
	20 UEs	2,845392	0,766692
3 MHz	5 UEs	7,023863	0,999437
	10 UEs	6,246138	1,101324
	20 UEs	3,802484	1,159618
5 MHz	5 UEs	12,35259	1,329992
	10 UEs	9,616284	1,537612
	20 UEs	6,790651	1,902758

Tabla 3.22 Valores de media y desviación estándar del *throughput* para un sector.

Analizando la Tabla 3.22 correspondiente al *throughput* presente en el sector, se observa que para 1.4 MHz (5, 10 y 20 UEs) se obtienen valores bajos de *throughput* promedio, puesto que se maneja una menor cantidad de recursos; mientras en el caso de 3 MHz (5, 10 y 20 UEs) los usuarios mantienen valores medios de *throughput* y finalmente para el caso de 5 MHz (5, 10 y 20 UEs) los usuarios obtienen los valores más altos de *throughput* debido a que manejan mayores recursos que los dos casos anteriores. De la Tabla 3.22 también se observa que los valores promedio de *throughput* son más bajos que los obtenidos en los escenarios 1 y 2. Lo anterior debido a que en varias de las simulaciones la mayoría de los usuarios experimenta malas condiciones, por lo que la red deja entrar a una menor cantidad de usuarios de los que puede atender, es decir que no se hace un uso eficiente de los recursos de la red.

A continuación se muestran una serie de resultados, los cuales apoyan al análisis realizado de los anteriores escenarios y casos de estudio. Con la ayuda de estos resultados se da más soporte al hecho de que el AC mejora el desempeño de una red LTE.

3.3.5 Otros Resultados del Análisis de las Simulaciones

3.3.5.1 Comparación 2 Usuarios con y sin Control de Admisión para 1.4 MHz

La Figura 3.23 muestra el comportamiento para los mismos usuarios en un sistema, por un lado NAC (escenario1 caso1), que está representado por los usuarios de color verde y morado, los cuales presentan fluctuaciones de *throughput* y no garantizan ninguna QoS.

Por otro lado se tienen un sistema gobernado bajo el AC (escenario2 caso1), representados por los usuarios de color rojo y azul que indican el efecto del procedimiento de AC al mantener un determinado nivel de *throughput*.

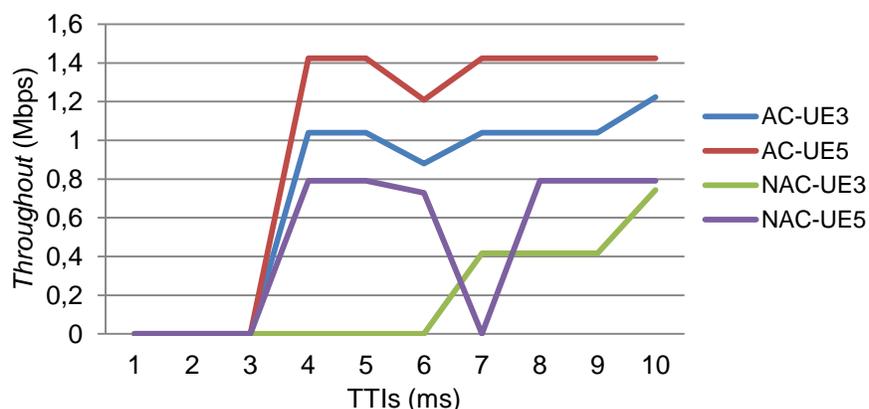


Figura 3.23 Comparación *throughput* AC-1.4 MHz-5 UEs y NAC-1.4 MHz-5 UEs.

En la Figura 3.23 se puede verificar el impacto y el mejor desempeño que causa el AC en una red LTE, al permitir un uso más eficiente de los recursos y garantizar su asignación a los usuarios aceptados por el procedimiento.

3.3.5.2 Simulación y Análisis del Control de Admisión sobre Una y Dos Celdas

Se realizaron simulaciones sobre una celda completa (3 sectores, Figura 3.24, Tabla 3.23) y dos celdas (6 sectores, Figura 3.25, Tabla 3.24), se verificó que el procedimiento de control de admisión sigue operando de igual manera que para un sector, permitiendo la entrada a la red a los usuarios que experimenten mejores condiciones.

Adicionalmente no se tomaron en cuenta factores relevantes como la interferencia inter-celda, puesto que el análisis se centró en mirar el efecto del AC en una y dos celdas completas.

AC 1.4 MHz	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Admitido	Throughput prom. [Mb/s]	Throughput Total sector [Mb/s]
Sector1 Celda 1	1	0	No	0	3,858
	2	2	Si	1,814	
	3	2	Si	1,587	
	4	2	Si	0,457	
	5	0	No	0	
Sector2 Celda 1	1	2	Si	0,829	3,754
	2	0	No	0	
	3	2	Si	1,580	
	4	2	Si	1,345	
	5	0	No	0	
Sector3 Celda1	1	2	Si	1,714	3,803
	2	2	Si	0,855	
	3	0	No	0	
	4	2	Si	1,234	
	5	0	No	0	

Tabla 3.23 Throughput celda completa.

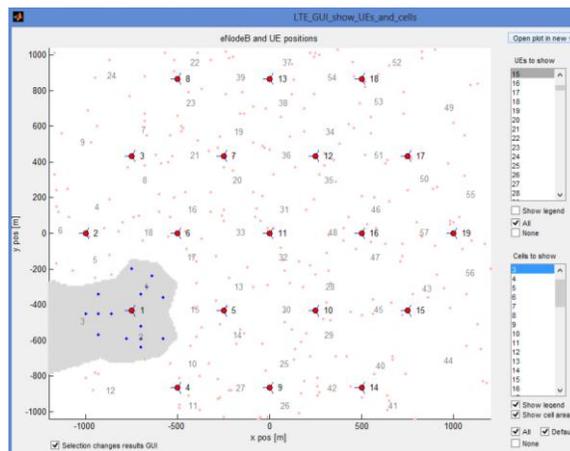


Figura 3.24 Celda completa LTE.

AC 1.4 MHz	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Admitido	Throughput prom. [Mb/s]	Throughput Total sector [Mb/s]
Sector1 Celda 1	1	0	No	0	3,382
	2	2	Si	1,488	
	3	2	Si	1,314	
	4	2	Si	0,58	
	5	0	No	0	
Sector2 Celda 1	1	2	Si	1,714	3,928
	2	0	No	0	
	3	0	No	0	
	4	2	Si	1,017	
	5	2	Si	1,197	
Sector3 Celda 1.	1	0	No	0	3,493
	2	0	No	0	
	3	2	Si	1,704	
	4	2	Si	0,598	
	5	2	Si	1,191	
Sector4 Celda2	1	0	No	0	3,655
	2	2	Si	1,392	
	3	2	Si	1,645	
	4	2	Si	0,618	
	5	0	No	0	
Sector5 Celda2	1	2	Si	1,34	3,325
	2	2	Si	0,873	
	3	0	No	0	
	4	0	No	0	
	5	2	Si	1,112	
Sector6 Celda2	1	0	No	0	3,947
	2	2	Si	1,015	
	3	2	Si	1,718	
	4	2	Si	1,214	
	5	0	No	0	

Tabla 3.24 Throughput dos celdas.

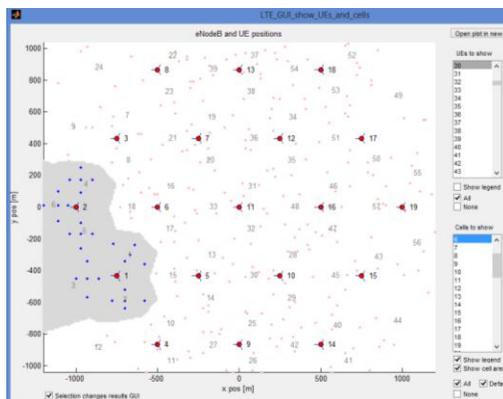


Figura 3.25 Dos celdas LTE.

3.3.5.3 Análisis Probabilístico del Control de Admisión Mediante el *throughput*

Se presenta una serie de resultados complementarios que permiten verificar el impacto que genera el AC en el desempeño de una red LTE, mejorando el rendimiento por sector y por usuarios aceptados por la red en relación al *throughput*. Los resultados se basan en la distribución de *throughput* en función de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) para los usuarios y los dos escenarios estudiados sin AC y con AC.

Los diagramas de dispersión se presentan en la parte inferior de las Figuras 3.26 y 3.27, los cuales representan diferentes valores de *throughput* dependiendo de la SINR que esté experimentando cada usuario. En los casos estudiados (1.4 MHz, 3 MHz y 5 MHz) se evidencia en todas las gráficas (5, 10 y 20 usuarios) que el desempeño por usuario siempre es mayor en un sistema AC en comparación con uno sin AC.

Tomando como ejemplo las Figuras 3.26 y 3.27, para 5 usuarios sin AC el 60% de los mismos presentan valores de probabilidad de ocurrencia del *throughput* de aproximadamente 0.4 Mbps; con esta probabilidad de ocurrencia en un ambiente con AC, se obtienen valores de *throughput* de aproximadamente 1.1 Mbps. En este caso el procedimiento de AC acepta a 3 usuarios rechazando a 2, los cuales debido a su baja SINR se descartan y obtiene como resultado un *throughput medio* igual a cero.

Con lo que se puede concluir que en un ambiente gobernado bajo el AC la probabilidad de ocurrencia de valores altos de *throughput* es mayor que en uno sin AC.

➤ Escenario Sin AC para 1.4 MHz con 5,10 y 20 Usuarios

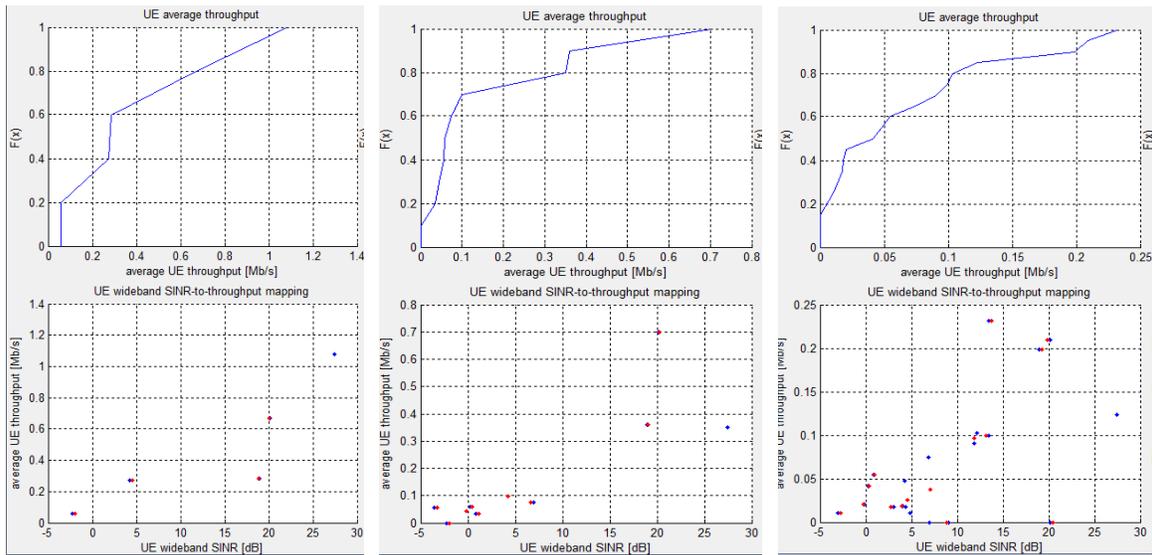


Figura 3.26 ECDF y Diagramas de Dispersión, NAC-1.4 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.

➤ Escenario con AC para 1.4 MHz con 5,10 y 20 Usuarios

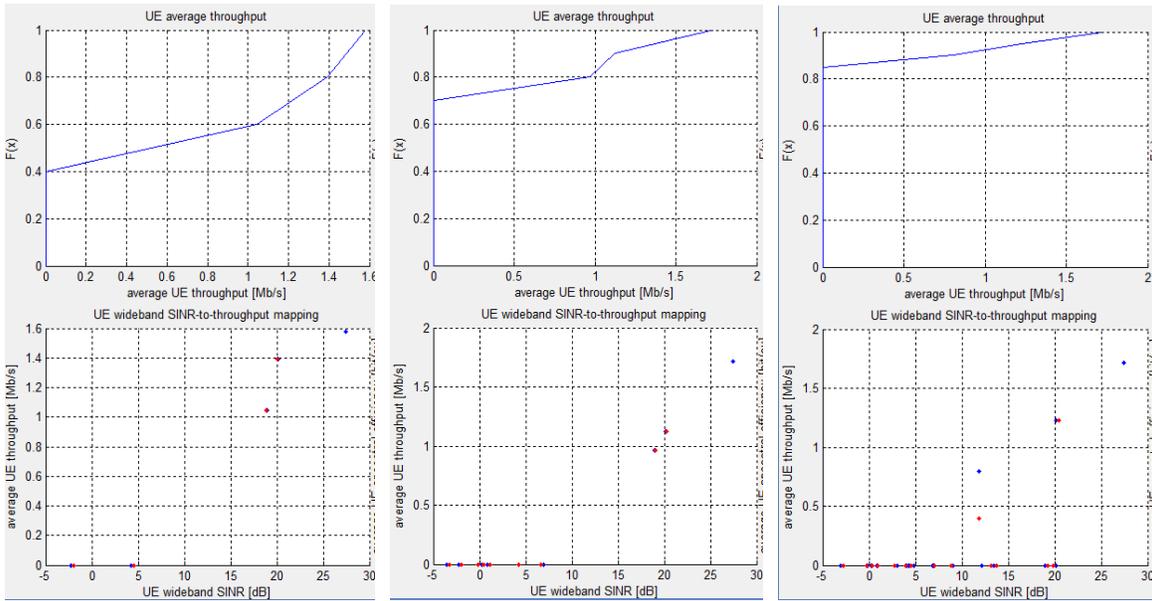


Figura 3.27 ECDF y Diagramas de Dispersión, AC-1.4 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.

Para los demás escenarios se evidencia la misma tendencia analizada anteriormente, donde los usuarios bajo el AC siempre van a experimentar valores mayores de *throughput* que en un sistema no AC, esto debido al uso eficiente de los recursos que el AC implementado realiza. Las simulaciones realizadas para los demás anchos de banda 3 MHz y 5 MHz se muestran en el anexo D.

3.3.5.4 Probabilidad de Bloqueo

La Figura 3.28 muestra la probabilidad de bloqueo calculada mediante la ecuación 3.2 [50], para los diferentes anchos de banda de la red LTE. La probabilidad de Bloqueo ocurre cuando todos los recursos del sistema se encuentran ocupados y no es posible atender nuevos usuarios con las condiciones requeridas.

$$Prob. de Bloqueo = \frac{Número de Conexiones Bloqueadas}{Número de Conexiones Generadas} \quad (3.2)$$

Para el ancho de banda de 1,4 MHz, solo se atienden 3 usuarios, a partir de los cuales no es posible recibir nuevas solicitudes debido a que no se cuenta con los recursos suficientes; para los anchos de banda de 3 MHz y 5MHz, se atienden 8 y 13 usuarios respectivamente.

Las probabilidades de bloqueo, dependen de las políticas definidas por el proveedor de servicios a través del AC que decida implementar.

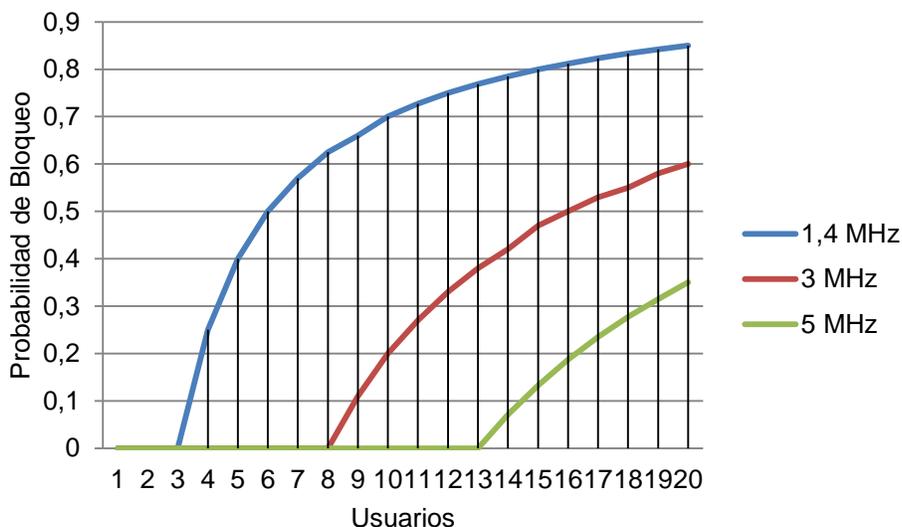


Figura 3.28 Probabilidad de Bloqueo para cada ancho de banda.

La Tabla 3.25 muestra un resumen de los resultados obtenidos sobre el desempeño de una red LTE, que opera con y sin AC.

	Escenario 1 Sin Control de Admisión			Escenario 2 con Control de Admisión			Escenario 3 Control de Admisión y Usuarios con entrada Aleatorios		
	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz
	Throughput (Mbps)								
5 UE	2,364	6,180	14,97	4,02	9,67	16,44	3,607	7,02	12,35
10 UE	1,771	8,39	14,63	3,80	9,55	16,26	3,402	6,24	9,61
20 UE	1,32	5,8	13,76	3,74	9,25	15,6	2,845	3,80	6,79

Tabla 3.25 Resumen del desempeño de una red LTE sin y con control de admisión.

Algunos aspectos a resaltar de los resultados obtenidos son los siguientes:

- Independientemente del ancho de banda que se tenga disponible para una red LTE, el uso del control de admisión siempre brinda un mejor desempeño.
- Se evidencia en las pruebas realizadas sobre una y dos celdas, un comportamiento muy similar al obtenido en el análisis hecho por sector, debido a que el procedimiento de control de admisión implementado en la red, presentan un mejor desempeño que la red sin AC.

- El AC permite un uso eficiente de los recursos de la red, ya que al comparar el escenario 1 y 2 se puede verificar que el que presenta mejor desempeño es el número 2 debido a que cuenta con la implementación del procedimiento de control de admisión.
- En el escenario 1, el cual hace referencia a una red sin control de admisión para todos los casos y usuarios analizados, la red siempre va a atender más usuarios que una red AC, pero siempre en peores condiciones.
- El AC permite la entrada de una menor cantidad de usuarios pero garantizando siempre un *throughput* mayor que un sistema sin AC
- Los resultados indican que una red sin AC, entre mayor número de usuarios se tenga, el *throughput* por usuario va a ser más reducido y la fluctuación del mismo durante el tiempo de la sesión será mucho mayor, por lo cual no se garantiza una apropiada calidad de servicio a las aplicaciones.
- En el escenario 3 con entrada aleatoria de usuarios, se obtiene un *throughput* menor en comparación con el escenario 2, dado que, como se realizaron 5000 iteraciones, en muchos casos la mayoría de los usuarios experimentan malas condiciones y el AC permite la entrada de un número menor de usuarios de los que la red puede atender, por lo cual no se está haciendo uso eficiente de los recursos.
- En los 3 escenarios se verifica que en el ancho de banda de 1.4 MHz, se atiende a una menor cantidad de usuarios debido a los escasos recursos con los que cuenta.

En este capítulo se presentó el análisis de los resultados obtenidos al simular los 3 escenarios y casos que componen el plan de pruebas, con los cuales se realizó el análisis de los principales parámetros y su efecto en el desempeño de una red con AC.

El capítulo 4 presenta las conclusiones obtenidas después del desarrollo del proyecto de grado, recomendaciones y trabajos futuros que se pueden implementar con referencia a esta temática.

4. CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se exponen las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros fruto de la realización de este trabajo de grado. Las conclusiones se basan en los objetivos y en su desarrollo. Las recomendaciones se dan acerca de la metodología de trabajo y los trabajos futuros con respecto a las herramientas de simulación, anchos de banda y número de celdas.

4.1 CONCLUSIONES

4.1.1 Respecto al Desarrollo de la Simulación

- ✓ Las simulaciones realizadas por sector presentan unos resultados tan importantes como los resultados obtenidos a nivel de simulación por celda.
- ✓ La implementación del control de admisión con características dinámicas haciendo uso de la herramienta *System Level Simulator* fue fácil de integrar con la herramienta de simulación Matlab.
- ✓ Al estudiar las características de la herramienta de simulación utilizada se evidencia que permite la implementación de otros procedimientos que hacen parte de la gestión de recursos radio.

4.1.2 Respecto a los Resultados de Simulación

- ✓ Una red que implementa el procedimiento de control de admisión evidencia mejores resultados en relación a una red que no implementa el AC.
- ✓ A medida que aumenta el ancho de banda de la red LTE, la disponibilidad de recursos es mayor, por lo tanto el AC atiende un número mayor de usuarios.
- ✓ Acorde a los resultados de simulación los procedimientos de AC evidencian una mayor asignación de *throughput*, para cada uno de los usuarios admitidos y este *throughput* es mucho más estable que en los caso sin AC.
- ✓ El AC permite la entrada de un número menor de usuarios en comparación con una red sin AC, pero siempre garantiza un *throughput* mayor, dependiendo del ancho de banda en el que se esté trabajando.
- ✓ El escenario sin AC experimenta fluctuaciones severas en el *throughput* para los casos donde la red atiende a la mayor cantidad de usuarios (20 usuarios.), esto debido a que la red intenta atender a todos y no posee los recursos suficientes
- ✓ Con la realización de pruebas para una celda (3 sectores) y 2 celdas (6 sectores), se evidenció que el AC sigue el mismo comportamiento del análisis realizado para un sector, aunque presenta una disminución en su *throughput* debido a la interferencia inter celda.

- ✓ Se verificó que en el ancho de banda de 1.4 MHz se atiende a un número reducido de usuarios debido a los escasos recursos con los que cuenta, por lo cual la tasa de bloqueo presente en este ancho de banda es la más grande en una red LTE gobernada por el AC.
- ✓ La evaluación probabilística mostró que los escenarios gobernados por el AC presentan mejor desempeño, debido a las características de asignación de recursos del procedimiento.
- ✓ Se evidencia a través de los resultados obtenidos mediante la función de densidad de probabilidad y los diagramas de dispersión, una alta coherencia con la forma como se comporta el AC implementado.
- ✓ Los aspectos que inciden al aplicar el control de admisión en una red LTE son: la cantidad de recursos disponibles por ancho de banda, el número de usuarios, la posición de estos dentro de la red LTE y el tipo de servicio.

4.2 RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de este trabajo de grado se presentaron retos adicionales en términos de manejo de información, de líneas de código y otros apartados. Debido a esto se hace necesario nombrar recomendaciones para a futuros trabajos en redes LTE.

- ✓ Al seleccionar una herramienta de simulación para el estudio deseado, se recomienda realizar un estudio previo acerca de sus características, que permita determinar si ésta cumple con la mayoría de los requisitos y los que no, comprobar si se pueden implementar.
- ✓ La utilización de herramientas de uso libre o académico son de gran ventaja, puesto que en algunas se puede modificar el código fuente, para adaptarlos a los requerimientos del trabajo de grado.
- ✓ Al utilizar *System Level Simulator* es recomendable utilizar la versión Matlab 2012a o superiores, porque mejora el desempeño de las simulaciones y los tiempos de ejecución.
- ✓ Para el desarrollo de cualquier proyecto de simulaciones es recomendable conocer a profundidad la teoría, para poder efectuar las simulaciones de forma exacta.
- ✓ Seguir una metodología de simulación ayuda en gran forma a alcanzar los objetivos planteados al inicio del trabajo de grado.
- ✓ Antes de iniciar el proceso de simulación, se recomienda definir los escenarios y casos que se van a analizar, ya que esto permite estructurar adecuadamente las simulaciones para validar los objetivos.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

Por último se proponen varios trabajos futuros que abordan temáticas y variables que pueden desarrollarse a partir del presente trabajo, entre estos están los siguientes:

- ✓ **Análisis del control de admisión y control de potencia en una red LTE:** en este trabajo solamente se tuvo en cuenta el impacto del control de admisión, sería interesante realizar un estudio junto con el control de potencia analizando el desempeño y asignación de recursos.
- ✓ **Simulación del control de admisión con características propias de las implementaciones físicas actuales:** todo el análisis se realizó en un sector extendiéndolo hasta dos celdas, por lo tanto, se propone realizar el análisis de un sistema sin y con control de admisión con las 21 celdas disponibles en el simulador, tomando en cuenta factores importantes como la interferencia inter celda, pérdidas, desvanecimientos entre otras.
- ✓ **Análisis del *Handover* aplicando el procedimiento del control de admisión de una red LTE:** en este trabajo de grado no se consideró el efecto de *handover*, por lo que se propone realizar el análisis de los usuarios en movimiento que se encuentran al borde de la celda.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Flórez y C. Hernández, "Introducción a LTE," Marzo 2013 [Online]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo%201.pdf>, [Consultado: Julio 2013].
- [2] C. Pearson et al., "Mobile Broadband Acceleration in the Americas," Mayo 2013 [Online]. Disponible en: <http://www.4gamericas.org/UserFiles/file/Presentations/2013/May%2014%20Mobile%20Broadband%20Acceleration%20in%20the%20Americas%20Chris%20Pearson.pdf>, [Consultado: Julio 2013].
- [3] C. Pearson, et al., "Latin America Deep Dive," Mayo 2013 [Online]. Disponible en: <http://www.4gamericas.org/UserFiles/file/Presentations/2013/May%2013%20Latin%20America%20Deep%20Dive%20Erasmus%20Rojas.pdf>, [Consultado: Julio 2013].
- [4] R. Agustí, et al., *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Fundación Vodafone España, Departamento de la Teoría de la Señal, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, 2010.
- [5] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, Primera edición, Jhon Wiley and Sons, 2009.
- [6] Shayea, et al., "Advanced handover techniques in LTE-Advanced system," en International Conference on in Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, Malasia, 2012, pp. 74-79.
- [7] N. Muñoz, "Efecto de las Redes de Cuarta Generación (LTE) en los Servicios Móviles de Chile," Tesis de Pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 2011.
- [8] 3GPP TS 36.300, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description," 2009 [Online]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/specs/html-INFO/36300.htm>, [Consultado: Julio 2013].
- [9] V. Flórez y C. Hernández, "Arquitectura y Protocolos LTE," Marzo 2013 [Online]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo%202.pdf>, [Consultado: Agosto 2013].
- [10] B. Youl, "LTE RRC/RRM," Mayo 2012 [Online]. Disponible en: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=rrm%20en%20lte&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDoQFjAC&url=http%3A%2F%2Fedu.tta.or.kr%2Fsub3%2Fdown.php%3FNo%3D107%26file%3D3-2_LTE_RRC.pdf&ei=MMITUvK6DoiG9QTpYHoCg&usq=AFQjCNFNgPygkx2JFQoRBn298B5IdAw4pQ, [Consultado: Agosto 2013].
- [11] 3GPP TR 25.913, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (EUTRAN)," (Release 8), Enero 2009 [Online]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25913.htm>, [Consultado: Julio 2013].
- [12] S. Ferrán, "QoS - Control de Admisión Uplink en Long Term Evolution," Ingeniería Técnica en Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, 2012.
- [13] E. Dahlman y S. Parkvall, *LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Academic Press, 2011.

- [14] S. Bae et al., "Delay-aware Call Admission Control Algorithm in 3GPP LTE System," en *Tencon 2009 IEEE Region 10 Conference*, Korea del Sur, Suwon, Noviembre. 2009.
- [15] W. Min et al., "Efficient QoS over LTE – a Scheduler Centric Approach," en *23rd Internat. Sympo. On PIMRC*, Sidney, Australia, 9-12 Septiembre 2012, pp. 1395-1400.
- [16] 4gamericas, "Q & A: LTE," [Online]. Disponible en: <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page&pageid=1066>, [Consultado: Julio 2013].
- [17] D. Soldani and J. Laiho, "A Virtual Time Simulator for Studying QoS Management Functions in UTRAN," *IEEE, VTC Fall 2003*, pp. 3453 – 3457, vol.5.
- [18] S. Sesia, et al., *LTE - The UMTS Long Term Evolution (From Theory to Practice)*, John Wiley and Sons Ltd, 2009.
- [19] D. Matic, "mathematical description of OFDM," [Online]. Disponible en: <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/ofdmmath.htm>, [Consultado: Enero 2014].
- [20] 3GPP TS 23.002, "Technical Specification 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and Systems Aspects; Network architecture," (2008-09) [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/23002.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [21] D. Marcano, "Acceso Múltiple OFDMA" [Online]. Disponible en: http://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/images/documentos/seccion_telecomunicaciones/Capitulo%203%20Acceso%20Multiple%20OFDMA.pdf, [Consultado: Enero 2014].
- [22] Simplified Architecture, [online]. Disponible en: <http://www.g3ekarmy.com/ltecaracteristicas-y-estado-actual-en-mexico/coren/>, [Consultado: Julio 2013].
- [23] O. Ahmad y A. García, "MIMO-OFDM in LTE and Wimax móvil," [Online]. Disponible: <http://www.tsc.uc3m.es/~omarasj/documentos/MIMO-OFDM.pdf>, [Consultado: Enero 2014].
- [24] 3GPP ETSI TS 136.306, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) radio access capabilities," 2013 [Online]. Disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136306/11.04.00_60/ts_136306v110400p.pdf, [Consultado: Enero 2014].
- [25] 3GPP TS 36.104, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception," Julio 2010 [Online]. Disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/09.04.00_60/ts_136104v090400p.pdf, [Consultado: Enero 2014].
- [26] Agilent, "3GPP Long Term Evolution," Enero 2014 [Online]. Disponible en: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf>, [Consultado: Enero 2014].
- [27] J. Conde y J. Villamuez, "Análisis del Desempeño a Nivel de Sistema de la Tecnología LTE Mediante la Herramienta de Simulación LTE-AMoRE®," Tesis de Pregrado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2012.
- [28] 3GPP TS 24.229, "Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3," Octubre 2012 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/24229.htm, [Consultado: Enero 2014].

- [29] V. Flórez y C. Hernández, “Gestión de Recursos Radio,” Marzo 2013 [Online]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo%204%20x6.pdf>, [Consultado: Agosto 2013].
- [30] 3GPP TS 36.323, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Packet Data Convergence Protocol (PDCP),” Julio 2009 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/36323.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [31] 3GPP TS 36.322, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Radio Link Control (RLC),” Julio 2010 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/36322.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [32] 3GPP TS 36.321, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Medio Access Control (MAC),” Octubre 2009 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/36321.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [33] V. Flórez y C. Hernández, “Nivel Físico LTE,” Marzo 2013 [Online]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo3a.pdf>, [Consultado: Julio 2013].
- [34] 3GPP TS 36.213, “Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Layer Procedures,” Septiembre 2009 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/36213.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [35] 3GPP TS 36.211, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Channels and Modulation,” Junio 2009 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/36211.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [36] V. Flórez y C. Hernández, “Nivel Físico,” Marzo 2013 [Online]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo3b.pdf>, [Consultado: Julio 2013].
- [37] J. Tamayo y R. Gonzales, “LTE y su Impacto en Colombia,” Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Católica de Pereira, Pereira, Colombia, 2012.
- [38] J. Córdoba y J. Zúñiga, “Análisis del Desempeño a Nivel Físico del Enlace de Bajada LTE,” Tesis de Pregrado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.
- [39] V. Flórez y C. Hernández, “Nivel Físico,” Marzo 2013 [Online]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo3c%20x6.pdf>, [Consultado: Agosto 2013].
- [40] 4Americas, “MIMO and Smart antennas for Mobile Broadband System,” Octubre 2012 [Online]. Disponible en: <http://www.4americas.org/documents/MIMO%20and%20Smart%20Antennas%20for%20Mobile%20Broadband%20Systems%20Oct%202012x.pdf>, [Consultado: Julio 2013].
- [41] 3GPP TR 25996, “3GPP System Architecture Evolution (SAE); Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations,” 2012 [Online]. Disponible en: www.3gpp.org/DynaReport/25996.htm, [Consultado: Enero 2014].
- [42] C. Olariu et al., “A QoS based call admission control and resource allocation mechanism for LTE femtocell deployment,” en *Proc. IEEE CCNC2012*, Las Vegas, USA, Enero 2012.

- [43] A. Boukerche, L. Mokdad, y M. Sene, "Call admission control performance analysis in mobile networks using stochastic well-formed petri nets," en *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 22, no. 8, pp. 1332–1341, 2011.
- [44] H. Lei et al., "Adaptive Connection Admission Control Algorithm for LTE Systems," en Proc. Of IEEE Vehicular Technology Conference, Marina Bay, Singapur, pp. 2336, 234011-14 Mayo 2008.
- [45] R. Kwan y R. Arnott, et al., "On Radio Admission Control for LTE Systems," en Proc. Of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Ottawa, Canadá, 6-9 Septiembre 2010.
- [46] M. Anas et al., "QoS-Aware Single Cell Admission Control for UTRAN LTE Uplink," en Proc. Of IEEE Vehicular Technology Conference, Marina Bay, Singapur, pp. 2487-2491, 11-14 Mayo 2008.
- [47] M. Anas et al., "Combined Admission Control and Scheduling for QoS Differentiation in LTE uplink," en *Proceedings of the 68th Semi-Annual IEEE Vehicular Technology (VTC '08)*, Calgary, Canadá, 21-24 Septiembre 2008, pp. 1502-1506.
- [48] Public Safety Communications Research, "Priority, Preemption and QoS," [Online]. Disponible: http://www.pscr.gov/projects/broadband/700mhz_demo_net/meetings/inaug_stakeholder_mtg_042010/day_2/5_Priority_Preemption_and_QoS-final.pdf, [Consultado: julio 2013].
- [49] 3GPP TS 23.203, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture," 2009 [Online], Disponible en: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23203.htm>, [Consultado: Julio 2013].
- [50] M. Buil y M. Hernández, "Control de Admisión y Gestión de Recursos en movilidad en sistemas móviles 4G," Tesis de Maestría, Departamento de ingeniería electrónica y comunicaciones, universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2011.
- [51] B. Bojovic, "A Cognitive Scheme for Radio Admission Control in LTE systems," en *3rd Internat. Workshop on Cognitive Information Processing (CIP)*, Baiona, España, 28-30 Mayo 2012, pp-1-3.
- [52] F. Kuo, et al., "Call admission control based resource allocation scheme for LTE uplink," en *15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Taiwan, pp. 554-558, Sep. 24-27, 2012.
- [53] P. Muñoz, et al., "Estimation of Link-Layer Quality Parameters in a System-Level LTE Simulator," en Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications (IB2Com), Malaga, España, 2010.
- [54] Nsman, "NS-3 Tutorial," Diciembre 2012, [Online]. Disponible en: <http://www.nsnam.org/docs/release/3.16/tutorial/ns-3-tutorial.pdf>, [Consultado: Agosto 2013].
- [55] G. Piro, et al., "An LTE module for the ns-3 network simulator," en *Proc. SIMU Tools*, Marzo 2011.
- [56] N. Hussain, "Dynamic Admission Control & Scheduling for Efficient Channel Utilization in LTE Networks," 2010-2011 [Online]. Disponible en: <http://repository.ksu.edu.sa/jspui/bitstream/123456789/19346/1/lteT.pdf>, [Consultado: septiembre 2013].

- [57] OPNET Technologies, Inc., "Introduction to OPNET Modeler", 2007, [Online]. Disponible en: <http://fcsiba.wikispaces.com/file/view/Intro+Modeler+Lecture+16.0.pdf>, [Consultado: septiembre 2013].
- [58] J. Colom, "System Level Modeling and Optimization of the LTE Downlink", PhD Tesis, Instituto de Telecomunicaciones, Universidad de Vienna, Austria, 2013.
- [59] Qualcomm, "LTE Advanced: Heterogeneous Networks", 2011, [Online]. Disponible en: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-heterogeneous-networks.pdf>, [Consultado: septiembre 2013].
- [60] B. Fernández y L. Alejandra, "Análisis de Interferencia en LTE con Reuso de Frecuencia Fraccional", Tesis de Pregrado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2014.
- [61] O. M. Ülgen et al., "Simulation Methodology -- A Practitioner's Perspective," University of Michigan-Dearborn, MI, 2006.
- [62] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building," en *Simulation Methodology – Discrete Event Simulation*, ed Ontario, Canada, 2003.
- [63] V. Sen, "Energy efficient Scheduling for LTE Uplink," Tesis de Pregrado, Departamento de Comunicaciones Móviles, Universidad de Vienna, Austria, 2013.
- [64] N. Zolkaffi, et al., "LTE performance evaluation of scheduling strategy in various environments," en *2012 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*, Indonesia, Bandung, pp. 327-331, Septiembre 2012.
- [65] Motorola Solutions: *Realistic LTE Performance From Peak Rate to Subscriber Experience*, 2009, White Paper, [Online]. Disponible en: http://www.motorolasolutions.com/web/Business/_Documents/static%20files/Realistic_LTE_Experience_White_Paper_FINAL.pdf, [Consultado: Enero 2014].
- [66] Motorola solutions: *Real-World LTE Performance for Public Safety*, Septiembre 2010, White Paper, [Online]. Disponible en: <http://www.tsag-its.org/docs/real-world-lte-performance.pdf>, [Consultado: Enero 2014].
- [67] 3GPP TR 36.814, "Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects. Tech Rep 36.814 v9.0.0," Marzo 2010, [Online]. Disponible en: <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36814-900.pdf>, [Consultado: Enero 2014].
- [68] P. Ameigeiras, et al., "Traffic models impact on OFDMA scheduling design," en *EURASIP de Wireless Communications and Networking*, pp. 1-13, Febrero 2012.
- [69] R. Srinivasan, "IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group," Julio 2008, [Online]. Disponible en: http://ieee802.org/16/tgm/docs/80216m-08_004r2.pdf, [Consultado: Enero 2014].
- [70] C. Robert y G. Casella, "Introducing Montecarlo with R," 2009, [Online]. Disponible en: <http://www.stat.ufl.edu/archived/casella/ShortCourse/MCMC-UseR.pdf>, [Consultado: Julio 2013].

- [71] R. Gandara, *PROBABILIDAD Y ESTADISTICA*, Instituto Tecnológico de Chihuahua, Noviembre 2007. [Online]. Disponible en: <http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/sabaticorita/amarillo.htm>, [Consultado: Julio 2013].
- [72] A. Roldán, *Distribución Normal*, Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, Mayo 2005. [Online]. Disponible en: http://electronica.ugr.es/~amroldan/assignaturas/sacpc/apuntes/va_normal.pdf, [Consultado: Julio 2013].

ANEXO A

Los planificadores a evaluar son: Round Robin, Best CQI y Resource Fair⁴ [59], [69].

Round Robin, Best CQI y Resource Fair	
Frecuencia	2.14 GHz
Ancho de Banda Total	1.4 MHz (6 RB)
Número de UEs	3, 5 y 10
Ambiente de simulación	Zona Urbana
Arreglo de Antenas	SISO (1x1)
Velocidad de los UEs	1,38 m/s (ITU Peatonal A)
Modelo de Tráfico	Full Buffer ⁵

Tabla A.1 Parámetros de configuración para los tres planificadores. Por los Autores.

- Round Robin

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu ⁶]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC ⁷	1	1	1,1530	0,387
	2	2	4,1460	1,393
	3	2	1,1800	0,499
<i>Throughput sector</i>				2,279

Tabla A.2 Prueba con 3 usuarios.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput Prom. [Mb/s]
NAC	1	1,28	0,68	0,1485
	2	1,14	2,11	0,4057
	3	1	0,41	0,0697
	4	1,14	2,14	0,4125
	5	1,28	2,16	0,5725
<i>Throughput sector</i>				1,6089

Tabla A.3 Prueba con 5 usuarios.

⁴ Resource Fair es nombrado por los desarrolladores del simulador y es equivalente a Proportional Fair.

⁵ Full buffer: Es una combinación de varios tráficos (voz, video, datos) recibido/transmitido por un usuario en una sesión establecida.

⁶ Bit/cu: Bit por Uso de Canal.

⁷ NAC-Non Admission Control.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	0,714	0,342	0,0411
	2	0,571	0,27	0,0263
	3	0,571	1,70	0,1634
	4	0,571	1,66	0,16
	5	0,571	1,86	0,1794
	6	0,571	2,07	0,1988
	7	0,571	0,95	0,0914
	8	0,571	0,60	0,0582
	9	0,428	0,90	0,0651
	10	0,714	2,02	0,2434
<i>Throughput sector</i>				1,2271

Tabla A.4 Prueba con 10 usuarios.

- **Best CQI**

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	4,14	2,99	2,08
	2	1,57	1,82	0,48
	3	0,28	0	0
<i>Throughput sector</i>				2,56

Tabla A.5 Prueba con 3 usuarios.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	0	0	0
	2	2,4	3,42	1,29
	3	0	0	0
	4	2,8	1,7	0,62
	5	0,71	3,4	0,40
<i>Throughput sector</i>				2,21

Tabla A.6 Prueba con 5 usuarios.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
	5	1,43	3,50	0,85
	6	4,2	0,56	0,72
	7	0	0	0
	8	0	0	0
	9	0	0	0
	10	0	0	0
<i>Throughput sector</i>				1,57

Tabla A.7 Prueba con 10 usuarios.

• **Resource Fair**

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	2	4,22	1,42
	2	2	3,2	1,10
	3	2	1,2	0,40
<i>Throughput sector</i>				2,92

Tabla A.8 Prueba con 3 usuarios.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput prom. [Mb/s]
NAC	1	1,143	1,39	0,245
	2	1,142	3,39	0,657
	3	1,57	0,85	0,241
	4	1	4,5	0,774
	5	1.142	3,94	0,769
<i>Throughput sector</i>				2,686

Tabla A.9 Prueba con 5 usuarios.

	Núm. Usuarios	Prom. RBs Asignados	Eficiencia [Bit/cu]	Throughput Prom. [Mb/s]
NAC	1	0,714	1,104	0,1325
	2	0,428	0,428	0,0308
	3	0,428	0,428	0,0308
	4	0,428	2,190	0,1577
	5	0,571	4,535	0,4354
	6	0,857	4,214	0,6068
	7	0,714	2,304	0,2765
	8	0,428	0,333	0,024
	9	0,857	0,761	0,1097
	10	0,571	1,916	0,184
<i>Throughput sector</i>				1,9982

Tabla A.10 Prueba con 10 usuarios.

	Round Robin	Best CQI	Resource Fair
<i>Throughput (Mbps)</i>			
3UE	2,2790	2,5600	2,9200
5UE	1,6089	2,2100	2,6860
10UE	1,2271	1,5700	1,9982

Tabla A.11 Comparacion del rendimiento.

La Tabla A.11 muestra el funcionamiento de los 3 planificadores más utilizados en LTE, se verifica que el de mejor rendimiento en cuanto a medidas de *throughput*, tanto para 3, 5 y 10 usuarios, lo logró el Resource Fair, porque siempre trata de hacer una administración y reparto justo de los recursos.

ANEXO B

Después de escoger el planificador con el mejor desempeño en cuanto a *throughput*, para implementar el AC, se prosigue a determinar cuál sería el tiempo adecuado para realizar las simulaciones; los tiempos de prueba fueron tramas de 10, 20, 30, 50 y 100 TTIs, donde los primeros 3TTIs de cada prueba son removidos debido a la señalización que se maneja en LTE. Adicionalmente los parámetros para realizar dichas pruebas se muestran en la Tabla B.1. Seguidamente la Figura B.1, evidencia que al incrementar el tiempo de simulación (TTI), la asignación de recursos se realiza de 2 RB promedio, lo que sugiere que el AC mantiene constante la asignación de recursos para varios tiempos de simulación, debido a esto se trabaja con un tiempo de simulación de 10TTI para todos los casos.

Ancho de banda	1,4 MHz
Usuarios estáticos	5
TTIs	10, 20, 30, 50, 100
Número de sectores	1
Frecuencia de operación	2.1GHz
Antenas	SISO
Planificador	AC

Tabla B.1 Parámetros de simulación. Por los Autores.

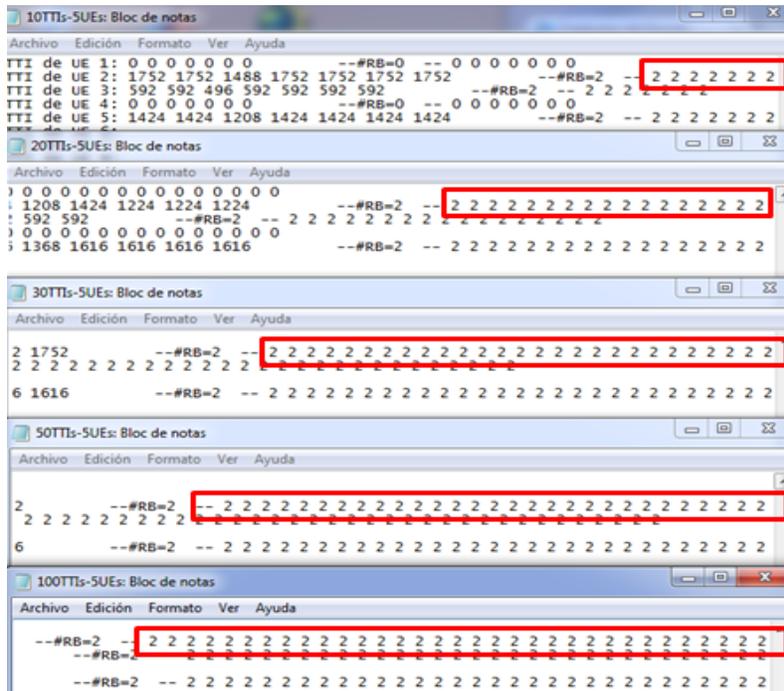


Figura B.1 Pruebas con diferentes TTIs. Basado en [59].

ANEXO C

Las Figuras C.1, C.2 y C.3, se observan las funciones de densidad de probabilidad para el *throughput* para cada caso de estudio. El valor de cada curva permite determinar cuál será la probabilidad relativa que el *Throughput* tome un determinado valor cercano a la media calculada para cada escenario [60], [71]-[72].

De igual manera se observa en la Figura C.1, que los valores de la media y la desviación estándar son los más altos del sistema, debido a la poca fluctuación de *throughput* que presentan los 3 usuarios que admite el procedimiento implementado. De las Figuras C.2 y C.3, se observa un comportamiento similar el cual indica, que a medida que aumentan los recursos, los usuarios experimentan mayor probabilidad de obtener un *throughput* bajo o alto, porque pueden estar al borde del sector o cerca al eNodeB. Por lo cual la curva de la distribución normal de *throughput* disminuye en comparación con 1.4 MHz.

En las figuras C1, C2 y C3, se verifica el decrecimiento de la distribución normal hacia la izquierda, esto debido al incremento gradual en el número de usuarios; los usuarios que son rechazados utilizan recursos de la red para informar sus condiciones al eNodeB.

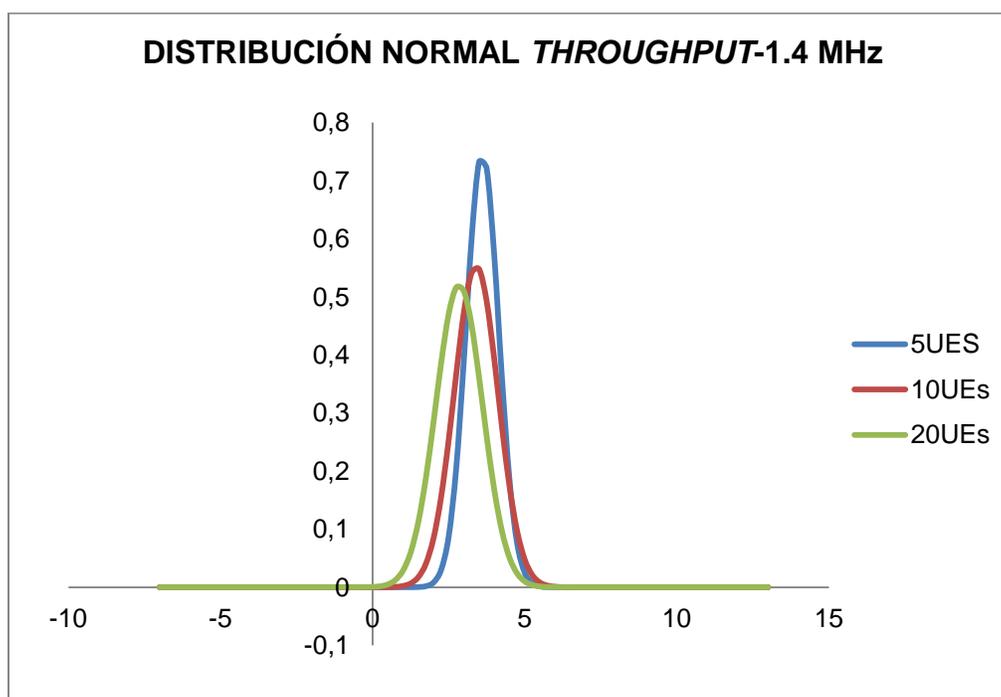


Figura C.1 Distribución normal de *throughput*.

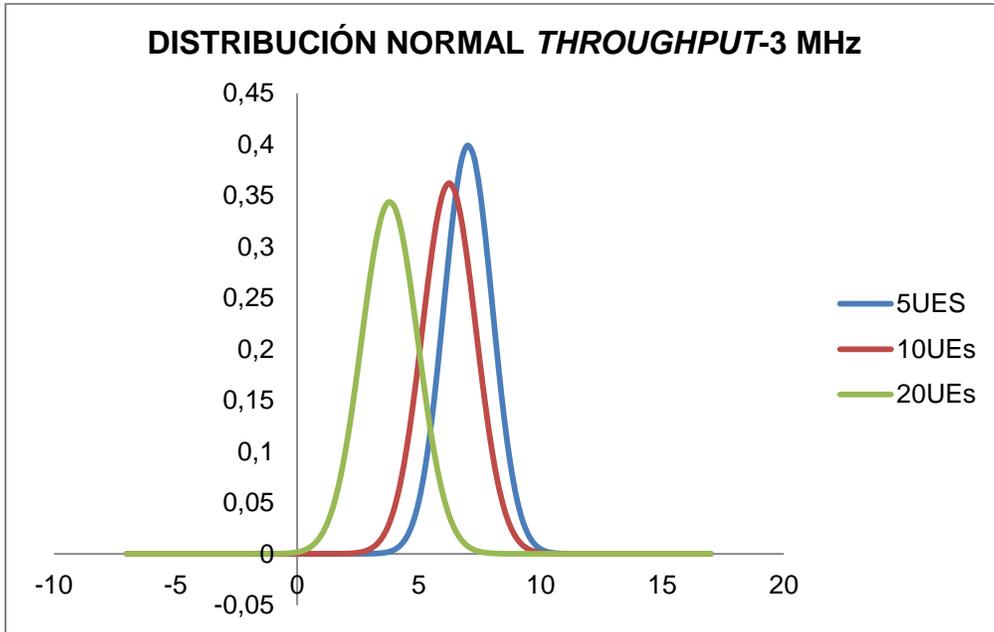


Figura C.2 Distribución normal de *throughput*.

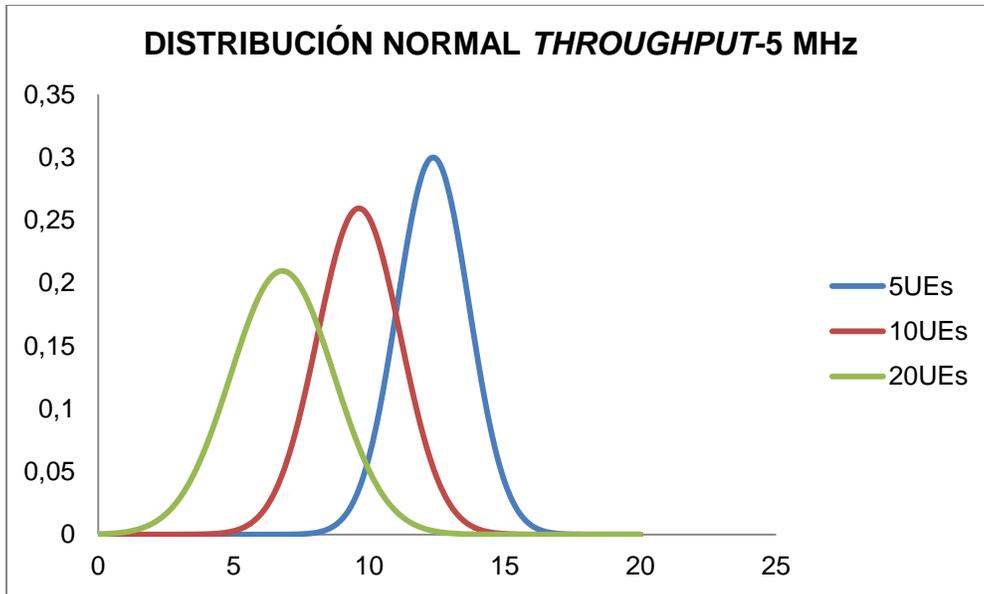


Figura C.3 Distribución normal de *throughput*.

ANEXO D

➤ Escenario sin AC para 3 MHz con 5,10 y 20 Usuarios

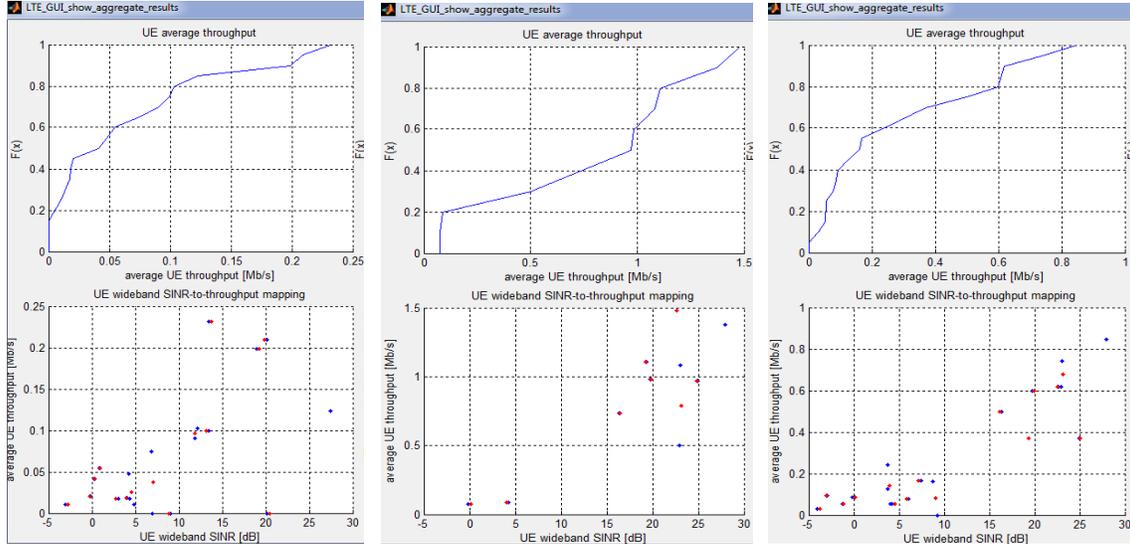


Figura D.1 ECDF y Diagramas de Dispersión, NAC-3 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.

➤ Escenario con AC para 3 MHz con 5,10 y 20 Usuarios

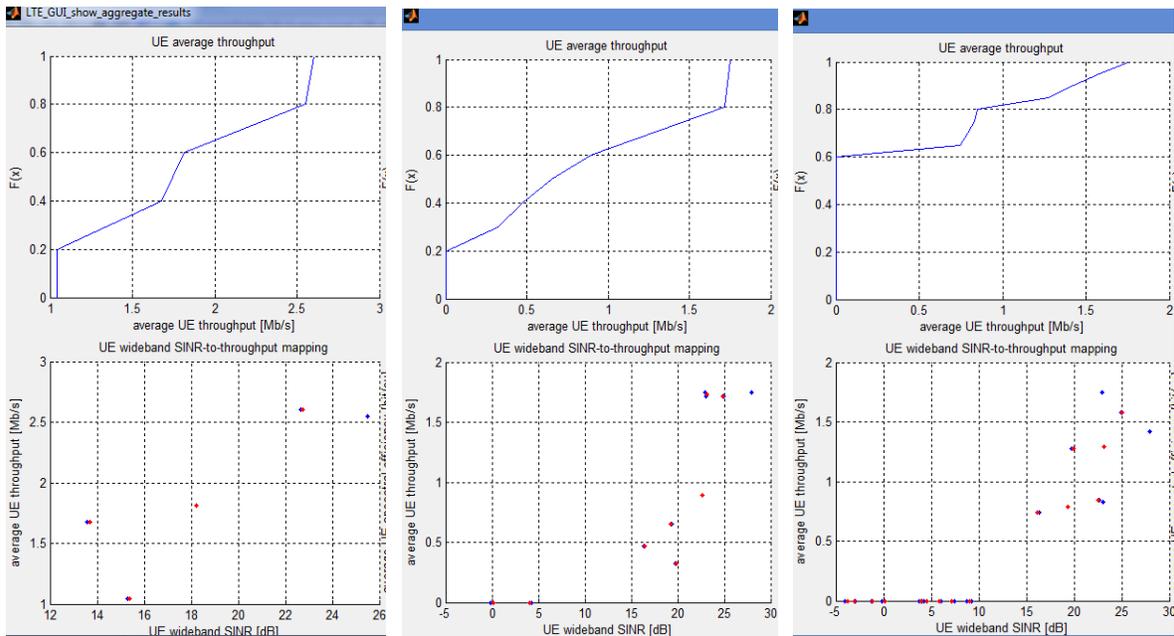


Figura D.2 ECDF y Diagramas de Dispersión, AC-3 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.

➤ Escenario sin AC para 5 MHz con 5,10 y 20 Usuarios

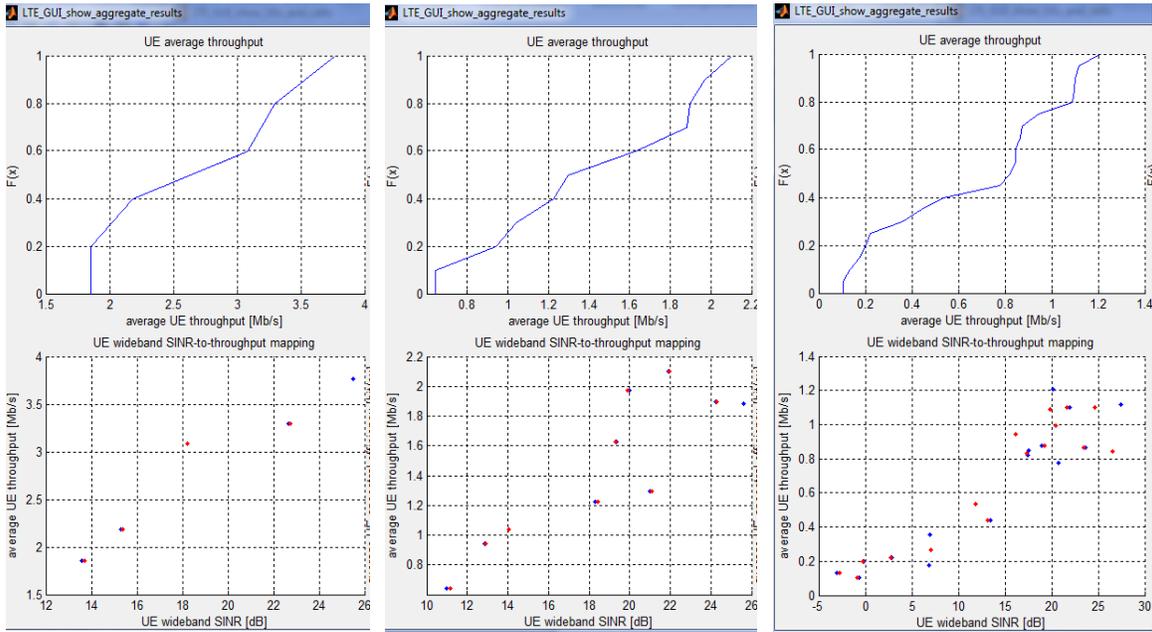


Figura D.3 ECDF y Diagramas de Dispersión, NAC-5 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.

➤ Escenario con AC para 5 MHz con 5,10 y 20 Usuarios

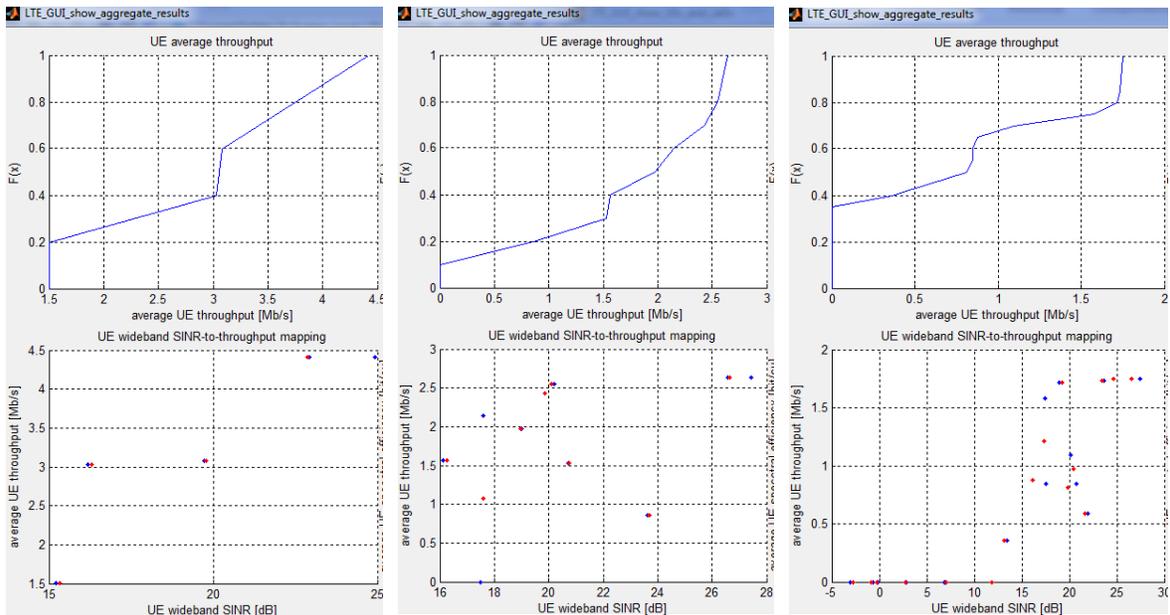


Figura D.4 ECDF y Diagramas de Dispersión, AC-5 MHz para 5, 10 y 20 Usuarios respectivamente.